



**SENKRON GENERATÖRLER İÇİN YÜKSEK DİNAMİK TEPKİLİ
STATİK BİR UYARTIM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Mustafa Baha BAYRAM

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2017

Mustafa Baha BAYRAM tarafından hazırlanan “SENKRON GENERATÖRLER İÇİN YÜKSEK DİNAMİK TEPKİLİ STATİK BİR UYARTIM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. İbrahim SEFA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Ömer Faruk BAY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Hamit ERDEM

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Başkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 03/03/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa Baha BAYRAM

03/03/2017

SENKRON GENERATÖRLER İÇİN YÜKSEK DİNAMİK TEPKİLİ STATİK BİR UYARTIM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Mustafa Baha BAYRAM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2017

ÖZET

Senkron generatörler, hidrolik ve termik santraller ile rüzgâr türbini gibi sistemlerle birlikte enerji üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Generatör güçlerinin birkaç MW gücünden daha büyük olması halinde tepkilerinin daha hızlı olması ve yüksek güçlerde kendinden uyarımlı topolojilerin tasarımındaki zorluklar gibi sebeplerle harici uyarımlı topolojiler yaygın olarak kullanılır. Harici uyarımlı generatörlerin güç değerleri yüzlerce MW, uyarım güçleri ise MW değerlerine kadar ulaşabilir. Yüksek güçlü generatörlerin uyarım devrelerinde gereken uyarım akımı 6 veya 12 darbeli faz kontrollü tristörlü doğrultucular ile sağlanmaktadır. Ancak kontrollü doğrultucuların tepki süresindeki gecikme ve güç elektroniğindeki gelişmeler yeni seçeneklerin oluşmasına yol açmıştır. Bu çalışmada, tristör kontrollü statik uyarım sistemlerine alternatif olarak kullanılabilecek yüksek frekanslı ve modüler olarak gücü artırılabilen, faz kaymalı azaltan dönüştürücü topolojisi içeren bir otomatik gerilim regülatör sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem, dinamik yük ve sistem koşulları için tristör kontrollü sistemlerin yavaş tepki dezavantajını ortadan kaldırmaktadır. Aynı zamanda, tristör kontrollü sistemlerin çıkış gerilimlerindeki düşük frekanslı, yüksek genlikli harmonik bileşenlerden dolayı meydana gelen ekstra şaft gerilimini yok etmekte ve generatörün ömrünü uzatmaktadır. Geliştirme sürecinde, senkron generatörün elektromanyetik modellemesi sonlu elemanlar analizi ile yazılım ortamında yapılmıştır. Modellenen generatör ile önerilen faz kaymalı azaltan dönüştürücüye ait güç elektroniği devresinin eş zamanlı benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları, deneysel olarak kurulan uyarım sistemi ile doğrulanmıştır. Benzetim sonuçlarından ve deneysel sonuçlardan elde edilen veriler, sistemin adım cevabı ve kanal sayısı yardımıyla indüktör akımı dalgacık seviyesi açısından daha iyi performans sunduğunu göstermektedir. Önerilen sistemde tüm ölçüm, izleme, kayıt, yüksek frekanslı faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu üretimi ve tüm kontrol işlemlerinin koşturulduğu gömülü işletim sistemli bir NI CompactDAQ platformu kullanılmıştır. Bu platform üzerinde çalışan ve süreci yöneten sanal enstrüman ise LabVIEW yazılım ortamında tasarlanmıştır.

Bilim Kodu : 90514

Anahtar Kelimeler : Otomatik gerilim regülatörü, senkron generatör, uyarım, faz kaymalı azaltan dönüştürücü, Labview, CompactDAQ,

Sayfa Adedi : 154

Danışman : Doç. Dr. İbrahim SEFA

IMPLEMENTATION OF A HIGH DYNAMIC RESPONSE STATIC EXCITATION SYSTEM FOR SYNCHRONOUS GENERATORS

(Ph. D. Thesis)

Mustafa Baha BAYRAM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2017

ABSTRACT

Synchronous generators are commonly used in energy generation together with the systems such as hydraulic and thermal power plants and wind turbines. If the generator power levels are larger than a few MW, external excited topologies are commonly used, because of the faster response of them and the difficulties in designing self-exciting topologies at higher rated power. The power values of external excited generators can reach hundreds of MW, and the excitation power can reach up to a few MW values. The excitation current required for excitation circuits of high power generators is provided by 6 or 12 pulse phase controlled thyristor rectifiers. However, the delay in the response of the controlled rectifiers and the improvements in the power electronics have led to the creation of new options. In this study, an automatic voltage regulator system with an interleaved buck converter topology, which has high frequency and which can be increased in power with its modularly, has been proposed as an alternative to thyristor controlled static excitation systems. The proposed system removes the slow response disadvantage of thyristor-controlled systems for dynamic load and system conditions. At the same time, it eliminates the extra shaft tension due to low frequency, high amplitude harmonic components at the output voltages of thyristor-controlled systems and extends the life of the generator. In the development process, the electromagnetic modeling of the synchronous generator is performed in the software environment by means of finite element analysis. Co-simulations of the power-electronic circuit of the modeled generator and the proposed interleaved buck converter have been performed. The simulation results are verified by an experimentally established excitation system. The results obtained from the simulation results and the experimental results show that the system provides better performance in terms of the system step response and in terms of the inductor current ripple level with the help of channel number. With in the proposed system, all the measurement, monitoring, recording, high frequency phase shift pulse width modulation generation and all control processes have been deployed in NI CompactDAQ platform with an embedded control system. The virtual instrument that runs on this platform and manages the process is designed in the LabVIEW software environment.

Science Code : 90514

Key Words : Automatic voltage regulator, synchronous generators, excitation, interleaved buck converter, Labview, CompactDAQ,

Page Number : 154

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. İbrahim SEFA

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince son derece etkili rehberliği ve motive edici katkılarıyla sabırlı bir şekilde beni sürekli olarak yönlendiren, akademik olarak çalışkanlığı ile kendisini örnek aldığım danışmanım Doç. Dr. İbrahim SEFA hocam başta olmak üzere olumlu yöndeki eleştirileri ve deneyimleri ile tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Ömer Faruk BAY ve Doç. Dr. Hamit ERDEM, araştırma ve uygulamalarda yardımlarından dolayı Doç. Dr. Necmi ALTIN ve Öğr. Grv. Dr. Şaban ÖZDEMİR'e, çalışmalarım için gerekli malzemelerinin temini sürecinde desteklerinden dolayı National Instruments firması temsilcisi Ruffi ÖZTÜRK'e, manevi destekleriyle arkadaşlarım Dr. Selami BALCI'ya, Funda BATTAL'a ve Abdullah ÖZSAN'a, beni her yönden destekleyen ve özveride bulunan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. SENKRON GENERATÖRLER	7
2.1. Senkron Generatörlerin Yapıları	7
2.2. Döner Alan Hızı	9
2.3. Senkron Generatörlerde Üretilen Gerilim	9
2.3.1. Harmonik	11
2.3.2. Gerilimin dalga formu	12
2.4. Senkron Generatörün Çeşitli Yük Durumları, Gerilim Düşümleri ve Nedenleri.	14
2.5. Generatörde Frekans-Aktif Güç ve Gerilim-Reaktif Güç İlişkileri	16
3. SENKRON GENERATÖRLERDE GÜÇ DENETİMİ	19
3.1. Generatörde Kontrol Döngüleri	20
3.1.1. Yük frekansı kontrolü	22
3.1.2. Otomatik kazanç kontrolü	27
3.1.3. Uyarım kontrol sistemi	28

	Sayfa
3.1.4. Basit AVR modeli	32
3.1.5. Oran geri beslemeli uyarım dengeleme modeli	35
3.1.6. PID kontrollü uyarım dengeleme modeli	36
3.1.7. AGC ve AVR sistemlerinin birleşimi	40
3.2. Güç Sistemi Sabitleyici	42
3.3. Sınırlandırma ve Koruma İşlevleri	43
3.3.1. Kapasite eğrisi	44
3.3.2. Aşırı uyarım sınırlandırıcı	45
3.3.3. Düşük uyarım sınırlandırıcı	47
3.3.4. Stator akımı sınırlandırıcı	50
3.3.5. Gerilim/Frekans sınırlandırıcı	53
3.4. Uyarım Sistemi Türleri	54
3.4.1. Fırçalı ve fırçasız generatörlerin avantajları ve dezavantajları	55
3.5. Uyarım Sistemi Modellerinin Sınıflandırılması	56
3.5.1. DA uyarım sistemleri	57
3.5.2. AA uyarım sistemleri	59
3.5.3. Statik uyarım sistemleri	63
4. MATERYALLER VE METOTLAR	71
4.1. Veri Toplama Sistemi ve Unsurları	71
4.1.1. Sensör	72
4.1.2. DAQ donanımı	72
4.1.3. Bilgisayar donanımı	73
4.2. NI CompactDAQ	75
4.2.1. NI CompactDAQ avantajları	77

	Sayfa
4.2.2. NI DAQmx VI kategorileri ve fonksiyonları	80
4.2.3. NI MAX	84
4.2.4. NI DAQ asistanı	85
4.2.5. Yapılandırılan NI CompactDAQ platformu	86
4.3. NI LabVIEW.....	87
4.4. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanma Yöntemleri	88
4.4.1. Gerilim ve akım değeri hesaplama	91
4.4.2. Frekans değeri hesaplama	92
4.4.3. Birikimli değeri hesaplama	93
4.4.4. IEC uyumlu elektriksel parametrelerin hesaplanma formülleri	94
4.5. Kullanılan NI LabVIEW Denetleyici Araçları	98
4.6. Faz Kaymalı PWM Üretiminin Gerçekleştirilmesi	100
4.7. Veri Kaydının Gerçekleştirilmesi	100
4.8. Azaltan Dönüştürücü ile Uyarım	102
4.8.1. Klasik azaltan dönüştürücü	103
4.8.2. Faz kaymalı azaltan dönüştürücü	106
4.9. Önerilen Senkron Generatör Güç Denetim Sistemi	108
4.9.1. Gerilim ve frekans denetleme işlevleri	110
4.9.2. Sınırlandırma ve koruma işlevleri	112
5. BENZETİMSEL VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	119
5.1. Benzetimsel Çalışmalar	119
5.1.1. Senkron generatörün azaltan dönüştürücü ile statik uyarım benzetimi ..	120
5.1.2. Senkron generatörün tristörlü doğrultucu ile statik uyarım benzetimi ...	126
5.1.3. Senkron generatör terminal gerilimin yük değişimine cevabı	127

	Sayfa
5.2. Deneysel Çalışmalar	129
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	133
KAYNAKLAR	137
EKLER	145
EK-1. Ölçülen büyüklüklerin listesi	146
EK-2. IEC 61000-4-30 standardı	148
EK-3. Senkron generatör güç denetim sistemin ayrıntılı bağlantıları	149
ÖZGEÇMİŞ	152
DİZİN	154

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Harmonik bileşenler çizelgesi.....	12
Çizelge 3.1. AVR transfer fonksiyonları.....	33
Çizelge 3.2. Üreticiler tarafında kullanılmış model örnekleri.....	42
Çizelge 3.3. Aşırı uyartım için verilen süre ve seviye çizelgesi.....	46
Çizelge 3.4. Generatör için Volt/Hz sınırlamaları.....	54
Çizelge 3.5. Step-up transformatörü Volt/Hz sınırlamaları.....	54
Çizelge 3.6. IEEE DA uyartım modellerini kullanan üreticiler ve ürünleri.....	58
Çizelge 3.7. IEEE AA uyartım modellerini kullanan üreticiler ve ürünleri.....	62
Çizelge 3.8. IEEE ST uyartım modellerini kullanan üreticiler ve ürünleri.....	65
Çizelge 4.1. NI DAQmx VI kategorileri ve fonksiyonları.....	81
Çizelge 4.2. Azaltan dönüştürücü komponentleri.....	110
Çizelge 4.3. Uyartım kontrol döngüsü PI denetleyici parametreleri.....	111
Çizelge 4.4. Frekans kontrol döngüsü PID denetleyici parametreleri.....	111
Çizelge 5.1. Senkron generatörün etiket değerleri.....	120
Çizelge 5.2. Benzetim sonuçlarına göre elektriksel parametreler.....	123
Çizelge 5.3. Yüzde ikilik kabul dilime girmesine göre terminal gerilimi cevabı.....	128
Çizelge 5.4. Önerilen uyartım sistemli AVR için benzetim ve uygulama sonuçları.....	132

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Silindirik (a) ve çıkık (b) kutuplu rotor yapısı (Çolak, 2010: 18).....	8
Şekil 2.2. Temel dalga ve ikinci harmoniğinin temel dalgaya etkisi (a) zaman ekseninde, (b) frekans ekseninde (Çolak, 2010: 27).....	14
Şekil 2.3. Senkron generatörün çeşitli yük durumları için terminal gerilimi değişimi...	15
Şekil 2.4. Generatör (a) hız-aktif güç ve (b) frekans-aktif güç eğrisi (Çolak, 2010).....	17
Şekil 2.5. Generatör terminal gerilimi-reaktif güç eğrisi (Çolak, 2010).....	17
Şekil 3.1. Buhar güçlü bir LFC ve AVR şematik diyagramı (Saadat, 1999).....	21
Şekil 3.2. Senkron makine governor ve AVR blok diyagramı (Law, 2001).....	21
Şekil 3.3. Generatör ve yük blok diyagramı.....	23
Şekil 3.4. Sadeleştirilmiş generatör ve yük blok diyagramı.....	23
Şekil 3.5. Ana tahrik sistem modeli blok diyagramı.....	24
Şekil 3.6. Governor kararlı-durum hız karakteristiği (Saadat, 1999).....	25
Şekil 3.7. Buhar türbini için hız governor sisteminin blok diyagram gösterimi.....	26
Şekil 3.8. İzole edilmiş güç sisteminin LFC blok diyagramı.....	27
Şekil 3.9. İzole edilmiş güç sistemi için AGC blok diyagramı.....	28
Şekil 3.10. İzole edilmiş güç sistemi için eşdeğer AGC blok diyagramı.....	28
Şekil 3.11. Uyarım kontrol sisteminin basit şeması.....	29
Şekil 3.12. Uyarım kontrol sistemi unsurları.....	29
Şekil 3.13. Uyarım sistem kontrolü ve koruyucu devreleri.....	31
Şekil 3.14. Kontrolsüz, basit AVR blok şeması.....	33
Şekil 3.15. Senkron generatörün uyarım akımına bağlı çalışma karakteristik eğrisi....	34
Şekil 3.16. Kompanze edilmiş AVR blok diyagramı.....	36
Şekil 3.17. PID denetleyici sistemin kapalı döngü blok şeması.....	37

Şekil	Sayfa
Şekil 3.18. PID kontrollü AVR blok diyagramı.....	38
Şekil 3.19. Denetleyicisiz AVR adım cevabı.....	39
Şekil 3.20. PID denetleyicili AVR adım cevabı.....	39
Şekil 3.21. AGC ve AVR sistemlerinin birleşik blok diyagramı.....	41
Şekil 3.22. Senkron generatör P-Q diyagram ve çalışma sınırları.....	44
Şekil 3.23. Maksimum uyarım akım sınır karakteristikleri.....	46
Şekil 3.24. Alan akımı kısa devre kapasitesi (IEEE Std 421.5™-2016, 2016).....	46
Şekil 3.25. UEL ve LOE röleleri ve stabilizasyon sınırı arasındaki koordinasyon.....	48
Şekil 3.26. UEL1 modeli için dairesel sınırlama karakteristiği.....	49
Şekil 3.27. UEL2 modeli için tek segmentli düz çizgi karakteristiği.....	49
Şekil 3.28. UEL2 modeli için çok segmentli düz çizgi karakteristiği.....	50
Şekil 3.29. Senkron makine kapasite eğrisi üzerindeki stator akımı sınırı.....	51
Şekil 3.30. Stator akımı sınırlandırıcı referansı.....	52
Şekil 3.31. Gerilim/Frekans sınırlandırıcı karakteristiği.....	54
Şekil 3.32. DA uyarım sistemi.....	57
Şekil 3.33. Alan kontrollü generatör doğrultucu uyarım sistemi.....	60
Şekil 3.34. Generatör tedarikli kontrollü doğrultucu uyarım sistemi.....	60
Şekil 3.35. Fırçasız uyarım sistemi.....	61
Şekil 3.36. Statik uyarım sistemi.....	63
Şekil 3.37. ST1C potansiyel kaynak – kontrollü doğrultucu uyarım sistemi.....	67
Şekil 3.38. ST3C generatör yardımcı güç kaynağı ile potansiyel kaynak–kontrollü doğrultucu uyarım sistemi.....	67
Şekil 3.39. ST2C Bileşik kaynak – kontrolsüz doğrultucu uyarım sistemi ve doyumlu potansiyel transformatör.....	68
Şekil 3.40. ST2C Bileşik kaynak – kontrolsüz doğrultucu uyarım sistemi.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 3.41. Bileşik kaynak – kontrolsüz doğrultucu uyarım sistemleri.....	69
Şekil 4.1. DAQ sistemi.....	72
Şekil 4.2. NI-DAQmx sürücü yazılımının geliştirme ortamları ve iletişim yolu olanakları.....	74
Şekil 4.3. Genel NI CompactDAQ platform blok şeması.....	75
Şekil 4.4. Genel NI CompactDAQ platformları.....	75
Şekil 4.5. Bağımsız NI CompactDAQ denetleyici platformu (a) blok şeması (b) donanımı.....	76
Şekil 4.6. LabVIEW ortamında bir DAQ cihazının sanal enstrümanlar ile programlaması.....	81
Şekil 4.7. NI MAX kullanıcı arayüzü.....	85
Şekil 4.8. Yapılandırılan NI CompactDAQ platformu.....	86
Şekil 4.9. NI Signal Processing paketindeki dalga formu ölçüm sanal enstrümanları...	89
Şekil 4.10. Sinyal işleme sanal enstrümanları ile RMS hesaplama.....	89
Şekil 4.11. NI Electrical Power araçları ve güç ölçüm sanal enstrümanları.....	90
Şekil 4.12. NI Electrical Power sanal enstrümanı ile RMS değer ölçme.....	90
Şekil 4.13. PLL prensibi (ELCOM, 2009)	91
Şekil 4.14. Yarım ve tam saykıl gerilim RMS hesaplanması.....	91
Şekil 4.15. 10/12 saykıl gerilim RMS ve akım RMS değerlerinin hesaplanması.....	92
Şekil 4.16. LabVIEW elamanları kullanılarak hazırlanan frekans ölçüm örneği.....	93
Şekil 4.17. EN 50160 Agregasyon VI blok diyagram görünümü.....	93
Şekil 4.18. Birikimli değer hesaplama sonuçlarını için düzenlenen arayüz.....	94
Şekil 4.19. Güç üçgeni.....	96
Şekil 4.20. LabVIEW Kontrol ve benzetim fonksiyonları diyalog penceresi.....	98
Şekil 4.21. LabVIEW PID fonksiyonları diyalog penceresi.....	99
Şekil 4.22. Gelişmiş PID VI blok diyagramı.....	99

Şekil	Sayfa
Şekil 4.23. LabVIEW ve cDAQ ile iki kanal faz kaymalı PWM üretimi blok diyagramı.....	100
Şekil 4.24. Gerilim ve akım dalga formlarının kaydını gerçekleştiren blok diyagram...	101
Şekil 4.25. Kayıt edilmiş 3 faz gerilim dalga formunun NI DIADEM ile analizi.....	102
Şekil 4.26. Klasik azaltan dönüştürücü.....	104
Şekil 4.27. İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü.....	106
Şekil 4.28. CompactDAQ ile senkron generatör güç denetimi düzeneği blok şeması...	109
Şekil 4.29. Kontrol işlevleri arayüzü.....	112
Şekil 4.30. Aşırı uyartım sınırlandırma (OEL) ve koruma işlevleri ön paneli.....	113
Şekil 4.31. Düşük uyartım sınırlandırma (UEL) ve koruma işlevleri ön paneli.....	114
Şekil 4.32. Stator akımı sınırlandırma (SCL) ve koruma işlevleri ön paneli.....	115
Şekil 4.33. Volt/Hertz oranı sınırlandırma (V/Hz) ve koruma işlevleri ön paneli.....	116
Şekil 4.34. Terminal gerilimi-frekansı sınırlandırma ve koruma işlevleri ön paneli.....	117
Şekil 4.35. Sistem başlatma izleme ve koruma işlevleri ön paneli.....	118
Şekil 5.1. Senkron generatörün Maxwell modeli (a) Rmxprt görseli, (b) Maxwell 2D görseli.....	119
Şekil 5.2. Klasik azaltan dönüştürücülü statik uyartım benzetim modeli.....	120
Şekil 5.3. İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücülü statik uyartım benzetim modeli..	121
Şekil 5.4. Boşta ve tam yük koşullarında uyartım gerilimi dalga formları (a) klasik azaltan dönüştürücüyle (10 kHz'de), (b) klasik azaltan dönüştürücüyle (20 kHz'de), (c) iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücüyle (2x10 kHz)....	122
Şekil 5.5. Boşta ve tam yük koşullarında dönüştürücü indüktör akımı dalga formları (a) klasik azaltan dönüştürücüyle (10 kHz'de), (b) klasik azaltan dönüştürücüyle (20 kHz'de), (c) iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücüyle (2x10 kHz).....	124
Şekil 5.6. İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücünün indüktör akımı dalga formları.....	125
Şekil 5.7. Kontrollü doğrultucu devresi.....	126

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. Kontrollü doğrultucu tabanlı uyartım sistemine ait benzetim devresi.....	127
Şekil 5.9. Kademeli yük değişimi için terminal gerilimi tepkisi benzetim sonuçları....	128
Şekil 5.10. Klasik azaltan dönüştürücü için indüktör akımı dalga formu.....	130
Şekil 5.11. İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü için indüktör akımı dalga formu.....	131
Şekil 5.12. Generatörün yüklenme durumu ile terminal gerilimi dalga biçimleri.....	131
Şekil 5.13. Yük değişimi için terminal gerilimi cevabının benzetim ve deney sonuçlar.....	132



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. CompactDAQ ile senkron generatör güç denetimi sistem resmi.....	109



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
D	Doluluk oranı
D_r	Yük değişimi yüzdesinin, frekans değişimi yüzdesine oranı
dPF	Yer değiştirme güç faktörü
$D\Delta\omega$	Frekans değerine duyarlı yük değişimi
e	Bobinde indüklenen gerilim, Volt
f_{anma}	Generatörün anma geriliminin frekans değeri, Hz
f_n	Generatörün tam yüklü durumdaki frekansı, Hz
f_{nl}	Generatörün boştaki frekansı, Hz
f	Frekans, Hz
f_{output_ripple}	Çıkış akımı içeriğindeki dalgacık frekansı, Hz
f_{switch}	Anahtarlama frekansı, Hz
G_n	n. derece harmonik bileşenin RMS değeri
H_{max}	Maksimum harmonik derecesi
I_C	Kondansatör akımı, Amper
I_L	İndüktör akımı, Amper
I_n	Akımın anlık değeri, Amper
I_{out}	Çıkış akımı, Amper
I_1	1. Harmonik akımı, Amper
k_p	Adım katsayısı
k_d	Dağıtım katsayısı
L	Endüktans değeri, Henry
N	Bobinin siper sayısı
n	Harmonik derecesi
n_m	Manyetik alanın mekanik hızı, d/d

Simgeler	Açıklamalar
n_{fl}	Generatörün tam yüklü durumdaki hızı, d/d
n_{nl}	Generatörün boştaki hızı, d/d
p	Çift kutup sayısı
P	Gerçek güç, W
PF	Güç faktörü
P_{fl}	Generatörün tam yüklü durumdaki aktif çıkış gücü, W
P_T	Toplam gerçek gücü, W
P_1	1. Harmonik gerçek gücü, W
Q	Reaktif güç, VAR
Q_{fl}	Generatörün tam yüklü durumdaki reaktif çıkış gücü, VAR
Q_T	Toplam reaktif gücü, VAR
Q_1	1. Harmonik reaktif gücü, VAR
R	Hız regülasyonu
Sp	Eğimi, kW/Hz veya MW/Hz
V_{anma}	Generatörün anma gerilimi değeri, Volt
V_{fl}	Generatör tam yüklü iken terminal gerilimi değeri, Volt
V_{in}	Giriş gerilimi, Volt
V_{nl}	Generatör yüksüz iken terminal gerilimi değeri, Volt
V_{out}	Çıkış gerilimi, Volt
VR	Yüzdelik olarak gerilim regülasyonu
V_t	Ölçülen terminal gerilimi değeri, Volt
Sa	Anahtarlama açısı
SD	Yüzde olarak hızdaki düşme
T_{switch}	Anahtarlama periyodu, Saniye
THD	Yüzdelik olarak toplam harmonik distorsiyon
U_n	Gerilimin anlık değeri, Volt
U_1	1. Harmonik gerilimi, Volt
u_2	Fazlar arası dengesizlik (Unbalance), negatif dizi bileşeni yüzdesi
S	Görünür güç, VA

Simgeler	Açıklamalar
S_T	Toplam görünür güç, VA
ω	Açısal frekans, rad/s
ω_e	Elektiriki açısal hız, rad/s
ω_m	Mekaniki açısal hızı, rad/s
ϕ	Bobin sargılarını kesen manyetik akı miktarı, Wb
$\phi_{\max}$	Nüve akısının maksimum değeri, Wb
ΔP_m	Mekaniksel güç çıkışı
ΔP_L	Frekans değerine duyarsız yük değişimi
ΔP	Aktif güç değişimi
ΔP_g	Referans güç ve çıkış gücü arasındaki farkı
ΔP_{ref}	Generatör referans gücü
$\Delta \omega$	Hız sapması
$\Delta I_{L\max}$	Maksimum indüktör dalgacık akımı, Amper
φ	Faz açısı
φ_{U1}	1. Harmonik gerilimin faz açısı
φ_{I1}	1. Harmonik akımının faz açısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
AA	Alternatif Akım
ADC	Analogdan Sayısala Dönüştürücü
AGC	Otomatik Kazanç Kontrolü
ASM	Asenkron Motor
AVR	Otomatik Gerilim Regülatörü
C	Compact
CCM	Sürekli İletim Modunda
cDAQ	Compact DAQ
D	Duty: Doluluk Oranı
DA	Doğru Akım

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DAT	Doyumlu Akım Trafosu
DAQ	Data AcQuisition
DCM	Süreksiz İletim Modunun
DSP	Sayısal Sinyal İşleme
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
emf	Üretilen Elektromanyetik Alanı
EMI	Elektromanyetik Girişim
EPS	Elektrik Güç Paketi (Electrical Power Suite)
ESD	Elektrostatik Deşarj
FPGA	Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi
GA	Genetik Algoritma
GPB	Genel Amaçlı Arabirim Veri Yolu
GPT	Güç Potansiyeli Transformatörü
GUI	Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface)
HIL	Döngüde Donanımsal Benzetim (Hardware In the Loop)
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LFC	Yük Frekans Kontrolü
LV	Düşük Gerilim
MAX	Ölçüm ve Otomasyon Gezini (Measurement & Automation Explorer)
MVR	Elle Gerilim Regülatörü
NI	National Instruments
OEL	Aşırı Uyarım Sınırlandırıcı
PF	Güç Faktörü
PLL	Faz Kilit Döngüsü
PSO	Parçacık Yığın Optimizasyonu
PSS	Güç Sistemi Sabitleyici
PT	Potansiyel Transformatörü
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
RMS	Etkin Değer
RTAI	Gerçek Zamanlı Uygulama Arayüzü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

RTDS	Gerçek Zamanlı Sayısal Simülatör
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SC	Sinyal Şartlandırma
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCL	Stator Akımı Sınırlandırıcılar
SCXI	Signal Conditioning eXtension for Instrumentation
SG	Senkron Generatör
SISO	Tek giriş-tek çıkış
ST	Statik
TDC	Technical Data Cloud: Teknik Data Bulutu
TDMS	Technical Data Management: Teknik Data Yönetimi
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon
UEL	Düşük Uyarım Sınırlandırıcı
VI	Sanal Araçlar
WES7	Microsoft Windows Embedded Standard 7

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin üretiminde bir kaç kVA gücünden başlayarak yüzlerce MVA güç değerlerine kadar farklı güçlerde ve yapılarda senkron generatörler kullanılmaktadır. Genellikle termik, hidrolik, dizel veya gaz türbinli elektrik üretim santrallerinde uyartımlı senkron generatör yapıları ile karşılaşmaktadır. Son yıllarda doğrudan bağlantılı olarak da adlandırılan çok kutuplu uyartımlı senkron generatörler yüksek güçlü rüzgar türbinlerinde dişli sistemi olmaksızın kullanılmaya başlanmıştır. Farklı yapılardaki bu generatörlerin ortak özelliği çıkış gerilimlerini düzenlemek, reaktif güç oranlarını dengelemek ve sistemi korumak gibi amaçlarla uyartım akımlarının denetlenmesidir.

Ulusal elektrik şebekesi gibi büyük şebekelerde yük genellikle endüktif özelliktedir. Çünkü şebekeye bağlı endüksiyon motorları, endüksiyon fırınları, transformatörler ve balastlı lambalar gibi yükler endüktif akım çekilmesine sebep olurlar. Görünür gücün artması anlamına gelen bu durum, iletim hatlarında büyük gerilim düşümlerine ve dolayısıyla da iletim veriminin azalmasına yol açmaktadır. Bundan dolayı güç kat sayısının düzeltilerek, reaktif gücün azaltılması gerekmektedir (Peşint, 1975: 294). Reaktif gücün azaltılması şebeke sisteminde kullanılacak olan generatör ve transformatörlerin anma güç değerlerini de doğrudan etkilemektedir. Şebekeye reaktif güç sağlamak için yüksek ücret talep eden şebeke operatörleri tarafından getirilen şartlar için reaktif güç kontrolüne izin verdiğinden dolayı senkron generatör doğal bir seçenek olmaktadır. Senkron generatörlerdeki güç faktörü veya reaktif güç, rotorun doğru akım ile uyartılması yolu ile, terminal gerilimleri ayarlanarak kontrol edilebilir (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011).

Elektrik sistemindeki tüm elektrik santralleri, ulusal veya uluslararası elektrik nakil hatları ve güç transformatörleri vasıtasıyla ortak gerilim ve frekans değerleri ile birbirine paralel bağlanırlar. Aktif (gerçek) güçteki değişiklikler şebekenin frekans değerini etkilemektedir. Reaktif güç, frekans değerindeki değişikliklere karşı daha az duyarlıdır ve temel olarak terminal gerilim genliğindeki değişikliklere bağlıdır. Dolayısıyla, senkron generatörlerde aktif ve reaktif güçlerin ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekmektedir. Yük frekansı kontrolü (LFC: Load Frequency Control) döngüsü aktif gücü ve frekansı denetlemektedir. Yük frekansı kontrolü ulusal elektrik şebeke sisteminin kurulmasını sağlamıştır ve gün geçtikçe büyüyen ulusal elektrik şebeke sistemi ile yük frekansı kontrolü önem kazanmıştır. Günümüzde bu gereksinim, büyük sistemlerin kontrolü için pek çok gelişmiş kavramın temelini oluşturmaktadır. Frekans değerini anma değerinde tutabilmek için üretim otomatik

olarak ayarlanmaktadır ve bu düzen otomatik kazanç kontrolü (AGC) olarak bilinmektedir (Saadat, 1999). Bununla birlikte, talep faktörü olarak da adlandırılan yük seviyesi, her saniye farklı bir değerde olabilmektedir. Buradan, herhangi bir elektrik tesisindeki generatörün terminal geriliminin günün her anında farklı değer aldığı söylenebilir. Bu nedenle, generatörün terminal geriliminin anlık olarak sabit kalabilmesi için uyarım akımı, kapalı döngü sistemi ile kontrol edilmelidir. Bu kapalı döngü kontrol sistemi görevi, uyarım kontrol sistemlerinin bir parçası olan ve Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR) sistemleri olarak adlandırılan bir yapı ile gerçekleştirilmektedir. Bu yapı reaktif gücün regülasyonunu da yapabilir. AVR sistemleri, uyarım kontrol döngüsünde terminal gerilimi hatasını kontrol girişi olarak kullanmaktadır. Bu fark sıfır olana kadar uyarım akımı dolayısıyla generatör çıkış gerilimi sürekli olarak ayarlanmaktadır (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Faiz, Shahgholian ve Arezoomand, 2007).

Senkron generatörlerde uyarım akımının denetlenmesi gerekliliği bir takım uyarım devresi sistemlerinin geliştirilmesine öncülük etmiş ve halen de yenilikçi kontrol sistemi yöntemleri üzerine araştırmalar yapılmaktadır. IEEE tarafından, doğru akım kaynağının generatör alan sargısına uygulanması metoduna bağlı olarak yapılan sınıflandırmaya göre doğru akım (DA), alternatif akım (AA) ve statik (ST) olmak üzere üç uyarım çeşidi vardır (IEEE Std 421.5™-2016, 2016). Tristör kontrollü doğrultucuların 1960'lı yıllarda geliştirilmesiyle birlikte otomatik uyarım akımı ayar sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Tristörlü AVR sistemlerinin yaklaşık yarım asır önce başlayan serüveni ise günümüzde halen devam etmektedir (Deepak ve Shubhanga, 2012; Dong-Hee, Tae-Hyoung ve Jin-Woo, August 2008; Lane, Rogers ve Vance, 1961). Statik uyarım sistemleri olarak ta bilinen ve daha çok büyük ölçekli senkron generatörlerin uyarım devrelerinde kullanılan, tristörlü sistemlerin; ölçme ve algılama devrelerindeki gecikmenin dışında, gerilim regülasyonunun gerçekleşmeye başlaması için doğrultucunun darbe sayısına bölünmesiyle ortaya çıkan doğal bir minimum gecikme süresine ihtiyaç duyulmaktadır (Schaefer R. C., 1997). Bu durum yük değişimlerinin hızlı olduğu sistemler için önemli bir problem oluşturabilmektedir. Aynı zamanda, tristör kontrollü sistemlerin çıkış gerilimlerindeki düşük frekanslı, yüksek genlikli harmonik bileşenlerden dolayı istenmeyen şaft gerilimleri meydana gelmektedir. Diğer taraftan, son yıllarda, güç yarı iletken anahtarlama elemanlarındaki gelişmelerle birlikte büyük güçlerin yüksek frekanslarda kontrol edilebilmesi ve anahtarlama hızlarındaki artışlar güç MOSFET ve IGBT'lerin bulunduğu

DA/DA güç dönüştürücülerin (azaltan ya da artıran gibi) AVR sistemlerinde tercih edilmesine olanak vermektedir (Bayram, Sefa ve Balci, 2016; Erceg, Tusun ve Erceg, 2012).

Süreç kontrol teknikleri son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Adaptif kontrol, sinirsel ağ kontrol, sinirsel-bulanık kontrol ve bulanık kontrol gibi birçok süreç kontrol yöntemi AVR için uygulanabilmektedir. Geniş bir yelpazedeki çalışma koşullarında sunduğu, dayanıklı (robust) yapısı ve basitliğinden dolayı, aralarında en çok bilinen ve en yaygın kullanılan yöntem PID denetleyici sistemidir. PID denetleyici tasarımı için en önemli nokta, oransal (P), integral (I) ve türev (D) kazançlarının belirlenmesidir. Tek giriş-tek çıkış (SISO) PID kontrolörleri ayarlamak için, birçok yaklaşım önerilmektedir. Bazı tanınmış PID ayar teknikleri ve bunların birbirleri ile kıyaslamaları literatürde bulunmaktadır (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013).

Uyartım sistemin kontrol donanımı olarak mikrodenetleyici, Digital Signal Processor (DSP) ve FPGA yani, sahada programlanabilir kapı dizisi (Field Programmable Gate Array) kartların kullanımına ilişkin örneklerle literatürde rastlanılmaktadır (Dong-Hee, Tae-Hyoung ve Jin-Woo, August 2008; Khan, Yinliang ve Tahir, June 2015). Ancak, DSP ve FPGA kartlardaki, klasik tümleşik tasarım ortamları oldukça karmaşıktır ve kayda değer bir öğrenme süresi gerektirirler. National Instruments (NI) tarafından geliştirilen ve bu işi biraz daha kolaylaştıran donanım ve yazılım çözümleri yanında dSPACE, Real-Time Application Interface (RTAI) ve Real Time Digital Simulator (RTDS) OPAL-RT gibi farklı seçenekler bulunmaktadır. Bunların dışında, elektrik enerjisi üretimi ve denetimi gibi ihtiyaçlara cevap vermek üzere çeşitli DAQ (Data AcQuisition) çözümlerinin kullanıldığı çalışmalar literatürde oldukça yaygındır. Buna rağmen, NI tarafından geliştirilen NI CompactDAQ (cDAQ) platformu, sunduğu üstün kabiliyetlerle, klasik DAQ çözümlerinin önüne geçmektedir.

NI tarafından sunulan CompactDAQ platformu için üretici tarafından savunulan üstün kullanıcı arayüzü çözümleri, kullanım kolaylığı, dayanıklılığı, en küçük alanı kaplaması, en geniş esnekliği sağlarken en iyi fiyat performansı sunması gibi önerileri destekleyen birçok çalışma literatürde yer almaktadır (Beghi, Cervato ve Rampazzo, 2015; Mangalekar ve Ugale, 2015; McWilliam, 2008; Monti, Neri ve Pollastrone, 2015; Polak, 2013; Silva, dos Santos, Bottura ve Oleskovicz, 2017; Zhu, Wen ve Xie, 2012). NI tarafında sunulan yazılım desteği çeşitliğinin de getirdiği çok yönlü ve etkili kullanım özellikleri de eklendiğinde,

CompactDAQ platformu en iyi fiyat performans oranını sunan, dayanıklı, kompakt ve çok yönlü bir endüstriyel çözümdür (McWilliam, 2008; Monti, Neri ve Pollastrone, 2015).

NI tarafından sunulan C serisi modüllerinin takılı olduğu bir CompactDAQ denetleyici şasisi ve LabVIEW ortamı, kullanıcıyı düşük seviyeli programlamanın ağır yükünden kurtarmaktadır. LabVIEW, uygulamalar oluşturmak için metin tabanlı geliştirme ortamı yerine simgeler kullanan grafiksel bir programlama dilidir. LabVIEW programlarına sanal araçlar (VI) denir; çünkü görünüşleri ve işlevleri, sinyal üretici, osiloskop, analizör ve multimetreler gibi fiziksel enstrümanları taklit etmektedir. LabVIEW, şema ve kod programındaki arızaları giderme araçları yanı sıra, veri toplama, analiz etme, işleme, görüntüleme, saklama gibi işlevler için kapsamlı birçok araç seti içermektedir. Üstelik NI Multisim ve özellikle Matlab SIMULINK gibi yaygın yazılımlar ile eş zamanlı çalışmalara olanak vermesi ayırtıcı bir fark yaratmaktadır. LabVIEW ortamının sağladığı bu kabiliyeti kullanan bir çalışmada, senkron generatör güç denetleme sistemi için türbin ve uyarım sistemleri dahil olmak üzere gerekli tüm sistemleri Matlab SIMULINK ile modellenmiş, AVR ve sınırlandırma işlevlerini LabVIEW yazılımı ile eş zamanlı benzetimini gerçekleştirmiştir (Iranian ve Zabihinejad, 2011). LabVIEW, yüksek seviyeli programlama dili ile programlanabilmesi ve CompactDAQ gibi hedef donanım platformları sayesinde, profesyonellerin, araştırmacıların ve öğrencilerin en karmaşık uygulamaları bile makul bir zaman içerisinde bitirebilmesine olanak tanımaktadır (Monti, Neri ve Pollastrone, 2015). Tüm bu avantajlarıyla, hızlı bir prototip tasarlama ortamı sunduğu için NI LabVIEW ve gömülü Windows işletim sistemi bulunduran NI CompactDAQ platformu tercih edilmiştir.

Bu tezdeki benzer işlevleri yerine getirmek üzere, NI LabVIEW ve NI Compact DAQ ikilisinin birlikte kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Bunların arasında devreye alma, koruma, bakım, izleme, güç kalitesi analizi ve eğitim alanlarında farklı tipte test ekipmanının veya simülatörlerin geliştirildiği çalışmalar bulunmaktadır (Dube, 2016; Lahti, 2015; Mangalekar ve Ugale, 2015; Silva, dos Santosa, Bottura ve Oleskovicz, 2017). Ayrıca, bu ikilinin elektrik enerjisi alanında yakıt hücresi (Marignetti, Minutillo, Perna ve Jannelli, 2011) rüzgâr türbini (McCann, 2013; McWilliam, 2008) gibi yöntemler ile enerjinin üretimi, bu sistemlerin izlemesi ve denetlemesi amacıyla kullanımları da oldukça yaygındır. Örneğin, (İnternet: Milojević, Joksimović ve Mandić) tarafından termik santrallerde kullanılan bir uyarım sisteminin ve generatörünün izlenmesi ve analizinin otomatikleştirilmesi için bir SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sistemi geliştirilmiştir. Benzer şekilde, bir rüzgâr türbini enerji dönüşüm sistemi için HIL (Hardware In the Loop) sistemi

geliştirmek üzere gerekli tüm kontrol ve veri toplama işi gerçekleştirilmiştir (Cengiz, 2015). Senkron generatör için (Polak, 2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, SG tarafından üretilen faz gerilimleri ve akımlar, uyartım akımı ve frekans izlenerek kayıt edilmesi sağlanmıştır. Tüm bu çalışmalar, yapılan donanım ve yazılım tercihin bu tezin amacı için uygunluğunu desteklemektedir.

Prototip üretilmesinden önce benzetim çalışmalarının yapılmasıyla, performans analizi ve iyileştirme çalışmaları kısa sürede ve çok düşük maliyetle gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda, senkron generatör performansları da elektromanyetik modelleme ve sonlu elemanlar analizi (SEA) ile test edilebilmekte ve senkron generatör davranışlarının (yük değişiklikleri ve farklı hata koşulları gibi) simülasyonları ayrıntılı olarak incelenebilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmanın bir ön adımı olarak, senkron generatör Ansys-Electromagnetics Suite içerisindeki Maxwell yazılımı ile generatörün ölçü ve parametrelerine göre iki boyutlu olarak modellenmiştir. Senkron generatörün elektromanyetik modellemesine ait eşdeğer devrenin güç elektroniği devresi ile birlikte eş zamanlı olarak çalıştırılabilmesi gerçeğe daha yakın davranışlarda benzetim olanağı sağlamaktadır (Bayram, Sefa ve Balci, 2016). Bu hedefle, uyartım devresinin benzetiminde ise güç elektroniği benzetimlerinde kullanılan Simplorer yazılımından yararlanılmış ve eş zamanlı olarak işletilmiştir. Böylece, hem senkron generatörün elektromanyetik davranışı hem de uyartım sistemi parametreleri ve etkileşimleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Benzetim çalışmaları önce bir fazlı bir azaltan dönüştürücü için belirli bir frekans değeri için yapılmıştır. Daha sonra, önerilen iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücülü uyartım sisteminin benzetimi bir fazlı azaltan dönüştürücü ile aynı anahtarlama frekansında yapılmıştır. Bu sayede, yük akımı üstündeki AA bileşenin genliğinin azalması, anahtarlama frekansının iki katına çıkarılma etkisi ve sonuçları incelenmiştir. Benzetimlerden elde edilen sonuçlar ise karşılaştırılmalı olarak rapor edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, eş zamanlı benzetim çalışmalarından elde edilen veriler ışığında, laboratuvar ortamı için orta ve büyük ölçekli bir senkron generatör uyartım sisteminde tam çözüm sağlayan (kontrol-koruma-izleme) modüler bir denetleyici ile özgün bir yazılımın geliştirilmesidir. Sistemi gerçekleştirmek için belirli bir güç değerindeki şebeke gerilimli bir senkron generatör ada modunda çalıştırılmıştır. Generatörün uyartım sisteminde kullanılmak üzere geliştirilen bir PI kontrollü faz kaymalı DA/DA azaltan dönüştürücü topolojisi ile ST uyartım yapılmıştır. Ölçüm, izleme ve her türlü kontrol fonksiyonu, cDAQ üzerinde çalışan özgün bir LabVIEW yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Senkron generatörün tahrik edilmesi

amacıyla bir asenkron motorun ile asenkron motor sürücüsü kullanılmıştır. Motor miline akuple generatörün devir sayısı da, sürücünün analog girişi üzerinden cDAQ içerisinde yürütülen PI denetleyici yardımı ile kontrol edilmektedir. Böylece, aynı kontrol donanımı ile AVR ve AGC kontrolü PI ile sağlanmıştır. Sistemin kurulumuna ve çalışmasına dair ayrıntılı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilmiştir. Güç analizörü gibi diğer ölçü aletleri ile yapılan ölçüm sonuçlarının geçerliliği değerlendirilmiştir. Ek olarak, Ansys-Maxwell ve Simplorer yazılımlarının eş zamanlı çalıştırılması ile elde edilen ön sonuçlar deneysel çalışmalardan elde edilenler gerçek sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



2. SENKRON GENERATÖRLER

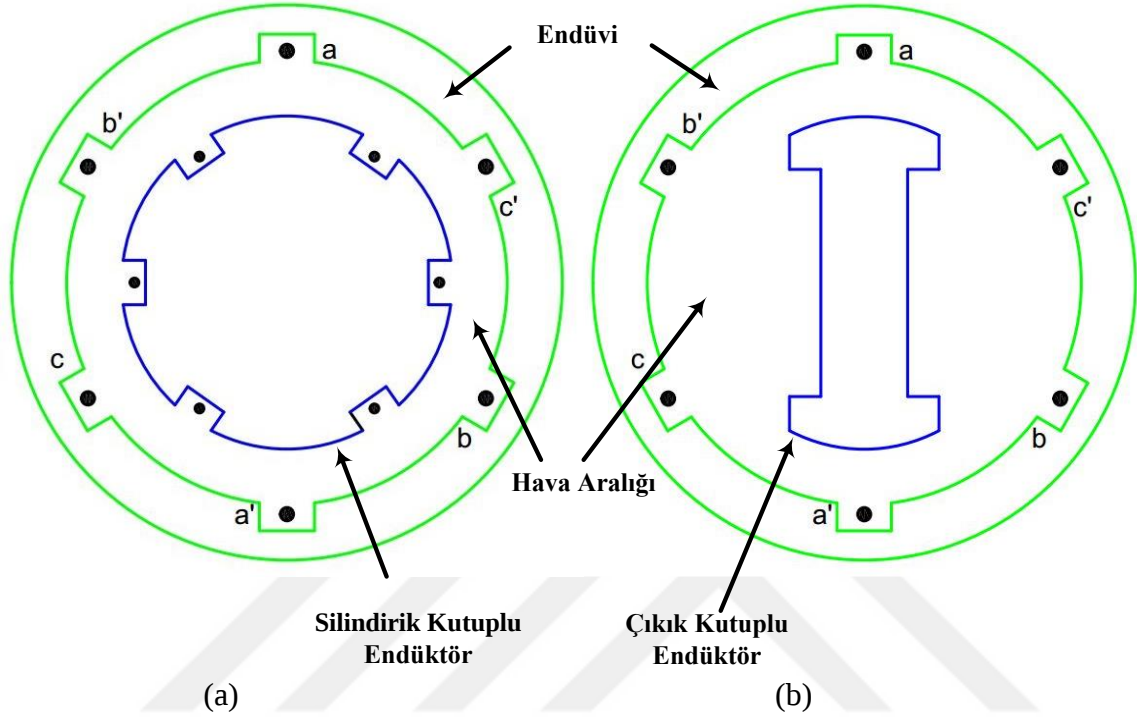
Bir veya çok fazlı olarak üretilirler ve senkron hızda döndürülürler. Senkron makineler özel yol verme teknikleri kullanılmadan direkt olarak şebekeye bağlanamazlar. Stator (endüvi) sargısında alternatif akım (AA) söz konusu iken, rotor (endüktör) sargılarında ise doğru akım (DA) elektrik enerjisi söz konusudur. Bu sebeple çift uyarımlı makineler olarak da kabul edilirler. Senkron makineler, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirdiği durumlarda senkron motor olarak; mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için kullanıldıklarında ise senkron alternatör veya senkron generatör olarak adlandırılırlar. Stator yapısına veya kutup sayısına göre sınıflandırılabilirler. Anma güç değerlerine göre sabit stator-döner rotorlu ve sabit rotor-döner statorlu olmak üzere iki farklı yapıda imal edilebilirler. Kutup yapılarına göre yapılan sınıflandırmada ise silindirik (cylindrical) kutuplu ve çıkık (salient) kutuplu olmak üzere ikiye ayrılırlar.

2.1. Senkron Generatörlerin Yapıları

Sabit statorlu senkron makinelerin rotorları hareketli olacağından, rotorda bulunan uyarım sargılarının ihtiyaç duyduğu uyarım gerilimini DA kaynağından sargılara aktarmak için fırça ve bilezik sistemi kullanılır. Bu uyarım gerilimi, birkaç yüz voltu (125-400 V) geçmediği için herhangi bir yalıtım problemi olmazken, sabit rotorlu sistemlerde statorun hareketli olması bir takım problemler doğurur. 25000 volt gibi yüksek gerilimler üreten alternatif akım sargılarını bulunduran stator için bu yüksek gerilimi sargılardan dış terminallere taşımak için gerekli fırça, bilezik ve yalıtım tertibatı ekonomik yönden çok pahalı olacaktır. Bundan dolayı, orta ve büyük güçteki senkron makinelerin mümkün olduğunca sabit stator-döner rotorlu yapılmak istenmesi de bu sebeptendir (Çolak, 2010; Peşint, 1975).

Anma gücü 5 kW seviyelerine kadar olan senkron generatörler sabit mıknatıslı yapılabilmektedirler. Bu güç değerinin üstüne çıkıldığında, kutupları sargılı olarak üretilirler. Senkron makinelerin anma güçleri arttıkça verimleri artar. Senkron makineler için soğutma gereksinimi, anma güç değeri arttıkça soğutma kapasitesinin daha çok artması anlamına gelmektedir. Anma güç değeri 50 MW'a kadar hava sirkülasyonu soğutma için yeterli iken, 50 MW-300 MW arası güçteki senkron makineler için hidrojen soğutmalı sistemler kullanılmaktadır. Buna rağmen, 1700 MW seviyelerine kadar olan daha büyük

güçler için su soğutmalı sistemler kullanılmaktadır. Aynı güçlerde fakat farklı hızlarda çalıştırılan iki senkron makineden düşük hızla dönenin daha fazla soğutmaya ihtiyacı vardır (Çolak, 2010: 17, 18; Peşint, 1975).



Şekil 2.1. Silindirik (a) ve çıkık (b) kutuplu rotor yapısı (Çolak, 2010: 18)

Kutup yapısına göre silindirik kutuplu olan senkron makinelerin boyları uzun ve çapları küçük olup (rotor çapı en fazla 1,1 m), milleri yere paralel olarak kullanılırlar. Bu generatörler yüksek hızlarda döndürülür ve genellikle 2 veya 4 gibi az kutup sayılarında üretilirler. Çıkık kutuplu senkron makinelerin ise boyları daha kısadır ve çapları daha geniştir (stator çaplar 10-14 m). Silindirik kutuplunun aksine milleri yere dik olarak kullanılırlar. Şekil 2.1 (a)'da görüldüğü üzere, kutup yapılarından dolayı silindirik kutupluda stator ve rotor arasındaki hava aralığı sabit iken, çıkık kutuplunun yapısı itibari ile değişkendir. Çıkık kutuplu senkron makinelerin çok kutuplu olmalarından dolayı düşük hızlarda çalıştırılırlar, zira uyartım sargıları santrifüj (merkez kaç kuvveti) etkisi ile yapısal olarak bozulabilir. Silindirik kutuplu senkron generatörler buhar generatörlerinde kullanılırken, çıkık kutuplu senkron generatörler ağırlıklı olarak hidrolik ve rüzgar türbinlerin düşük hızları ile eşleşen generatör sistemlerinde kullanılmaktadırlar (Çolak, 2010; Peşint, 1975).

2.2. Döner Alan Hızı

Senkron makinelerde döner alan hızı, makinenin dönüş hızı ile senkronize olduğundan aynı değeri alır. Senkron makinenin bu isimle anılmasının sebebi de budur. Sabit hızda çalıştıklarından, döner alan hızı ve dolayısıyla frekansları sabittir. Üretildikten sonra, kutup sayısı değiştirilemeyeceği için frekans ile mekanik hız arasında direkt bir ilişki vardır. Bu ilişki, Eş. 2.4'te verildiği gibidir. Bu eşitliğe göre, senkron hızdaki azalma direkt olarak üretilen gerilimin frekansını etkiler.

$$f = \frac{n_m \cdot p}{120} \quad (2.1)$$

$$\omega_e = 2\pi f \quad (2.2)$$

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m \quad (2.3)$$

$$\omega_m \frac{60}{2\pi} = n_m = (2\pi f) \frac{2}{P} \cdot \frac{60}{2\pi} = \frac{120f}{P} \quad (2.4)$$

Burada,

p : Çift kutup sayısını

f : Elektriki frekansı (Hz)

n_m : Manyetik alanın mekanik hızı(d/d)

ω_e : Elektriki açısal hızı (rad/s)

ω_m : Mekanik açısal hızı (rad/s)

göstermektedir.

Generatörün frekansı, şebekeye bağlantı sırasında (motor gibi hareket ettirmek yerine) güç sağlamak için şebekeden biraz daha yüksek olarak ayarlanır (Tibebu, 2013).

2.3. Senkron Generatörlerde Üretilen Gerilim

Senkron generatörlerde uyartım sargısının bulunduğu rotor ya da alternatif akım sargılarının bulunduğu kısım dönüyor olabilir. Döner rotorlu ise, DA gerilimle uyartılan kutupların oluşturduğu döner alan, sabit stator sargılarını keser. DA gerilimle uyartılan sabit rotor

sargıları ise döner stator sargıları, kutup sargılarının oluşturduğu manyetik alan tarafından kesilir. Faraday kanununa göre de döner alan içerisinde kalan bir bobinde veya sabit alan içerisinde dönen bobinde gerilim indüklenir (Çolak, 2010; Peşint, 1975). Bu üretilen gerilimin büyüklüğü, manyetik alanın gücü ve bobinin manyetik alanı geçme hızı ile doğru orantılıdır. Uyarım alanı d-ekseni boyunca olmaktadır. Stator tarafından indüklenen gerilim q-ekseni boyunca ve Lenz kanununa göre indüklenmesine sebep olan gerilim ile ters polaritededir (İnternet: Whitby Hydro Energy Corporation).

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

Burada;

e: Bobinde indüklenen gerilimi (V)

N: Bobinin siper sayısını

ϕ : Bobin sargılarını kesen manyetik akı miktarını (Wb)

temsil etmektedir.

Nüve akısı $\phi(t)$ sinüzoidal olarak değiştiği kabul edildiğinde Eş. 2.6 yazılabilmektedir.

$$\phi(t) = \phi_{max} \sin(\omega t) \quad (2.6)$$

Burada;

ϕ_{max} : Nüve akısının maksimum değeri (Wb)

ω : Açısal frekansını $= 2\pi f$ (rad/s)

f: Frekansını (Hz)

göstermektedir.

Eş 2.6'daki denklem, Eş 2.5'te yerine yazılır ise N siperli bobinde indüklenen gerilim değeri Eş 2.7'deki gibi bulunur.

$$e(t) = \omega N \phi_{max} \cos(\omega t) = E_{max} \cos(\omega t) \quad (2.7)$$

Buradan;

$$E_{max} = \omega N \phi_{max} = 2\pi f N \phi_{max} \quad (2.8)$$

olarak bulunur.

Kalıcı durumda çalışma için alternatif gerilimin etkin yani RMS değeri kullanılmaktadır. Sinüzoidal bir dalganın maksimum değerinin karekök ikiye bölünmesi, etkin değeri vermektedir. Bu durumda, indüklenen gerilimin RMS değerini Eş.2.9'daki gibi ifade edilmektedir. Generatör sargılarında indüklenen gerilimin sinüs formunu iyileştirmek için kutup adımlarının tam adım yerine kesirli adım yapılmasının ve stator sargılarının dağıtılmasının indüklenen gerilim üzerindeki etkileri, sabit çarpan olarak eklendiğinde ise Eş. 2.10 elde edilmektedir. Generatör için frekans ve manyetik akı dışındaki siper sayısı, adım katsayısı ve dağıtım katsayısı gibi yapısal parametreler sabit olduğundan Eş. 2.10 ile verilen K katsayı ile daha da sade hale getirilebilmektedir.

$$E_{RMS} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \phi_{max} = 4,44 f N \phi_{max} \quad (2.9)$$

$$E_{RMS} = 4,44 N k_p k_d f \phi_{max} = K f \phi_{max} \quad (2.10)$$

$$K = 4,44 N k_p k_d \quad (2.11)$$

Burada;

k_p : Adım katsayısını

k_d : Dağıtım katsayısını

göstermektedir.

2.3.1. Harmonik

Generatör sargılarından indüklenen gerilim tam sinüzoidal değildir. Özellikle çıkık kutuplu yapıdaki değişken hava aralığı sebebiyle bu tip generatörlerde indüklenen gerilim trapez şeklinde olup içerisinde harmonikler bulunur. Harmonik, temel dalgadan farklı frekanslarda olan ve temel dalgaya bozucu etkiler gösteren dalgalara verilen genel isimdir.

Harmonikler periyodiktir ve matematiksel olarak Fourier serileri ile ifade edilmektedirler. Buna göre tek değerli bir periyodik dalga, sinüslü ve kosinüslü ifadelerin toplamından

meydana gelen bileşik bir dalgadır. Harmoniklere isimleri, frekansları ve bileşenleri ile sınıflandırılırlar.

Çizelge 2.1. Harmonik bileşenler çizelgesi

Harmonik bileşenler	Temel 1.	Harmonikler											
		2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
Frekans (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Bileşen	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Dengeli bir 3 faz- 4 hatlı bir sistemde harmonik bileşen, harmonik gerilim ve akımlarının fazör dönüş ile ifade edilir. 4., 7. ve 10. gibi pozitif bileşenli harmonikler temel frekans ile aynı yönde dönerler. 2., 5., ve 8. gibi negatif bileşenli harmonikler temel frekansın tersi yönde döner. Pozitif bileşenli harmonikler, dalga formlarının eklenmesinden ötürü iletkenlerin, güç hatlarının ve transformatörlerin aşırı ısınmasına sebep olduklarından istenmezler. Negatif bileşenli harmonikler ise fazlar arasında dolaşarak tersine fazör dönüşü ile motorlar için ek problemler çıkarırlar ve motorlar için gerekli olan döner manyetik alanı zayıflatılarak daha az tork üretilmesini sebep olurlar. 3. ve üçün katları olan yani triplen harmonikler, sıfır döner bileşenli harmoniklerdir. Sıfır bileşenli harmonikler faz ile nötr ya da toprak arasında dolaşırlar. Birbirlerini bastıran pozitif ve negatif harmoniklerin aksine triplen harmonikler bastırılmaz. Bunun yerine nötr hattı, her üç fazdan gelenler bu harmoniğin aritmetik ortalamasına maruz kalır. Temel frekanstaki faz akımının üç katına kadar çıkabilen nötr hattındaki bu akım, temel frekanstaki faz akımının etkisinin azalmasına ve aşırı ısınmaya sebep olur. En baskın harmonikler, 2. ve 19. harmonikler arasındakilerdir ve en kötüler de triplen harmoniklerdir. Özetleyecek olursak; pozitif bileşenli harmonikler aşırı ısınmaya, negatif bileşenler motorlarda tork problemlerine sebep olur. Sıfır bileşenler ise nötr hattında, ısınmaya sebep olan akımlar ve/veya gerilimler eklemektedir (Çolak, 2010; Peşint, 1975).

2.3.2. Gerilimin dalga formu

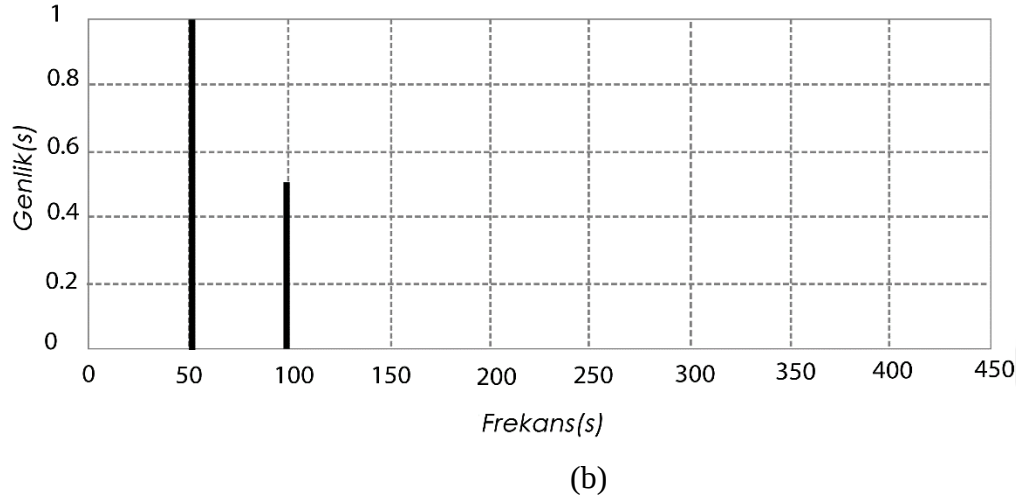
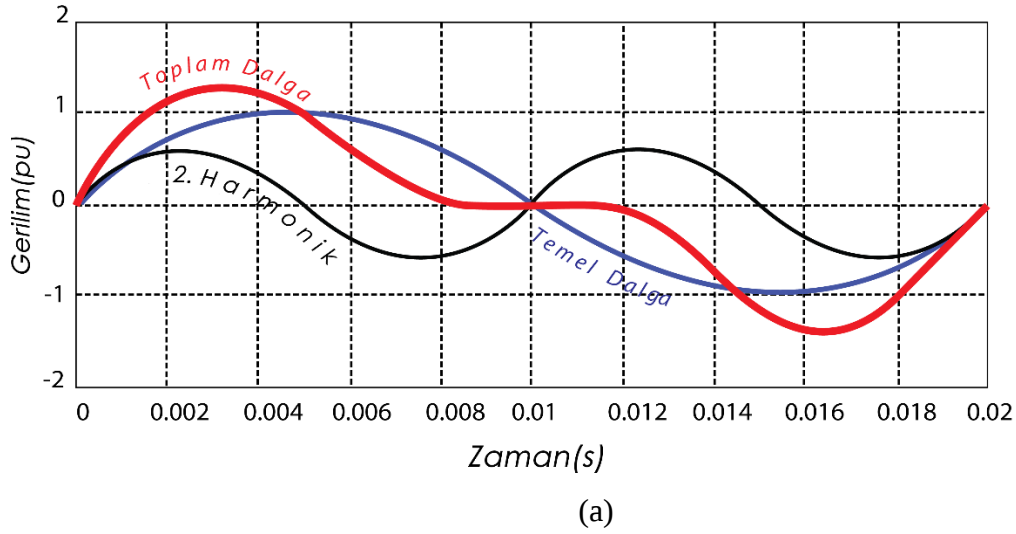
Generatör sargılarından indüklenen gerilim tam sinüzoidal olmaması sebebi ile oluşan harmoniklerin azaltılması gereklidir. İndüklenen gerilimin formunu sinüzoidale daha da yaklaştırmak için kutup adımlarının tam adım yerine kesirli adım yapılması ve stator sargılarının dağıtılması (bir faza ait bobinin tek oluk yerine birden fazla oluğa

yerleştirilmesi) şeklinde yapılan bazı değişiklikler ile indüklenen gerilimin RMS değeri Eş. 2.9 ile hesaplanır. Temel dalganın sinüs formuna yaklaştırılması, harmoniklerin yok edilmesi demektir. Ayrıca, bazı generatörlerin rotorlar ayaklarında, gerilimde meydana gelebilecek dalgalanmaları önlemek için kısa devre çubukları bulunur (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011; Çolak, 2010).

Gerilim dalga formunun sinüs kabul edilebilmesi için, gerilim eğrisinin herhangi bir andaki değeri ile gerilimin temel dalgasının o andaki değeri arasındaki fark birinci harmonik bileşenin yani temel dalganın maksimum değerinin %5'ini geçmemelidir (Peşint, 1975: 65).

Genellikle generatörlerde üretilen gerilimler simetrik yani zaman eksenini altındaki kısımlar ile eksen üstü kısımları birbirine eşit ve benzer olduklarından, çift dereceli harmonikler bu gerilimler içerisinde bulunmaz. Şekil 2.2'deki bileşke dalgaya bakıldığında ikinci harmonik bileşen etkisinin çok küçük değerde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, çift basamaklı harmoniklerin etkileri dikkate alınmamaktadır. Harmonik derecesi arttıkça temel dalgaya olan etkileri de azalmaktadır ve temel dalgaya en çok etki eden harmonikler 3., 5., 7., 9., 11. ve 13. harmoniklerdir. Senkron generatörlerde 13. harmonikten sonraki harmoniklerin etkileri çok küçük olduğundan genellikle dikkate alınmazlar. Bobin adımında 20° kısaltma yapıldığında 9., 36° kısaltma yapıldığında 5. ve 60° kısaltma yapıldığında ise 3. harmonik sıfırlanmaktadır (Peşint, 1975: 55, 77).

SG'ler bazı avantajlarından dolayı genelde yıldız bağlanırlar ve eğer stator yani alternatif akım sargıları yıldız bağlanırsa, faz gerilimlerinde var olan üçüncü harmonik bileşen, fazlar arasında yok olur. Üçgen bağlandığında ise her bir fazın harmonik bileşenleri fazlar arasında da görüleceği için çok büyük miktarlarda harmonik akımlar dolaşmaktadır. Triplen harmonik gerilimleri makinenin kendi iç empedansına uygulandığından, makine terminallerine önemli bir etkisi olmamaktadır. Yıldız bağlantının diğer bir avantajı da, yıldız noktasından bir uç alınarak nötr telli 4 hatlı bir sistem meydana getirilerek birden fazla çeşitli gerilim elde edilebilir. Son olarak, yıldız bağlantıda faz gerilimi fazlar arası gerilimin $1/\sqrt{3} = 0,58$ katı olduğundan; istenen terminal gerilimini sağlamak üzere, sarım sayıları üç faz için de %58 indirilebilir. Böylece işçilik ve yalıtım masrafları yanında bakır malzemedeki ekonomi sağlanmaktadır (Peşint, 1975: 55, 77).



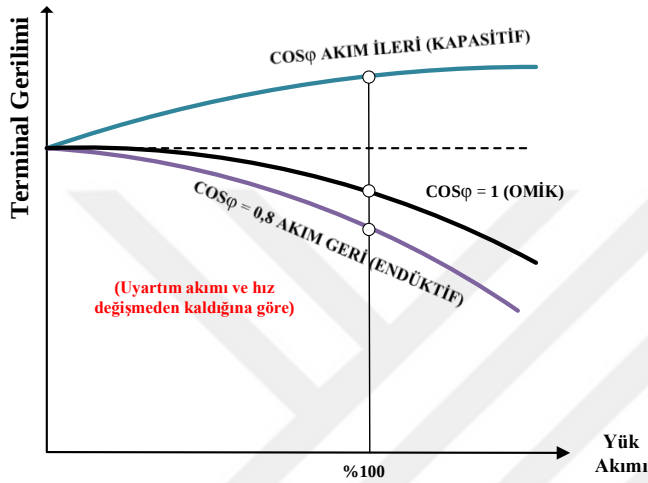
Şekil 2.2. Temel dalgı ve ikinci harmoniğinin temel dalgıya etkisi (a) zaman ekseninde, (b) frekans ekseninde (Çolak, 2010: 27)

2.4. Senkron Generatörün Çeşitli Yük Durumları, Gerilim Düşümleri ve Nedenleri

Senkron generatör yüklendiğı zaman, terminal gerilimleri yükün cinsine ve yük miktarına bağılı olarak değışir. SG iç direncinden ötürü yüklendiğinde çoğıu zaman terminal gerilimleri (V_T) azalır. Bunun nedenlerinin başında ise generatörün kendi iç direnci gelmektedir. Senkron generatör için üç çeşit yük durumu vardır. Yükün cinsi omik, endüktif ve kapasitif olabilir. Buna göre terminal gerilimleri azalır veya artar. Endüktif ve omik yüklerde terminal gerilimi azalırken, kapasitif yüklerde terminal gerilimi artar (Peşint, 1975: 79, 80).

Güç katsayısı $\cos\phi = 1$ olan omik yük durumunda, statordan çekilen akım artar; ancak açısı sabit olup terminal gerilimi ile aynı fazdadır. Buna bağılı olarak, stator reaksiyon gerilim düşümü değeri de bir miktar artar ve terminal geriliminde %10 ile %20 kadar bir azalma

olur. Güç katsayısı $\cos\phi < 1$ akım geri olan endüktif yüklenme durumunda, boştaki duruma göre %20 ile %50 kadar bir azalma gösterir. $\cos\phi = 0,8$ olduğunda ve normal uyartım durumunda bu düşüş %50'yi geçmemelidir. Güç katsayısı $\cos\phi < 1$ akım ileri olan kapasitif yüklenme durumunda, terminal geriliminde boştakine göre bir artış görülür. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi bu durum, %100 yük yani tam yük durumundan sonra gerilimin azalması şeklinde kendini gösterir (Peşint, 1975: 79, 80).



Şekil 2.3. Senkron generatörün çeşitli yük durumları için terminal gerilimi değişimi

Terminal gerilimindeki bu değişimi ifade etmek için regülasyon kavramı kullanılır. Generatörün boş durumdaki geriliminin (V_{nl}), tam yüklendiklerindeki terminal gerilimine (V_{fl}) olan değişiminin, tam yüklü durum gerilimine oranına generatörün gerilim regülasyonu denilmekte ve Eş. 2.12 ile yüzdelik olarak ifade edilmektedir. Ancak, bu hesaplamanın doğru yapılabilmesi için tam yüklü durum ve yüksüz çalışma durumları için uyartım akımının sabit tutulması mecburi bir şarttır. Birim ve geri (endüktif yük) güç faktörü için VR pozitifken, ileri (kapasitif) güç faktörü için negatiftir (Çolak, 2010; Peşint, 1975).

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100 \quad (2.12)$$

Burada;

VR: yüzdelik olarak gerilim regülasyonunu

V_{nl} : Generatör yüksüz iken terminal gerilimi değerini

V_{fl} : Generatör tam yüklü iken terminal gerilimi değerini göstermektedir.

Bu yöntem küçük güçlü generatörler için regülasyon bulunmak istendiğinde kullanılması pratik bir yöntemdir. Diğer taraftan, büyük güçler için bu yöntem maliyetli zor olması bakımından senkron empedans ve doymuş senkron empedans yöntemleri, potiyer yöntemi, manyeto motor kuvveti yöntemi gibi farklı yöntemler geliştirilmiştir (Peşint, 1975: 103). Regülasyonun bilinmesi kullanılacak uyartım devresi gücü, gerilim düzenleyici ve kısa devre akımı gibi noktalarda gereklidir. Endüktif (geri) ve omik yükler için regülasyon pozitif iken kapasitif (ileri) yükler için regülasyon negatiftir. Yüke sağlanan gerilimi sabit kılmak için generatörde indüklenen gerilimi değiştirmek gerekmektedir. Eş. 2.10'a göre generatör için yapısal olarak K değerinin ve generatörün sabit hızla dönmesiyle de formüldeki frekansın sabit olmasından ötürü, bunun yolu sadece ϕ manyetik akısını değiştirmekten geçmektedir (Çolak, 2010; Peşint, 1975).

2.5. Generatörde Frekans-Aktif Güç ve Gerilim-Reaktif Güç İlişkileri

Senkron generatörlerin mekanik güç girişini sağlayan sistemler, dizel motorlar, su türbinleri, buhar türbinleri, gaz türbinleri veya rüzgâr türbinleri olabilir. Bu sistemlerden herhangi birisi ile çalıştırılan senkron generatör yüklendikçe, devir sayısı (hızı) bu yüke bağlı olarak azalacaktır. Hız ile yük arasındaki bu ilişki lineer değildir. Ancak türbin ile generatör mili arasına yerleştirilen özel mekanizma ile bu bağıntı doğrusal yapılabilir. Senkron generatörün hızında meydana gelen azalma yani devir ya da frekans regülasyonu yüzde olarak Eş. 2.13'teki gibi ifade edilir. Genel olarak %2 veya %4 civarındadır (Çolak, 2010: 112, 113; Peşint, 1975: 174). Generatörün hız-güç eğrisi Şekil 2.4 (a)'da ve frekans-güç eğrisi Şekil 2.4 (b)'de verilmiştir.

$$SD = \frac{n_{nl}-n_{fl}}{n_{fl}} \times 100 = \frac{f_{nl}-f_{fl}}{f_{fl}} \times 100 \quad (2.13)$$

Burada,

SD (Speed Drop): Yüzde olarak hızdaki düşmeyi

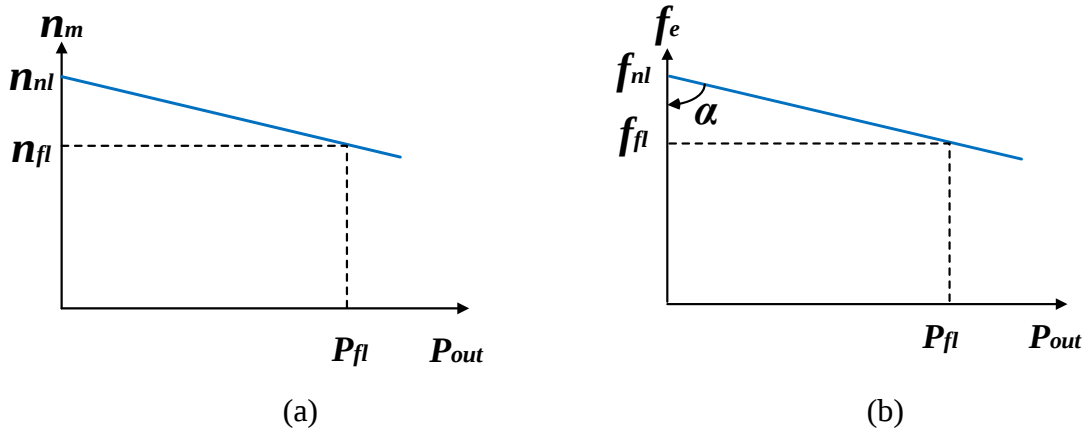
n_{nl} : Generatörün boştaki hızı (d/d)

n_{fl} : Generatörün tam yüklü durumdaki hızı (d/d)

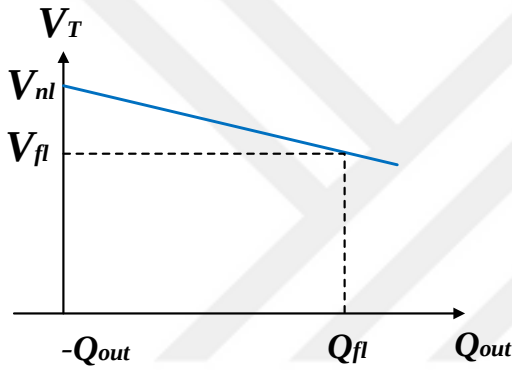
f_{nl} : Generatörün boştaki frekansı (Hz)

f_{fl} : Generatörün tam yüklü durumdaki frekansı (Hz)

göstermektedir.



Şekil 2.4. Generatör (a) hız-aktif güç ve (b) frekans-aktif güç eğrisi (Çolak, 2010)



Şekil 2.5. Generatör terminal gerilimi-reaktif güç eğrisi (Çolak, 2010)

Şekil 2.5'e göre generatörün aktif gücü ve reaktif çıkış gücü aşağıdaki sırasıyla Eş. 2.14 ve Eş. 2.15'te verilmiştir.

$$tg\alpha = S_p = \frac{P_{fl}}{f_{nl} - f_{fl}} \quad (2.14)$$

$$P_{fl} = S_p(f_{nl} - f_{fl}) \quad (2.15)$$

$$Q_{fl} = S_p(V_{nl} - V_{fl}) \quad (2.16)$$

Burada;

P_{fl} : Generatörün tam yüklü durumdaki aktif çıkış gücünü (W)

Q_{fl} : Generatörün tam yüklü durumdaki reaktif çıkış gücünü (VAR)

f_{nl} : Generatörün boştaki frekansını (Hz)

f_{fl} : Generatörün tam yüklü durumdaki frekansını (Hz)

V_{nl} : Generatörün boştaki terminal gerilimini (V)

V_{fl} : Generatörün tam yüklü durumdaki terminal gerilimini (V)

$Sp: tga$: Eğimi (kW/Hz veya MW/Hz)

göstermektedir.

Generatörün reaktif gücünün ise terminal gerilimi ile lineer değişim gösterdiği Şekil 2.5'te görülmektedir. Terminal gerilimi, çekilen reaktif güce karşı düşüş göstermektedir. Senkron makine generatör olarak çalıştırılmakta ise, çekilen güç (+) işaretlidir. Eğer senkron makine senkron motor olarak çalıştırılıyorsa, çekilen güç (-) işaretlidir. Generatörden çekilen çıkış gücü daima yükün çektiği güce eşittir. Çalışma frekansı ise, generatörü döndüren sistemin devir sayısına bağlıdır. Generatörün terminal gerilimi de, uyarım akımı ile kontrol edilmektedir (Çolak, 2010: 112-114).

3. SENKRON GENERATÖRLERDE GÜÇ DENETİMİ

Güç sistemlerinin çalışması, aktif ve reaktif yükteki değişimlere maruz kalındığında verdiği tepki üzerine değerlendirilmektedir. Kalıcı durumda, frekans ve gerilim değerlerinin neredeyse sabit veya bu değerlerde kabul edilebilir sınırlar dâhilinde değişimlerin olması istenilmektedir. Aktif güç akışı, ana tahrik sistemi (prime mover) enerji girdisine, dolayısıyla senkron generatörün (SG) hızına bağlıdır. Öte yandan, reaktif güç kontrolü terminal gerilimi ile ilgilidir. Büyük değerdeki aktif güç yükü, devirde çökmeye; büyük değerdeki reaktif güç yükleri ise gerilimin çökmesine neden olmaktadır (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 52).

Generatörlerin, anma güç faktöründe, gerilimde $\pm\% 5$ ve frekansta $\pm\% 2$ aralıklarla sürekli olarak anma değerini sağlamaları gerekir. IEC 60034-3, bu aralıkların dışında çalışmanın genişlemesi, devam ettiği süre ve meydana gelme sıklığı sınırlandırılması tavsiye etmektedir. Bu nedenle, üreticiler generatör için anma frekans değerinin $\% 98$ ile $\% 102$ 'si arasındaki sürekli, aralık dışında çalışma için ise zaman kısıtlamaları uygulamaktadır. Özellikle, anma frekans değerinin $\% 95$ 'inden az veya $\% 103$ 'ün üstünde (50 Hz bazında, sırasıyla 47,5 Hz -51,5 Hz) bir çalışma için bu zaman kısıtlamaları daha ciddi olmaktadır. Standart frekans aralığının dışındaki çalışma, sabit ve döner parçaların yüksek devir yorgunluğundan ötürü, generatörün ve ana tahrik sisteminin mekanik bileşenlerinin yaşlanmasını hızlandırmaktadır (IEEE Std C37.102™-2006, 2007). Benzer şekilde, bir generatörün anma gerilim değerinin $\% 95$ 'inden daha düşük terminal gerilimi ile çalıştırılması, kararlılık sınırında azalma, şebekeden aşırı reaktif güç çekilmesi ve gerilime duyarlı cihazların ve ekipmanın arızalanması gibi istenmeyen etkilere neden olabilmektedir (IEEE Std C37.102™-2006, 2007: 85). Makine anma gerilim değerinin (tipik olarak $\% 105$) üzerindeki değer artışı, stator göbeği alanlarında aşırı akı yoğunluğuna (doymaya) ve ısıtmaya neden olabilir. Gerilim seviyeleri makine anma gerilimi değerinin $\% 110$ 'una yaklaştığında ve aştığında, hasar çok hızlı bir şekilde oluşabilir (IEEE Std C37.102™-2006, 2007: 81).

Devir yani senkronizasyon kontrolü, şebeke ile senkronizasyon sağlamak için SG üzerinde yüksüzken uygulanmaktadır. Senkronize edildiğinde faz farkı yaklaşık 0,001 saniyedir ve bu da 18 dereceye tekabül eder. Bu güç aktarımında, güç açısının elektriksel değeridir. Reaktif güç kontrolü ise SG doğrudan şebekeye bağlandığında, kalıcı durumda birim güç

faktörünü devam ettirmek ve alçak gerilim şebeke arızaları sırasında şebekenin reaktif güç gereksinimlerini yerine getirmek için gereklidir (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 52).

3.1. Generatörde Kontrol Döngüleri

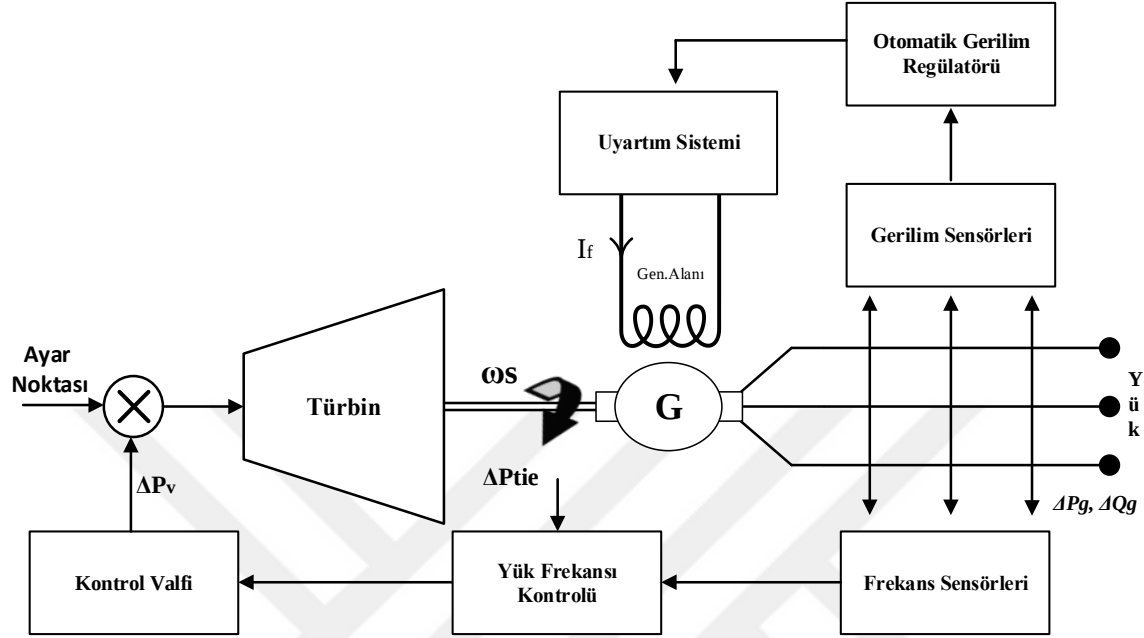
Bu konu sistemi kararlı halde tutmak için aktif ve reaktif gücün kontrolü ile ilgilidir. Ayrıca kontrol sistemlerinde kullanılan temel bileşenlerin basit modelleri sunulmaktadır. Güç sistemi kontrol stratejisinin amacı, gerilim ve frekans değerleri izin verilen sınırları korurken, mümkün olduğunca ekonomik ve güvenilir bir enerji üretmek ve dağıtmaktır.

Aktif (gerçek) güçteki değişiklikler esasen sistem frekansını etkilemektedir. Reaktif güç, frekans değerindeki değişikliklere karşı daha az duyarlıdır ve temelde gerilim büyüklüğündeki değişikliklere bağlıdır. Dolayısıyla, aktif ve reaktif güçlerin ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekmektedir. Yük frekansı kontrolü (LFC) döngüsü aktif gücü ve frekans değerini kontrol etmektedir. Yük frekansı kontrolü ulusal elektrik şebekesi sistemini mümkün kılmıştır ve büyüyen ulusal elektrik şebekesi sistem ile yük frekansı kontrolü önem kazanmıştır. Günümüzde bu, büyük sistemlerin kontrolü için pek çok gelişmiş kavramın temelini oluşturmaktadır. Frekansı anma değerine geri getirmek için üretim otomatik olarak ayarlanmakta ve bu düzen otomatik kazanç kontrolü (AGC) olarak bilinmektedir (Saadat, 1999).

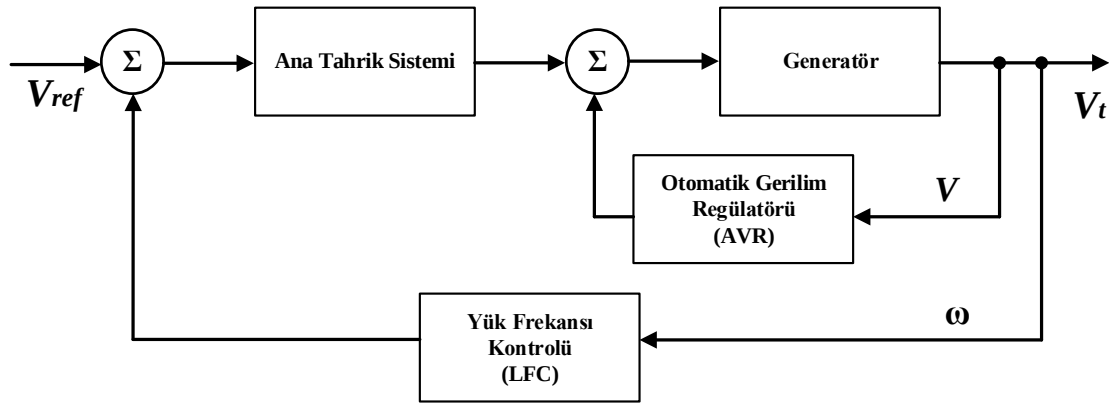
Bununla birlikte, talep faktörü olarak da adlandırılan yük seviyesi, her saniye farklı bir değerde olabilir. Bu nedenle, herhangi bir elektrik tesisindeki generatörün terminal geriliminin her an değiştiği söylenebilir. Bu nedenle, generatörün terminal geriliminin anlık olarak sabit kalması için, uyartım akımı, kapalı döngü kontrol sistemiyle ayarlanmalıdır. Bu görev, uyartım kontrol sistemlerinin bir parçası olan ve Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR) sistemleri olarak adlandırılan yapı tarafından gerçekleştirilir. Bu yapı aynı zamanda, reaktif gücün regülasyonundan sorumludur. AVR, uyartım kontrol döngüsünde terminal gerilimi hatasını kontrol girişi olarak kullanmaktadır. Bu fark sıfır olana kadar alan akımı dolayısıyla generatör çıkış gerilimini sürekli olarak ayarlamaktadır (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Faiz, Shahgholian ve Arezoomand, 2007).

Ulusal elektrik şebekesi güç sisteminde, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi her generatör için yük frekansı kontrolü (LFC) ve otomatik gerilim regülatörü (AVR) kurulur. Bu şemanın basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 3.2'de blok verilmiştir. Burada, türbin yerine daha

genel anlamda bir hareket kaynağını ifade eden ana tahrik sistemi kullanılmaktadır. Ana tahrik sistemi literatürde *prime mover* olarak da bilinmektedir.



Şekil 3.1. Buhar güçlü bir LFC ve AVR şematik diyagramı (Saadat, 1999)



Şekil 3.2. Senkron makine governor ve AVR blok diyagramı (Law, 2001)

Denetleyiciler, belirli bir çalışma koşuluna göre ayarlanır ve yük talebindeki küçük değişiklikleri gözeterek, frekans ve gerilim büyüklüğünü belirtilen sınırlar dâhilinde tutmaya çalışır. Aktif gücündeki ufak değişiklikler esasında rotor açısındaki ve dolayısıyla frekanstaki değişikliklere bağlıdır. Reaktif güç de esas olarak generatörün uyartılması ile uçlarında oluşan gerilimin büyüklüğüne bağlıdır. Uyartım sistemi zaman sabiti, ana tahrik sistemi zaman sabitinden çok daha küçüktür ve geçici bozunumu çok daha hızlıdır ve LFC

dinamiğini etkilemez. Dolayısıyla, LFC döngüsü ve AVR döngüsü arasındaki karşılıklı bağlantı ihmal edilebilir. Sonuç olarak, yük frekansı ve uyartım gerilimi kontrolü bağımsız olarak analiz edilmektedir (Saadat, 1999).

3.1.1. Yük frekansı kontrolü

LFC'nin çalışma hedefleri, yükü generatörler arasında bölmek için makul derecede uniform frekansı korumak ve bağlantı hattı¹ değişim programlarını kontrol etmektir. Bu noktada bağlantı hattı ile iletim hattı arasındaki farka değinmek gerekir. Bağlantı hattı, iki veya daha fazla güç santrali arasında bağlantı noktası veya basitçe bir güç şebekesidir. İletim hattı ise, elektrik üretim tesislerinden trafo merkezlerine elektrik enerjisi aktaran yüksek gerilim hattıdır. Frekans ve bağlantı hattı aktif gücündeki değişim, rotor açısındaki değişimin δ , yani düzeltilecek olan $\Delta\delta$ hatasının bir ölçüsü olarak algılanır. Hata sinyali; yani frekans sapması (Δf) ve güç sapması (ΔP_{tie}), yükseltilir, karıştırılır ve tork artışı talep etmek için ana tahrik sistemine gönderilen aktif bir güç sinyali olan ΔP_v 'ye dönüştürülür. Bu nedenle, ana tahrik sistemi, Δf ve ΔP_{tie} değerlerini belirtilen tolerans içinde değiştirecek olan ΔP_g miktarı kadar bir değişimi generatör çıkışında meydana getirilmektedir (Saadat, 1999: 528).

Bir kontrol sisteminin analizindeki ve tasarımındaki ilk adım, sistemin matematiksel modellenmesidir. En genel iki metot, transfer fonksiyonu ve durum değişkeni yaklaşımlarıdır. Transfer fonksiyonu ve doğrusal durum denklemlerini kullanmak için sistem doğrusal hale getirilmelidir. Sistemi betimleyen matematik denklemlerini doğrusal hale getirmek için öngörülen varsayımlar ve yaklaşımlar yapılır ve sistem bileşenlerinin her biri için bir transfer fonksiyonu modeli elde edilmektedir.

Generatör ve yük modeli

Bir güç sistemindeki yük, çeşitli elektrikli cihazlardan oluşmaktadır. Akkor telli aydınlatma sistemleri ve ısıtma yükleri gibi dirençli yükler için elektrik gücü, frekanstan bağımsızdır. Motor yükleri frekans değişikliklerine duyarlıdır. Şebekede endüktif ve omik yükler birlikte bulunabildiğinden bu tür kompozit yüklerin frekans değerine ne kadar hassasiyeti olduğu, sürülen cihazların hız-yük karakteristiklerine bağlıdır ve bu ilişki Eş. 3.1 ile bulunur.

¹ tie-line

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D_r \Delta \omega \quad (3.1)$$

Burada,

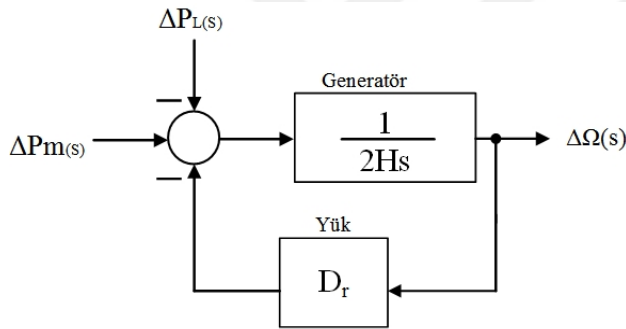
ΔP_m : Mekaniksel güç çıkışını

ΔP_L : Frekans değerine duyarsız yük değişimini

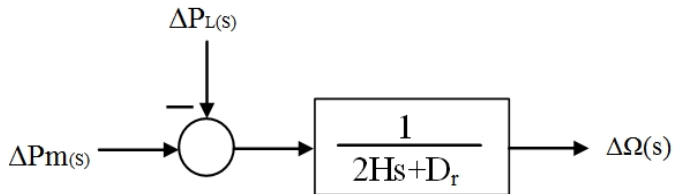
$D_r \Delta \omega$: Frekans değerine duyarlı yük değişimini

D_r : Yük değişimi yüzdesinin, frekans değişimi yüzdesine oranı göstermektedir.

Şekil 3.3'te, generatör ve yük modelinin oluşturduğu blok diyagram görülmektedir. Yük değişimi yüzdesinin, frekans değişimi yüzdesine bölünmesi “ D_r ” olarak ifade edilir. Bu basit geri besleme bloğu Şekil 3.4'teki gibi düzenlenebilir.



Şekil 3.3. Generatör ve yük blok diyagramı

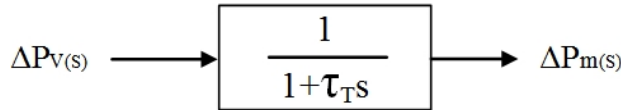


Şekil 3.4. Sadeleştirilmiş generatör ve yük blok diyagramı

Ana tahrik modeli

Generatörün mekanik güç kaynağı dizel motorlar veya buhar, gaz, su ve rüzgâr türbinleri gibi bir ana tahrik sistemidir. Tüm ana tahrik sistemleri benzer şekilde davranırlar. Onlardan çekilen güç arttıkça, dönme hızı azalmaktadır. Genel olarak, devir sayısındaki bu düşüş doğrusal değildir. Ancak, governor güç talebinin artmasıyla bu düşüşü doğrusal hale

getirmektedir (Kiameh, 2002: 31.19). Eğer ana tahrik sistemi için bir buhar türbini modeli düşünülmüş ise, mekanik güç çıkışındaki değişikliği (ΔP_m) buhar valfi konumundaki değişiklikle (ΔP_v) ilişkilendirilmektedir. Farklı türbin türlerinin farklı karakteristikleri bulunmaktadır. Tekrar ısıtmasız buhar türbini için en basit ana tahrik sisteminin modeli yaklaşık olarak tek bir zaman sabiti τ_T ile gösterilebilir. Bu zaman sabiti, 0,2 saniye ile 2 saniye aralığındadır (Saadat, 1999: 531). Şekil 3.5'te ana tahrik sistem modeli verilmiştir.



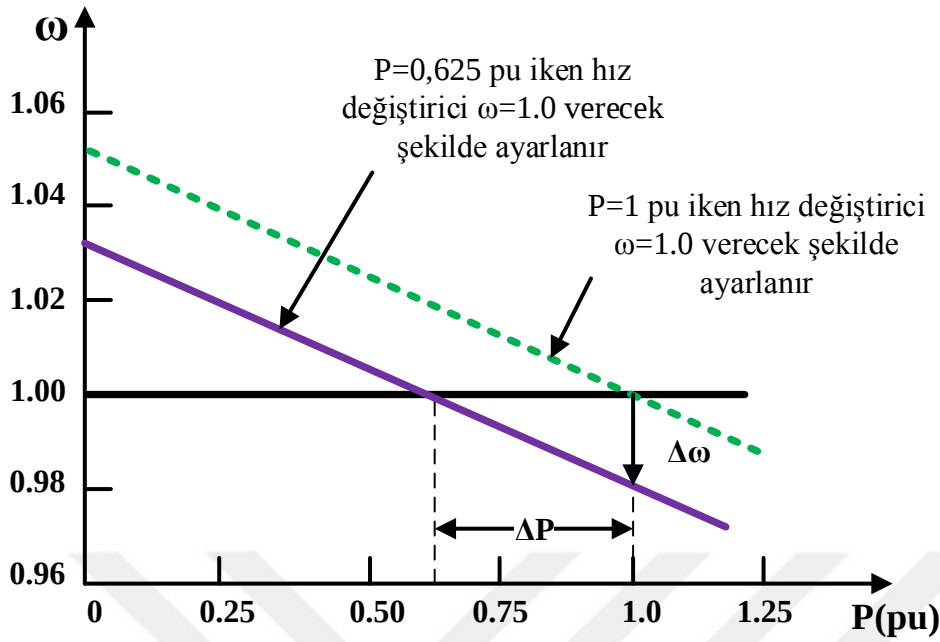
Şekil 3.5. Ana tahrik sistem modeli blok diyagramı

Governor modeli

Generatörün elektriksel yükü aniden artırılırsa, elektriksel gücü mekanik güç girişini aşmaktadır. Bu güç eksikliği, dönen sistemde depolanan kinetik enerji ile karşılanmaktadır. Kinetik enerjideki azalma, türbin yani ana tahrik sistemi devir sayısının ve dolayısıyla da generatör frekans değerinin düşmesine neden olmaktadır. Devir sayısındaki değişim governor tarafından algılanmakta ve devir sayısını yeniden kalıcı duruma getirmek için mekanik güç çıkışını değiştirmek üzere ana tahrik sistemi (buhar türbinini için valfi) ayarlamaktadır.

Genel olarak, devir sayısındaki bu düşüş doğrusal değildir. Ancak, governor güç talebinin artmasıyla meydana gelen bu düşüşü, doğrusal hale getirerek istikrarlı bir çalışma sağlamaktadır. Dolayısıyla governorlar, yük arttıkça devir sayısının düşmesine izin verecek şekilde tasarlanırlar ve senkron generatörlerin paralel çalışmasına olanak tanırırlar². Böylece yükler; generatörler arasında, güç oranlarına orantılı olarak paylaşılmaktadır (Kiameh, 2002: 31.19, 31.21). Bu durum, özellikle değişik karakterli generatörlerin bağlanması için önemlidir (Peşint, 1975: 161, 224). Governor için kalıcı durum devir karakteristiği Şekil 3.6'da gösterilmiştir (Saadat, 1999: 532, 533).

² Bu işlem droop speed kontrol yani devrilmeye karşı hız kontrolü olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.6. Governor kararlı-durum hız karakteristiği (Saadat, 1999)

$$R = \frac{\Delta\omega}{\Delta P} \quad (3.2)$$

Burada;

R : Hız regülasyonunu

$\Delta\omega$: Hız sapmasını

ΔP : Aktif güç değişimini

göstermektedir.

Eğrinin eğimi, governor hareketi sonucundaki hız regülasyonu sabiti R ile gösterilir ve generatörün frekans değişimine duyarlılığını nicelleştirir. Per-unit cinsinden, Hz/MW olarak ifade edilebilir. Frekans geri besleme döngüsünün kazancı devrilme (droop) olarak da adlandırılır ve $1/R$ 'dir. Governor için sıfırdan tam yüke kadar % 5-6 oranında bir hız regülasyonu vardır. Eş. 3.3 ile hesaplanan ΔP_g , referans güç ve çıkış gücü arasındaki farktır. ΔP_{ref} referans ayar noktasıdır. $\Delta P_g(s)$ yani s -düzlemi ile gösterimi Eş. 3.4'te verilmiştir. Frekans değişimi $\Delta\Omega(s)$, $\Delta f(s)$ veya $\Delta\omega(s)$ güç sistemi çıkışını s -düzleminde tanımlamak için kullanılabilir. Buhar valfi pozisyon komutu ΔP_v , doğrusal bir ilişki varsayarak ve basit bir zaman sabiti (τ_g) düşünerek s -düzleminde Eş. 3.5 ile bulunur. Eş. 3.4 ve Eş. 3.5'teki eşitlikler, Şekil 3.7'deki bir buhar türbini için governor sistemini temsil edilmektedir (Saadat, 1999: 533).

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta \omega \quad (3.3)$$

Burada;

ΔP_g : Referans güç ve çıkış gücü arasındaki farkı

ΔP_{ref} : Generatör referans gücü

$\Delta \omega$: Hız sapması

R : Hız regülasyonu

göstermektedir.

s-düzleminde;

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \Omega(s) \quad (3.4)$$

$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1+\tau_g s} \Delta P_g(s) \quad (3.5)$$

Burada;

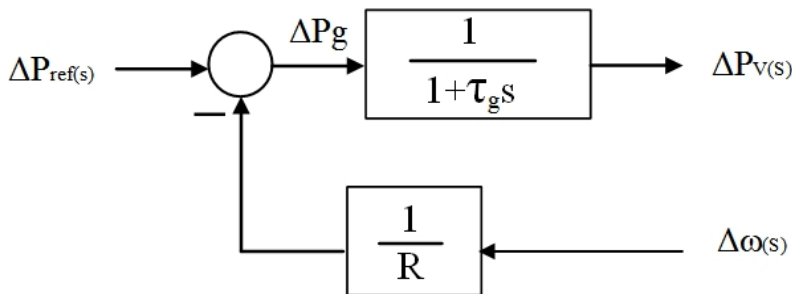
$\Delta \Omega(s)$: s-düzleminde frekans sapması

$\Delta P_{ref}(s)$: s-düzleminde generatör referans gücü

$\Delta P_v(s)$: s-düzleminde buhar valfi konumundaki değişikliği

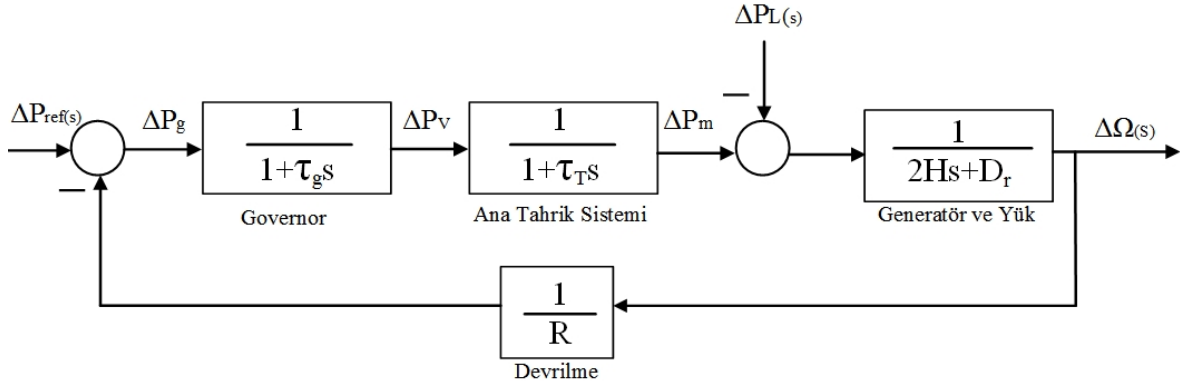
τ_g : Governor zaman sabitini

göstermektedir.



Şekil 3.7. Buhar türbini için hız governor sisteminin blok diyagram gösterimi

Şekil 3.8’de, governor, ana tahrik sistemi makine dinamikleri (generator ve yük) bileşenlerine ait bireysel transfer fonksiyonları ile oluşturulan LFC blok diyagramı verilmiştir (Saadat, 1999: 534).



Şekil 3.8. İzole edilmiş güç sisteminin LFC blok diyagramı

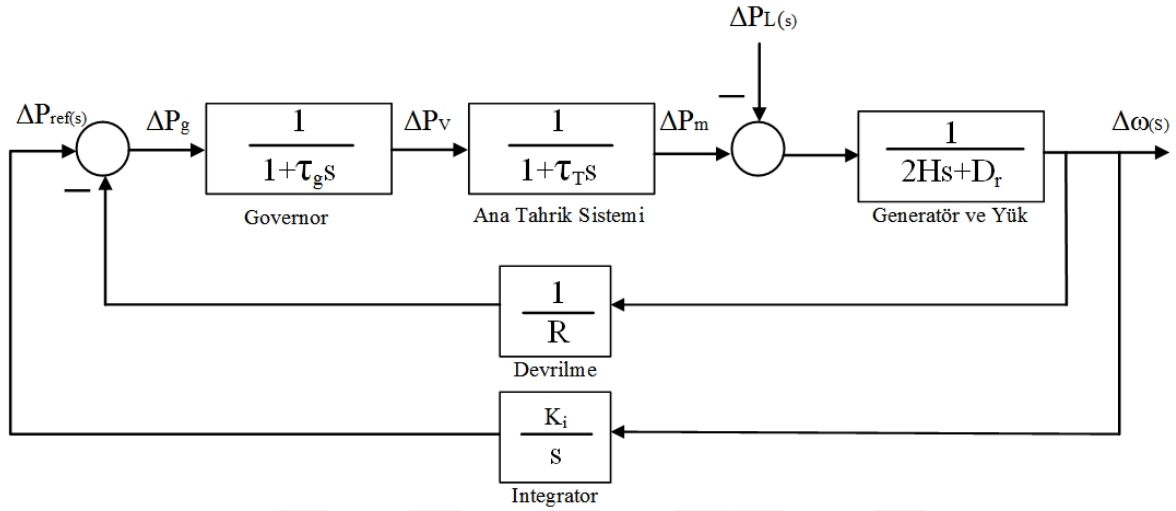
3.1.2. Otomatik kazanç kontrolü

Sistemin yükü arttığında, governor ana tahrik sisteminin girişini yeni yüke göre ayarlamadan önce ana tahrik sisteminin hızı düşer. Hız değerindeki değişim azaldığından hata sinyali daha da küçülür. Ancak sabit hız istenen değer olmayacaktır ve bir kayma (offset) olacaktır. Hız veya frekansı anma değerine geri getirmenin ve bu kalıcı durum hatasını gidermenin bir yolu integratör eklemektir. İntegral ünitesi bir süre boyunca ortalama hatayı izler ve kaymanın üstesinden gelecektir. Bir sistemi kendi belirlediği noktaya geri getirebilme yeteneğinden dolayı, integral faaliyeti, sıfırlama faaliyeti olarak da bilinir. Böylece, sistem yükü sürekli değiştiğinden, frekansı anma değerine geri getirmek için üretim otomatik olarak ayarlanır. Bu düzen, otomatik kazanç kontrolü olarak bilinmektedir. AGC’nin rolü sistemler, istasyonlar ve generatörler arasında yükü paylaştırarak, maksimum ekonomi sağlamak ve makul oranda uniform frekansı korurken, hatlar arası planlanan güç değişimlerini doğru bir şekilde kontrol etmektir. Tabii ki sistem kararlı olduğunda ancak kalıcı durum elde edilebilir. Büyük geçici bozukluklar ve acil durumlarda, AGC bypass edilmektedir ve diğer acil kontroller uygulanmaktadır (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011; Saadat, 1999).

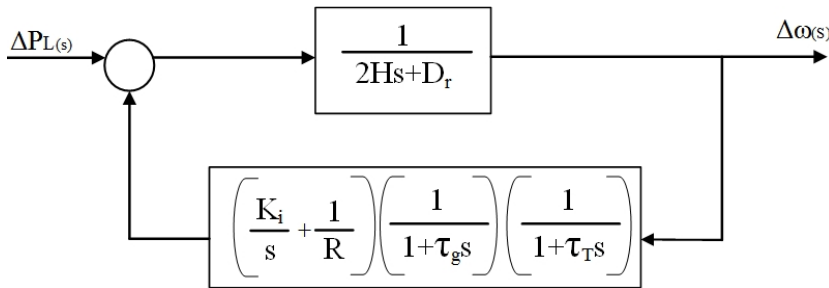
AGC, tek bir alan³ sisteminde ve birincil LFC döngülü bir ulusal elektrik şebekesi sisteminde düşünüldüğünde, sistem yükündeki herhangi bir değişiklik, governor hız regülasyonuna (R) bağlı olarak, bir kalıcı durum frekans sapmasına sebep olacaktır. Bu frekans sapmasını, Şekil

³ Çok bölgeli AGC için (Saadat, 1999: 545) kaynağına başvurulabilir.

3.9’da görüldüğü gibi, bir integral ünitesinden oluşan ikincil bir döngüyü eklenerek sıfıra indirmek için bir sıfırlama yani reset faaliyeti gereklidir. İntegral kontrolün kazancı, sistemin geçici durum cevabı tatminkâr bir seviyede olacak şekilde ayarlanmalıdır. Blok diyagramdaki paralel kollar sadeleştirilir ise Şekil 3.10’daki eş değer blok diyagram elde edilmektedir.



Şekil 3.9. İzole edilmiş güç sistemi için AGC blok diyagramı.

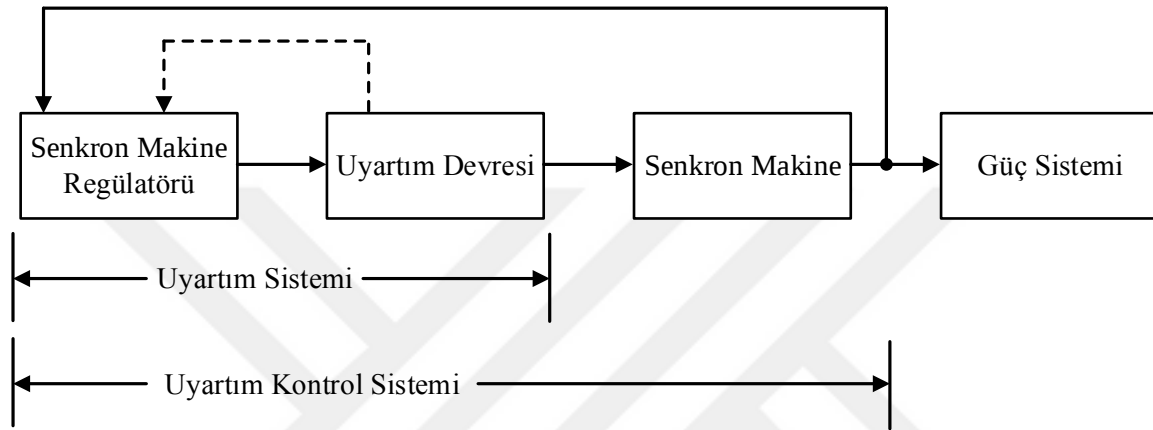


Şekil 3.10. İzole edilmiş güç sistemi için eşdeğer AGC blok diyagramı.

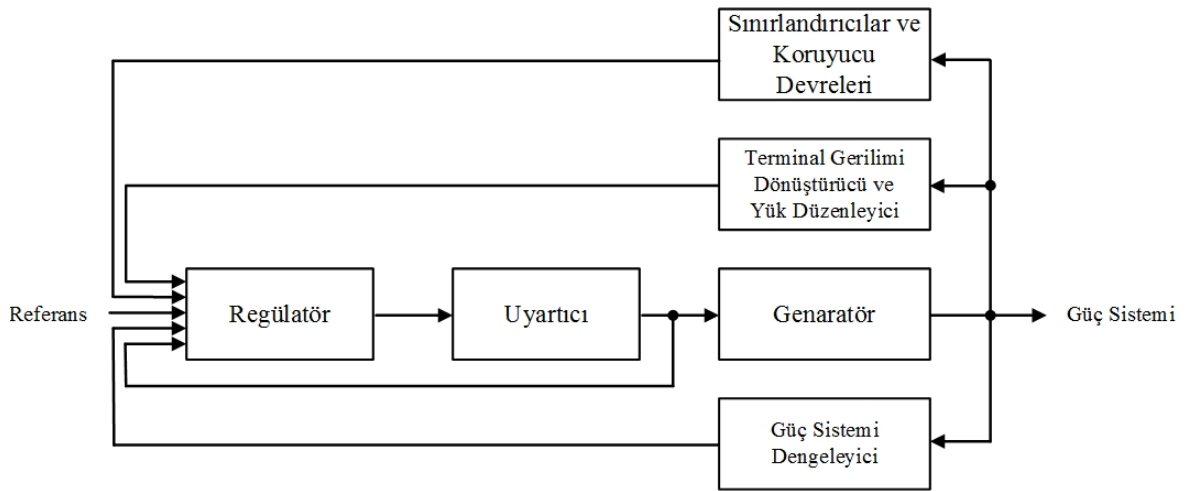
3.1.3. Uyarım kontrol sistemi

Uyarım sistemi ve uyarım kontrol sistemi kavramları Şekil 3.11’den daha iyi anlaşılmaktadır. Uyarım sisteminin performans gereksinimleri olarak da nitelendirebileceğimiz iki işlevi vardır. Bunlardan ilki, senkron generatörün alan sargısına DA elektrik enerjisi yani uyarım sağlamak ve dolayısıyla da, generatör terminallerinde anma terminal gerilimi değerini sağlamaktır. Terminal gerilimi sabit tutmak için gerekli uyarım miktarı generatör yükünün bir fonksiyonudur. Generatör yükü arttıkça, uyarım

akımı değeri artar. Endüktif yükler, birim PF yüklerinden (omik) daha fazla uyartım gerektirir. Kapasitif yükler, PF yüklerinden (omik) daha az uyartım gerektirirler (İnternet: Whitby Hydro Energy Corporation). İkincisi de, güç sisteminin başarılı bir şekilde çalışması için gerekli olan kontrol ve koruyucu işlevleri gerçekleştirmektir. Generatör kontrol sisteminin temelini oluşturur.



Şekil 3.11. Uyartım kontrol sisteminin basit şeması (IEEE Std 421.1™-2007, 2007)



Şekil 3.12. Uyartım kontrol sistemi unsurları

Bir uyartım kontrol sistemi oluşturan unsurlar, genellikle Şekil 3.12'deki gibidir.

- Uyartıcı: Generatör alan sargılarına DA güç uygular.
- Regülatör: Giriş kontrol sinyallerini, uyartıcının kontrolü amacıyla uygun seviye ve biçime sokmak için işler ve kuvvetlendirir. Uyartıcı, otomatik gerilim regülatörü (AVR) tarafından kontrol edilir. AVR kalıcı durum çalışması sırasında çok etkilidir. Ani

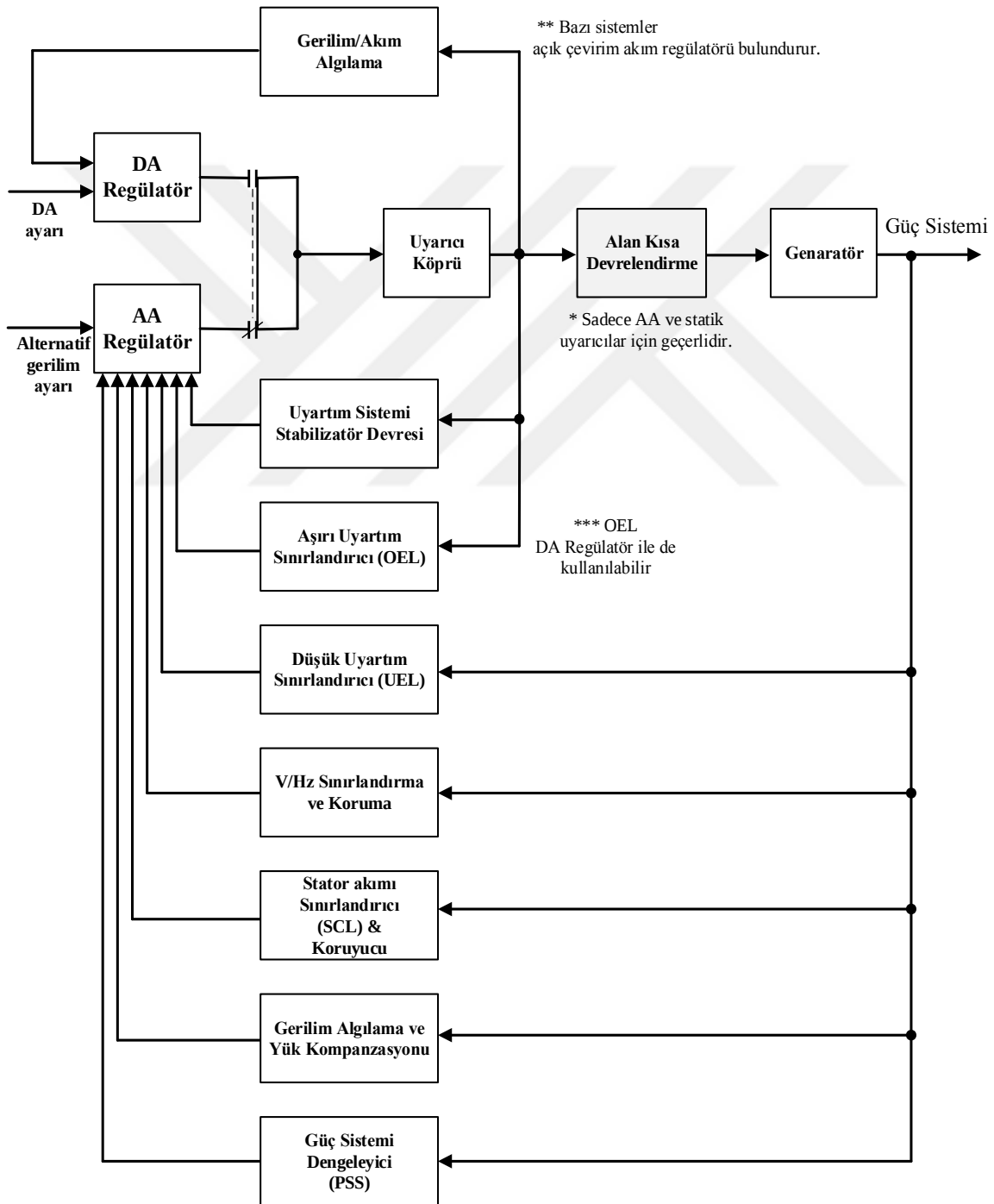
bozulmalarda, AVR güç salınımlarını sönümlemede negatif bir etkiye yol açabilir çünkü AVR generatördeki alan akımını değişikliğe zorlar. Bunu ortadan kaldırmak için ek bir kontrol döngüsü (PSS) getirilebilir.

- Terminal Gerilim Dönüştürücü ve Yük Düzenleyici: Generatör terminal gerilimini algılar, doğrultur, DA niceliğe filtreler ve referans ile karşılaştırır. İstenirse, gerilimi uzak bir noktada tutmak için yük düzenleme sağlanabilir.
- Güç Sistemi Dengeleyici (Power System Stabilizer = PSS): Güç sistemi salınımlarının sönümlenmesi için regülatöre ek bir giriş işareti sağlar. Bu salınımların yetersiz sönümlenmesi, güç iletimi becerisini sınırlayabilir.
- Sınırlayıcılar ve Koruyucu Devreler: Uyarıcı ve generatör kapasite limitlerinin aşılmadığından emin olur. Sınırlandırıcıların ana amacı, koruma cihazlarını, sistemi devreden çıkarabilecek eylemlerden uzak tutup, generatörün çalışma noktasını güvenli ve kararlı çalışma sınırları içinde tutmaktır (Kanjilal, Patra, Krishn ve Bhattacharya, 2012).

Geçmişte, bir analog uyarım sistemi kullanarak generatör tepkisini şekillendirmek, gerilim regülatörü kararlılık devresinin kontrol döngülerindeki potansiyometreleri ayarlamak veya kondansatörleri ve dirençleri ekleme veya silme meselesiydi. Ayarlamalar çok zaman alıcı olabiliyordu, çünkü değişiklikler çoğu kez uyarım sistemini birçok kez açıp kapamayı içermekteydi. Günümüzde, sayısal uyarım sistemi, analog sistemin zorlu parametrelerine kolayca erişme olanağı sağlamaktadır. Çoğu sayısal denetleyicinin kalbi, uyarım sistemi için çeşitli kontrol işlevlerini de gerçekleştiren gömülü mikroişlemcilerdir. Bu kontrol fonksiyonları, otomatik gerilim regülatörü (AVR), elle gerilim regülatörü (MVR), VAR/güç faktörü kontrolü ve generatörü, makinenin güvenli çalışma sınırları dâhilinde kontrol etmek ve korumak için uyarı sınırlayıcıları içermektedir (Schaefer ve Kim, 2002).

Sayısal uyarım sisteminin temel fonksiyonu uyarım için gerekli doğru akımı generatör uyarım sargısına sağlamaktır. Ayrıca, uyarım sistemi, alan gerilimini ve dolayısıyla alan akımını kontrol ederek tatmin edici bir güç sistemi performansı için gerekli olan kontrol, sınırlandırma ve koruma işlevlerini yerine getirir. Herhangi bir sistem, özel uygulama ve uyarım türüne bağlı olarak, bu işlevlerin bazılarını veya tümünü içerebilir. Kontrol fonksiyonu gerilim, akım ve reaktif güç akışının kontrolü ve sistem kararlılığının arttırılmasını içermektedir. Sınırlandırma işlevinin normal çalışma koşullarında genellikle herhangi bir rolü yoktur. Bu sınırlayıcılar, sadece senkron makine çalışma kabiliyetinin ötesine itildiğinde rol almaktadır. Ancak, sınırlayıcılar koruma sisteminin yerini almaz. Aşırı

geçici koşullar altında, belirli niceliklerin ayarlanan sınırlarını aşmasını engelleyerek, koruma sisteminin gereksiz yere açılmasını önler. Sınırlandırıcılardan herhangi biri başarısız olursa, o zaman koruyucu fonksiyonlar, uygun bileşenleri ya da birimi hizmetten çıkararak, uyarım sisteminin ve diğer ekipmanların kapasite sınırlarının aşılmamasını sağlamaktadır. Şekil 3.13, bu fonksiyonların doğası ve birbirleri ile olan arabirim şeklini göstermektedir (Prajapati, Patel, Chandwani ve Patel, 2013).



Şekil 3.13. Uyarım sistem kontrolü ve koruyucu devreleri

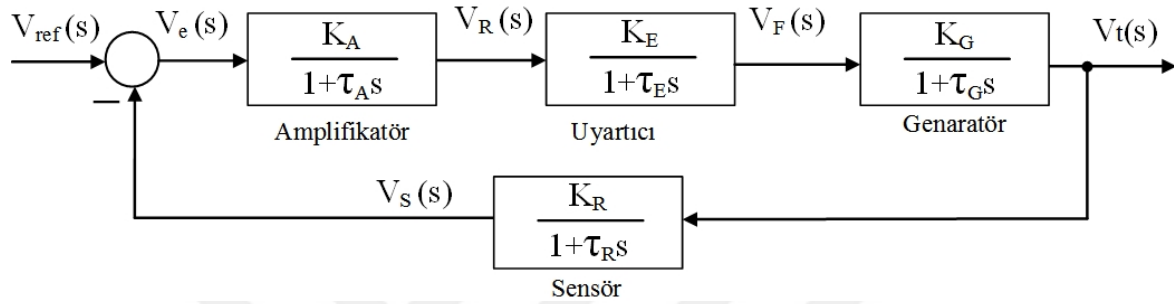
Elle (Manuel) gerilim regülatörü (MVR) olarak da bilinen DA regülatörün temel fonksiyonu, generatör alan gerilimini sabit tutar. AA regülatörün arızalı olduğunda, test ve devreye alma için kullanılmaktadır. AA regülatörün temel fonksiyonu, generatör stator gerilimini muhafaza etmektir. Buna ek olarak, sınırlandırıcılar ve koruyucular gibi diğer yardımcı unsurlar AA regülatörü üzerinden hareket ederler. AA regülatörü modern sistemlerde otomatik gerilim regülatörü (AVR) olarak adlandırılmaktadır. Kısaca, AVR döngüsü, terminal gerilimini kontrol etmek üzere alan gerilimini (akımını) ayarlamak için terminal gerilimi hatasını kullanmaktadır. Alan akımı ve böylece de generatör çıkış gerilimi, bu fark sıfıra varana kadar sürekli ayarlanmaktadır (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Kundur, 1994).

Elle gerilim regülasyonu MVR ile terminal gerilimin %0-%100 ayarlanması mümkündür. Terminal geriliminin anma değerinin %90'ı geçildiğinde AVR devralır ve %100 olduğunda ise yüklenmeye hazırdır. AVR terminal geriliminin %90 -%110 aralığında kapalı çevrim denetimi yapar. Bu aralığın dışına çıkıldığında elle gerilim regülasyonu devreye girer. AVR devrede iken geçerli olan son parametreler bu geçişi için otomatik takip özelliği ile elle ayarlara aktarılmalıdır (IEEE Std 421.4™-2014, 2014). Devralma modelindeki OEL kontrolü aktif olduğunda, birincil kontrol düzenleme işlevini MVR yapmaktadır (Murdoch, Boukarim, D'Antonio ve Lawson, 2001).

3.1.4. Basit AVR modeli

AVR sistemleri uyartım kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Generatörün reaktif gücünü kontrol etmenin birincil yolu, uyartımın AVR ile kontrolüdür. AVR'nin bir diğer görevi de normal çalışma şartları altında, farklı yük seviyeleri için generatör terminal gerilimini sabit tutmaktır. Generatörün reaktif gücündeki artışa, terminal gerilimi büyüklüğünde bir düşüş eşlik eder. Gerilim büyüklüğü bir potansiyel transformator (PT) aracılığıyla algılanır. Eski sistemlerde tek bir fazın gerilimi izlenirken yeni sistemlerde bu üç fazın da gerilim seviyesi izlenir. Bu noktada, herhangi bir fazın bireysel olarak aşırı düşük veya aşırı yüksek olması gözetilmelidir. PT ile ölçülen gerilim değeri, referans ile karşılaştırılarak hata sinyali elde edilir. Amplifiye edilen hata sinyali, uyartım alanını kontrol eder ve uyartım terminal gerilimini artırır. Dolayısıyla, generatör alan akımı artmakta ve böylece, üretilen elektromanyetik alanı (emf) artırmaktadır. Terminal gerilimini arzu edilen değere yükselterek, reaktif güç üretimi yeni bir dengeye ulaştırılmaktadır. En basit AVR

blok diyagramı, Şekil 3.14'te görüldüğü gibi amplifikatör, uyarıcı, generatör ve sensör olmak üzere dört ana modelden oluşmaktadır. Çizelge 3.1'de ise bu doğrusal hale getirilmiş modellerin her biri için parametre sınırları ve anma değerleri gibi bilgiler verilmiştir. Doğrusal olmayan durumlar gerekli ise, amplifikatörden sonra eklenebilecek amplifikatör doyma (saturasyon) bloğu ile bu sağlanabilir (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Bayram, Sefa ve Balci, 2016; Saadat, 1999: 555; Law, 2001: 43, 70).



Şekil 3.14. Kontrolsüz, basit AVR blok şeması

Çizelge 3.1. AVR transfer fonksiyonları

Model	Transfer Fonksiyonu	Parametre Sınırları	Nominal Değerler
Amplifikatör	$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s}$	$10 \leq K_A \leq 400$ $0,02 \leq \tau_A \leq 0,1$	$K_A=10$ $\tau_A=0,05$
Uyarıcı	$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s}$	$10 \leq K_E \leq 400$ $0,5 \leq \tau_E \leq 1$	$K_E=10$ $\tau_E=0,5$
Generatör	$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s}$	$0,7 \leq K_G \leq 1$ $1 \leq \tau_G \leq 2$	$K_G=0,8$ $\tau_G=1,5$
Sensör	$\frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s}$	$0,01 \leq \tau_R \leq 0,06$	$K_R=1$ $\tau_R=0,05$

Amplifikatör modeli

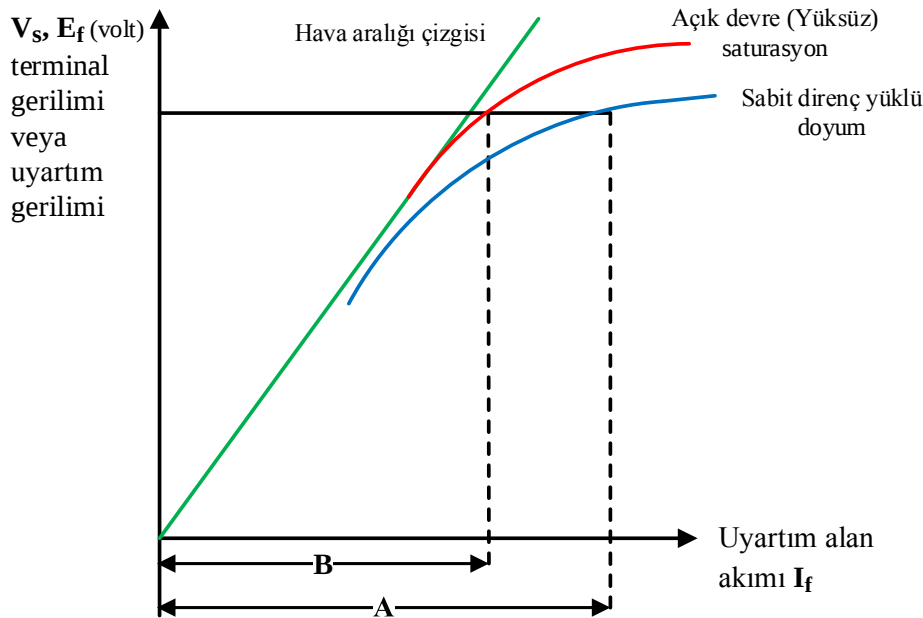
Uyartım sistemi amplifikatörü bir manyetik amplifikatör, döner amplifikatör veya modern elektronik amplifikatör olabilir. Amplifikatör modeli, K_A kazancı ve τ_A zaman sabiti ile

temsil edilir. Amplifikatör zaman sabiti çok düşüktür ve genelde ihmal edilir (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Law, 2001: 45; Saadat, 1999: 555-556).

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1+\tau_A s} \quad (3.6)$$

Uyartıcı modeli

Şekil 3.15’te görüldüğü gibi, uyartım devresinin çıkış gerilimi manyetik devredeki doyma etkisinden dolayı alan geriliminin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, terminal gerilim ile uyartım alan gerilimi arasında basit bir ilişki yoktur. IEEE öneri yayınlarında mevcut olan ve çeşitli derecelerde gelişmişliğe sahip pek çok model geliştirilmiştir. Modern uyartıcının makul bir modeli, büyük zaman sabitini dikkate alan ve doyma veya diğer doğrusal olmayanları göz ardı eden doğrusal bir modeldir. En basit haliyle, modern bir uyartıcının transfer fonksiyonu, tek bir zamanlı sabiti τ_E ve bir kazanç K_E ile temsil edilebilir. Modern uyartıcıların zaman sabiti oldukça düşüktür (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Law, 2001: 44, 45; Saadat, 1999: 556).



Şekil 3.15. Senkron generatörün uyartım akımına bağlı çalışma karakteristik eğrisi

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1+\tau_E s} \quad (3.7)$$

$$S_E = f(E_f) = \frac{A-B}{B} = \frac{A}{B} - 1 \text{ (Law, 2001)} \quad (3.8)$$

Generatör modeli

Senkron makinede üretilen elektromanyetik alan (emf), makine manyetizasyon eğrisinin bir fonksiyonudur ve makinenin terminallerindeki gerilim, generatör yüküne bağlıdır. Generatör terminal geriliminin, generatör alan gerilimine ilişkin transfer fonksiyonu, doğrusal hale getirilmiş modelde K_G kazancı ve τ_G zaman sabiti ile temsil edilir. Bu sabitler yüke bağlıdır (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Law, 2001: 46; Saadat, 1999: 557).

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1+\tau_G s} \quad (3.9)$$

Sensör modeli

Potansiyel transformatör üzerinden terminal gerilimi algılanması için Eş.3.10 ile verilen sensörün birinci dereceden transfer fonksiyonu için τ_R zaman sabiti oldukça düşüktür (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Law, 2001: 47; Saadat, 1999: 557).

$$\frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1+\tau_R s} \quad (3.10)$$

Şekil 3.14'teki kontrolsüz, basit AVR blok şeması için açık ve kapalı çevrim transfer fonksiyonları sırasıyla Eş. 3.11 ve Eş. 3.12'de verilmiştir.

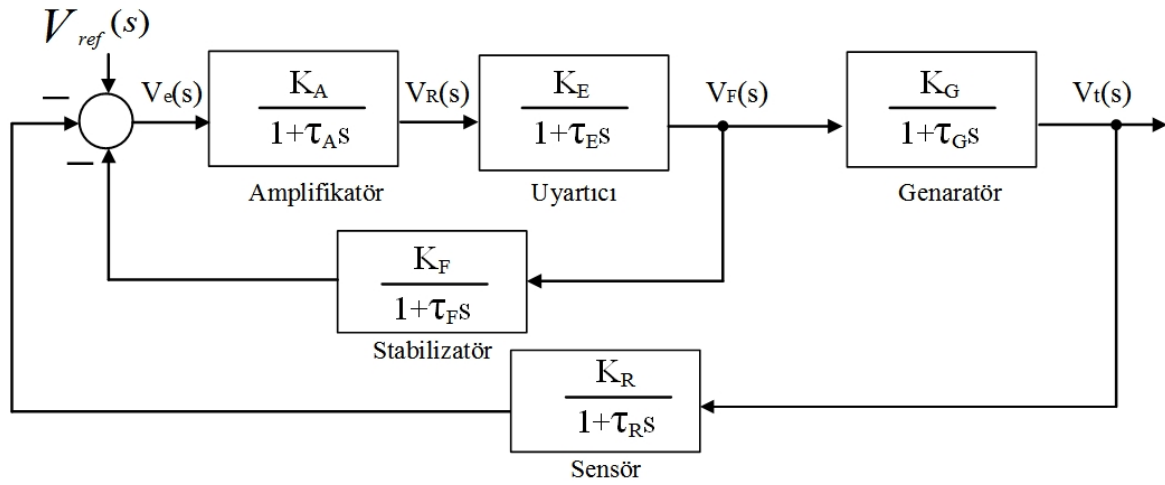
$$KG(s)H(s) = \frac{K_A K_E K_G K_R}{(1+\tau_A s)(1+\tau_E s)(1+\tau_G s)(1+\tau_R s)} \quad (3.11)$$

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G K_R (1+\tau_R s)}{(1+\tau_A s)(1+\tau_E s)(1+\tau_G s)(1+\tau_R s) + K_A K_E K_G K_R} \quad (3.12)$$

3.1.5. Oran geri beslemeli uyarım dengeleme modeli

Kontrolsüz AVR modelinin geçici tepkisi tatmin edici seviyede değildir, çünkü olağanüstü salınımlıdır, çok büyük bir aşma ve uzun bir oturma süresi vardır. Dahası, çok küçük sayılamayacak bir kalıcı durum hatası vardır. Generatör açık devre iken, çok düşük kararlı

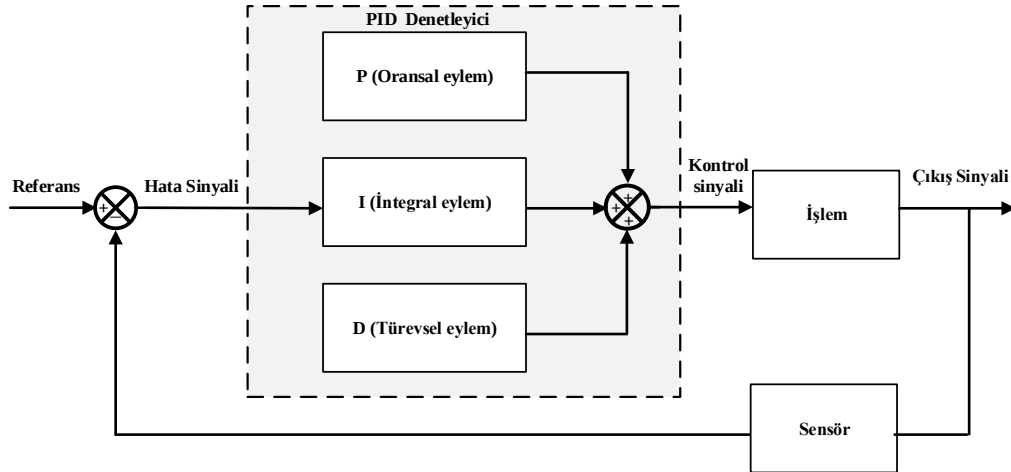
hal regülatör kazancı kullanılmadığı sürece, kontrol işlemi kararsızdır. Dinamik tepkiyi iyileştirmek için seri veya geri beslemeli bir dengeleme yapılabilir. Şekil 3.16’da gösterildiği gibi, AVR açık çevrim transfer fonksiyonuna sıfır ekleyecek bir geri beslemeli denetleyici ile stabilite artırılabilir. Bu türevsel geri bildirimdeki K_F kazancı ve τ_F zaman sabitinin uygun belirlenmesi ile tatminkâr bir adım cevabı sağlanabilir. Örnek hesaplamalar ve daha fazla ayrıntı için (Saadat, 1999: 558-564) incelenebilir. Fakat hala kalıcı durum hatası vardır (Saadat, 1999: 562-564) ve buna yönelik farklı AVR kontrol çözümleri, sonraki bölümde ele alınmıştır.



Şekil 3.16. Kompanze edilmiş AVR blok diyagramı

3.1.6. PID kontrollü uyartım dengeleme modeli

Günümüzde bulanık kontrol, sinir ağı kontrolü ve benzeri birçok gelişmiş kontrol yöntemi bulunmaktadır. Bunların AVR sistemi için kullanımını içeren birçok yayın yapılmıştır (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Erceg, Tusun ve Erceg, 2012; Sang-Hoon, Jae-Sung, Sang-Seuk, Su-Won ve Chung-Yuen, Sept. 2009; Khan, Yinliang ve Tahir, June 2015; McArdle M. G., April 2000). Denetleyiciler, uyartım sisteminin dinamik yanıtını iyileştirmek ve ayrıca kalıcı durum hatasını en aza indirmek veya ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Geniş bir yelpazedeki çalışma koşullarında sunduğu, dirençli performans ve basitliğinden dolayı, aralarında en çok bilinen ve en yaygın kullanılan metot PID’dir (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013).



Şekil 3.17. PID denetleyici sistemin kapalı döngü blok şeması

Şekil 3.17'deki PID transfer fonksiyonu sürekli s-düzlemindeki (Laplace operatörü) aşağıdaki denklemler ile tanımlanır.

$$G_{pid}(s) = p + i + d = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.13)$$

veya,

$$G_{pid}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (3.14)$$

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (3.15)$$

$$\tau_d = \frac{K_d}{K_p} \quad (3.16)$$

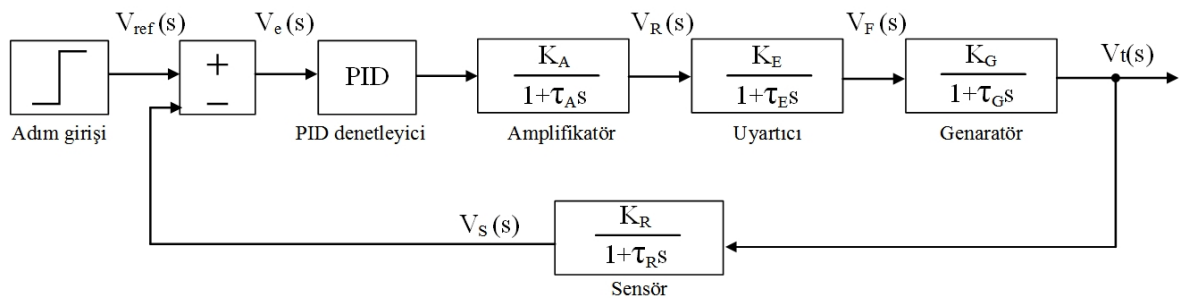
Burada, K_p , K_i ve K_d kazançları sırasıyla oransal, integral ve türevsel kazançları temsil etmektedir. τ_i , integral eylem zamanı veya sıfırlama zamanını temsil eder ve τ_d , türev işlem zamanını veya hız süresini temsil eder (Dos Santos, Sadowski ve Batistela, 2016; Shabib, Gayed ve Rashwan, 2010).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.17)$$

Bu bağlamda, zaman düzlemindeki PID denetleyicisi çıkışı Eş. 3.17'deki gibidir. Zaman düzleminde $u(t)$ ve $e(t)$, sırasıyla kontrol ve hata izleme sinyalleridir (Dos Santos, Sadowski ve Batistela, 2016).

P terimi, bir adım değişikliktan sonra, gerilimin yükselme oranını etkileyen oransal kazancı temsil etmektedir. I terimi, ilk gerilim aşımından sonra, generatör geriliminin yerleşim süresini etkileyen integral kazanımını temsil eder ve kalıcı durum hatasını azaltır. Son olarak D terimi, sistem bozulmalarından sonra izin verilen aşım yüzdesini etkileyen türev kazanımını temsil eder ve gerilim aşımı ne kadar düşükse, gerilim o kadar hızlı anma değerine geri gelir. Başka bir deyişle, sistemin geçici durum cevabını iyileştirir. Türev terimi, döner uyarım sistemleriyle birlikte kullanılır. Bu sistemlere göre çok daha hızlı tepki veren ana alan uyarım sistemleri için D terimi gerekli değildir (Schaefer ve Kim, 2002). Dolayısıyla, bu çalışmada için PI denetleyici kullanılmıştır. P ve I terimlerinin birleşik etkisi, generatör uyarım sisteminin istenen performansa ulaşma tepkisini şekillendirmektedir.

P, PI, PD ve PID kontrol uygulamaları yapılabilir. P denetleyici sadece bir parametresi olduğundan en basit denetleyicidir. Bu kontrolörün temel dezavantajı durağan durumda sapmadır. Kazanç artışı (yani regülatör parametre değeri artışı) bu farklılığı azaltır, aynı zamanda sistemin kararlılığını azaltır. PI denetleyici durağan durumdan sapmayı ortadan kaldırır. İntegral kazancı sistem dinamiklerini azaltırken, sistem kararlılığını azaltan faz gecikmesini artırır. Bu PI denetleyicinin dezavantajıdır. PID denetleyicide ek olarak bir türev elemanı vardır. Türev unsuru, uzaklaşma değişim hızına cevap verir, sistem dinamiklerini artırır ve integral unsurunun sebep olduğu yavaşlamayı telafi eder. Kazançları $K_p=1$, $K_i=0,25$ ve $K_d=0,28$ olan bir PID denetleyicili AVR sistemi Şekil 3.18'de verilmiştir.

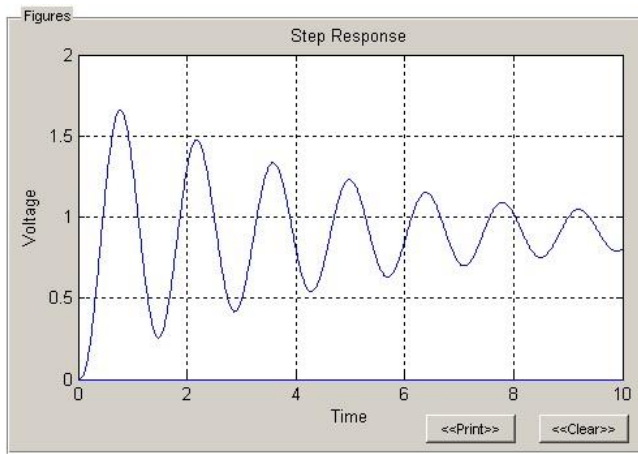


Şekil 3.18. PID kontrollü AVR blok diyagramı

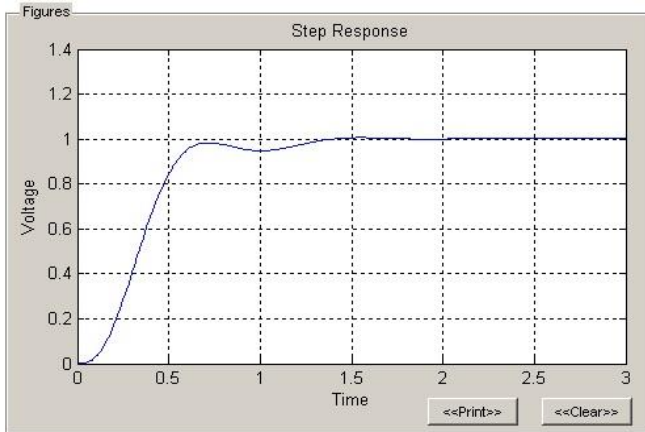
Amplifikatör, uyartıcı, generatör ve sensör parametreleri için Çizelge 3.1'de verilen nominal değerler kullanılmıştır. Şekil 3.19'da denetleyicisiz bir AVR'deki kalıcı durum hatası ve

geçici durum cevabının hiç de iyi olmadığı açıktır. Diğer taraftan, PID kontrollü bir AVR kullanıldığında, Şekil 3.20’de görüldüğü gibi geçici durum cevabı çok daha iyidir.

AVR, çıkış terminalinden RMS gerilim bilgisini kullanır. Bu bilginin filtre ve sinyal işleme için biraz zaman gecikmesi vardır. Zaman gecikmesinden dolayı, ani yük değişimi durumunda geleneksel PID kontrolörünün dinamik performansı düşer. Kontrol birimi kazancı yüksekse, sistemin dinamik yanıtı hızlıdır, ama biraz aşma ve salınım gösterebilir. Ancak, yavaş dinamik tepki ile düşük kontrol kazançlı iken sistem kararludur (Dong-Hee, Tae-Hyoung ve Jin-Woo, August 2008).



Şekil 3.19. Denetleyicisiz AVR adım cevabı



Şekil 3.20. PID denetleyicili AVR adım cevabı

Dinamik yanıtı ve sistem kararlılığını artırmak için PID kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında birçok yöntem kullanılmıştır. Doğrusal denetleyicilerin parametreleri, analitik veya deneysel yöntemler kullanılarak ayarlanabilir. Parametrelerin ayarlaması için

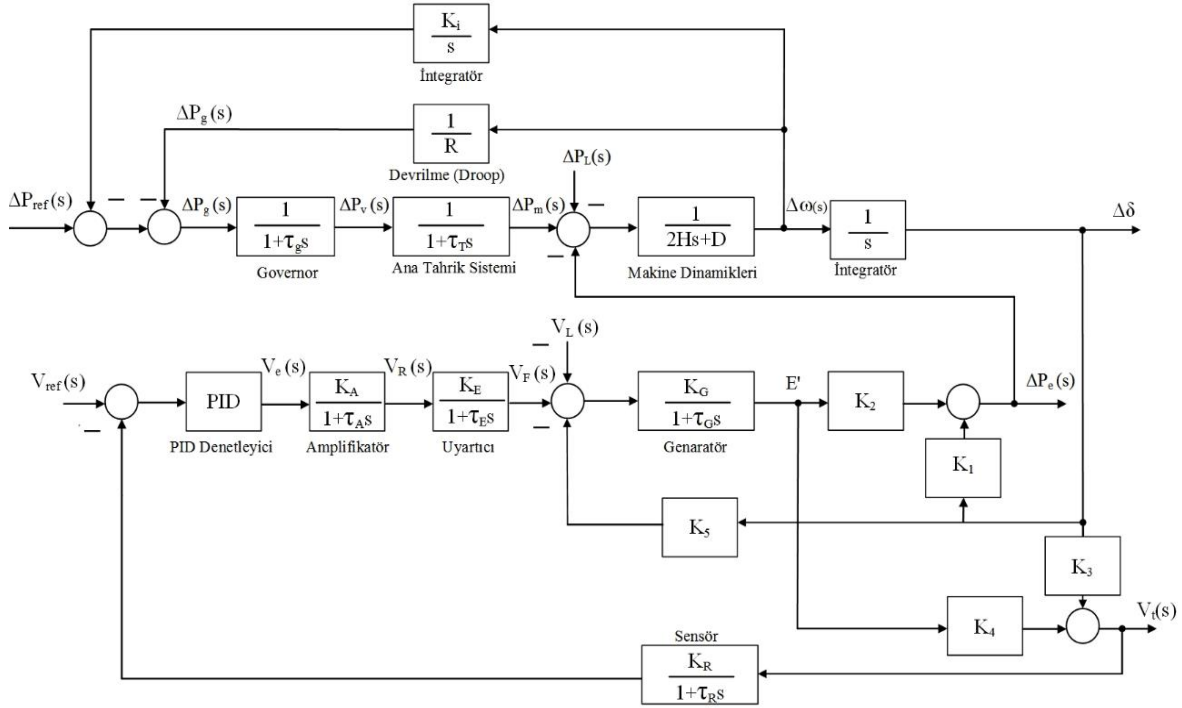
analitik yöntemlerin kullanımı, tüm regülasyon sisteminin matematiksel modelini gerektirir. Senkron generatör modeli doğrusal bir sistem olmadığından, sistemin doğrusallaştırılması gerekir. Bu şekilde ayarlanmış parametreler, çalışma noktası bölgesinde geçerlidir. Senkron generatör çalışma noktası değiştirilirse, parametreler yeniden ayarlanmalıdır. Ziegler-Nichols (Ziegler, Nichols ve Rochester, 1942) gibi deneysel yöntemler sistemin matematiksel modelini bilmeyi gerektirmez. Ancak, kalıcı durumda ve sadece deneyi gerçekleştirilen operasyon noktasının bölgesinde, en iyi parametreleri verir. Aynı zamanda, sistemin en iyi performansını elde etmek zordur ve tasarımcının en iyi performansı elde etmesi, tecrübesine bağlıdır (Bayram, Bülbül, Can ve Bayındır, 2013; Mallesham, Mishra ve Jha, 2009).

Doğrusal denetleyiciler kalıcı durumda, örneğin tek çalışma noktasında, senkron generatör çalışmasında iyi regülasyon özelliği verir. Uygulamada, senkron generatör senkronizasyonu, elektrik güç sisteminde kısa devre gibi senkron generatörün veya elektrik güç sisteminin geçici durumlarında, sistem kararlılığının muhafaza etmek önemlidir. Geçici durum sırasında kararlılığı sağlamak için, doğrusal olmayan modeller ve denetleyiciler ile çalıştırma gereklidir. Bu çeşit denetleyicilerin yapılması yakın zamanda geliştirilmiştir ve yenilerde yaygınlaşmaya başlamıştır. PID kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında daha karmaşık analiz sergileyen adaptif kontrol (Ritonja, 2015; Yan, Venayagamoorthy ve Corzine, 2012), sinir ağı tekniği (Venayagamoorthy and Harley , 1999), bulanık mantık (Senjyu, Gibo, and Uezato, 1992) ve nöronal bulanık sistem (Seng, Khalid ve Yusof, 1999) gibi birçok yapay zekâ (AI) tekniği sunulmuştur. Son zamanlarda, PID kontrolünün optimal tasarımını elde etmek için genetik algoritma (GA) ve parçacık yığın optimizasyonu (PSO) gibi evrimsel hesaplama teknikleri uygulanmış ve bazı yayınlarda birbirleri ile karşılaştırılmışlardır (Gaing, 2004; Shabib, Gayed ve Rashwan, 2010). Bu yapılar doğrusal regülasyondan daha karmaşık yapıdadırlar ama daha da geliştirilerek, uyarım sisteminin regülasyonunu iyileştirme potansiyeline sahiptirler (Hasanien, 2013).

3.1.7. AGC ve AVR sistemlerinin birleşimi

AVR ve AGC sistemleri Şekil 3.21'deki gibi birleştirilebilir. AVR ve AGC arasındaki zayıf bağlantı ilişkisi nedeniyle gerilim ve frekans ayrı ayrı regüle edilir. Doğrusallaştırılmış AVR ve AGC'nin bağlantı etkilerinin incelenmesi konusunda daha fazla ayrıntı için (Anderson ve Fouad, 1994) ve (Kundur, 1994) kullanılabilir. Bu incelemelere göre; aktif yani gerçek

elektrik gücündeki (ΔP_e) küçük değişim, senkronizasyon güç katsayısı P_s ve güç açısı $\Delta\delta$ 'daki değişimin ürünüdür. Gerilimin gerçek güç üzerindeki küçük etkisini dâhil edersek, Eş. 3.18'deki doğrusallaştırılmış denklem elde edilir.



Şekil 3.21. AGC ve AVR sistemlerinin birleşik blok diyagramı

$$\Delta P_e = K_1 \Delta\delta + K_2 E' \quad (3.18)$$

$K_1=P_s$ ve K_2 ise, stator emf'sindeki (E') küçük bir değişim için elektrik gücündeki değişimdir. Rotor açısının (δ) generatör terminal gerilimi üzerindeki küçük etkisi, aşağıda verilen eşitlik x elde edilir.

$$\Delta V_t = K_3 \Delta\delta + K_4 E' \quad (3.19)$$

K_3 , sabit stator emf (E') için rotor açısındaki değişimle birlikte terminal gerilimindeki değişimdir. K_4 ise, sabit rotor açısı (δ) için stator emf (E') değişimi ile terminal gerilimindeki değişimdir.

$$E' = \frac{K_G}{1+sT_G} (V_t - K_5 \Delta\delta) \quad (3.20)$$

K_5 , rotor açısındaki (kalıcı durumda) bir değişikliğin demanyetizasyon etkisidir. Kararlı bir sistem için, K_1 , K_2 , K_3 , K_5 pozitif ve K_4 ise negatiftir (Bayram, Bülbul, Can ve Bayındır, 2013; Law, 2001: 54; Saadat, 1999: 566).

3.2. Güç Sistemi Sabitleyici

Güç sistemi salınımlarının sönümlenmesi için regülatöre ek bir giriş işareti sağlar. Generatör alanını modüle etmesi için şaft hızı, frekans ve güç gibi yardımcı stabilizasyon sinyallerini veya bu sinyallerin bazı kombinasyonlarını kullanır ve böylece sistemin dinamik performansını artırarak, osilasyonlarını engeller. Bu osilasyonların frekans aralığı 0,1 den 3 Hz'e kadardır. Bu salınımların yetersiz sönümlenmesi, güç iletimi becerisini sınırlayabilir. IEEE tarafından sunulan ve Çizelge 3.2'de verilen PSS1A, PSS2C, PSS3C, PSS4C, PSS5C, PSS6C ve PSS7C olmak üzere, 7 adet güç sistemi stabilizatör modeli vardır.

Çizelge 3.2. Üreticiler tarafında kullanılmış model örnekleri

PSS Tipi	Üretici
PSS1A	Mitsubishi MEC600
PSS2C	Eaton Cutler-Hammer, GE ve ABB UNITROL P, F ve 5000, Basler ve ALSTOM ALSPA P320 uyartım sistemlerinde sunulan standart bir seçenektir. REIVAX PWX, Basler PSS-100 ve Brush PRISMIC T20 bağımsız stabilizatörler.
PSS3C	PSS3B modeli bazen Siemens THYRIPOL ile kullanılır. Siemens RG3, Siemens THYRISIEM ve ABB UNITROL-M ve UNITROL-D uyartım sistemleri.
PSS4C	MB-PSS tipi Multi-band PSS ABB, ALSTOM ControGen HX, Andritz Hydro THYNE uyartım sistemleri, REIVAX uyartım sistemleri
PSS5C	PSS4C ile aynı.
PSS6C	Siemens RG3, THYRIPOL, THYRISIEM
PSS7C	Siemens THYRIPOL.

Ancak sadece üç tanesi tamamen yeni modeldir. PSS1A modeli 2005 sürümünden bir değişiklik göstermeden standardın 2016 sürümüne aktarılmıştır. Diğerleri ise önceki versiyonlarda da yer alan modellerin güncellenmiş halleridir (IEEE Std 421.5™-2016, 2016). PSS modelleri üzerine çalışmalar literatürde vardır (Abaci, Tugal ve Yamancli, 2013; IEEE, 1996; Kitauchi, Shirasaki, Hayashi, Banjo ve Kitamura, 2000). IEEE uyartım

sisteminin teknik özelliklerini hazırlama kılavuzuna göre, 66 kV ve üzeri şebeke bağlantısı için güç sistem dengeleyicisini gerektirir (Thapar, 2002). Tez açısından, kullanılan generatör bu değerin çok altında olduğundan PSS konusu bu tasarımda yer verilmemiştir.

3.3. Sınırlandırma ve Koruma İşlevleri

Sınırlandırıcıların amacı, senkron makineyi güvenli ve dengeli çalışma limitleri dâhilinde çalıştırıp, koruma cihazlarının harekete geçmesinden kaçınmaktır (ABB, 2005). Modern uyartım sistemleri genel olarak AVR ile birlikte çalışan; aşırı uyartım sınırlandırıcı (OEL), düşük uyartım sınırlandırıcı (UEL), stator akımı sınırlandırıcılar (SCL) ve hertz başına gerilim (V / Hz) sınırlandırıcılar gibi çeşitli sınırlayıcı fonksiyonlar sunar. OEL ve UEL önceki IEEE 421.5TM 2005 ile sunulmuşken, SCL1C ve SCL2C modelleri IEEE 421.5TM 2016 ile sunulmuş giriş modelleridir. Ayrıca, V/Hz sınırlandırıcı için henüz IEEE tarafından sunulmuş bir model olmadığı da düşünüldüğünde, bir sonraki IEEE 421.5TM güncellemesinde V/Hz sınırlandırıcı modelleri yanı sıra, yeni SCL modellerinin de eklenmesi beklenmektedir (IEEE Std 421.5TM-2016, 2016: 70).

Genel olarak, sınırlayıcılar uyartım sistemi modellerine üç olası yoldan biriyle bağlıdır:

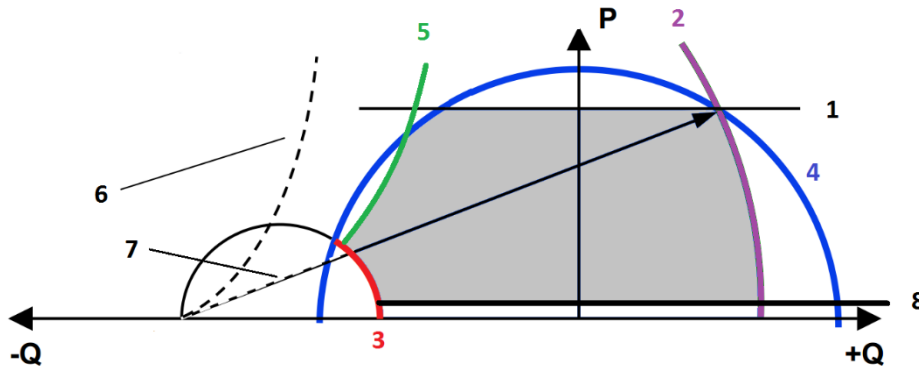
- Gerilim hata hesaplamasına ilave bir sinyal olarak eklenerek (AVR toplam girişi).
- Uyartım sistemi modelinde yüksek değerli (HV) veya düşük değerli (LV) bir mantık kapısına giriş şeklinde, bir devralma sinyali girişi olarak.
- Uyartım sistemi modelinde üst veya alt sınırın bir parçası olarak.

IEEE 421.5TM-2016 önerilen uygulamadaki bireysel uyartım sistemi modelleri, bu sınırlayıcılardan gelen çıktı sinyallerinin (V_{OEL} , V_{UEL} , V_{SCL}) normalde nasıl bağlanacağını gösterir. OEL ve UEL modellerinin çıkışı, bir toplam girişi veya bir kapı girişi olarak çeşitli konumlardan uyartım sistemine bir girdi olarak (V_{OEL} ve V_{UEL}) alınabilir. Ancak, herhangi bir uyartım sistemi modeli uygulamasındaki V_{OEL} ve V_{UEL} sinyalleri için sadece birer bağlantı kullanılabilir. Bu sinyaller için bağlantı yerinin seçimi birbirinden bağımsız olmalıdır. OEL ve UEL modellerine benzer şekilde, SCL modeli ya bir toplama noktası ya da bir devralma (AVR döngüsünü ayırma) eylemini temsil edebilir. Ancak OEL ve UEL modellerinden farklı olarak, SCL modeli bir toplama noktası eylemi temsil ederken V_{SCLtop} sinyalini tanımlamalıdır. Ancak, bir devralma eylemini temsil ederken V_{SCLoel} ve V_{SCLuel}

olarak iki sinyal tanımlanmalıdır. Devralınma durumunda, sınırlandırıcı kontrolü ele alır ve anma değerine döndüğünde AVR döngüsüne de geri dönlür. En basit haliyle, bir sınırlayıcı modeli alan akım sınırını temsil eden tek bir sabitten ve sınırın aşılmasını uyarmak için bir bayraktan oluşabilir (IEEE Std 421.5™-2016, 2016).

3.3.1. Kapasite eğrisi

Kapasite eğrisi için verilen Şekil 3.22’de görüldüğü gibi, grafiğin x ekseni Reaktif Gücü(Q), y ekseni ise Aktif Gücü(P) gösterir. +Q geri (endüktif) yani aşırı uyartım bölgesidir ve -Q ise ileri (kapasitif) yani düşük uyartım bölgesidir. Sınırlar arasında kalan taralı bölge senkron makine için AVR’nin aktif çalışma bölgesidir (ABB, 2005; Jerkovic, Miklosevic ve Spoljaric, 2010).



Şekil 3.22. Senkron generatör P-Q diyagram ve çalışma sınırları

P-Q diyagramında sırasıyla;

- (1) Ana tahrik sistemi tarafından üretilebilen maksimum aktif güç çıkışı
- (2) Maksimum uyartım akımı sınırlayıcı (rotor termal sınırlayıcı)
- (3) Minimum uyartım akımı sınırlayıcı
- (4) Stator akımı sınırlayıcı (Stator termal sınırlayıcı)
- (5) Pratik stabilite sınırı
- (6) Teorik stabilite sınırı
- (7) Uyartım gücü
- (8) Ana tahrik sistemi tarafından üretilebilen minimum aktif güç çıkışı

Çıkış gerilimini sabit tutmak için gerekli uyartım miktarı generatör yükünün bir fonksiyonu olduğundan bahsedilmiştir (İnternet: Whitby Hydro Energy Corporation). Buna göre,

generatörün yükü arttığında, uyarım miktarı artırılmalıdır ki terminal gerilimi sabit kalsın. Endüktif yükler, birim PF yüklerinden (omik) daha fazla uyarım gerektirdiğinden, çalışma bölgesi $+Q$ bölgededir. Kapasitif yükler, PF yüklerinden (omik) daha az uyarım gerektirdiğinden, çalışma bölgesi $-Q$ bölgededir.

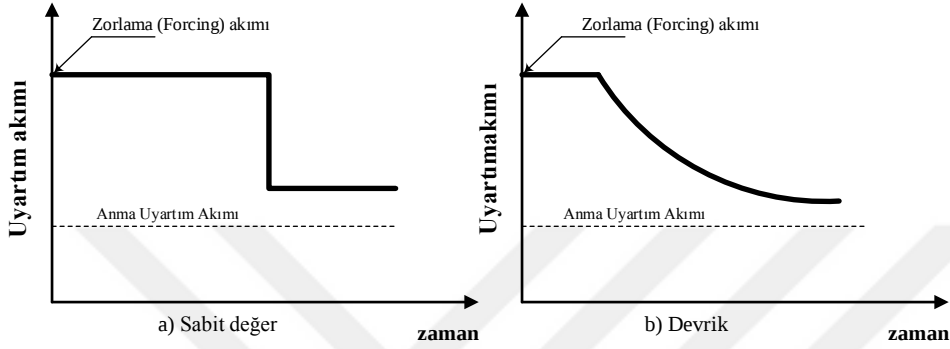
3.3.2. Aşırı uyarım sınırlandırıcı

Aşırı (endüktif) uyarım sınırlandırıcıları (Over Excitation Limiter = OEL), alan akım sınırlandırıcı veya maksimum uyarım sınırlandırıcı olarak da adlandırılır (IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 70). Generatör çalışma alanının termal kapasitesi bu sınırın temelidir (GE Energy Control Solutions, 2015: 21). Aşırı uyarımlı bölgedeki generatörün kapasitesi, alan sarımını soğutma kabiliyeti ve makinenin toplam MVA çıkışı (stator akımı) ile sınırlandırılır. Generatörün aşırı uyarımlı bölgesi, geride (lagging) güç faktörüne sahip ve generatörün VAR sağladığı yer olarak adlandırılır. Dolayısıyla, generatörün sağlayabileceği reaktif güç miktarını sınırlar yani OEL maksimum reaktif üretim yeteneği olarak da düşünülebilir (Pajuelo, Gokaraju ve Sachdev, 2010).

Aşırı uyarım sınırlandırıcı veya maksimum uyarım sınırlayıcı, statik uyarım devresinin alan akım çıkışını algılar ve alanın aşırı ısınmasını önlemek için alan akımını sınırlar. Elle (çevrim dışı) veya otomatik mod (çevrim içi) için farklı sınırlandırıcı ve bunlar için de farklı seviyelerde devreye girecek, farklı sınırlandırıcılar kullanılabilir (GE Energy Control Solutions, 2015: 21). Off line operasyonu için düşük OEL ve yüksek OEL olmak üzere iki OEL akım seviyesi tanımlanmıştır. Generatör, düşük OEL akım seviyesinde kesintisiz olarak çalışabilir ve bu durum uzun süreli aşırı yükleme kapasitesi olarak da bilinir. Programlanmış bir süre için yüksek OEL akım seviyesinde (field forcing) çalışabilir ve bu durum kısa süreli aşırı yükleme kapasitesi olarak da bilinir (Erceg, Tonkovic ve Erceg, 2001).

Şekilde 3.23'te görüldüğü gibi, sabit zaman (a) ve devrik (zamanla ters) (b) olmak üzere iki çeşit kısa süreli zaman gecikmesi kullanılır. Alan akımı, sabit bir ayarlanmış süre için başlatma değerini aştığında, sabit zaman sınırlayıcı aşırı uyarılma derecesine bakılmaksızın çalışır. Zorlama akımı anma seviyesinin iki katı olabilir ve zaman gecikmesi 10-20 saniye arasında olabilir. Zamanla ters sınırlayıcı, alan termal kapasitesine uyan zaman gecikmesiyle çalışır. Aşırı uyarım için izin verilen süre ve seviye standardı IEEE standartlarına göre Çizelge 3.3 ve Şekil 3.24'teki gibi sunulmuştur. Hesaplama şekli ve daha fazla ayrıntı IEEE

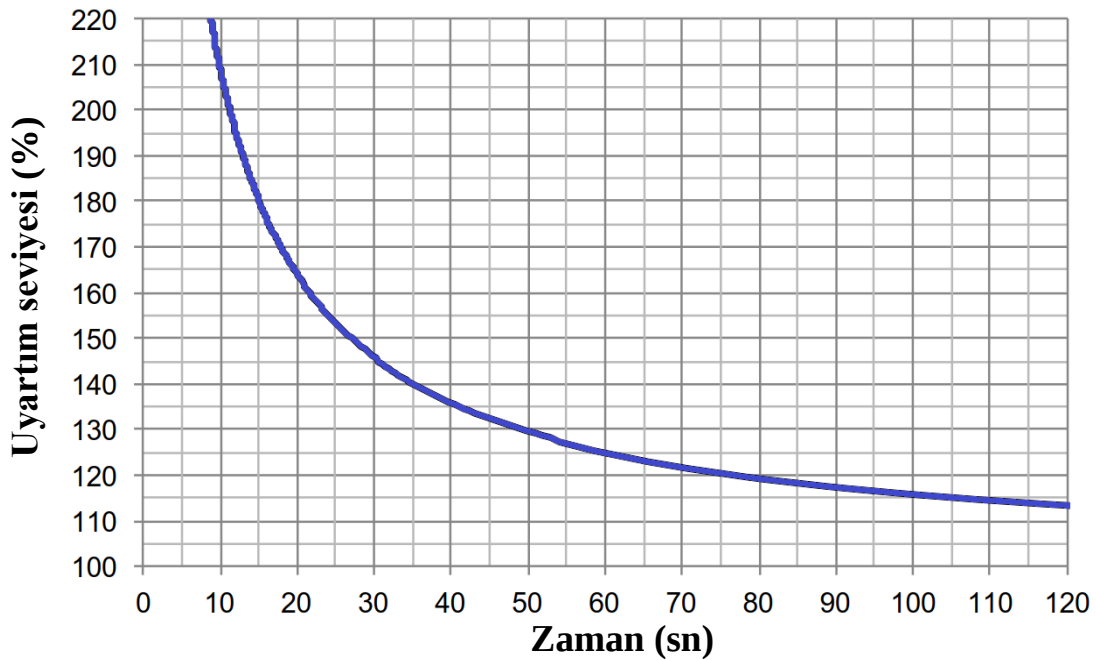
Std C50.12™, IEEE Std C37.102™ ve IEEE Std 421.5™ standartlarında bulunmaktadır. Zaman gecikmesinden sonra uyarım akımı, anma uyarım akımının % 110'u ile sınırlandırılır. Bu şekilde, tepe yükler ve sistemdeki kısa devreler sırasında, generatörün ve sistemin geçici kararlılığı iyileşmektedir (Erceg, Tonkovic ve Erceg, 2001; Prajapati, Patel, Chandwani ve Patel, 2013: 64, 65).



Şekil 3.23. Maksimum uyarım akım sınır karakteristikleri

Çizelge 3.3. Aşırı uyarım için verilen süre ve seviye çizelgesi

Zaman (saniye)	10	30	60	120
Alan akımı (%)	209	146	125	113



Şekil 3.24. Alan akımı kısa devre kapasitesi (IEEE Std 421.5™-2016, 2016)

Aşırı uyartım sınırlandırıcısı, rotor sargısının termal olarak aşırı yüklenmesini önlemekte ve generatör rotorunu aşırı uzun süre aşırı yüklerle maruz kalmasına karşı koruma sağlamaktadır. Amacı, uzun süreli alan akımı nedeniyle aşırı ısınmaya karşı generatörü korumaktır. Generatör alan sargısı, anma yük koşuluna karşılık gelen bir değerde sürekli çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Aşırı uyartım sınırlandırma işlevi tipik olarak, yüksek alan akımı durumunu algılar ve bir zaman gecikmesinden sonra uyartımı, geçerli bir değere (tipik olarak anma alan akımının %100 ile %110'u) indirmek için regülatör vasıtasıyla hareket eder. Eğer bu başarısız olursa, kesiciyi ve ünite arızasını açar (Prajapati, Patel, Chandwani ve Patel, 2013).

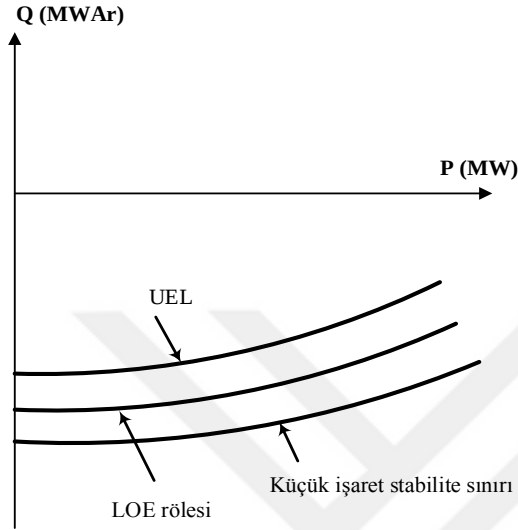
OEL denetleyicisi, normal olarak ya "devralan" ya da "toplayan" tipi kontrolör olarak uygulanır. Toplayan tip için OEL, gerilim regülatörünün iç döngüsünü oluşturur ve bir PI denetleyicisi kullanır. OEL modelleri için amper cinsinden gerçek uyartım akımı kullanılır ve OEL çıkışı gerilim regülatörünün toplanma noktasına eklenir. Uyartım akımı sınırın üstünde olduğunda, OEL sınırlayıcı çıkışı AVR çıkışından daha düşük olur ve OEL uygun bir uyartım seviyesinde devralır. OEL etkin olduğunda, AVR döngüsü, entegrasyonu durdurur ve OEL döngüsünden çıkmak için çıkışını OEL çıkışıyla karşılaştırır (Prajapati, Patel, Chandwani ve Patel, 2013).

3.3.3. Düşük uyartım sınırlandırıcı

Uyartım sınırlayıcılar büyük senkron generatörler üzerinde uygulanan en modern gerilim regülatörlerine dahildir. Düşük (kapasitif) uyartım sınırlandırıcı (Under Excitation Limiter : UEL), uyartım kaybı röleleri ve stabilizasyon sınırı arasındaki koordinasyon Şekil 3.25'e göre sağlanmaktadır. UEL, generatör uyartım seviyesinin çok düşük olduğu belirlendiğinde uyartımı yükseltmek için harekete geçerek şunları amaçlar:

- Senkron makinenin stabilitesini tehlikeye atacak veya yetersiz uyartım sebebi ile senkronizasyonun kaybına yol açabilecek AA regülatör (AVR) işletimi önlemek,
- Senkron makinedeki stator uç bölgesinde aşırı ısınmaya neden olan çalışmayı önlemek için, tipik olarak makinenin kapasite eğrisinin aşırı düşük uyartım bölgesi tarafından tanımlanır.
- Düşük uyartım sırasında uyartım kaybı (Loss Of Excitation = LOE) rölesinin çalışmasını önlemek için bunun ile koordineli çalışmalıdır (IEEE Std 421.4™-2014, 2014; Kundur, 1994).

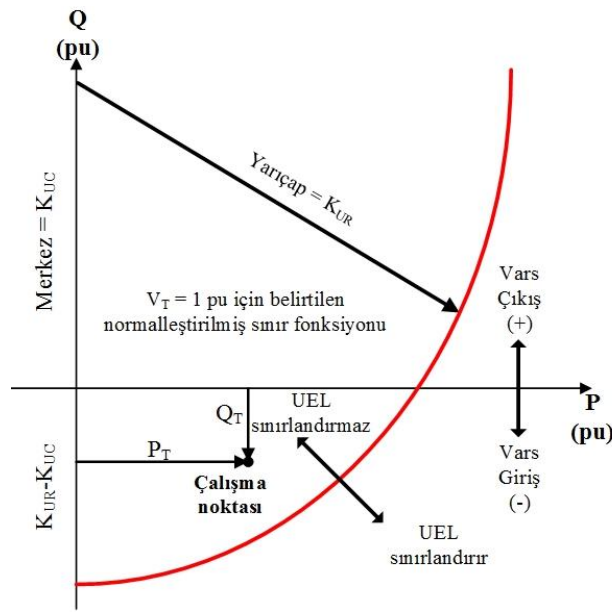
- Kalıcı durum (küçük işaret) stabilite sınırının veya stator nüvesinin uç bölge ısınma sınırının geçildiği seviyede, AA regülatörün generatör uyarımını, senkronizasyon kaybına yol açacak bir seviyeye düşmesini önlemek için tasarlanmıştır (GE Energy Control Solutions Inc., 2015; IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 81; Kundur, 1994).



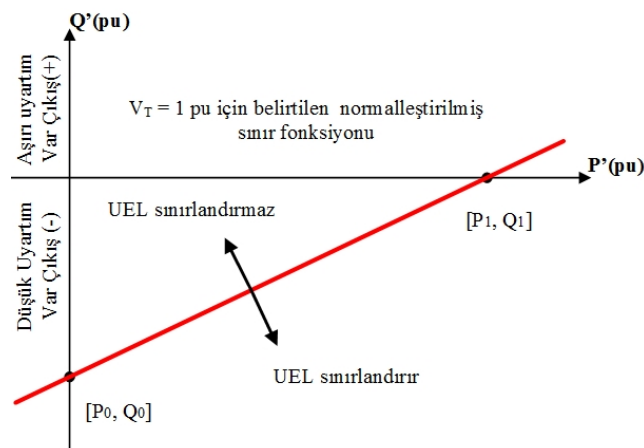
Şekil 3.25. UEL ve LOE röleleri ve stabilizasyon sınırı arasındaki koordinasyon

UEL, senkron makinenin gerilim ve akım kombinasyonu veya gerçek ve reaktif güç kombinasyonunu algılar. UEL tasarımlarında çeşitli giriş algılama ve sinyal işleme çeşitleri kullanılmaktadır (Prajapati, Patel, Chandwani ve Patel, 2013). Diğer taraftan sınırlayıcı karakteristikler; terminal gerilimine bağlı olmasına rağmen, genellikle MVAR-MW eksenlerinde reaktif ve gerçek güç açısından çizilir (IEEE Task Force on Excitation Limiters, 1995). Ancak, generatör terminallerindeki görünür empedansı algılayan düşük uyarım sınırlandırıcılar gibi birçok durumda, MW ve MVAR cinsinden belirtilen sınır, terminal gerilimine bağlıdır (IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 81). Sınırlar, bir referans seviyesini veya karakteristik aşan makine çalışma noktası tarafından belirlenir. Referans seviyesi veya karakteristik geçildiğinde, UEL çıkış sinyali uyarım sistemi kontrolünün bir parçası haline gelir. UEL çıkışı gerilim regülatöründe normal gerilim kontrolünü eklemek için bir toplama noktasına veya gerilim regülatörünün normal etkisini geçersiz kılmak için yüksek değer (HV) kapısına uygulanır. Uyarımı kontrol etmek için UEL fonksiyonunun uygulanmasına bağlı olarak, UEL gerilim regülatörünü devre dışı bırakabilir ve/veya UEL karakteristiğine erişilmediğinde normal çalışma sırasında normalde oluşmayabilecek etkileşimlere neden olabilir (IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 81; Prajapati, Patel, Chandwani ve Patel, 2013).

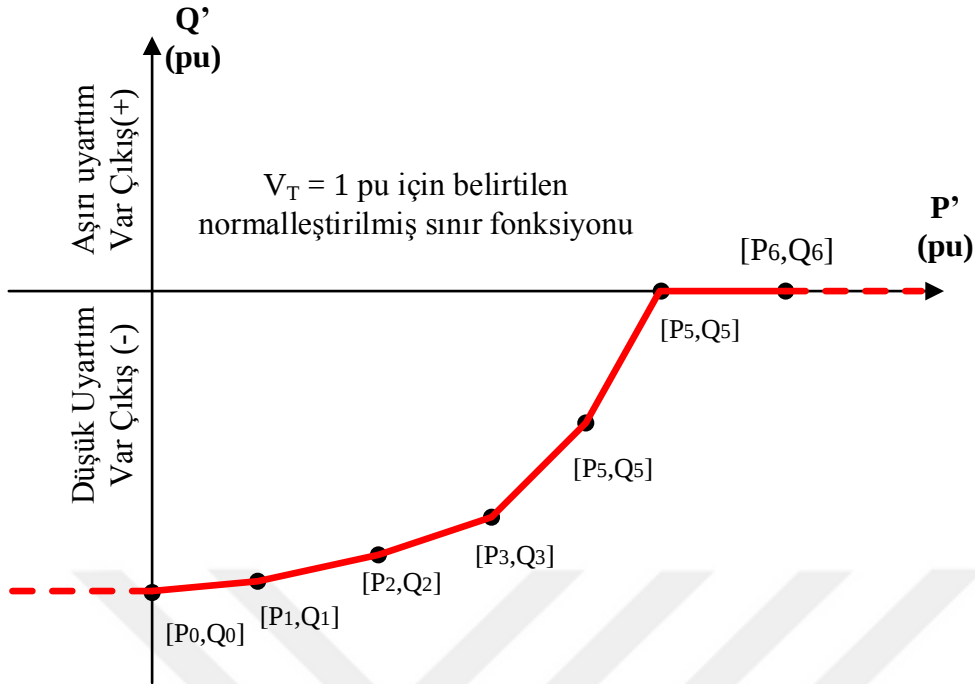
Dairesel karakteristik (UEL1), tek veya çok segmentli düz çizgi karakteristik (UEL2C) olmak üzere iki adet UEL modeli geliştirilmiştir. IEEE 421.5TM-2016 standardı ile birlikte, 2005 yılında sunulan UEL2, yerini UEL2C'ye bırakmıştır. Makinenin reaktif güç - gerçek güç çıkışı ekseninde çizildiğinde UEL1, Şekil 3.26'da gösterildiği gibi dairesel bir sınıra sahiptir. UEL2C için var olan iki karakteristik bulunmaktadır. Şekil 3.27 tek bir doğrusal sınır çizgisi sunan karakteristiği göstermektedir. Şekil 3.28 ise çoklu (2-6) doğrusal segment ile sınırlamaya imkân veren karakteristiği göstermektedir (IEEE Std 421.5TM-2016, 2016; IEEE Task Force on Excitation Limiters, 1995; Prajapati, Patel, Chandwani ve Patel, 2013).



Şekil 3.26. UEL1 modeli için dairesel sınırlama karakteristiği



Şekil 3.27. UEL2 modeli için tek segmentli düz çizgi karakteristiği



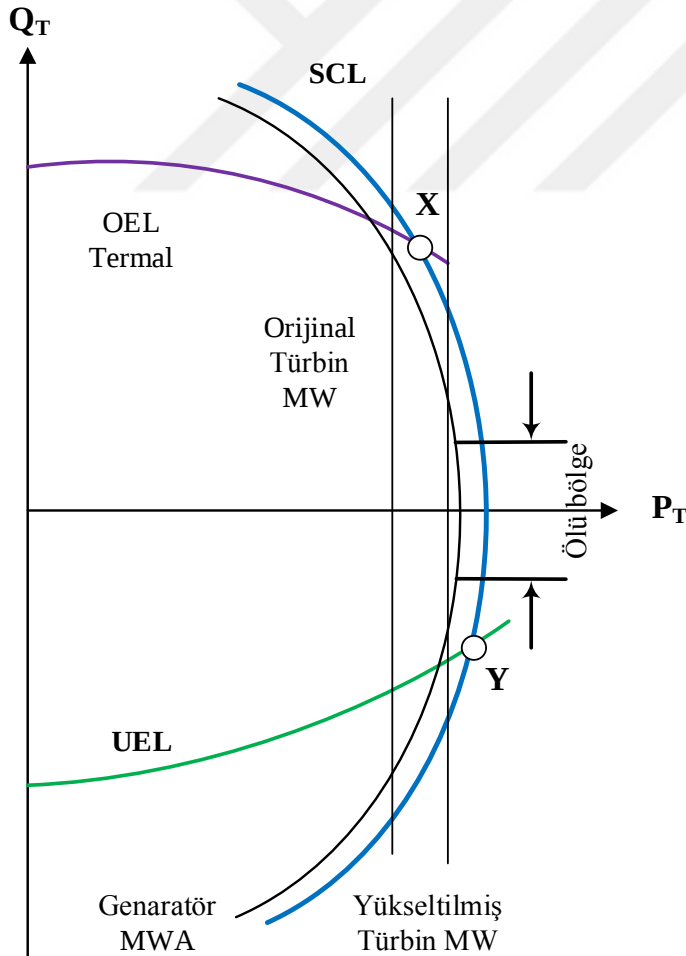
Şekil 3.28. UEL2 modeli için çok segmentli düz çizgi karakteristiği

3.3.4. Stator akımı sınırlandırıcısı

Stator akımı sınırlandırıcısı (Stator Current Limiter = SCL), yüksek stator akımlarından dolayı stator sargısının aşırı ısınmasına neden olacak şekilde çalışmayı önlemek için kullanılabilir. Bu durum, sistem gerilimi önemli ölçüde değiştiğinde veya türbin gücü, jeneratör stator sargılarına ilişkin bir yükseltme olmaksızın artırıldığında gerçekleşebilir. Güvenilirlik standartları veya şebeke ara bağlantıları, bazı ülkelerde SCL kullanımını talep edebilir veya bazı ülkelerde de kullanımını engelleyebilir. Bu nedenle, bu sınırlayıcıların uygulanması ile ilgili bölgesel gereklilikler kontrol edilmelidir (IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 88). IEEE 421.5™ 2016 ile sunulan SCL1C ve SCL2C olmak üzere iki model vardır. SCL2C ile hem toplama noktasına hem de devralma şeklinde eklenmesini temsil ederken, SCL1C ile toplama noktasına eklenmeyi temsil eder (IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 90).

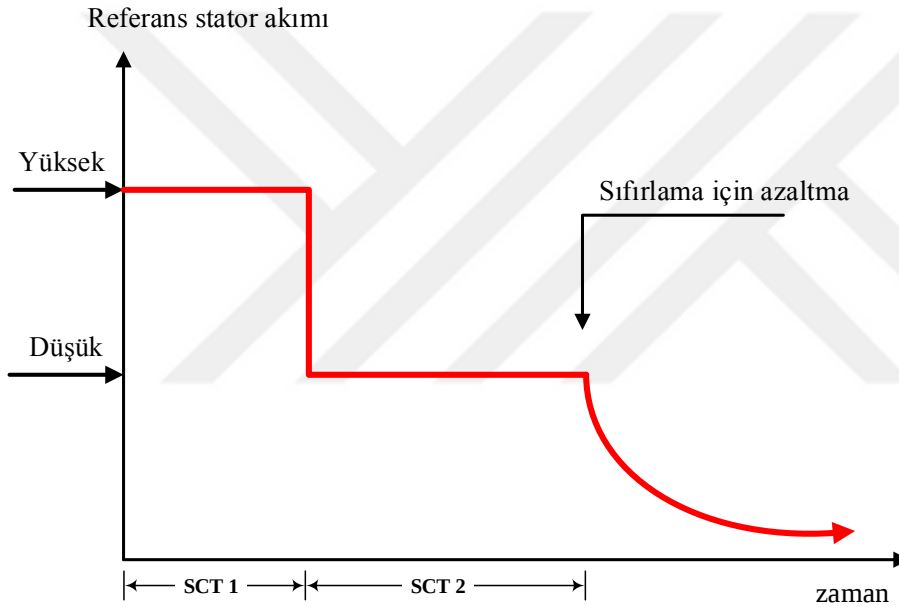
Stator akım sınırlayıcıları, Şekil 3.29'da gösterilen kabiliyet eğrisinde OEL termal sınır değerinin altında ve UEL karakteristiğinin üstünde bir bölge, X ve Y noktaları arasındaki sınırlandırmadan sorumludur. Şekil 3.29'da gösterildiği gibi, aşırı uyarımda olduğu kadar düşük uyarım bölgesinde de aktif olabilir. Adanmış OEL veya UEL modellerine kıyasla stator akımı sınırlandırıcısının en belirgin farkı budur. Türbin kapasitesi genellikle generatörün aktif güç çıkışı (P_T) sınırlandırarak reaktif güç çıkışı (Q_T) sınırını SCL

karakteristiğinin altında tutar (X ve Y noktaları arasındaki eğrinin soluna doğru). Bu nedenle, en azından normal çalışma koşullarında SCL hiç bir zaman aktif olmayacaktır. SCL termal ayar noktası (sabit durum veya sürekli çalışma sınırı), Şekil 3.29'da gösterildiği gibi genellikle generatörün anma MVA'sına karşılık gelen stator akımı üzerinde ayarlanır. Türbin kapasitesi, Şekil 3.29'da gösterildiği gibi generatör stator sargılarına eşdeğer bir yükseltme yapılmaksızın artırılırsa, SCL belirli çalışma koşullarında aktif hale gelebilir. SCL, sınırlamadan önce ayarlanabilir bir zaman gecikmesine izin verir ve böylece sistem arızaları sırasında stator akımının kısa süreli artışına izin verir. Buna ek olarak, birim PF çevresinde (sıfır reaktif güç) bir ölü bant ($\pm \%10$) uygulanmaktadır. Çünkü SCL gerçek gücü etkileyemez ve bu bölgede uyartım değişimi pek yarar sağlamaz veya stator akımının azaltılması için uyartım gereksinimi artandan azalana değiştiğinden kararsız kontrol çıkışları üretebilir (IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 87, 90).



Şekil 3.29. Senkron makine kapasite eğrisi üzerindeki stator akımı sınırı

SCL akım referansı Şekil 3.30’da gösterildiği gibi yüksek akım seviyesine ve düşük akım seviyesine sahip iki basamaklı bir dalga formuna dayalı olarak üretilir. Aşırı endüktif (ileri) akım için (şebekeye VAR aktarırken), belli bir zaman gecikmesi sonrası, AVR üzerinden hareket eder ve endüktif akım değerini sınırlandırmak için uyarım akımını azaltır. Fakat aşırı kapasitif (ileri) akım yani düşük uyarım söz konusu ise (şebekeden VAR çekilirken) makinenin başarısız olma riski nedeniyle, uyarımı arttırmak için zaman geciktirmeden AVR üzerinde hareket etmektedir. Böylece kapasitif yüklenmeyi azaltarak, stator kayıplarını ve ısınmayı düşürür (Baechle, Knazkins, Smulders ve Stutz, 2012; IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 87,88; Prajapati, Patel, Chandwani ve Patel, 2013).



Şekil 3.30. Stator akımı sınırlandırıcı referansı

Stator akımının mutlak değeri ana kontrol edilen değişkendir. Matematiksel olarak, stator akımı aktif ve reaktif bir bileşene ayrılabilir. Sınırlandırıcı, reaktif bileşenini, stator akımının mutlak değerini ve dolayısıyla stator sarımındaki I^2R kayıplarını sınırlamak için ayarlar. Bu amaçla, stator akımı sınırlandırıcı, düşük uyarım (kapasitif) ve aşırı uyarım (endüktif) sınırlandırıcıya bölünmelidir. Düşük uyarım koşulları altında, generatörün çalışma noktasını aşırı uyarım bölgesine doğru hareket ettirmek için uyarımı artırması gerekir. Bu, stator akımının mutlak değerinin azalmasına neden olur ve bu da, stator kayıplarını ve ısınmayı düşürür. Aşırı uyarım koşullarında, stator akım sınırlandırıcısının, stator akımının mutlak değerini düşürmek ve böylece de stator sargısındaki kayıpları azaltmak için uyarımı düşürmesi beklenir (Baechle, Knazkins, Smulders ve Stutz, 2012). Alternatif olarak, stator

akımını azaltmak için, ana transformatör kademesinin değiştirilmesi veya mümkünse türbin gücünün azaltılması düşünülebilir (IEEE Std 421.5™-2016, 2016: 87).

Stator akım sınırlandırıcı devralma durumunda iken AVR/VAR kontrolünü belirler. Generatör stator akımı anma değerini aştığında, AVR kontrolünden anma generatör kapasitesiyle koordine edilmiş bir VAR/PF kontrol ön ayarına geçilir. VAR/PF fonksiyonu, AVR referans ayar noktasının yavaş yavaş rampalanmasıyla gerçekleştirilir. Stator akımı nominal değerden düşük olduğunda ise AVR kontrolüne geri dönülür (GE Energy Control Solutions, 2015).

3.3.5. Gerilim/Frekans sınırlandırıcı

Akı, terminal geriliminin frekansa bölünmesiyle orantılı olduğu için hertz başına gerilim (V/Hz) olarak isimlendirilir. Düşük frekans ve aşırı gerilimden kaynaklanan aşırı manyetik akının sebep olacağı zararlardan generatörü ve step-up transformatörü korumak için kullanılır. Aşırı manyetik akının sürmesi halinde aşırı ısınmaya sebep olabilir ve cihaz transformatörü ve generatör nüvesi zarar görebilir. V/Hz oranı önceden ayarlanan değeri aştığında, generatör gerilimini sınırlandırmak için V/Hz sınırlandırıcısı (veya regülatörü) alan gerilimini kontrol eder ve aşırı uyarıtımı önler. V/Hz ön ayar değerini belirli bir süre için aştığında, V/Hz koruma generatörün çıkış gerilimini frekansla orantılı olarak düşürür. Cihaz step-up transformatörünün alçak gerilim derecesi, genellikle generatör gerilim derecesinin % 5 altındadır. Tipik olarak, bu sınırlayıcılar gerilim/frekans oranını 1,1 pu değerinde tutacak şekilde ayarlanır; ancak, 1,05 gibi düşük ayarlar da belgelenmiştir (IEEE, 1995). Çizelge 3.4'te generatör için ve Çizelge 3.5'te Step-up transformatörü için Volt/Hz sınırlamaları verilmiştir (IEEE Std C37.102™-2006, 2007: 170).

$$V/Hz(pu) = \frac{V_t/V_{anma}}{f/f_{anma}} \quad (3.21)$$

Burada;

V_t : Ölçülen terminal gerilimi değerini (volt)

V_{anma} : Generatörün anma gerilimi değerini (volt)

f : Ölçülen terminal geriliminin frekans değerini (Hz)

f_{anma} : Generatörün anma geriliminin frekans değerini (Hz)

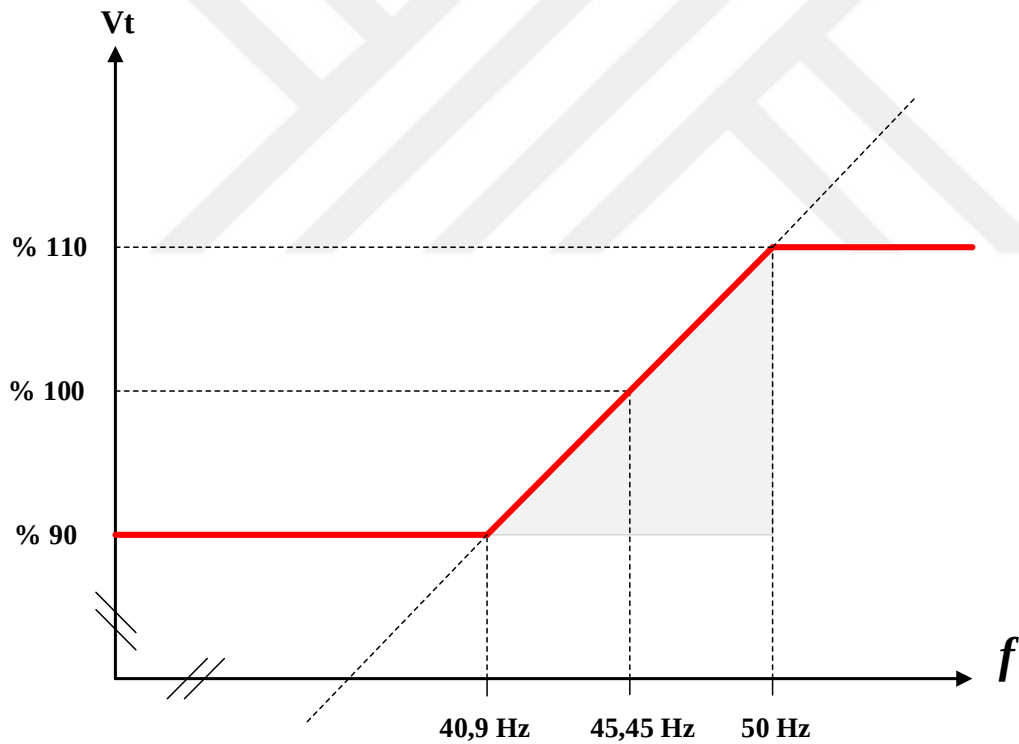
göstermektedir.

Çizelge 3.4. Generatör için Volt/Hz sınırlamaları

Zaman (dk)	33	25	20	15	10	5	2	1	0,5	0,2
Volt/Hz (%)	110	111	111,5	112,5	113,5	115,5	118	120	122	125
Volt/Hz (pu)	1,1	1,11	1,115	1,125	1,135	1,155	1,18	1,20	1,22	1,25

Çizelge 3.5. Step-up transformatörü Volt/Hz sınırlamaları

Zaman (dk)	40	30	20	10	6	2	1	0,5	0,3
Volt/Hz (%)	106,4	106,9	107,4	108,4	109,3	112,1	114,3	118	123,5
Volt/Hz (pu)	1,064	1,069	1,074	1,084	1,093	1,121	1,143	1,18	1,235



Şekil 3.31. Gerilim/Frekans sınırlandırıcı karakteristiği

3.4. Uyartım Sistemi Türleri

Uyartım enerjisini kaynağına göre harici (separate) uyartımlı ve kendinden uyartımlı (self-excitation) sistemler olmak üzere iki ana sınıf vardır. Harici uyarma sistemleri fırçalı (statik) veya fırçasız (döner) olabilir. Harici uyartımlı sistemler, elektrik sisteminde meydana gelen

aksamalar ve arızalardan bağımsızdır ve zorlama uyartım imkânı sunar. Ana dezavantajı ise uyarma besleme geriliminin ve dolayısıyla uyarma akımının doğrudan generatör çıkış gerilimine bağlı olmasıdır. Diyot köprüsü olan fırçasız kendi kendine tahrik sistemleri de mevcuttur (Jerkovic, Miklosevic ve Spoljaric, 2010).

3.4.1. Fırçalı ve fırçasız generatörlerin avantajları ve dezavantajları

- Fırçalı ve fırçasız generatörler arasındaki temel fark, generatör ana alanının ana uyartıma nasıl bağlı olduğudur. Fırçalı generatörler için sadece ana sargı ve stator sargısı olmak üzere iki sargı varken, fırçasızda ise alan sargısı, stator, döner uyartıcı ve ana generatör sargıları olmak üzere dört adet sargı vardır.
- Uyartıcılar, fırçalı tip generatörlere bağlandıklarında statik olarak adlandırılırlar. Fırçasız generatörlere bağlandıklarında da genellikle AVR olarak adlandırılırlar.
- Fırçalı generatörler bilezikler, fırçalar, fırça tutucular gibi parçalara sahiptirler. Fırçasız generatörler ise döner diyotlar, daha fazla sargı ve bir AVR'ye sahiptir.
- Fırçasız generatörler daha az bakıma ihtiyaç duyarlar gibi düşünülebilir ancak, arızalarını gidermek daha zor ve karmaşık olabilmektedir. Fırçasız uyartım sistemlerinde, sorunu bulmak ve düzeltmek için daha fazla parça gerektirir. Fırçalı tip generatörlerdeki fırçalar ve bilezikler, kullanımla yıpranırlar ve fırçaların, belirli aralıklarla değiştirilmesi gerekmektedir.
- Fırçasız generatörler, fırçalı tiplere göre daha temiz bir sinüs formu üretirler.
- Fırçalı generatörler, fırçasız tipler ile karşılaştırıldığında uyartıcıdan çok daha fazla akım gerektirirler. Bu yüzden, fırçalı tip uyartım sistemi de fırçasız tipe göre daha büyüktür.
- Fırçalıya göre, fırçasız sistem geçici şebeke dalgalanmalarına karşı daha yavaş bir tepki süresine sahiptir. Bunun sebebi, içerdikleri döner uyartıcının daha fazla zaman sabiti eklemesidir. Fırçalı tip için ana generatörün korunması, fırçasıza göre daha güvenilirdir. Çünkü uyartıcı alana doğrudan bağlıdır ve böylece herhangi bir düşük toprak empedansını tespit edebilir. Bu süre fırçalı için 20 ms'den az iken, fırçasız sistemlerde 200 ms'den fazladır (ABB, 2005).
- Fırçalı generatörler içi pozitif ve negatif tavan gerilimi özellikleri sunabilmekte iken fırçasız sistemler sadece pozitif tavan gerilimi sunabilmektedir (ABB, 2005).
- Tristörlü köprü doğrultucu ile fırçasız sistem kurma girişimleri, tristörün kontrol güvenilirliği sorunları nedeniyle başarısız olmuştur.

- Fırçasız sistemler büyük generatörlerin (600 MVA üzerindeki güçler) yanıcı ve patlayıcı ortamlarda uyarılması için kullanılır.
- Öte yandan, fırçasız generatörler, fırçalı tip generatörlere göre daha az bakım gerektirirler.
- Fırçalıların aksine, fırçasız generatörler alan akımının veya geriliminin doğrudan ölçülmesine izin vermezler.

(İnternet: Kinetics Industries, Whitby Hydro Energy Corporation)

3.5. Uyarım Sistemi Modellerinin Sınıflandırılması

İlk kez 1968 yılında, kullanımdaki uyarım sistemleri için matematiksel modeller ve bu modeller için parametreler tanımlamıştır. 1981 yılında başlayıp günümüze kadar gelen dönemde, bu modeller ve parametreleri genişletilme çalışmaları IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) tarafından sürdürülmektedir. IEEE Std 421.5TM standardı altında sunulan bu çalışmalar 1992, 2005, 2014 ve 2016 yıllarında güncellenmiştir. Yapılan genişletme çalışmaları arasında en dikkate değer olanları, 2005 yılında sunulan reaktif diferansiyel kompanzasyonu, uyarım sınırlayıcıları, güç faktörü ve VAR kontrol cihazları ve oransal, integral ve diferansiyel (PID) kontrolü içeren yeni modeller ile getirilen revizyondur. Son güncelleme ise 15 Mayıs 2016 tarihinde IEEE Std 421.5TM-2016 ile sunulmuştur. Bu revizyon, önceki revizyonun ardından piyasaya sunulan yeni cihazların modellerini ve mevcut bazı modellerin güncellemelerini içermektedir.

Bununla birlikte, bu modeller düşük sipariş modelleridir ve belirli bir sistemdeki tüm kontrol döngülerini temsil etmez. Modeller, anma frekansından $\pm 5\%$ frekans sapması ve 3 Hz'e kadar olan salınım frekansları için geçerlidir. IEEE tarafından ise uyarım gücü kaynağına göre üç farklı uyarım sistem modeli tanımlanmıştır. Aşağıda kısaca açıklanan bu modeller kendi konu başlıkları altında daha ayrıntılı şekilde ele alınmıştır.

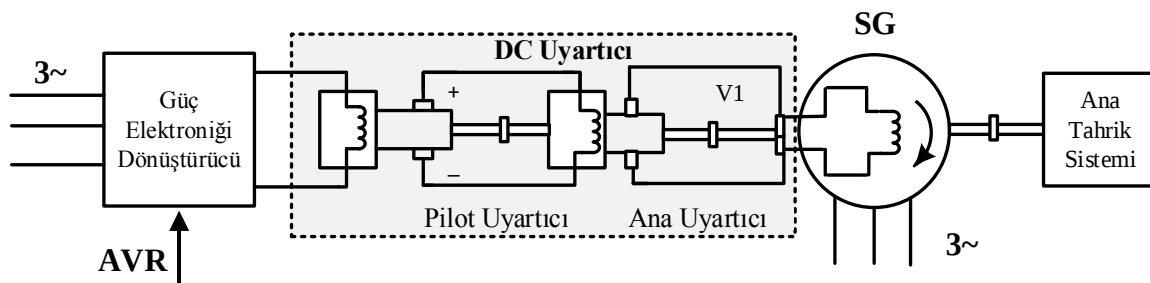
Doğru akım kollektörlü (DA) uyarım tipi, uyarıcı sistem gücünün kaynağı olarak, kollektörlü bir doğru akım generatörü kullanılır. Alternatörle beslemeli doğrultucu (AA) uyarım tipi, senkron makine alanı için gereken doğru akımın üretilmesi için bir alternatör (AA makine) ve sabit veya döner doğrultucu kullanan AA uyarımı sistemleri. Statik (ST) uyarım tipi, uyarma gücü, transformatörler veya yardımcı generatör bobinleri ve doğrultucu (kontrollü veya kontrolsüz) vasıtasıyla sağlanır.

ST uyartım sistemleri 100-10000A gibi büyük uyartım akımlarında kullanılırken döner yapılı uyartım sistemlerinde 1-200A gibi daha küçük uyartım akımları kullanılır (ABB, 2005). Tip AA ve ST modelleri ile temsil edilen çoğu uyarma sistemi, makinenin alanına sadece pozitif akım akışı sağlar, ancak bazı sistemler negatif gerilime izin vererek akım sıfırına kadar zorlar. Senkron makine tarafından indüklendiğinde negatif alan akımının akmasına izin vermek için özel hükümler yapılır. Özel çalışma için makine / uyarma sistemi ara yüzünde barındırma yöntemleri IEEE Std 421.5-2016 Ek G’de açıklanmıştır (IEEE Std 421.5™-2016, 2016).

IEEE, halen kullanımda olan, çok geniş bir yelpazedeki uyartım sistemini betimleyen yirmi beş model yapısını standartlaştırmıştır. Dört adet DA, on bir adet AA ve on adet de ST uyartım modeli hali hazırda mevcuttur (IEEE Std 421.5™-2016, 2016). Modellerin bazıları yeni olsa da, öncekilerin güncellemesi şeklinde sunulan modellerde mevcuttur. Bu modeller, transient ve küçük sinyal kararlılık (stabilite) çalışmalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu modelleri kullanan üreticilerin de bu modelleri kullandığı yayınları ve ürünler vardır (IEEE, 1996; Jerkovic, Miklosevic ve Spoljaric, 2010).

3.5.1. DA uyartım sistemleri

Güç kaynağı olarak; bir motordan veya ana generatör şaftından sürülen; kendinden veya ayrı uyartımlı, DA generatörleri kullanır. 1920’lerden 1960’lara kadar olan erken sistemleri temsil eder. Büyük yapıları sebebiyle, 1960’ların ortalarında desteğini yitirerek, yerlerini AA uyartıcılara bırakmışlardır. Gerilim regülatörleri ilk süreksiz reostatik tipten, sonraki manyetik döner yükselteçlere kadar uzanmaktadır (Kundur, 1994).



Şekil 3.32. DA uyartım sistemi

Şekil 3.32’de görüldüğü gibi, her ikisi de SG ana şaftına yerleştirilen, ana uyartıcı ve bir pilot uyartıcı olmak üzere iki DA generatör kullanılır. Ana uyartıcı, fırçalar ve kayma

halkaları vasıtasıyla SG alan sargısını (V_f) sağlarken, pilot uyarı cihazı ana uyartıcı alan sargısını sağlar (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 53). Normal koşullar altında, uyartım gerilimi 125 V ile 600 V arasındadır. Pilot uyartıcı tarafından üretilen akımı değiştiren kontrol sinyalleriyle, elle veya otomatik olarak bu gerilim regüle edilir. Pilot uyartıcısı alan sargısı için gereken güç elektroniği devresi çok düşük güç oranlarına sahiptir. Tipik olarak, 1000 kVA'lık bir generatörün (anma değerinin % 2,5'i) uyartımı için 25 kW'lık bir uyartıma ihtiyaç duyulurken, 500 MW'lık bir alternatör için 2500 kW'lık (anma değerinin % 0,5'i) yeterlidir (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 53).

Normal koşullar altında, uyartım bir AVR tarafından otomatik olarak değiştirilir. Sabit AA hat gerilimi sağlamak veya elektrik şebekesine verilen reaktif gücü kontrol etmek için yük değişimlerine yanıt verir. Sistemdeki ciddi bir bozulma, alternatörün terminalleri boyunca ani bir gerilim düşüşü oluşturabilir. Bu anda uyartım sistemi, AA gerilimin düşmesini önlemek için çok çabuk tepki vermelidir. Örneğin; uyartım gerilimi, 300-400 mili saniye gibi kısa bir sürede anma değerinin iki katına çıkmak zorunda kalabilir (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 53). Yerini AA ve ST uyartım sistemlerine bırakan DA uyartım sistemini kullanan az sayıda senkron makine vardır. Bununla birlikte, böyle pek çok sistem hala hizmet halindedir. IEEE 421.5TM-2016 için yedi adet DA uyartım modeli mevcuttur. Önceki versiyonlarda yer alan 4 modelin yanı sıra bu modellerin güncellenmiş 3 modeli daha sunulmuştur. Bu güncel modelleri kullanan üreticiler ve ürünleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. IEEE DA uyartım modellerini kullanan üreticiler ve ürünleri

IEEE UYARTIM MODELİ		ÜRETİCİLER
DA	DC1C	Allis Chalmers Corp (Regulex). General Electric Co.(Amplidyne ve GDA), Westinghouse (Mag-A-Stat, Rototrol, Silverstat ve TRA). Asea Brown Boveri Inc (AB ve KC). KC bazı yaklaşımlar ile modellenenabilir.
	DC2C	Westinghouse (PRX-400). General Electric (SVR). Eaton Cutler Hammer/Westinghouse WDR iyileştirme, Besler SR.
	DC3A	General Electric Co.(GFA 4), Westinghouse (BJ30), Broy VR1
	DC4C	Basler DECS veya Eaton/Cutler Hammer ECS2100 bir DA kollektörlü uyartıcıya uygulanmıştır.

DC1C model, azaltan-artıran modda çalışan gerilim regülatörü ile kendinden uyarımlı şönt alanlar için kullanılır. Ana giriş olarak generatör çıkış gerilimini kullanan, sürekli etkin gerilim regülatörleri (doğrudan etkin reostatik, döner yükselteç ve manyetik yükselteç tipleri) ile alan kontrollü DA kollektör uyarıcıları temsil eder. DC2C modeli sadece, gerilim regülatör çıkış sınırları açısından DC1C'den farklıdır. DC3A modeli eski sistemleri, özellikle süreksiz etkili regülatörlü DA kollektörleri, temsil etmek için kullanılır. DC4C, eklenen kontroller ile DC1C'den farklılaşan ve PID içeren yeni bir modeldir (IEEE Std 421.5™-2016, 2016; Jerkovic, Miklosevic ve Spoljaric, 2010; Kundur, 1994).

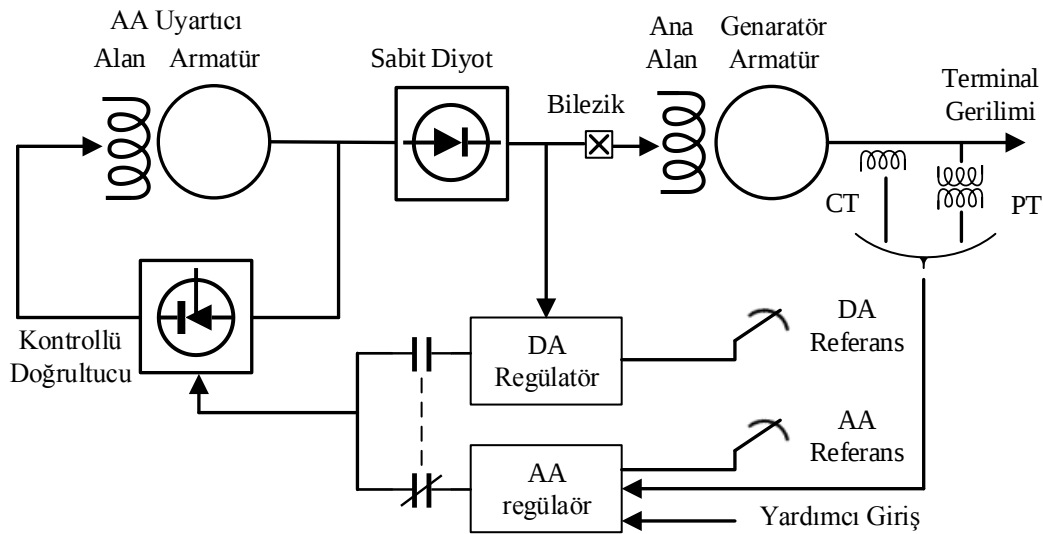
3.5.2. AA uyarım sistemleri

Güç kaynağı olarak AA makineleri (alternatörleri) kullanır. Genellikle uyarıcı, türbin generatör ile aynı şaft üzerindedir. Uyarıcının AA çıkışı kontrollü veya kontrolsüz doğrultucu ile doğrultulur. Doğrultucular sabit (stationary) veya döner (rotational) olabilir. Erken dönem sistemleri, regülatör olarak manyetik ve döner yükselteçlerin bir kombinasyonunu kullanır. Çoğu yeni sistem ise elektronik yükselteç regülatörlerini kullanır. IEEE tarafından sunulan AA uyarım modelleri ve uygulamaları literatürde mevcuttur (Griffo, Wrobel, Mellor ve Yon, 2013; IEEE Std 421.5™-2016, 2016; Jerkovic, Miklosevic ve Spoljaric, 2010).

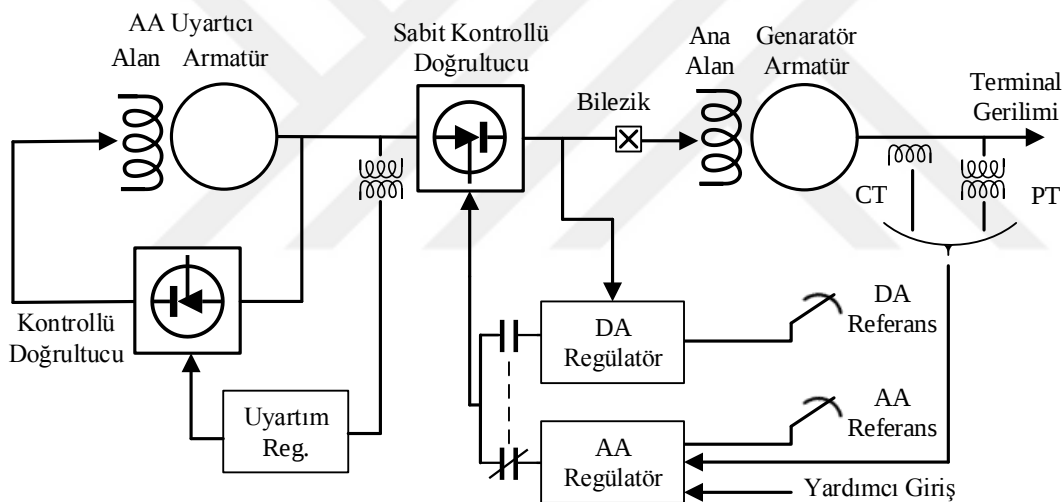
Sabit doğrultucu sistemleri

Ana generatör alanına DA çıkış bilezikleri üzerinden sağlanır. Bu sistemler fırçalı uyarım sistemleri olarak da adlandırılırlar. Kontrolsüz doğrultucu kullanıldığında, AA alan uyarımını regülatör kontrol eder. Şekil 3.33, böyle bir GE-ALTERREX sisteminin temsili gösterimidir.

Kontrollü doğrultucular kullanıldığında, regülatör, doğrudan uyarıcının DA çıkış gerilimini kontrol eder. Şekil 3.34, böyle bir GE-ALTHYREX sistemin temsili gösterimidir. Fırça aşınması ile temizlenmesi gereken karbon tozu; fırça, bileziklerin ve kollektörlerin değişmesi ve tamiri nedeniyle fırçalı uyarıcının bakım ve işletme maliyeti yüksektir (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 54; Kundur 1994).



Şekil 3.33. Alan kontrollü generatör doğrultucu uyartım sistemi

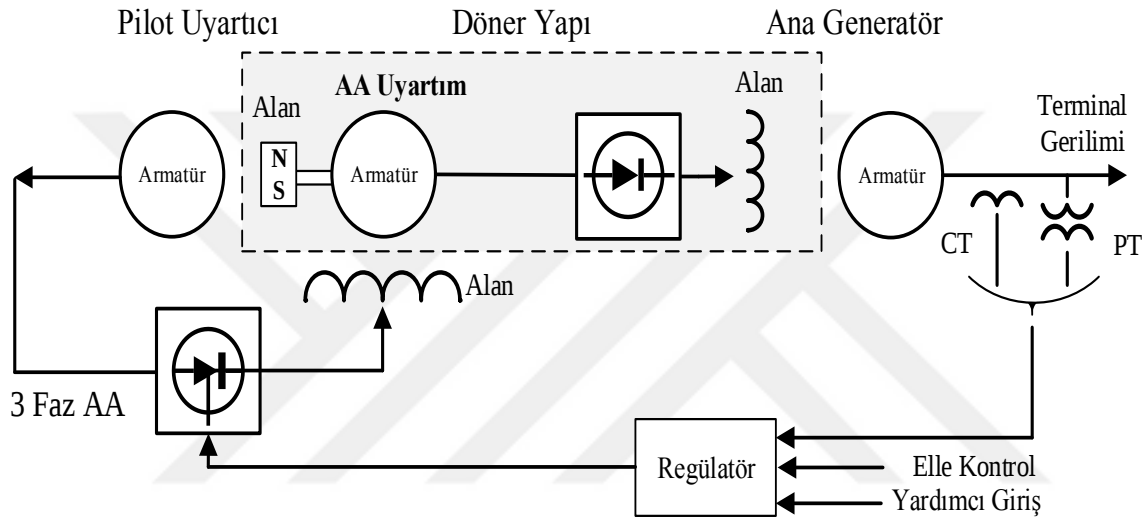


Şekil 3.34. Generatör tedarikli kontrollü doğrultucu uyarım sistemi

Döner doğrultucu sistemleri

Bileziklere ve fırçalara olan ihtiyacı elimine eden Şekil 3.35'teki bu sistemler, fırçasız uyarım sistemleri olarak adlandırılırlar. Büyük generatörlerin yüksek alan akımlarını sağlarken, fırçaların kullanımının ortaya çıkardığı problemleri önlemek için geliştirilmiştir (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 54). Fırçasız uyarma, generatör miline monte edilen küçük bir AA generatörüne yani pilot uyarıma dayanır. Ana generatör ile karşılaştırıldığında, uyarım sisteminin yapısı tersine çevrilir. DA alan akımı statora verilir ve statik akış oluşturur. Mil döndürüldüğünde, uyarım sisteminin rotorunda dönen armatür sargılarında 3 fazlı AA gerilim indüklenir. Bu alternatif akım daha sonra 3 fazlı diyot

(kontrolsüz) veya nadiren tristör (kontrollü) köprü tarafından doğrultulur ve ana generatörün alan sargılarına verilir. Üç fazlı doğrultucu, kollektör, bileziklerin ve fırçaların yerini alır. Başka bir deyişle, kollektör (mekanik doğrultucu) yerine bir elektronik doğrultucu konur. Dolayısıyla fırçalar ve bilezikler artık gerekli değildir. AA uyartıcının stator bazlı alan sargısı AVR'den kontrol edilir. Statik güç dönüştürücüsü artık SG uyartım sargısı güç oranlarının yaklaşık 1/20 (30) oranına sahiptir, çünkü AA uyartıcı üzerinden yalnızca bir adım güç yükseltmesi gerçekleştirilir (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 54).



Şekil 3.35. Fırçasız uyartım sistemi

IEEE tarafından sunulan on bir adet AA uyartım modeli vardır. Ancak sadece üç tanesi tamamen yeni modeldir. Ayrıca, önceki versiyonlarda yer alan 8 modelin yanı sıra, bu modellerin güncellenmiş 8 modeli daha sunulmuştur. IEEE tarafından sunulan yeni ve güncellenen AA uyartım modellerini kullanan üreticiler ve ürünleri Çizelge 3.7'de verilmiştir (Griffo, Wrobel, Mellor ve Yon, 2013; IEEE Std 421.5™-2016, 2016; Jerkovic, Miklosevic ve Spoljaric, 2010).

AC1C modeli, ayrı tahrik durumunda kontrolsüz doğrultucu (diyot) ile alan kontrollü alternatör-doğrultucu uyarma sistemleri için kullanılır. AC2C, yüksek ilk yanıt alan kontrollü alternatör-doğrultucu uyartım sistemini temsil eder. Alternatör ana uyartıcı, kontrolsüz doğrultucu ile birlikte kullanılır. AC2C modeli, uyartım zaman sabiti telafisi ve uyartıcı alan akım sınırlayıcı elemanlar hariç olmak üzere AC1C modeline benzemektedir. AC3A modeli, ek doğrusallık getiren kendinden uyartımlı sistemleri için kullanılır. AC4C modeli, uyartım çıkış devresinde tam tristör köprü bulunan sistemlerde kullanılır. AC5C,

ayrı uyartımlı fırçasız uyarma sistemleri için basitleştirilmiş bir modeldir. AC6C, sistem tarafından beslenen elektronik gerilim regülatörlerine sahip alan kontrollü alternatör-doğrultucu uyartım sistemlerini temsil eder. AC7C modeli daha yeni kontroller ve PID denetleyicisi içerir. Model AC8C, PID denetleyicisi biçiminden farklılık gösterir. Burada, oransal, integral ve diferansiyel kazanımlar ayrı sabitlerle tanımlanır (IEEE Std 421.5™-2016, 2016).

Çizelge 3.7. IEEE AA uyartım modellerini kullanan üreticiler ve ürünleri

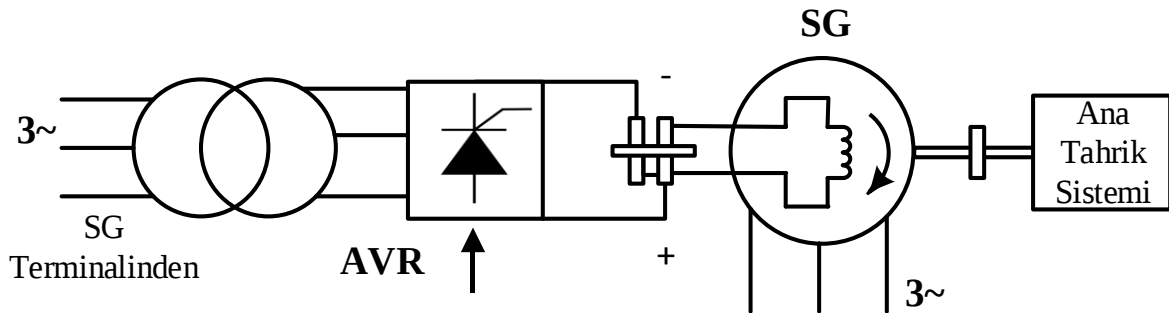
IEEE UYARTIM MODELİ		ÜRETİCİLER
AA	AC1C	Westinghouse Fırçasız Uyartım sistemi, Cutler Hammer Westinghouse WDR fırçasız uyartım iyileştirme, Emerson DGC iyileştirme, Brush (MAVR, STAVR ve PEAVR)
	AC2C	Westinghouse başlangıç cevabı hızlı fırçasız uyartım sistemi, yine fırçasız sistemler için GE EX2000/EX2100/EX2100e
	AC3C	General Electric Co.(ALTERREX)
	AC4C	General Electric Co.(ALTERREX); General Electric(Rotating Tristör Uyartım Sistemi)
	AC5C	Basler ve Electric Machinery ve ALSTOM ControGen SX tarafından üretilenler gibi küçük uyartım sistemlerini temsil etmek için kullanılabilir.
	AC6C	C.A. Parsons tarafından üretilenler gibi sabit (stationary) diyotlu sistemler.
	AC7C	Basler DECS ve EATON ECS2100 AA/DA döner uyartıcılara uygulanması; Brush Electrical Machines Ltd. (Brush PRISMIC A50-B, A32, A3100), GE EX2000/2100/2100e, SIEMENS (RG3 ve THYRISIEM) fırçasız uyartım. GE Alterrex (AC3A model) için gerilim regülatörü yerleştirme. Döner uyartıma uygulanan Emerson/Emerson Ovation (DGC ve REIVAX)
	AC8C	Basler DECS ve Brush PRISMIC sayısal uyartım sistemleri, Emerson/Emerson Ovation DGC, Siemens THYRISIEM, ALSTOM ControGen SX.
	AC9C	Döner uyartıma uygulanan ANDRITZ HYDRO THYNE uyartım sistemleri
	AC10C	Döner uyartıma uygulanan REIVAX uyartım sistemleri ve Asea Brown Boveri (UNITROL F,5000, 6080),
	AC11C	Döner uyartıma uygulanan REIVAX uyartım sistemleri ve Asea Brown Boveri (UNITROL 1000),

Yeni modellerden olan AC9C modeli, sabit veya döner doğrultuculu bir AC alternatörden oluşan uyartım sisteme uygulanabilir. IEC 60034-16-2 1991 E.5 temellidir. Temel olarak,

kaskat bağı bir PID tipi gerilim regülatörü ve bir PI akım regülatöründen oluşur. Her iki regülatör bloğunda da sargı (windup) sınırı yoktur. AC10C ve AC11C modeli, bağımsız bir kaynaktan beslenen veya generatör terminalleri vasıtasıyla beslenen fırçasız bir uyarım sistemlerini temsil ederler. Buna ek olarak, AC11C modeli manyetik alan gerilimine eklenen çeşitli bileşik devreler sunar. Bu eklenen devre; sistemdeki arıza durumları generatörün terminal geriliminde düşmeye neden olduğunda uygulanan, yükseltici devre olarak seçilebilir. AA uyarım sistemleri negatif alan akımına izin vermez ve sadece AC4A, AC4B ve AC4C modelleri negatif alan gerilimi zorlamasına izin verir. Bu, generatörün uyarım kaldırmaya (uyarım sönümlemeye) izin vermediğinden, bu tür sistemlerin önemli dezavantajıdır. Oluşan negatif alan akımları için modelleme konuları IEEE 421.5-2016 Ek G'de tartışılmıştır (IEEE Std 421.5™-2016, 2016; Jerkovic, Miklosevic ve Spoljaric, 2010; Katschnig, Nowak, Bächle, ve Taborda, 2010).

3.5.3. Statik uyarım sistemleri

Tüm bileşenleri statik yani sabit olan bu uyarım sistemi Şekil 3.36'da görsellenmiştir. Bilezikler üzerinden ana generatör alanına sargısına DA gerilim uygulanmaktadır. Statik uyarım için gereken gücü, bir uyarım transformatörü ve doğrultucu üzerinden ana generatörden veya sabit yardımcı hattan alır (Ateş, 2012; Kundur, 1994). Gücü alışlarına göre, potansiyel ve bileşik kaynaklı olmak üzere iki şekilde sınıflandırılabilirler. Gerilimi (bileşik kaynaklı sistemlerde aynı zamanda akımı), uygun bir değere dönüştürmek için bir transformatör kullanır. Doğrultucular generatör alanı için gerekli doğru akımı sağlamak üzere kontrollü veya kontrolsüz olabilirler. Statik uyarım sistemleri, genellikle büyük güçler (100-10000A) için kullanılmaktadır (ABB, 2007; Kundur, 1994).



Şekil 3.36. Statik uyarım sistemi

Motorlu alan reostasıyla DA alan akımı kontrol edilen, mile monte edilmiş eski döner uyarım sistemleri yerlerini, modern statik uyarım sistemlerine bırakmıştır (Kundur, 1994). Bu nedenle de, generatör alan akım sınırlarını aşmadan büyük arızalara yanıt verebilecek daha hızlı bir dinamik tepki ve daha büyük bir alan zorlama (forcing) kabiliyetine sahiptirler (Koritarov ve diğerleri, 2013: 20). Hızlı gerilim tepkisi ile karakterize edilmesinin sebebi de budur, ancak yine de SG'nin T_{do} zaman sabiti alan akım tepkisini geciktirmektedir (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011: 55). Fazladan döner alanların ortadan kaldırılması, yüksek kontrol hızı, uyarımdan çıkma süresi kısalığı, yüksek verim ve güvenilirlik sunarlar. Ayrıca; kısa generatör mili, az yer kaplama özellikleri ile montaj kolaylığı sağlarlar. Bunların yanı sıra, kollektör bakımı gerektirmemeleri ile sağladıkları düşük bakım maliyeti gibi avantajları sayesinde, ST uyarım modern sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ateş, 2012; Law, 2001: 25).

IEEE tarafından sunulan on yedi adet ST uyarım modeli vardır. Ancak sadece üç tanesi tamamen yeni modeldir. Ayrıca, önceki versiyonlarda yer alan yedi modelin yanı sıra, bu modellerin güncellenmiş yedi modeli daha sunulmuştur. IEEE tarafından sunulan yeni ve güncellenen ST uyarım modellerini kullanan üreticiler ve ürünleri Çizelge 3.8'de verilmiştir. Bu sistemlerin çoğundan negatif alan gerilimi elde edilebilir, buna karşılık negatif alan akımı elde edilemez. Bunun için daha detaylı modeller gerekmektedir. (IEEE Std 421.5™-2016, 2016) EK-G bu konuyu ele almaktadır. Statik sistemlerin çoğunda uyarım gerilimi çok yüksek değerlere çıkabilir. Bu yüzden uyarım sistemini ve generatör rotor sargılarını korumak için ilave alan akım sınırlama devreleri kullanılır. Bileşik kaynaklı doğrultuculu statik uyarım sistemleri, senkron generatörlerde yaygın kullanılan bir sistemdir (Ateş, 2012: 1-3).

IEEE tarafından sunulan ST1C potansiyel kaynaklı - kontrollü doğrultuculu sistemleri temsil edilmektedir. ST2C modeli bileşik kaynaklı - kontrolsüz doğrultuculu sistemleri temsil etmektedir. ST3C uyarım modeli ise hem potansiyel hem de bileşik kaynaklı kontrollü sistemleri içermektedir. Ayrıca, akım destekli uyarım sistemi içeren dönen doğrultuculu ve potansiyel kaynak uyarım olmak üzere iki ayrı uyarım sistem modelini de içermektedir. ST4C uyarım modeli, ST3C modelinin bir varyasyonudur. ST3C modelinde olan geri-ileri regülatör karakteristiğinin yerini oransal ve integral (PI) regülatör bloğu almaktadır. Hem potansiyel ve hem de bileşik kaynaklı doğrultucu uyarım sistemleri modellenmiştir. ST5C uyarım sistemi, alternatif aşırı uyarım ve düşük uyarım girişleri ve ek limitler ile ST1A modelinin bir varyasyonudur. ST6C modeli gerilim regülatörü, alan gerilim regülasyonun

ve ön kontrolün bir iç döngüsü ile birlikte PI gerilim regülasyonundan oluşur. ST7C modeli statik potansiyel-kaynak uyartım sistemlerini temsil eder. Bu sistemde, AVR bir PI gerilim regülatöründen oluşur. Seri ileri-geri (lead-lag) faz filtresi, tipik olarak fırçasız uyarma sistemleri ile kullanılan bir türev fonksiyonun kullanılmasına izin verir. Bu durumda regülatör PID tipindedir. Buna ek olarak, terminal gerilim kanalı bir ileri - geri faz filtresi içerir (IEEE Std 421.5™-2016, 2016).

Çizelge 3.8. IEEE ST uyartım modellerini kullanan üreticiler ve ürünleri

IEEE UYARTIM MODELİ		ÜRETİCİLER
ST	ST1C	General Electric Co.(Silcomatic). Westinghouse (Solid State Tristör Uyartım Sistemi, WTA tipi statik uyartım sistemi PS, WTA-300 ve WHS gerilim regülatörleri. Statik uyartım sistemleri (ALSTOM, ASEA, Brown Boveri, GEC-Eliott, Hitachi, Mitsubishi (MEC600), Rayrolle-Parsons ve Toshiba. General Electric Potansiyel Kaynak Statik Uyartım. Basler (SSE/ SSE-N). Asea Brown Boveri Inc.(UNITROL); Siemens (THYRIPOL); Westinghouse(WDR ve MGR), REIVAX statik uyartım sistemleri
	ST2C	General Electric statik uyartım sistemleri, sıklıkla SCT-PPT veya SCPT ile olarak anılır.
	ST3C	General Electric bileşik kaynak ve potansiyel kaynak GENERREX uyartım sistemleri.
	ST4C	Basler DECS Statik uyartıma uygulanmış, Brush PRISMIC A50-S ve A50-A, General Electric EX2000/2100 bus-beslemeli potansiyel kaynak ve statik bileşik kaynak ve Generrex-PPS or -CPS; Canadian General Electric SILCOMatic 5 veya Basler/EATON ECS2100 Statik uyartım sistemleri, ANDRITZ HYDRO THYNE statik uyartıma uygulandı, Emerson/Emerson Ovation DGC veya REIVAX statik uyartım sistemleri
	ST5C	Asea Brown Boveri Inc. (UNITROL D, P, F ve 5000); Brush DCP.
	ST6C	Siemens tarafından üretilen SES130/230/530 (eski adı ile THYRIPOL) ve EATON ECS2100 Statik Uyartım sistemleri.
	ST7C	ALSTOM uyartım sistemleri—Eurorec, Microrec K4.1, ALSTOM tarafından üretilen ALSPA P320
	ST8C	ANDRITZ HYDRO THYNE statik uyartıma uygulandı
	ST9C	GE Power Conversion SEMIPOL
	ST10C	UNITROL F, 5000, 6080, 6800 (trademarks of Asea Brown Boveri) statik uyartıma uygulanmış

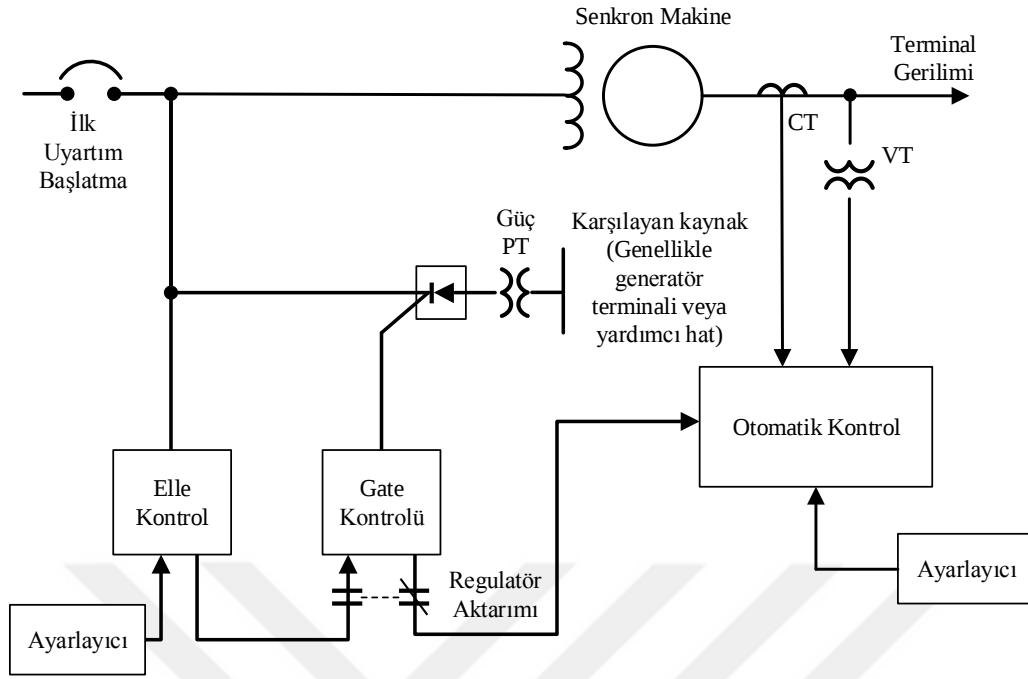
Yeni ST uyartım modellerinden olan ST8C modeli, IEC 60034-16-2 1991 E.3 temeldir. Kaskat bağlı bir PI tipi gerilim regülatörü ve bir PI akım regülatöründen oluşur. Her iki

regülatör bloğunda da sargı sınırı yoktur. Besleme bölümünün temsili IEEE 421.5 ST4B modeline dayanmaktadır. Güç kaynağı modeli, potansiyel ve bileşik kaynaklı kontrollü doğrultucu uyartıcıların temsiline imkân tanır. Bir diğer yeni model ise, PI regülatör içeren ST9C modelidir ve potansiyel kaynak doğrultucu uyartım sistemleri için kullanılır. Ayrıca, aşırı uyartım sınırlandırıcı için kendi orantılı kazancı olan ancak AVR ile integral yolunu paylaştığı bir PI regülatörü vardır (IEEE Std 421.5™-2016, 2016; Katschnig, Nowak, Bächle ve Taborda, 2010). ST10C modeli, ST1C ve ST5C modellerinin bir varyasyonudur. ST5C modeline ek olarak, bu model, PSS'den gelen VS sabitleme sinyalinin uygulanması için alternatifler sunar. Ayrıca, bir sınırlayıcı etkin olduğunda, lead-lag bloklarının paralel yapılandırmasıyla gerçekleştirilen bağımsız kontrol ayarları da sunar (IEEE Std 421.5™-2016, 2016).

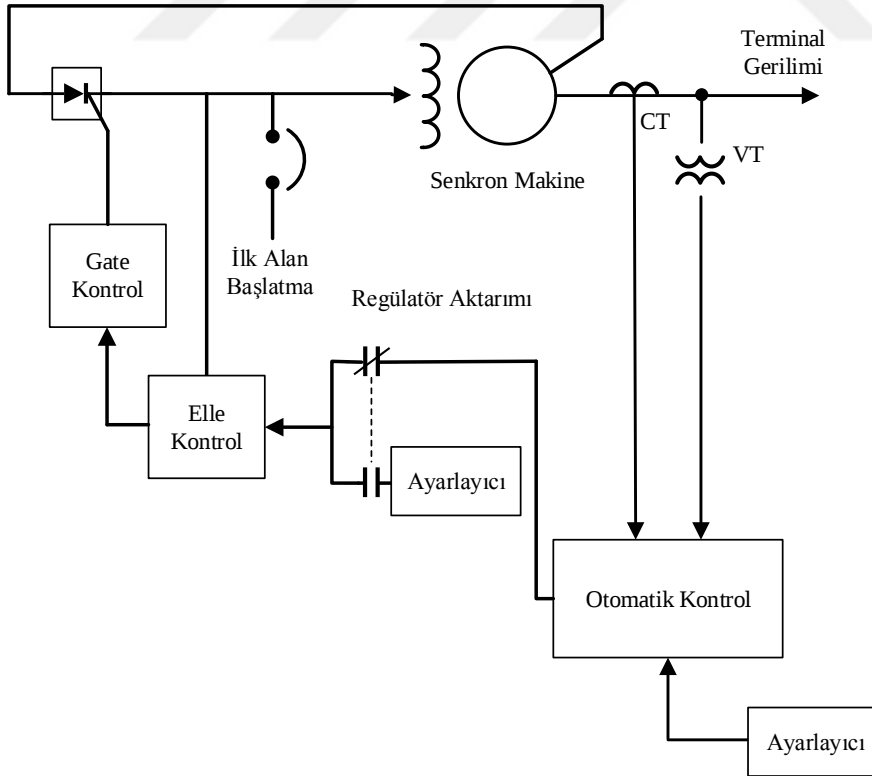
Potansiyel kaynak - kontrollü doğrultucu sistemi

Potansiyel kaynak uyartıcı, gücünü bir potansiyel kaynaktan alır. Bu kaynak genellikle, bir transformatör üzerinden bağlanan senkron makinenin terminalleridir. Genellikle hat-beslemeli veya transformatör-beslemeli statik uyartım sistemi olarak bilinmektedir. Aldığı AA gücü, kontrollü DA çıkışa dönüştürmek için sabit kontrollü doğrultucular kullanır. Maksimum uyartım gerilimi çıkışı, haliyle AA giriş gerilimine bağlıdır. Gücünü doğrudan generatör çıkışından edinen, bu uyartım sistemleri için field flashing ekipmanı gereklidir. Üstelik doğasından çok küçük bir zaman sabiti vardır (Fırçasız sistemler, daha fazla zaman sabiti ekleyen döner uyartım sebebiyle, geçici şebeke durumlarına, fırçalılara göre daha yavaş cevap verir). Potansiyel kaynak statik uyartıcılar sunduğu doğal hızlı tepki ile güç sisteminin geçici durum (transient) kararlılığına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, dönen uyartım sistemlerine göre, bu uyartıcılar tipik olarak daha yüksek çalışma verimi (daha düşük watt kaybı) sağlar. Günümüzde daha yüksek alan zorlama seviyeleri ile potansiyel kaynak uyartım sistemi, genellikle bileşik kaynak uyartıma göre daha fazla tercih edilen bir uyartım türüdür (IEEE Std 421.4™-2014, 2014; Kundur, 1994).

Şekil 3.37'deki uyartım sistemi, ST1C potansiyel kaynaklı - kontrollü doğrultuculu sistemleri temsil edilmektedir. Şekil 3.38'deki uyartım sistemi, ST3C generatör yardımcı güç kaynağı ile potansiyel kaynak – kontrollü doğrultucu uyartım sistemlerin temsil etmektedir.



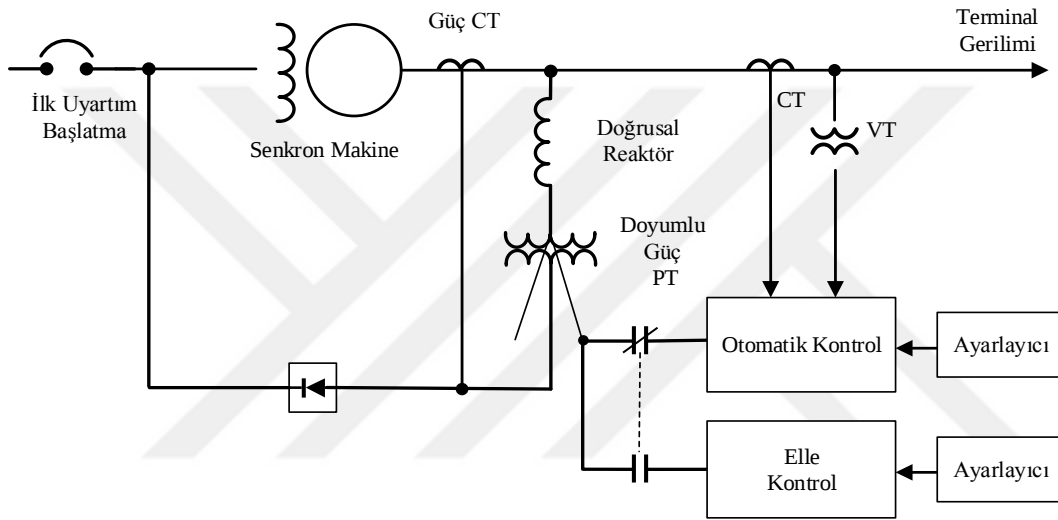
Şekil 3.37. ST1C potansiyel kaynak – kontrollü doğrultucu uyarım sistemi



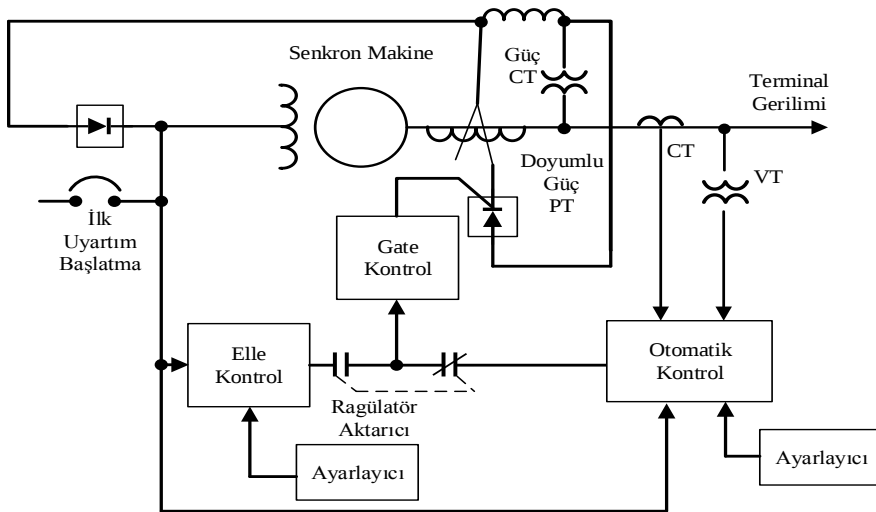
Şekil 3.38. ST3C generatör yardımcı güç kaynağı ile potansiyel kaynak–kontrollü doğrultucu uyarım sistemi

Bileşik kaynak – kontrolsüz doğrultucu sistemi

IEEE tarafından ST2C sunulan modelinde (Şekil 3.39 ve Şekil 3.40) uyartım gücü ana generatör terminalinden hem gerilim hem de akım kaynaklı elde edilir yani bir bileşik kaynaklı doğrultucu uyartım sistemidir. Bu, Güç Potansiyeli Transformatörü (GPT) ve Doyumlu (Saturable) Akım Trafosu (DAT) vasıtasıyla sağlanır. Uyartım transformatörünün kontrollü doyumu ile regülatör, uyartıcı çıkışı kontrol eder. Giriş akımı, uyartıcının yüksek alan zorlama kabiliyetini sağlamasına, olanak tanır.



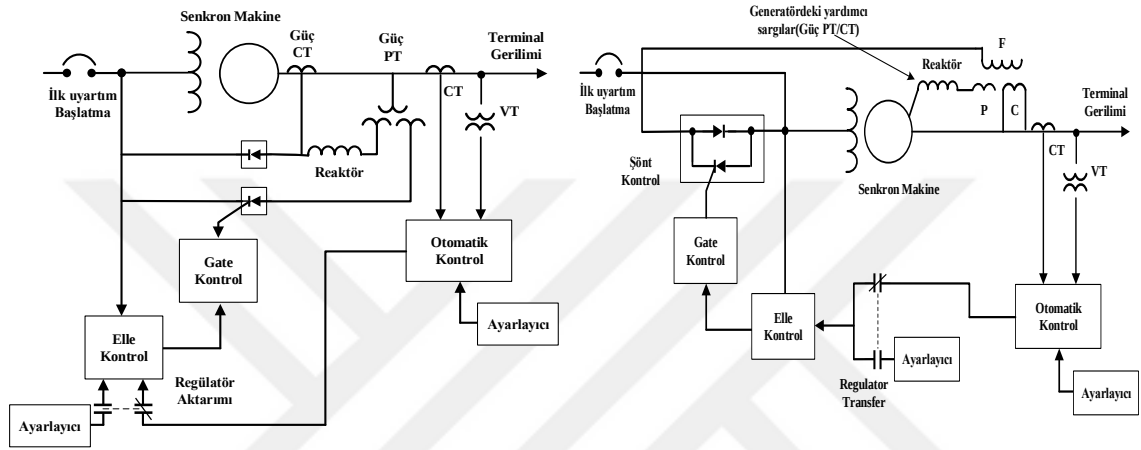
Şekil 3.39. ST2C Bileşik kaynak – kontrolsüz doğrultucu uyartım sistemi ve doyumlu potansiyel transformatör



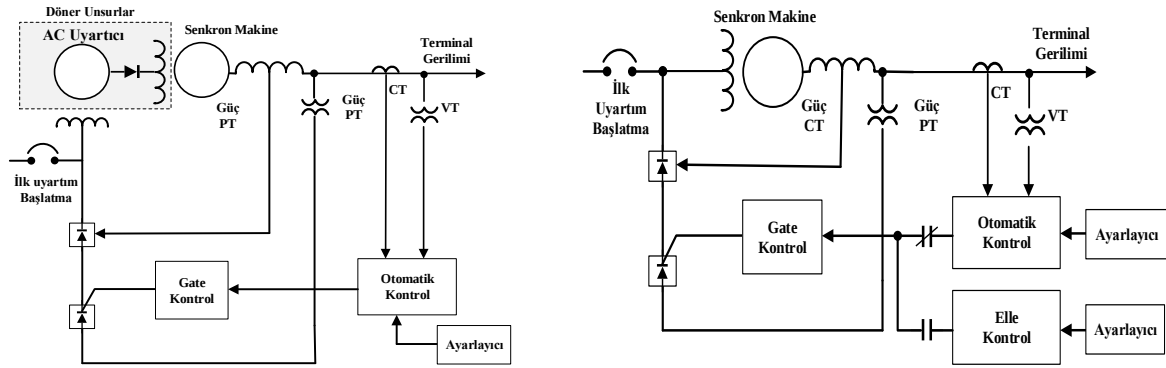
Şekil 3.40. ST2C Bileşik kaynak – kontrolsüz doğrultucu uyartım sistemi

Bileşik kaynak – kontrollü doğrultucu sistemi

IEEE tarafından sunulan ST3C modeli (Şekil 3.41) hem potansiyel hem de bileşik kaynaklı sistemleri içerdiğinden bahsedilmiştir. Uyarıcı çıkış devrelerindeki, kontrollü doğrultucuları ve generatörün statoru içerisindeki, gerilim ve akımı bileşimini kullanır. Bunun sonucu, tam "hata-açık (fault-on)" zorlama kabiliyetli bir yüksek ilk tepkili statik sistemdir.



(a) ST3C bileşik kaynak – kontrollü doğrultucu uyarım sistemi (b) ST3C bileşik kaynak – şönt kontrollü doğrultucu uyarım sistemi



(c) ST3C akım destekli uyarım sistemi ile döner doğrultuculu uyarım. (d) ST3C akım destekli uyarım sistemi ile potansiyel kaynak uyarım.

Şekil 3.41. Bileşik kaynak – kontrolsüz doğrultucu uyarım sistemleri



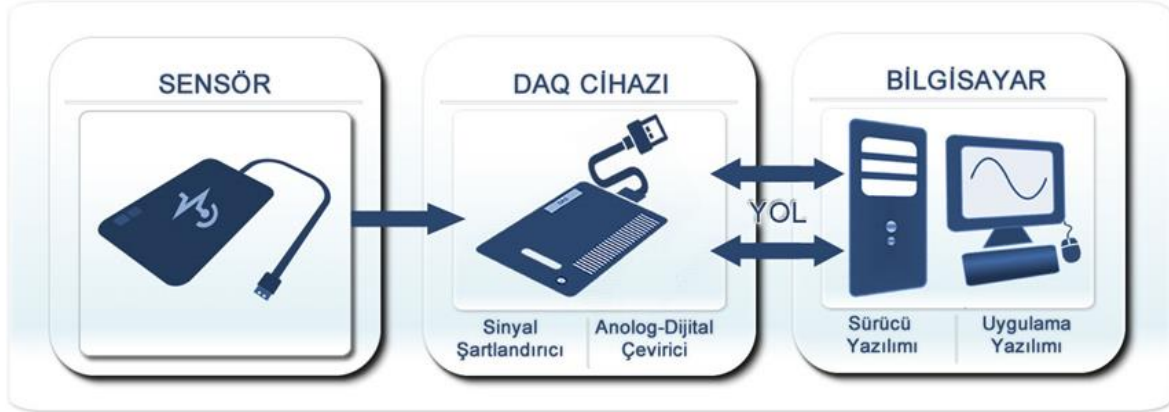
4. MATERYALLER VE METOTLAR

Kontrol donanımı olarak, kayda değer bir öğrenme süresi gerektiren mikrodenetleyici, DSP ve FPGA gibi daha karışık platformlar için gereken düşük seviyeli programlamanın ağır yükünden kurtaran National Instruments çözümleri kullanılmıştır. National Instruments tarafından, donanım hedefli uygulamaların tasarımını oldukça kolaylaştıran donanım ve yazılım çözümleri sunulmaktadır. NI LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), ölçümler, analizler ve özel grafik kullanıcı arayüzleri (GUI'ler) oluşturmak için tasarlanmış bir grafiksel programlama ortamıdır. LabVIEW ile programlanabilir olması ile hızlı bir prototip ortamı sunan CompactRIO (**R**econfigurable **I/O**) ve CompactDAQ (**D**ata **A**cquisition) gibi hedef donanım platformları sayesinde, profesyoneller, araştırmacılar ve öğrencileri için en karmaşık uygulamaları bile makul bir zaman içerisinde bitirebilmesine olanak tanımaktadır. Bu bölümde, veri toplama (DAQ) konusu sistemleri ve tezde kullanılmak üzere tercih edilen CompactDAQ ürün grubunu incelenmiştir. Sonrasında, LabVIEW yazılımı ve bu yazılımın önerilen sistemdeki ölçme, izleme ve kontrol amaçlarına yönelik kullanımlarına yer verilmiştir.

Daha sonra, senkron generatörlerin statik uyarımında klasik azaltan dönüştürücüler ve faz kaymalı azaltan dönüştürücüler ele alınmıştır. Bu DA/DA dönüştürücüler, yaygın şekilde kullanılan tristör kontrollü statik uyarım sistemlerin yavaş dinamik tepki ve yüksek şaft gerilimi indüklemeleri gibi olumsuzluklarına çözüm olabilmektedir. Son olarak, önerilen yüksek dinamik tepkili statik bir uyarım sisteminin gerçekleştirilmesi için kurulan sistem blok şeması ve tez deney düzeneği üzerine açıklamalar verilmiştir.

4.1. Veri Toplama Sistemi ve Unsurları

Veri toplama (DAQ), bir bilgisayarla voltaj, akım, sıcaklık, basınç veya ses gibi bir elektriksel veya fiziksel fenomenin ölçülmesi işlemidir. Bir DAQ sistemi sensörler, DAQ ölçüm donanımı ve programlanabilir yazılımı ile bilgisayardan oluşur (Şekil 4.1). PC tabanlı DAQ sistemleri, geleneksel ölçüm sistemleriyle karşılaştırıldığında, daha güçlü, esnek ve uygun maliyetli ölçüm çözümü sağlayan endüstri standardı bilgisayarların işlem gücü, üretkenlik, görüntüleme ve bağlantı özelliklerini kullanır.



Şekil 4.1. DAQ sistemi

4.1.1. Sensör

Sistemin en uç noktasını sensörler temsil ederler. Bir odanın sıcaklığı, bir ışık kaynağının yoğunluğu veya bir nesneye uygulanan kuvvet gibi bir fiziksel fenomen ölçümü, bir sensörle başlar. Transdüser olarak da adlandırılan bir sensör, bir fiziksel fenomeni ölçülebilir bir elektrik sinyaline çevirir. Sensör türüne bağlı olarak, elektrik çıkışı bir gerilim, akım, direnç veya zamanla değişen başka bir elektriksel nitelik olabilir. Bazı sensörler, bir DAQ cihazı tarafından doğru ve güvenli bir şekilde okunabilen bir sinyal üretmek için ek bileşenler ve bir devre sistemi gerektirebilir.

4.1.2. DAQ donanımı

DAQ donanımı, bir bilgisayar ile dış dünyadan gelen sinyaller arasında bir arayüz görevi görür. Öncelikle gelen analog sinyalleri sayısallaştıran bir bilgisayar gibi işlev görür; böylece bir bilgisayar onları yorumlayabilir. Sinyali ölçmek için kullanılan bir DAQ cihazının üç temel bileşeni vardır ve bunlar sırasıyla sinyal şartlandırma devresi, analog sinyali sayısal değere çevirici (ADC) ve bilgisayar veri yoludur. Birçok DAQ cihazı, ölçüm sistemini ve süreci otomatikleştiren diğer fonksiyonları içerir. Örneğin, sayısal-analog dönüştürücü (DAC) analog çıkış sinyalleri, sayısal giriş / çıkış hatları ve sayısal darbeleri sayan ve üreten sayacılar/zamanlayıcılar.

Sinyal şartlandırma

Sensörlerden gelen sinyaller veya dış dünya, doğrudan ölçmek için gürültülü veya çok tehlikeli olabilir. Sinyal şartlandırma devresi, bir sinyali bir ADC'ye giriş için uygun bir formda işler. Bu devre, yükseltme, zayıflatma, filtreleme ve izolasyon sağlama görevlerini üstlenebilir. Bazı DAQ cihazları, belirli sensör tiplerini ölçmek için tasarlanmış yerleşik sinyal şartlandırma özelliğini içerir.

Analog sayısal dönüştürücü

Sensörlerden gelen analog sinyaller, bir bilgisayar gibi sayısal cihazlarla manipüle edilmeden önce sayısal haline dönüştürülmelidir. ADC, analog sinyalin anında sayısal olarak temsilini sağlayan bir yongadır. Uygulamada, analog sinyaller zamanla sürekli değişir ve bir ADC, sinyalin periyodik *örneklerini* önceden tanımlanmış bir hızda alır. Bu örnekler, bir bilgisayar veri yolu (bus) üzerinden bilgisayara aktarılır. Bilgisayardaki bir yazılım da bu örneklerden orijinal sinyali yeniden oluşturur.

Bilgisayar veri yolu

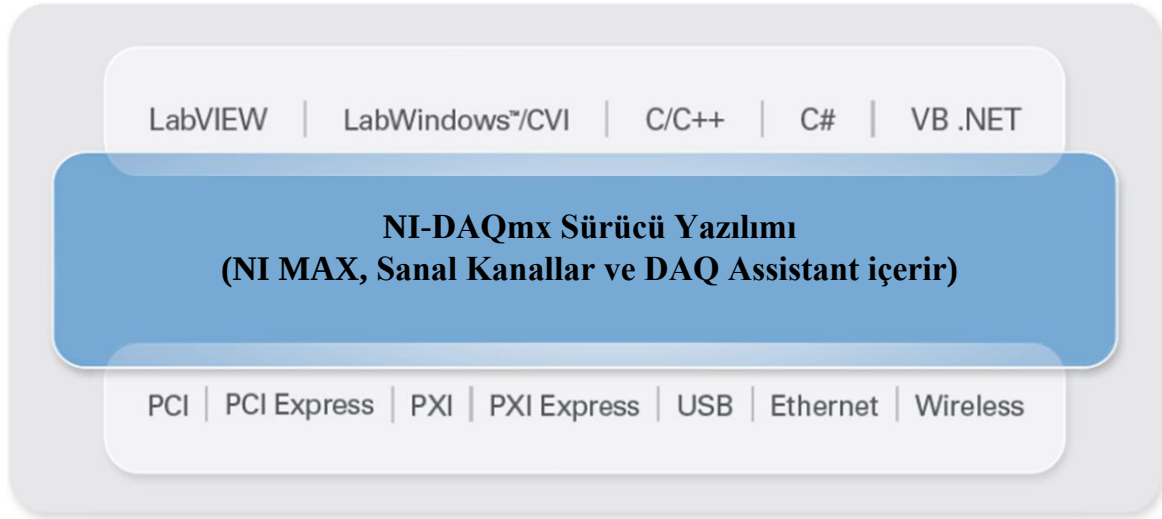
DAQ cihazları, bir yuvadan veya porttan bir bilgisayara bağlanır. Bilgisayar veri yolu, talimatları ve ölçülen verileri iletmek için DAQ cihazı ve bilgisayar arasındaki iletişim arabirimi olarak görev yapmaktadır. Birçok bus türü vardır ve her biri farklı uygulama türleri için farklı avantajlar sunmaktadır. DAQ aygıtları, USB, PCI, PCI Express ve Ethernet gibi en yaygın bilgisayar veri yollarının için sunulmaktadır. Yakın geçmişte, DAQ cihazları kablosuz iletişim için 802.11 Wi-Fi için hazır hale gelmiştir. NI tarafından sunulan PXI ve PXI Express de bu yollardandır.

4.1.3. Bilgisayar donanımı

Programlanabilir yazılım içeren bir bilgisayar DAQ cihazının çalışmasını kontrol etmektedir ve ölçüm verilerini işlemek, görselleştirmek ve saklamak için kullanılır. Farklı türde bilgisayarlarda farklı türde uygulamalar kullanılır. Laboratuvar koşullarında işleme gücü açısından bir masaüstü kullanılabilir. Sahada ise taşınabilirliği için bir dizüstü bilgisayarı kullanılabilir veya dayanıklılığı sebebiyle, üretim tesisinde endüstriyel bir bilgisayar kullanımı tercih edilebilir.

Sürücü yazılımı

Sürücü yazılımı, uygulama yazılımına DAQ cihazı ile etkileşim imkânı sağlar. Düşük seviye donanım komutlarını ve register düzeyi programlamayı soyutlayarak DAQ cihazı ile iletişimi basitleştirir. Genel anlamda DAQ sürücü yazılımı, uygulama yazılımını oluşturmak için bir programlama ortamında kullanılan bir uygulama programlama arabirimini (API) sunar. Hemen hemen tüm NI DAQ aygıtları için, donanım sürücüsü NI-DAQmx'dır ve yüksek hızlı akan (streaming) uygulamalar için idealdir. NI tarafından sunulan geliştirme ortamları yanı sıra metin tabanlı geliştirme ortamları da bu donanım sürücüsüne Şekil 4.2'de gösterildiği gibi erişebilmektedir. Sistem yapılandırması ve testi için bünyesinde bulunan Measurement & Automation Explorer (MAX) ve NI DAQ Asistanı kullanılmaktadır.



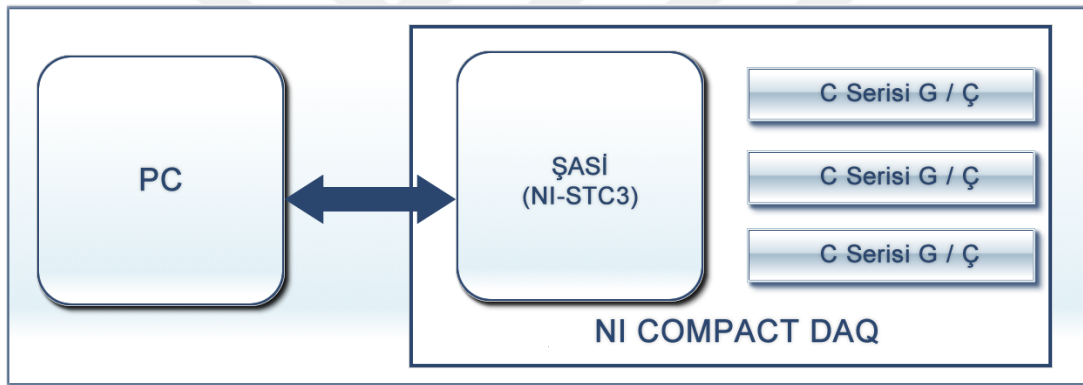
Şekil 4.2. NI-DAQmx sürücü yazılımının geliştirme ortamları ve iletişim yolu olanakları

Uygulama yazılımı

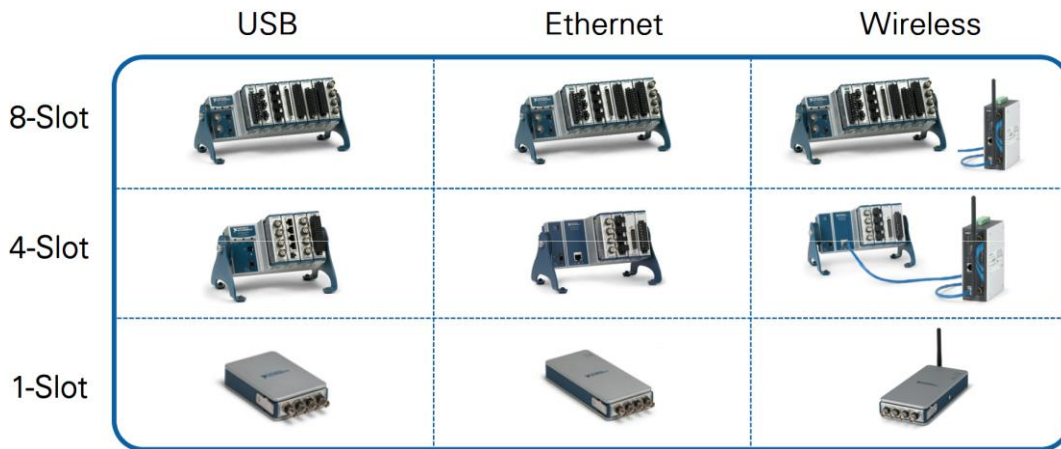
Uygulama yazılımı, ölçüm verilerini edinmek, analiz etmek ve sunmak için bilgisayar ile kullanıcı arasındaki etkileşimi kolaylaştırmaktadır. Bu yazılım, önceden tanımlanmış işlevlere sahip önceden hazırlanmış bir uygulamadır veya özel işlevlerle uygulamalar oluşturmak için bir programlama ortamıdır. Şekil 4.2'de gösterilen uygulama yazılımlarından olan ve NI tarafından sunulan iki ana geliştirme ortamı bulunmaktadır. Bunlardan en bilineni, grafiksel bir sistem tasarım ortamı olan LabVIEW yazılımıdır. Diğeri ise, C tabanlı bir geliştirme ortamı olan LabWindows / CVI yazılımıdır.

4.2. NI CompactDAQ

NI tarafından sunulan çeşitli CompactDAQ (cDAQ) şasileri yanı sıra, kendi işlemcisine ve gömülü bir işletim sistemine sahip olan bağımsız cDAQ ürün grubu da bulunmaktadır. Şekil 4.3'te genel bir NI cDAQ şasisi için sistem blok diyagram görülmektedir. Bu şekilde de anlaşıldığı üzere, standart bir DAQ sistemi gibi bir bilgisayar gerekmektedir. NI Compact platformları üzerinde değişik amaçlara yönelik Compact (C) serisi giriş/çıkış modülleri takılması için en çok sekiz veya en az dört yuva bulunmaktadır. Şekil 4.4'de NI tarafından geliştirilmiş USB, Ethernet ve Wi-Fi bus kullanan genel CompactDAQ platformları verilmiştir. Tüm ürün gamında DAQ işlevi NI-STC3 zamanlama ve senkronizasyon entegresi ile yürütülmektedir. Oldukça sağlam ve güvenilir bir yapıları vardır. 5 g titreşime ve 50 g şoka dayanabilmektedirler.

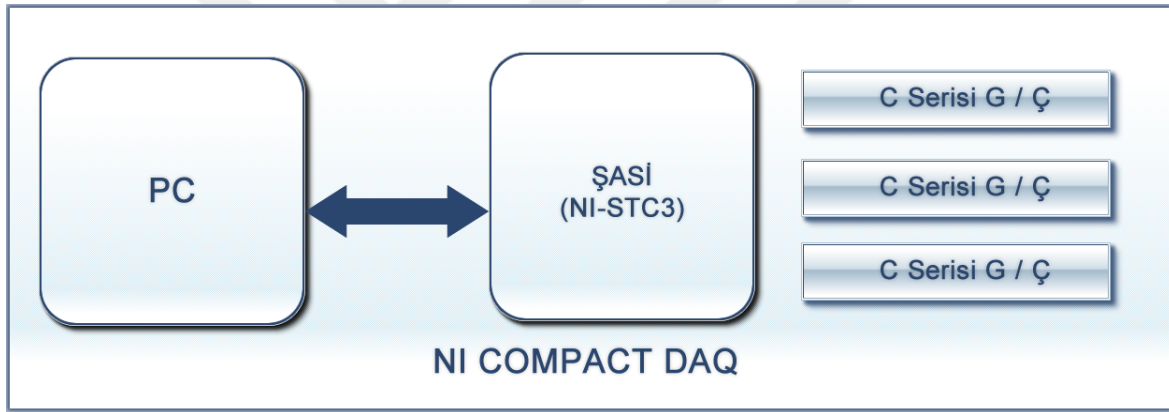


Şekil 4.3. Genel NI CompactDAQ platform blok şeması



Şekil 4.4. Genel NI CompactDAQ platformları

Şekil 4.5'te gömülü sistem bir NI CompactDAQ platformu gösterilmiştir. Bu platform, bağımsız veya denetleyicili cDAQ platformları olarak da bilinmektedir. Yüksek performanslı cDAQ-913x denetleyicileri, gelişmiş veri kaydı ve gömülü izleme uygulamaları için dayanıklı bir muhafazada Intel işlemci ve 32 GB'ye kadar kalıcı depolama içerir. Bu alana 25 MB/s hızında kayıt yapılabilir. Harici sabit disk kullanımı ile veri hızı 13 MB/s seviyesine düşer ve 3TB'a kadar desteklemektedir. USB Flash bellek kullanıldığında ise veri hızı 2 MB/s düzeyine iner ve 64 GB'a kadar desteklemektedir. Microsoft Windows Embedded Standard 7 (WES7) veya gerçek zamanlı bir işletim sistemi kullanma seçeneğinin sunulmaktadır. LabVIEW yazılımı tarafından sağlanan kapsamlı Windows ekosistem yazılımından ve ekran yeteneklerinden yararlanmak için bir cDAQ-913x üzerinde WES7 seçilebilir. Uzun vadeli güvenilirlik için önerilen LabVIEW Real-Time, NI Linux Real-Time OS ile yerel bir ekran kullanılabilir.



(a)



(b)

Şekil 4.5. Bağımsız NI CompactDAQ denetleyici platformu (a) blok şeması (b) donanımı

cDAQ-913x denetleyicisi ayrıca USB, Ethernet, seri (RS-485, RS-232 gibi), MXI-Express, CAN / LIN, tetikleme girişi ve Mini DisplayPort veya VGA görüntü çıkışı gibi geniş bir standart bağlantı ve genişletme seçenekleri sunar. Çeşitli analog girişler ve çıkışlar, sayısal girişler ve çıkışlar, sayaçlar / zamanlayıcılar ve CAN ölçüm ve kayıt sistemi için en çok

sekiz modüle kadar NI C serisi G/Ç modülü ile bir cDAQ-913x konfigürasyonu kurulabilir. Sekiz modüllü tek bir şasi ile 256 kanal kullanılabilir. Kullanılan modüle göre, sürekli dalga formu için kanal başına 1 MS/s örnekleme ve 24-bit çözünürlüğe imkân tanımaktadır. cDAQ-913x denetleyicilerinin dört adet 32-bit genel amaçlı sayıcı/zamanlayıcı bulundurmaktadır. Bu sayaçlara, karesel (quadrature) kodlayıcılar, PWM, olay sayımı, darbe dizisi üretimi ve periyot veya frekans ölçümü gibi uygulamalar için NI 9401 veya NI 9402 gibi donanım zamanlamalı bir sayısal modül aracılığıyla erişilebilmektedir.

CompactDAQ denetleyicileri, yoğun işlem görevleri için bir Intel işlemci özelliği ile ön plana çıkarlar. Çok çekirdekli işlemcilerle, işlemleri gerçekleştirmek için gereken süreyi önemli ölçüde azaltmak için bağımsız görevleri veya konuları aynı anda çalıştırabilmek mümkündür. LabVIEW, her bir işlemi birden fazla iş parçasına bölerek bu çok çekirdekli teknolojinin avantajlarından yararlanan bir uygulama geliştirmeyi kolaylaştırır. İşlemcide iş parçacığı yönetiminin karmaşık görevi net bir şekilde grafiksel programlamaya yerleştirilmiştir. Bu platform kablolama ihtiyacını daha da düşürür, network üzerindeki aşırı veri akışı azaltır, verileri yerel olarak veya harici olarak tutabilir, yerel veya uzaktan etkileşimde bulunabilir, birden çok iletişim protokolünü destekler.

4.2.1. NI CompactDAQ avantajları

NI tarafından sunulan CompactDAQ platformu üstün kullanıcı arayüzü çözümleri, kullanım kolaylığı, dayanıklılığı, en küçük alanı kaplaması, en geniş esnekliği sağlarken en iyi fiyat performans oranı gibi birçok avantaj sunmaktadır.

Geleceğe hazır esnek yapı

NI CompactDAQ, donanım gereksinimlerindeki değişikliklere uyum sağlamak için geleneksel aletlere göre çok daha esnektir. Geleneksel aletler, işlemcileri, bellek, yazılımları ve ekranları kısa sürede demode olabilecek sabit işlevsellikleri ile bir kutuya yerleştirir. Bunun yerine, NI CompactDAQ, bilgisayarınızın hız, güç ve veri depolama kapasitesini kullanır. Daha fazla veri saklama ya da daha hızlı bilgi işlemeye ihtiyaç olduğunda, yeni ve en son teknolojiye sahip bir cihazı satın almak yerine bilgisayarın belleğini yükseltme yolu seçilebilir. Ayrıca, yeni bir ölçüm tipi ekleme veya kanal sayısını artırmak, ek bir modülün

NI CompactDAQ şasisine takılması kadar kolaydır. Bu tezde kullanılan ve gömülü sistem desteği sunan, bağımsız NI CompactDAQ çözümler de bulunmaktadır.

Diğer veri toplama sistemlerinden farklı olarak NI CompactDAQ, analog giriş sinyali geçişleri için elektromekanik röleleri kullanmaz. Röleler yaklaşık 1000 S/s'lik geçiş oranları ile sınırlıdır ve zamanla yıpranarak sistemin arızalanmasına neden olabilirler. NI CompactDAQ ise zamanla aşınmayan solid state çoklayıcıları kullanır. Böylece, doğru ve güvenilir yüksek hızlı ölçümler için girdi kanallarını saniyede 250 bin kez değiştirebilmektedirler.

Konektörler, sinyal şartlandırma ve tek bir pakette DAQ

Bir veri toplama sistemi monte etmek genellikle sinyal şartlandırma ve konektör bloklarının, giriş sinyallerinin sayısallaştırılması için ayrı bir aygıtı kablolanmasını içerir. Bu kablolar ve konektör blokları maliyet ekler ve sistemdeki gürültüye ve hataya katkıda bulunabilmektedir. NI CompactDAQ, sinyal konektörleri, sinyal şartlandırma ve analog-sayısal çeviricileri tek bir pakette birleştirir. Bu özellik, birden fazla bileşeni birlikte kablolanmanızla ilişkili zamanı ve varsayımları ortadan kaldırır ve gürültüye veya arıza yaratmaya katkıda bulunabilecek bileşenlerin sayısını azaltmaktadır.

NI CompactDAQ modülleri, modülün ölçüm kapasitesine uygun konektörler içerir. Örneğin, genel amaçlı gerilim giriş modüllerinin çıkarılabilir vidalı terminalleri bulunurken, dinamik ve geçici sinyaller için modüller BNC konektörlerine sahiptir. Konektörleri modüllerin ölçüm kapasitesiyle eşleştirerek NI CompactDAQ, sensör ve sinyal tesisatını kolaylaştırır ve tel kesme, sıyırma ve kıvrımayı ortadan kaldırarak hata olasılığını daha da düşürmektedir.

Hata korumalı sensör ölçümleri

NI CompactDAQ, voltaj ve akıma ek olarak termokupl, gerinim ölçer ve ivme ölçer gibi en yaygın sensör tiplerini ölçebilir. NI CompactDAQ'da bulunan NI-DAQmx yazılımı, ölçülen sinyalleri otomatik olarak mühendislik birimlerine (termokupl ölçümleri için derece Celsius gibi) ölçeklendiren bir rehberli sihirbaz aracı olan DAQ Assistant'ı içerir. Bu özellik, karmaşık formüllerle ve çevrim tablolarıyla elle ölçeklemeyi ortadan kaldırarak DAQ donanımı ile kolayca haberleşmeyi sağlar.

Yüksek hızlı USB ile kolay PC bağlantısı

Gömülü olmayan sistemler için USB, PC tabanlı test ve ölçümü büyük ölçüde basitleştirmiştir. USB tak ve çalıştır veriyolu olduğu için, bir USB portuna bağlandığında NI CompactDAQ şasisi ve tüm G/Ç modülleri otomatik olarak algılanır ve yapılandırılır. Bir arabirim kartı gerektiren eski GPIB ve seri cihazların aksine, NI CompactDAQ, standart bir USB kablosuyla doğrudan USB portuna bağlanır. Bu kablolama özelliği, geleneksel aletlerle ilişkili gizli bir maliyeti ortadan kaldırır. Basit USB kablolama ile bir NI CompactDAQ sistemini bir bilgisayardan diğerine kolaylıkla taşıyabilirsiniz. Ancak gömülü sistemlerde şasinin aynı zamanda bir PC barındırdığı dikkate alınmalıdır.

Yüksek Hızlı USB (2.0), önceki USB 1.1 standardından 40 kat fazla bant genişliği artışı sağlar. 480 Mb / s hızında, çoğu PC'de 100BaseT Ethernet bağlantısına kıyasla neredeyse 5 kat daha hızlıdır. Böylece, NI CompactDAQ, veriyi doğrudan dâhili bellekte arabelleğe almak yerine PC'den doğrudan ve PC'den kolayca akıtıp aktarmak için yeterli bant genişliğine sahiptir. Aynı zamanda, Ethernet veya seri'den daha düşük gecikme sürelerine sahiptir, bu nedenle PC'ye gelen komutlar ve PC'den gelen komutlar daha kısa sürede iletilir.

Esnek yazılım

NI CompactDAQ, nokta-tıkla yapılandırma, günlüğe kaydetme ve veri görüntüleme için basit veri günlüğü yazılımı içerir. Daha fazla esneklik için, NI CompactDAQ ayrıca NI LabVIEW, LabWindows / CVI ve Visual Studio.NET için NI-DAQmx sürücü ve ölçüm hizmetleri yazılımını da içerir. Temel sürücü işlevselliğine ek olarak NI-DAQmx, bir yapılandırma yönetimi ve test yardımcı programı, DAQ Yardımcısı sihirbaz programı ve çoklu ve veri sıkıştırma gibi yüksek performans özellikleri içerir. LabVIEW, test, ölçüm ve kontrol sistemlerini tasarlamak için endüstri lideri bir grafiksel programlama ve geliştirme ortamıdır. Programlama dili esnekliğini, basit sıcaklık izlemesinden gelişmiş kontrol sistemlerine kadar çeşitli uygulamalar oluşturmak için özellikle test, ölçme ve kontrol için tasarlanmış yerleşik araçları birleştirmektedir.

Daha fazla kanal, daha az alan

NI CompactDAQ, 25 x 9 x 9 cm ölçülerindeki şasi ile 256 kanala kadar G/Ç kanalını bünyesinde toplar. Bir kilogramdan daha hafif ağırlığa sahiptir ve taşınabilirlik gerektiren

uygulamalar için idealdir. Kolayca bir dizüstü bilgisayar çantasına sığar ve AA şebeke bulunmayan araç içi ve diğer uygulamalar için DA kaynaklardan güç alabilir.

Sayısal izolasyon ile geliştirilmiş güvenlik ve doğruluk

NI CompactDAQ modüllerinden (NI 9233) biri hariç tümü şasiden ve diğer modüllerden sayısal olarak izole edilmiştir. Elektrostatik deşarj (ESD), yıldırım ve güç dalgalanmalarından şasinin, diğer modüllerin ve gömülü sistemli olmayan şasiler için gereken ana bilgisayarın zarar görmesinden doğan zararlı sinyalleri bu izolasyon önler. Çoğu G/Ç modülü 2.300 Vrms izolasyona (kısa süreli) ve 250 Vrms izolasyona (sürekli) sahiptir. Her bileşen çeşitli uluslararası güvenlik, elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve çevre sertifikaları ve derecelendirmeleri ile birlikte gelir.

Sayısal olarak izole edilmiş NI CompactDAQ modülleri ayrıca, hata oluşturan toprak döngülerini ortadan kaldırmaktadır. Toprak döngüleri, test edilen sistem ve veri toplama sistemi aynı toprağı paylaştığında ve iki sistem arasında potansiyel bir fark olduğunda ortaya çıkar. İzole edilmiş NI CompactDAQ modülleri harici güç bağlantısını zemin referansı olarak kullanmadığından zemin döngülerinden kaynaklanan yanlışlıkların oluşması ihtimali ortadan kalkar (İnternet: National Instruments Corporation).

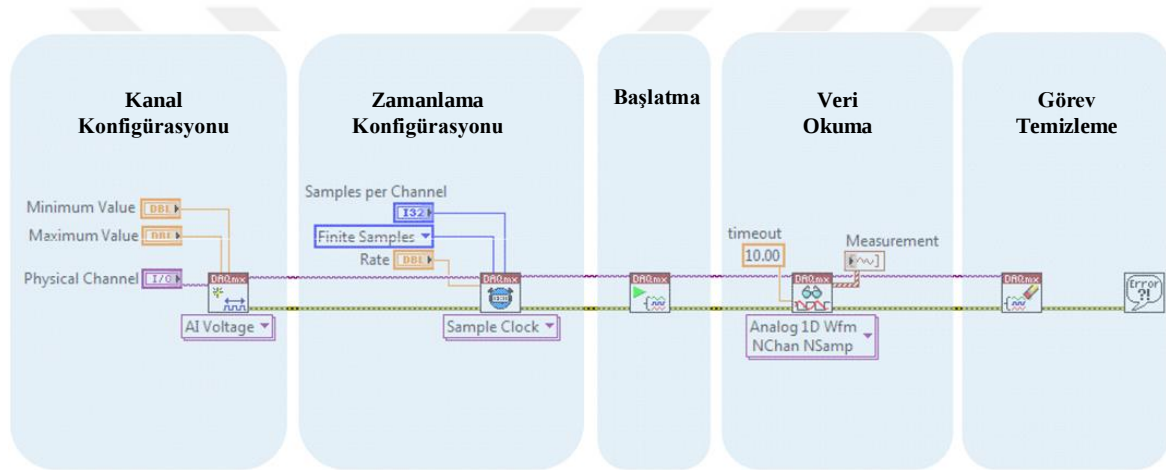
4.2.2. NI DAQmx VI kategorileri ve fonksiyonları

Aşağıdaki bölüm, deneyler için veri edinme işlemi özetlemektedir. Verileri elde etmek için NI DAQmx sürücü çağırımları, bir NI DAQ cihazını çağırma sürecindeki işlevlerine göre gruplandırılmıştır. Bu gruplar Yapılandırma, Okuma/ Yazma ve Kapatma şeklinde üç kategoridedir. Bunların içinde en yaygın olanlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Şekil 4.6’da, bir gerilim sinyali elde etmek için DAQ cihazını programlamada kullanılan bir dizi VI görülmektedir. Bir programlamada bu VI’ların bazıları şart iken bazıları da opsiyoneldir ancak bunların kullanılmaları tasarıma gelişmiş özellikler katabilir. LabVIEW, ardışık VI’lara teller boyunca bilgi aktarmak için veri akışı tekniğini kullanmaktadır. Bu programlama paradigması, bir veri toplama uygulamasının mantığını düşünüldüğünde, aynı düşünce şeklinde de programlamayı mümkün kılmaktadır.

Çizelge 4.1. NI DAQmx VI kategorileri ve fonksiyonları

Kategori	Sanal Enstrüman adı	Fonksiyonu
Yapılandırma	NI DAQmx Create Virtual Channel VI	Kanal oluşturma (G/Ç)
	NI DAQmx Timing VI	Zamanlama
	NI DAQmx Configure Logging VI	Günlüğe kaydetme
	NI DAQmx Start Trigger VI	Görevi Tetikle
	NI DAQmx Start Task VI	Görevi başlatma
Okuma/ Yazma	NI DAQmx Read VI	Okuma
	NI DAQmx Write VI	Yazma
Kapatma	NI DAQmx Stop Task VI	Görevi durdurmak
	NI DAQmx Clear Task VI	Görevi temizlemek



Şekil 4.6. LabVIEW ortamında bir DAQ cihazının sanal enstrümanlar ile programlaması

NI-DAQmx sanal kanal oluşturma VI

NI-DAQmx Create Virtual Channel (Sanal Kanal Oluştur) işlevi bir sanal kanalı oluşturur ve bir göreve ekler. Aynı zamanda birden çok sanal kanal oluşturmak ve hepsini bir göreve eklemek için kullanılabilir. Bir görev belirtilmediğinde, işlev otomatik olarak bir görev oluşturur. Aynı zamanda, sanal kanalın gerçekleştireceği belirli ölçüm veya üretim türüne karşılık gelen çok sayıda örneğe sahiptir.

Uygulamada kullanılmak üzere seçilebilecek ve önceden yapılandırılmış birçok kanal türü vardır. Gerilim, akım ve daha onlarca ölçüm işinde kullanılabilecek analog giriş kanalları bunların başında gelmektedir. Gerilim, akım ve diğer fonksiyon üretimini belirli sınırlılıklarda gerçekleştirebilen analog çıkış kanalları da bulunmaktadır. Olmazsa olmaz sayısal giriş ve sayısal çıkış kanalları da bunların arasında yer almaktadır. Ayrıca, frekans,

periyot ve yarı periyot, darbe frekansı ve genişliği ölçümü ile kenar sayma, doğrusal encoder ve açısal konum belirleme gibi işlemlerde kullanılmak üzere sayaç (counter) giriş kanalları bulunmaktadır. Sayaç çıkış kanalları ile de darbe üretimi ve frekans, zaman tıkları üretilebilmektedir.

NI-DAQmx zamanlama VI

NI-DAQmx Timing yani zamanlama fonksiyonu, donanım zamanlamalı veri toplama işlemleri için zamanlamayı yapılandırır. Bu, işlemin sürekli veya sonlu olup olmayacağını belirlemek, Sonlu işlemler için edinmek veya üretmek için numune sayısını seçmek ve gerektiğinde bir arabellek oluşturmayı da içerir. Örneklem zamanlaması gerektiren işlemler (analog giriş, analog çıkış ve sayaç) için örneklem saat kaynağını (dâhili veya harici) ve hızını ayarlar. Örneklem saati, örneklerin alındığı veya üretildiği hızı kontrol eder. Her saat darbesi, göreve dâhil edilen her sanal kanal için bir örneğin edinilmesini veya oluşturulmasını başlatır.

NI-DAQmx günlük yapılandırma VI

NI DAQmx Configure Logging (Günlük Yapılandırma) VI, günlüğe kaydedilen veri dosyasının konumunu ve günlük modunu ayarlamak için kullanılır. Veriler doğrudan arabellekten diske yazılmış gibi Teknik Veri Yönetimi Akışı (TDMS) biçiminde günlüğe kaydedilir. Bu fonksiyon doğrudan DAQmx Görevi Başlat VI'sından önce eklenmelidir. Verileri okumak için, bu dosya biçimini okuyabilen bir program kullanmak gerekmektedir. National Instruments, doğal olarak bu dosya biçimini okuyan ve kolay sonradan işleme ve veri görselleştirme araçları sağlayan NI DIAdem adında bir veri yönetimi yazılım aracı sunmaktadır. LabVIEW kurulumunda, Excel'de bu formatı açmasına izin veren bir Microsoft Excel eklentisi yüklemektedir.

NI-DAQmx tetikleme VI

DAQmx Trigger (Tetikleme) VI, tetikleyiciyi belirli bir işlemi gerçekleştirmek üzere yapılandırır. En sık kullanılan işlem bir başlatma tetikleyicisi ve bir referans tetikleyicidir. Bir başlatma tetiklemesi bir toplama veya üretim başlatır. Bir dizi toplanmış örnekte ön tetikleyici verinin bittiği ve sonra tetikleyici verinin başladığı yeri referans tetiği konumu olarak belirler. Bu tetikleyicilerin her ikisi de bir sayısal kenarda, bir analog kenarda veya

bir analog sinyal pencereye girdiğinde veya çıkarken oluşacak şekilde yapılandırılabilir.

NI-DAQmx görev başlatma VI

“NI DAQmx Görev Başlatma” işlevi, bir görevi çalışma durumuna geçirir. Çalışan durumda, görev toplama veya üretimi gerçekleştirir. “NI DAQmx Görev Başlatma” işlevi kullanılmazsa, NI DAQmx okuma veya yazma işlevi yürütüldüğünde, bir görev dolaylı olarak çalışma durumuna geçecek veya otomatik olarak başlatılacaktır. Her zaman gerekli olmasa da, NI DAQmx Görevi Başlatma işlevini kullanarak bir donanım zamanlı toplama veya üretimle ilgili bir görevi başlatmak için tercih edilmektedir. Ayrıca, “NI-DAQmx Okuma” işlevi veya “NI DAQmx Yazma” işlevi bir döngü gibi birden çok kez çalıştırılırsa, “NI DAQmx Görevi Başlatma” işlevi de kullanılmalıdır. Aksi halde, tekrar tekrar başlatılacak ve durdurulacağı için görevin performansı düşecektir.

NI-DAQmx okuma VI

NI-DAQmx Okuma işlevi, belirtilen toplama görevinden örnekleri okur. Fonksiyonun farklı örnekleri, toplama türünü (analog, sayısal veya sayaç), sanal kanal sayısını, örnek sayısını ve seçilecek veri türünü sağlar. Belirtilen miktardaki örneğin DAQ kartındaki FIFO’dan RAM’deki PC Tamponuna aktarıldıktan sonra, NI Tamponu uygulama geliştirme ortamı belleğine giderek burada bir ön panel göstergesinde görüntülenebilir.

NI-DAQmx yazma VI

NI-DAQmx Write yani yazma işlevi, örnekleri belirtilen üretim görevine yazar. İşlevin farklı aşamaları, sanal kanalların sayısı, numune sayısı ve seçilecek veri türü gibi üretim tiplerine (analog veya sayısal) izin verir. NI-DAQmx Yazma İşlevi, örnekleri Uygulama Geliştirme Ortamı (UGO) Belleğinden RAM’deki PC tamponuna taşır. Bu örnekler, daha sonra üretilmesi için PC arabelleğinden DAQ kartı FIFO’suna aktarılır.

NI-DAQmx Write fonksiyonunun her aşaması, doğrudan başlatılmadığında fonksiyonun dolaylı olarak başlatılacağını belirlemek için otomatik başlatma girişine sahiptir. Daha önce "NI-DAQmx Görev Başlatma" işlevinde açıklandığı gibi, donanım zamanlamasını kullanan bir üretim görevini doğrudan başlatmak için "NI-DAQmx Görevi Başlatma" işlevi

kullanılmalıdır. Ayrıca, "NI-DAQmx Yazma" işlevi birden çok kez çalıştırılırsa (örneğin bir döngüde), performansı en üst düzeye çıkarmak için de "NI-DAQmx Görevi Başlatma" işlevi kullanılmalıdır.

NI-DAQmx görev durdurma VI

NI-DAQmx Görevi Durdur işlevi görevi durdurur ve DAQmx Görevi başlatılmadan önceki görev durumuna geri getirir. "DAQmx Read VI" veya "DAQmx Write VI" işlevleri döngü gibi birden fazla kez kullanıldığında "DAQmx Görevi Başlat VI" ve "DAQmx Görevi Durdur VI" kullanılmadığında, görev başlayacak ve art arda duracak ve bu da performansı uygulama performansını düşürebilmektedir.

"DAQmx Görevi Başlat" işlevini doğrudan kullanıldığında, "DAQmx Görevi Durdur" seçeneğini kullanmaktan kaçınılabilir ve yalnızca DAQmx görevini yapısı gereği durduracak olan "DAQmx Görevi Sil" kullanılabilir ve bu hiçbir performans düşüşü göstermemektedir. "DAQmx Görevi Başlat" ve "DAQmx Görevi Sil" kullanmak yaygın bir uygulamadır ve "DAQmx Görevi Durdur" yalnızca gelişmiş uygulamalar için kullanılmaktadır.

NI-DAQmx görev temizleme VI

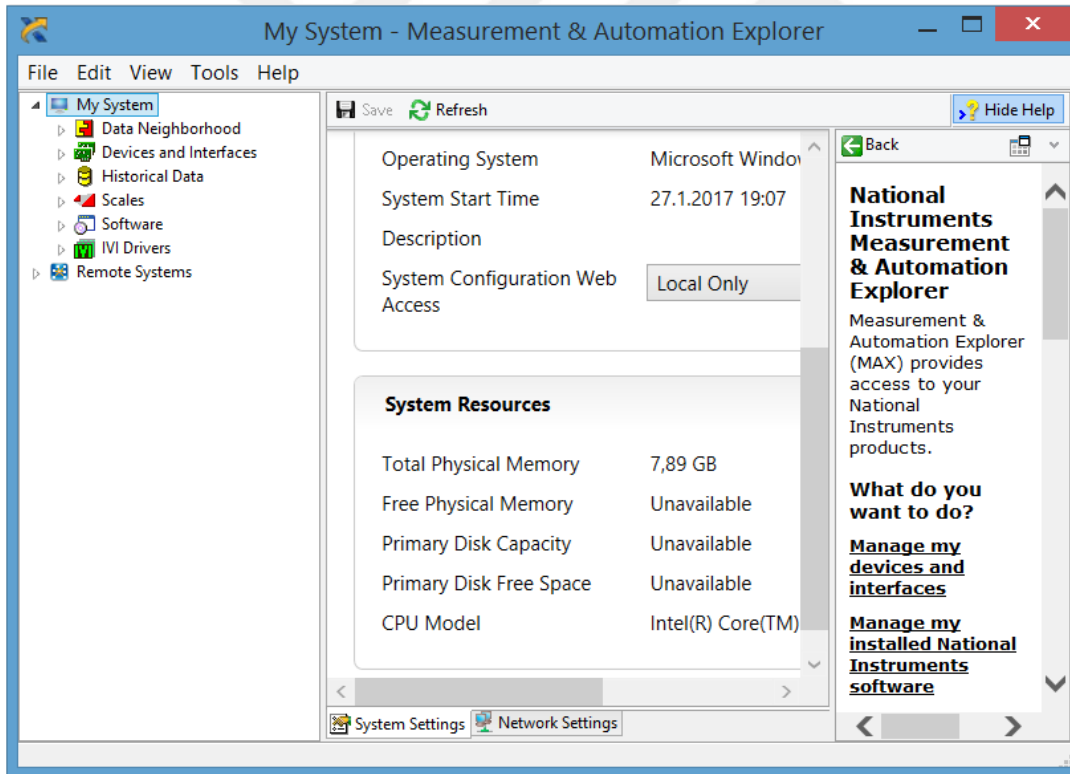
"NI-DAQmx Clear Task" işlevi belirtilen görevi silmektedir. Görev o anda çalışıyorsa, işlev önce görevi durdurur ve daha sonra tüm kaynaklarını serbest bırakır. Görev silindiğinde, yeniden oluşturulmadığı sürece kullanılamaz. Bu nedenle, bir görev tekrar kullanılacak ise, o görevi durdurmak için "NI-DAQmx Görevi Durdur" işlevi kullanılmalıdır, çünkü bu şekilde görev silinmemektedir. Sürekli işletme için toplama veya üretimi esasen durdurmak amacıyla "NI-DAQmx Clear Task" fonksiyonu kullanılmalıdır (İnternet: National Instruments Corporation).

4.2.3. NI MAX

Şekil 4.7’de kullanıcı arayüzü görülen Measurement & Automation Explorer (MAX), NI tarafından sunulan donanımlara ve yazılımlara erişim sağlar. NI donanımlarının ve yazılımlarının yapılandırılması, yapılandırma yedeklerinin alınması veya kopyalanması işlemleri ile birlikte, bu donanımların sürücü yazılımlarını ve diğer yazılımların

güncellenmelerini de gerçekleştirmektedir. Ayrıca, kanalları, görevleri, arayüzü, ölçekleri ve sanal enstrümanları oluşturma ve düzenleme işlemlerini gerçekleştirir. Sisteminize bağlı cihazları ve cihazları görüntüleme, tanılama ve bunlar için testi panelleri imkânı sağlamaktadır. Kendi Kendine Test, donanımınızla bağlantıyı kontrol etmek için kullanılan temel bir yardımcıdır. NI CompactDAQ şasisine sinyal bağlantılarını kontrol etmek için de NI-DAQmx Test Panellerini kullanılabilir. Bu panelleri, herhangi bir kod yazmadan sinyal bağlantılarının kontrol edilmesine izin verir ve cihazın her bir kanalındaki sinyalin okunmasını sağlar.

MAX ile takılı modüllere verilen otomatik isimlendirmeler değiştirilebilmektedir. Önemli bir noktada, herhangi bir NI-DAQmx cihaz ve birçok modüler enstrüman MAX ile benzetim olarak oluşturulabilmesidir. Böylece, gerçek donanıma sahip olmaksızın benzetimsel bir cihazla denenmesini sağlar.



Şekil 4.7. NI MAX kullanıcı arayüzü

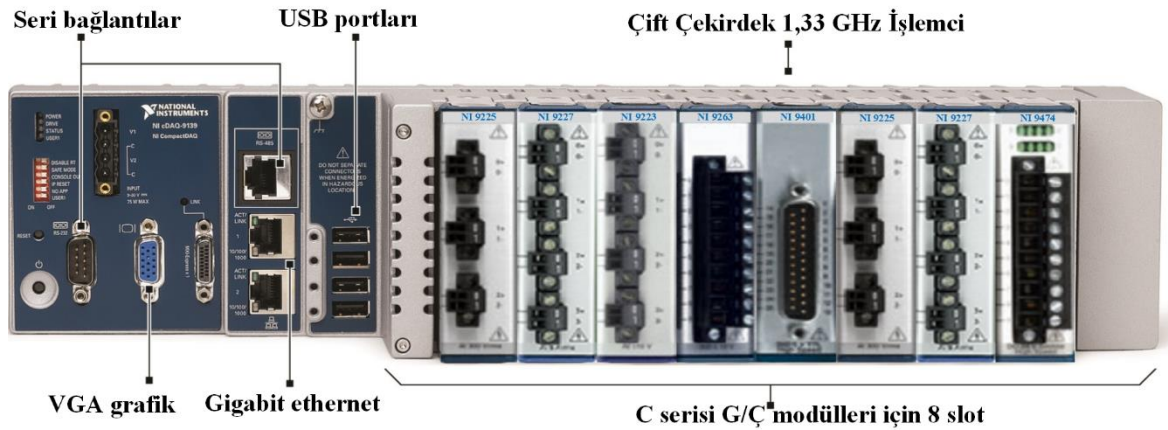
4.2.4. NI DAQ asistanı

NI-DAQmx ile birlikte gelen DAQ Asistanı, gerçek veya benzetimsel donanımlar için ölçüm verilerini yapılandırmak, test etmek ve elde etmek için kullanılan grafiksel, etkileşimli bir

kılavuzdur. Tek bir tıklamayla, yapılandırmaya göre kod üretebilir, böylece karmaşık işlemleri geliştirmek daha kolay ve hızlı hale gelmektedir. DAQ Asistanı tamamen menü odaklı olduğu için, daha az programlama hatası söz konusudur ve DAQ sistemini kurma işleminden ilk ölçümleri almaya kadar olan zamanı önemli ölçüde azaltmaktadır.

4.2.5. Yapılandırılan NI CompactDAQ platformu

Şekil 4.8’de, bu tezde kullanılan modüller ile birlikteki toplam maliyeti 20000 Amerikan doları olan NI CompactDAQ platformu yer almaktadır. Masaüstü montaj ekipmanları ve güç kaynağı gibi yardımcı ekipmanlar ile sadece NI cDAQ-9139 NI CompactDAQ sisteminin maliyeti on bin Amerikan dolarıdır. Kullanılan C-serisi modüllerin toplam maliyeti de, bir on bin Amerikan dolarıdır.



Şekil 4.8. Yapılandırılan NI CompactDAQ platformu

NI tarafından, analog modüller sadece giriş ve sadece çıkış birimi olarak sunulmaktadır. Sayısal modüllerin ise sadece giriş ya da sadece çıkış olanları yanında, hem giriş hem de çıkış olarak ayarlanabilen tipleri de vardır. Profibus, Canopen, Canbus, R2485, RS232 gibi ve sayısı daha da fazla olan endüstriyel haberleşme modülleri yanında GSM, GPS, WiFi gibi haberleşme modülleri de vardır. Çıkarılabilir hafıza modülleri ve çeşitli motorlara yönelik kontrol modülleri de bulunmaktadır. Üçüncü parti firmaların modül tasarımları yanında müşteri modül tasarımlarını da destekleyen yapılar; NI tarafından sunulmaktadır. Modül fiyatları modüllerin hızlarına, giriş/çıkış tiplerine ve sayılarına gibi birçok niteliğe göre oldukça değişmektedir. Örneğin, bu tez için kullanılan NI 9225 300 volt RMS analog girişin fiyatı 2000 Amerikan dolarıdır. Şasiye eklenen modüller sırasıyla; 2 adet NI 9225 yüksek

gerilim giriş modülü, 2 adet NI 9227 akım giriş modülü, 1 adet NI 9223 analog giriş, 1 adet NI 9263 analog çıkış, 1 adet NI 9401 sayısal G/Ç ve 1 adet NI 9474 sayısal çıkış olmak üzere toplamda sekiz adet modül şasi üzerine yerleştirilmiştir.

4.3. NI LabVIEW

NI tarafından geliştirilen LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), veri toplama ve enstrümantasyon kontrol yazılımı için standart olarak endüstri, akademik ve araştırma laboratuvarlarında geniş çapta benimsenen grafiksel bir programlama dilidir. LabVIEW, Windows, Mac OS X ve Linux ile çalıştırılabilen çok yönlü güçlü ve esnek bir enstrümantasyon ve analiz yazılımı sistemidir. Ayrıca, PDA’larda (PalmOS, PocketPC veya Windows CE cihazları), gerçek zamanlı platformlarda çalıştırabilir ve hatta LabVIEW programları FPGA yongalarına, DSP ve mikroişlemcilere gömülebilmektedir. LabVIEW uygulamaları yalnızca fiziksel olarak değil, aynı zamanda sanal olarak ağa bağlı uygulamalar arasında da konuşlandırılabilir. Uzaktan erişime ve anlık veri transferine imkân tanıyan web tabanlı kontrol ve izleme uygulamaları geliştirilmektedir. NI LabVIEW ve donanım çözümleri NASA, Amerikan donanması ve CERN laboratuvarları başta olmak üzere dünya genelinde birçok Ar&Ge tesisinde kullanılmaktadır. Ülkemizde ise başta Roketsan, Havelsan ve Aselsan gibi savunma sanayisinde, endüstride ve akademik çalışmalarda kullanılmaktadır (Travis ve Kring, 2006).

Tüm grafiksel programlama dillerinde olduğu gibi, programlama ve yazılım geliştirme konusuna aşina olmayan kullanıcılar tarafından anlaşılmasının daha kolay olması önemli bir avantajdır. LabVIEW, pek çok türdeki problemi *klasik* kod yazmak için gereken zamana ve güçlüklerle göre çok daha sade ve kısa sürede çözerek geliştirme sürecini kısaltmaktadır. Diğer taraftan, metin tabanlı diğer programlama dillerinden farklı yapısı, bu dillere alışık olan kullanıcıların grafiksel programlamaya adaptasyonunu biraz güçleştirmektedir. Ancak örnekler, forumlar ve online eğitimler açısından NI tarafından sunulan içerik zenginliği kullanıcıların bunu güçlüğü aşmasında çok yardımcı olmaktadır (Travis ve Kring, 2006).

Farklı işletim sistemlerinde geliştirilen programlar birbirleri üzerinde çalışabilmesi önemli bir özelliğidir. Ancak, NI donanımları için geliştirilen sürücülerin işletim sistemi kullanımını sınırlaması nadiren de olsa, söz konusu olabilmektedir. Yine de, NI tarafından sunulan geniş donanım desteği ve üçüncü parti geliştiriciler tarafından tasarlanmış donanımları da desteklemesi bu konuda bir çözüm yolu sunabilmektedir. LabVIEW, veri toplama (DAQ),

Genel Amaçlı Arabirim Veri Yolu (GPIB) ve seri enstrüman kontrolü, veri analizi, veri sunumu, veri saklama ve internet üzerinden iletişim için uygulamaya özel kütüphaneler içerir. Analiz Kütüphanesi, sinyal üretme, sinyal işleme, filtreler, pencereler, istatistikler, regresyon, doğrusal cebir ve dizi aritmetiği gibi çok sayıda kullanışlı fonksiyon içermektedir. Lakin NI tarafından sağlanan donanım ürünlerinin ve ihtiyaca bağlı olarak LabVIEW bünyesine eklenen "Electrical Power Suite (EPS)" ve "Control & Simulation" gibi ekstra yazılım araçlarının tasarım maliyetini yükselttiği de bir gerçektir. Buna rağmen, LabVIEW ile geliştirilebilen çözüm çeşitliği, bu çözümleri getiren bireysel cihaz ve yazılım tercihlerinin getireceği maliyetlerinden tasarruf edilmesi anlamına gelir.

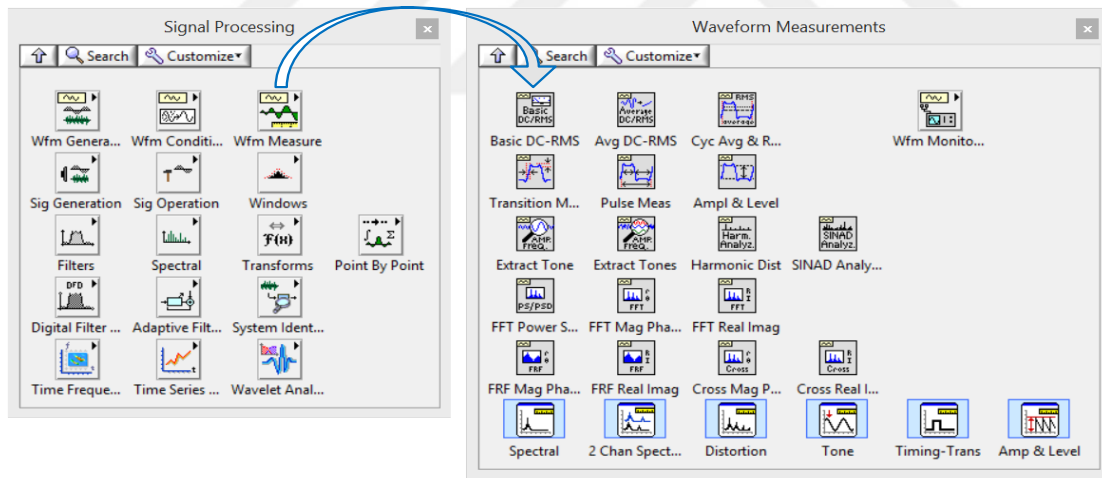
LabVIEW “G” olarak da adlandırılabilen ve uygulama oluşturmak için metin tabanlı geliştirme ortamı yerine simgeler kullanan grafiksel bir programlama dilidir. Enstrümantasyonların programın yürütülmesini belirlediği metin tabanlı programlama dillerinin aksine, LabVIEW veri akışının yürütmeyi belirlediği veri akışlı programlama kullanır. Blok diyagram ve ön (front) panel olmak üzere iki unsuru vardır. Simge görünümlü fonksiyonların birbirlerine bağlanması ile resimsel bir şekilde programlamanın yapıldığı kısım blok diyagram adını alır. Program çalıştırıldığında, blok diyagrama dair görsel unsurların kullanıcı ile bulunduğu ekran ise ön panel adını almaktadır. GUI (Graphical User Interface) yani kullanıcı arayüzü tasarlamak için de kullanılabilmesini de bu panel üzerinden sağlamaktadır. DAQ ve benzeri bir donanım veya bir haberleşme kanalından elde edilen veriler işlenip, grafiksel ve nümerik birçok görselleştirme seçeneği ile sanal enstrümanlar (Virtual Instruments) veya kısaca VI olarak adlandırılan programlar tasarlanabilir. Programların sanal enstrüman (VI) olarak isimlendirilmesindeki sebep, görünüş ve işlev bakımından osiloskop, multimetre, jeneratör ve analizör gibi fiziksel enstrümanları taklit etmesidir. VI’lar alt program gibi alt VI’lar olarak kullanılabilmektedir (Travis ve Kring, 2006).

4.4. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanma Yöntemleri

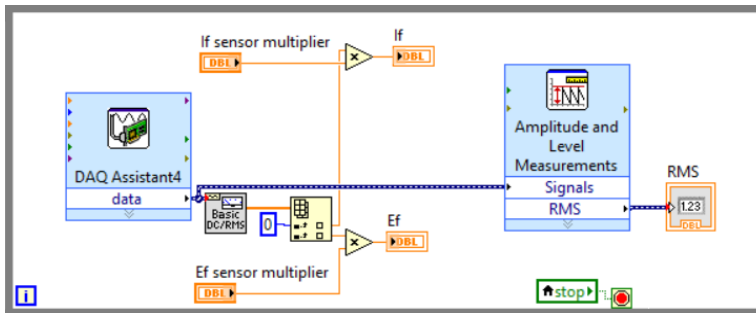
LabVIEW ve bünyesine yüklenebilecek ekstra araçlar ile elektriksel parametrelerin ölçüm ve analizi farklı yollar ile yapılabilir. Tezde kullanılan yöntemlerden ilki, sinyal işlem araçlarını barındıran ve Şekil 4.9’da gösterilen “NI Signal Processing” sanal enstrümanlarıdır. Bu enstrümanlar arasında “Waveform Measurement” adı ile sunulan

enstrümanları olarak isimlendirilen RMS, frekans, harmonik gibi parametreleri ölçen birçok sanal enstrümanı bulunmaktadır.

Şekil 4.10'daki blok diyagramdaki DAQ Asistanından gelen üç fazlı sinyali; başlangıç zamanı, t_0 , dalga formundaki veri noktaları arasındaki zaman aralığı dt 'yi ve veri değerlerini içeren bir dalga formudur. Her bir fazın kendi dalga formu ayrı ayrı elde edilebilir veya buradaki gibi bütünleşik form şeklinde elde edilebilir. Herhangi bir fazın bireysel dalga formu, LabVIEW ortamındaki birden fazla yöntemden birisi ile ayrıştırma işlemine tutularak elde edilebilmektedir. Fazlara ait bireysel dalga formları veya bütünleşik dalga formu, RMS hesaplama sanal enstrümanına uygulanarak gerçek (true) RMS değeri hesaplanabilmektedir. Aradaki fark, sanal enstrüman çıkışı bireysel dalga formu için bir nümerik değerken, bütünleşik dalga formu için üç fazında RMS değerini barındıran nümerik bir dizidir. Kullanılan sanal enstrümanın girişine yapılan bağlantı ile bunu otomatik olarak düzenlemektedir. Hesaplanan değeri veya değerleri ön panelde görselleştirmek için en basit yöntem, Şekil 4.10'daki gibi bir indikatör kullanmaktır.

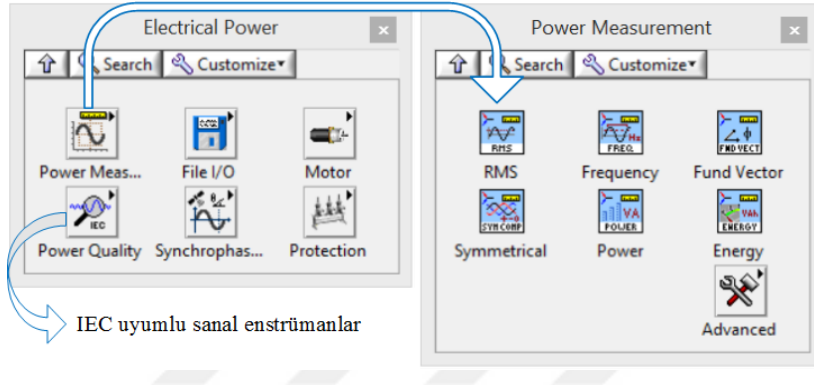


Şekil 4.9. NI Signal Processing paketindeki dalga formu ölçüm sanal enstrümanları

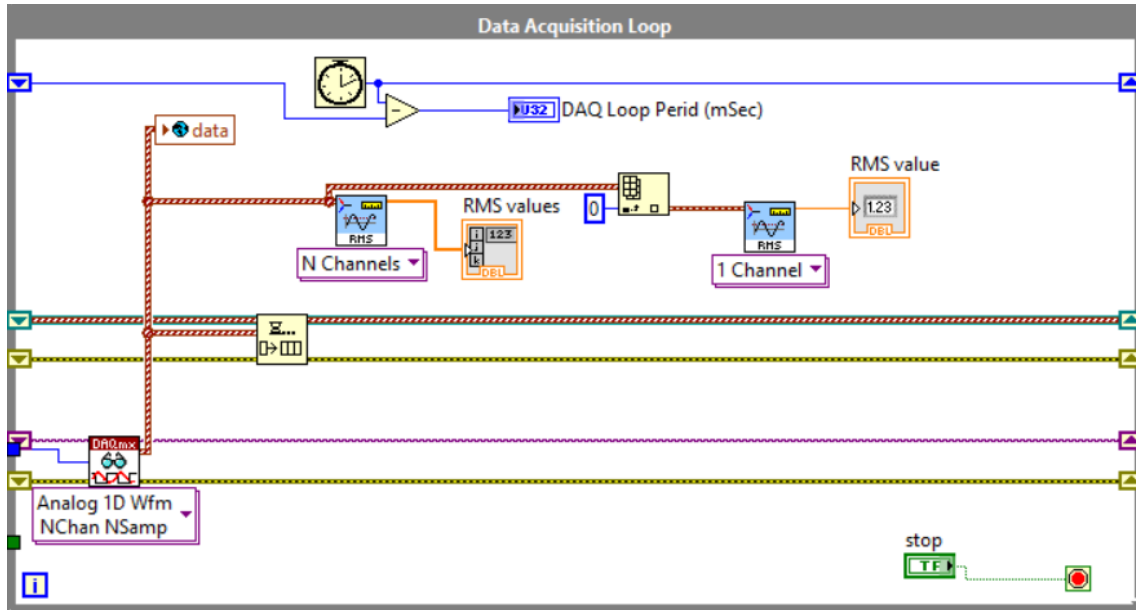


Şekil 4.10. Sinyal işleme sanal enstrümanları ile RMS hesaplama

Elektriksel parametrelerin ölçüm ve analizindeki diğeri bir yöntem de, Şekil 4.11’de gösterilen “NI Electrical Power” sanal enstrümanlarını kullanmaktır. Bu enstrüman grubunda yer alan “Power Measurement” yani güç ölçümü sanal enstrümanları da yine Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Şekil 4.12’deki blok diyagramdaki DAQ Asistanından gelen üç fazlı sinyali yine bir dalga formudur ve RMS.vi girişine uygulanmaktadır. VI girişine yapılan bağlantıya göre tek ya da birden fazla kanalın dalga formunun işlenmesi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Güç kalitesi analizinde IEC ve EN 50160 standartlarına uyumlu ölçüm yapmak için “NI Electrical Power” ile sunulan “Power Quality” enstrümanları kullanılmalıdır.

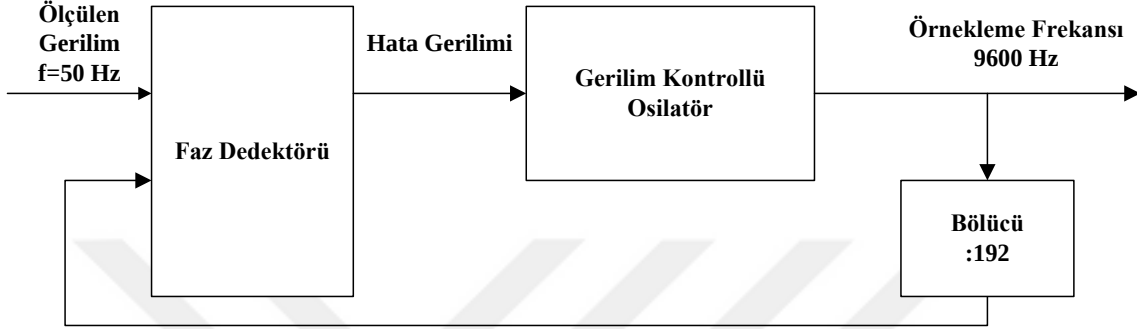


Şekil 4.11. NI Electrical Power araçları ve güç ölçüm sanal enstrümanları



Şekil 4.12. NI Electrical Power sanal enstrümanı ile RMS değeri ölçme

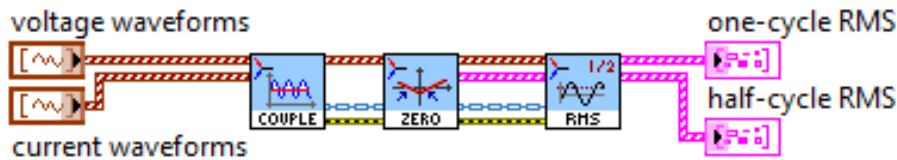
Faz Kilitleme Döngüsü (PLL), örnekleme oranını ölçülen gerilim sinyallerinin frekansı ile senkronize etmek için Şekil 4.13'teki gibi kullanılmaktadır. Herhangi bir giriş bağlantısı için standart örnekleme oranı 9,6 kS / sn'dir, bu 50 Hz sinyalinin bir periyodunda 192 örneğe eşittir. IEC61000-4-30'a göre temel zaman aralığı 10 çevrimli olup 50 Hz sinyal için bu süre 200 mili saniyedir (ELCOM, 2009).



Şekil 4.13. PLL prensibi (ELCOM, 2009)

4.4.1. Gerilim ve akım değeri hesaplama

“RMS (Half Cycle) VI”, LabVIEW tarafından sunulan ve *Electrical Power Suite* içerisine yer alan güç kalitesi VI'larından olup, hem gerilim hem de akım ölçümü için kullanılabilir. Yarım/ tam saykıl için RMS gerilim veya RMS akım, sıfır geçişleri kullanılarak hesaplanır. İhtiyaç duyulan sıfır geçişleri, Şekil 4.14'teki gibi “Zero Crossing VI” kullanılarak hesaplanabilir. Her yarım saykılta RMS değerlerini yeniler. Gerilim dip/tepe (sag/swell), gerilim kesintisi durumları, ani gerilim değişikliklerini tespiti ve kırpışma (flicker) ölçümleri için yarım/tam saykıl RMS değerleri kullanılır.

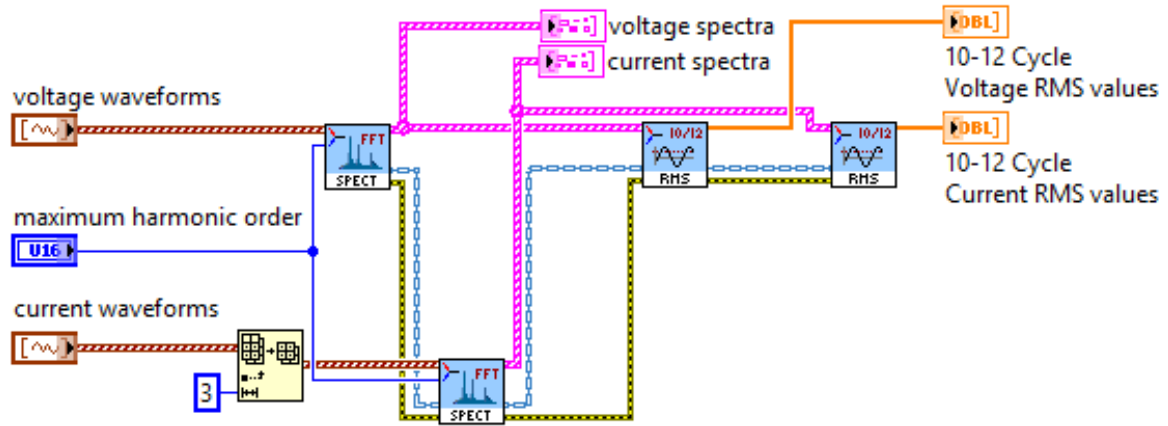


Şekil 4.14. Yarım ve tam saykıl gerilim RMS hesaplanması

IEC 61000-4-30 standardı gereğine göre gerilim/akım RMS değeri ölçümleri, 50 Hz'lik bir güç sistemi için 10 saykıl veya 60 Hz'lik bir güç sistemi için 12 saykıl zaman aralıklarında olmalıdır. Bunun için, belirtilen harmoniğe kadar olan 10/12 saykıl kompleks

spektrumun gerilim/akım RMS değerini hesaplayan “*RMS (10 or 12 Cycles) VI*” kullanılır. Kompleks spektrumun ilk vektörünün reel kısmı, DA bileşeni temsil eder. Bu dizinin her elemanı bir kanala tekabül eder. Gerilim spektrumu volt ve akım spektrumu amper cinsindendir. Şekil 4.15’te 10/12 saykıl gerilim RMS ve akım RMS değerlerinin hesaplanmasına dair blok diyagram örneği verilmiştir.

“Spectrum VI” kullanılarak, 5Hz civarında bir frekans çözünürlüğü ile belirlenen maksimum harmonik derecesine kadar, gerilim ve/veya akım için kompleks spektrum şeklinde FFT spektrum üretilir. Bahsedilen frekans çözünürlüğü, temel frekansın 10’a veya 12’ye bölünmesi ile elde edilir. EN 50160 standardı gereği, maksimum harmonik derecesi en az 40 olarak girilmelidir. Varsayılan olarak bu değer, 50 kabul edilmektedir.



Şekil 4.15. 10/12 saykıl gerilim RMS ve akım RMS değerlerinin hesaplanması

Akım, gerilim, frekans, harmonik, flicker, güç ölçümleri, olay algılama, birikimli değer hesaplama gibi tüm işlemlerin yapılması için, klasik programlamadaki alt program olarak düşünülebilecek olan birer SubVI tasarlanmıştır. Tüm bu hesaplamalar yine NI Electrical Power Suite araçları ile EN 50160 ve IEC 61000-4-30 standartlarına göre yapılmıştır.

4.4.2. Frekans değeri hesaplama

“Zero Crossing VI”, LabVIEW tarafından sunulan ve “*Electrical Power Suite*” içerisine yer alan güç kalitesi VI’larından biridir. Bu VI, gerilim ve / veya akım dalga formu için sıfır geçiş dizinlerini hesaplar. Sıfır geçişi, gerilim veya akım için pozitiften negatife veya negatiften pozitifte döndüğü anlık noktadır. Frekans ölçümü, bu ardışık geçişler arasındaki örneklerin sayısının hesaplanması olarak tanımlanmış sıfır geçiş yöntemine dayanmaktadır.

Bu VI, 10 saniyelik periyotlarda birikimli frekans bilgisi yanı sıra, 3 saniyelik (50 Hz için 150 saykıl veya 60 Hz için 180 saykıl) periyotlarda signalling RMS gerilim ve 10 dakikalık periyotlarda RMS gerilim, harmonik RMS gerilim, gerilim THD yüzdesi, gerilim under-deviasyon ve gerilim over-deviasyon gibi başka parametrelerin ölçümlerini de sağlar. *Custom Aggregation* VT'lar ile iki saatlik periyotlar sağlanabilmektedir. Bu tezde kullanılmak üzere birikimli değer hesaplama sonuçlarını izlemek için düzenlenen arayüz Şekil 4.18'deki gibidir.

Şekil 4.18. Birikimli değer hesaplama sonuçlarını için düzenlenen arayüz

4.4.4. IEC uyumlu elektriksel parametrelerin hesaplanma formülleri

Bir sinyalin toplam harmonik bozulması veya THD, mevcut harmonik bozulmanın bir ölçümüdür ve tüm harmonik bileşenlerin güçlerinin toplamının temel frekansın gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$THD = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^{H_{max}} \left(\frac{G_n}{G_1}\right)^2} \quad (4.1)$$

$$Distorsiyon Faktörü = \frac{1}{\sqrt{1+(THD)^2}} \quad (4.2)$$

Burada;

THD: Yüzdelik olarak toplam harmonik distorsiyon

n: Harmonik derecesi

H_{max}: Maksimum harmonik derecesi

G_n: *n*. derece harmonik bileşenin RMS değeridir.

G₁: Temel bileşenin RMS değeridir.
göstermektedir.

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2} \quad (4.3)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2} \quad (4.4)$$

Burada, bir saykıldaki tam sayı (integer) örneklerinin sayısını *N* ile temsil edilir. Bir örnek periyodunun bir noktasındaki gerilimin ve akımın anlık değeri sırasıyla *U_n* ve *I_n* ile temsil edilir. *U_{RMS}* ve *I_{RMS}* ise 10/12 saykıl için gerilim ve akımın etkin değerleridir. IEC61000-4-30'a göre 50 Hz için temel zaman penceresi 10 saykıldır yani 200 mili saniyedir. Örnekleme hızı 9600S/sn ise, A/D dönüştürücü her 10 döngüde (200ms) 1920 örnek sağlar. Bu veriler ile Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 yeniden düzenlenir ise Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 elde edilir.

$$U_{RMS} = U_A = \sqrt{\frac{1}{1920} \sum_{n=1}^{1920} U_n^2} \quad (4.5)$$

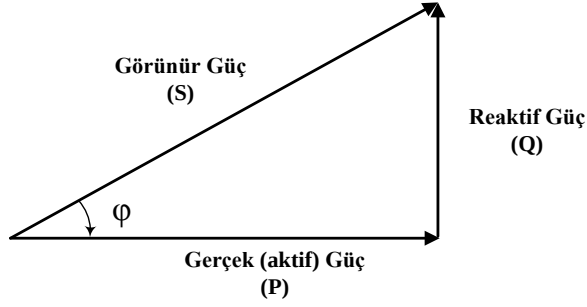
$$I_{RMS} = I_A = \sqrt{\frac{1}{1920} \sum_{n=1}^{1920} I_n^2} \quad (4.6)$$

Burada, *U_A* ve *I_A* sırasıyla ilk faz olan A fazının etkin gerilim ve akım değerleridir.

$$U_T = U_{ABC} = \sqrt{\frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}{3}} \quad (4.7)$$

$$I_T = I_{ABC} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}} \quad (4.8)$$

Burada, U_T (U_{ABC}) ve I_T (I_{ABC}) sırasıyla ortalama 3 faz gerilim ve akım değerlerini temsil etmektedir. Şekil 4.19’da verilen güç üçgeni görünür güç, reaktif güç ve aktif güç arasındaki ilişkiyi açıklamak için ideal bir görseldir.



Şekil 4.19. Güç üçgeni

Gerilim ve akımın RMS değerlerini kullanarak görünür güç değeri Eş. 4.9 ile hesaplanmaktadır.

$$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (4.9)$$

$$P = \sum_{n=1}^{H_{max}} U_n I_n \cos(\phi_{U_n} - \phi_{I_n}) \quad (4.10)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4.11)$$

$$PF = \cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{\text{Gerçek Güç (Watt)}}{\text{Görünür Güç (VA)}} \quad (4.12)$$

Burada;

S : Görünür gücü (VA)

P : Gerçek gücü (Watt)

Q : Reaktif gücü (VAR)

PF : Güç faktörünü

ϕ : Faz açısı

göstermektedir.

$$P_T = P_{ABC} = P_A + P_B + P_C \quad (4.13)$$

$$S_T = S_{ABC} = U_T I_T \quad (4.14)$$

$$Q_T = Q_{ABC} = \sqrt{S_T^2 - P_T^2} \quad (4.15)$$

Burada;

S_T : Toplam görünür gücü (VA)

P_T : Toplam gerçek gücü (W)

Q_T : Toplam reaktif gücü (VAR)

göstermektedir.

$$P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi_{U_1} - \varphi_{I_1}) \quad (4.16)$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin(\varphi_{U_1} - \varphi_{I_1}) \quad (4.17)$$

$$dPF = \cos(\varphi_{U_1} - \varphi_{I_1}) \quad (4.18)$$

Burada;

P_1 : 1. Harmonik gerçek gücünü (W)

U_1 : 1. Harmonik gerilimini

I_1 : 1. Harmonik akımı

φ_{U1} : 1. Harmonik gerilimin faz açısını

φ_{I1} : 1. Harmonik akımının faz açısını

Q_1 : 1. Harmonik reaktif gücünü (VAR)

dPF : Yer değiştirme güç faktörü

göstermektedir.

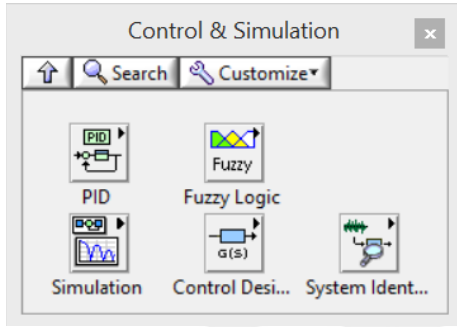
$$u_2 = \frac{\text{negatif dizi}}{\text{pozitif dizi}} \cdot \%100 \quad (4.19)$$

Burada;

u_2 : Fazlar arası dengesizlik (Unbalance), negatif dizi bileşeni yüzdesini göstermektedir (ELCOM, 2009; Horinek ve Bilik, 2010).

4.5. Kullanılan NI LabVIEW Denetleyici Araçları

LabVIEW üzerine kontrol ve benzetim paketi yüklendiğinde, Şekli 4.20’de gösterilen kontrol ve benzetim VI’larına ulaşılabilir. Buradan da görüldüğü üzere toplamda beş ana başlıkta toplanmaktadır. Bu araçlar, karmaşık kontrol uygulamaları, HIL test, Matlab Simulink ve NI Multisim yazılımları ile eş zamanlı benzetim imkânlarını sunmaktadır.



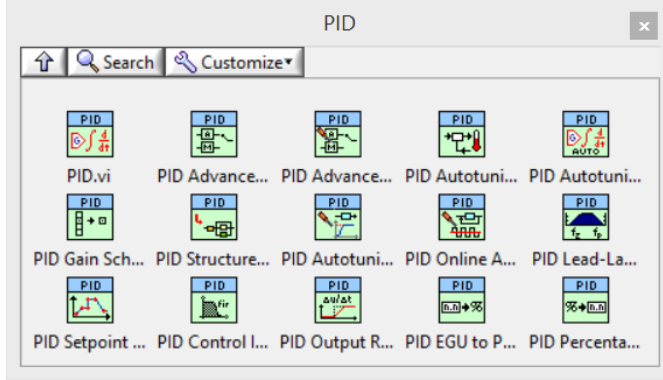
Şekil 4.20. LabVIEW Kontrol ve benzetim fonksiyonları diyalog penceresi

Bu pencereden ulaşabilecek olan “Kontrol ve Simülasyon VI’ları ve İşlevleri” (Control Design VIs and functions) kullanarak dinamik sistem modellerinin tasarımı, analizi, benzetimi ve uygulaması yapılabilmektedir. Dinamik sistemlerin matematik modellerini oluşturmak ve tahmin etmek için de “Sistem Tanımlama” (System Identification) VI’ları kullanılmaktadır. Gözlemlenen giriş-çıkış verilerini temel alan, sistemin tam modellerini tahmin etmek için bu “Sistem Tanımlama” VI’ları kullanılabilir. LabVIEW ile benzetim uygulamaları oluşturmak için ise “Benzetim VI’larını ve işlevleri” (Simulation VIs and functions) kullanılabilir.

Kontrol fonksiyonları açısından ise bulanık sistemleri tasarlamak ve kontrol etmek için “Bulanık Mantık” (Fuzzy Logic) VI’larını kullanılabilir. “Bulanık Sistem Tasarımcısı” (Fuzzy System Designer), bulanık sistemleri etkileşimli olarak tasarlamak için de aynı diyalog penceresinden faydalanılabilir. Bulanık mantığı, birden fazla girdi ile kontrol gerektiren sistemler için kural tabanlı denetim uygulamak için de kullanılabilir.

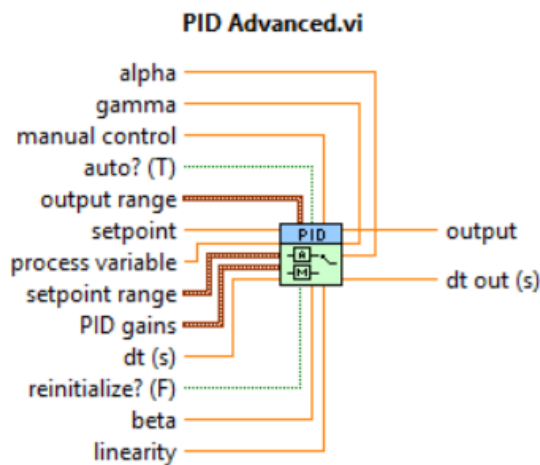
Diğer bir aracı olan Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrol uygulamalarını uygulamak için de PID VI’ları kullanılabilir. PID paletindeki ilk üç VI, PID VI’nın farklı versiyonlarıdır. Bu VI’lar, uygulamanın ihtiyaçlarına bağlı olarak birbirlerinin yerine ve ek

işlevler için *PID VI*'lerden biriyle birlikte de kullanılabilir. Şekil 4.21'de LabVIEW PID fonksiyonları diyalog penceresi gösterilmiştir (İnternet: National Instruments).



Şekil 4.21. LabVIEW PID fonksiyonları diyalog penceresi

Şekil 4.21'de ilk sıranın, en başında yer alan basit "*PID.vi*" aracıdır. PID algoritması, integrator anti-windup ve PID kazanç değişiklikleri için bumpless (sarsıntısız) kontrolör çıkışı ile kontrol çıkış aralığı sınırlamasını içermektedir. Bu tezde kullanılmak üzere, PID araçlarında ikinci VI olan ve Şekil 4. 22'de gösterilen "*PID Advanced.vi*" seçilmiştir. Bu VI, gelişmiş isteğe bağlı özelliklere sahip bir PID algoritması kullanan bir PID denetleyicisi uygular. Gelişmiş PID algoritması, basit "*PID.vi*" özellikleri yanında elle-otomatik çalışma arasında bumpless geçişli elle kontrolü, doğrusal olmayan integral eylemi, iki serbestlik dereceli⁴ kontrol (2-DOF) ve hata kare kontrolü içerir.

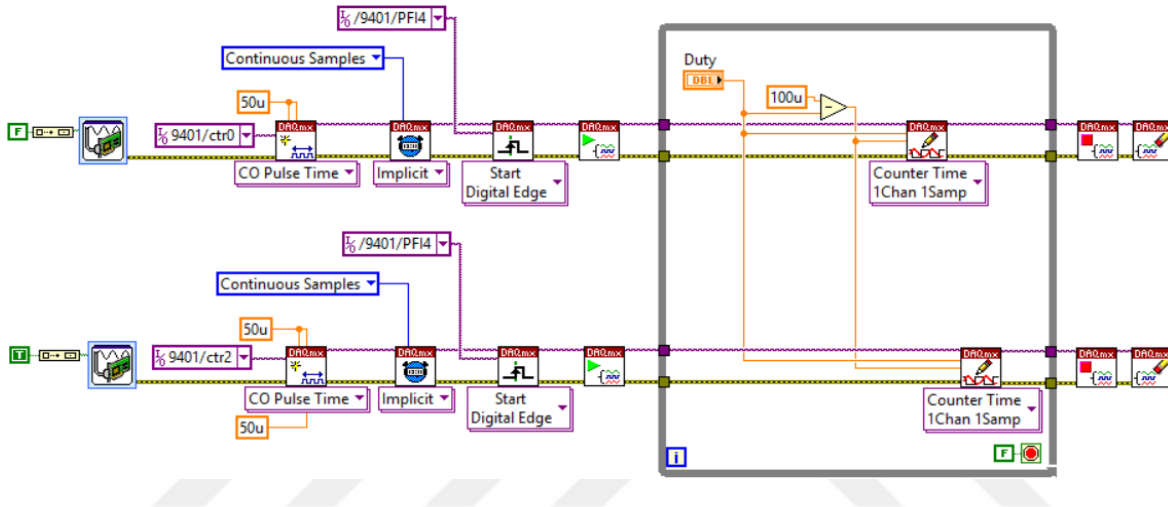


Şekil 4.22. Gelişmiş PID VI blok diyagramı

⁴ Bir kontrol sisteminin serbestlik derecesi bağımsız olarak ayarlanabilen kapalı çevrim iletim fonksiyonlarının sayısı olarak tanımlanır (Horowitz, 1963).

4.6. Faz Kaymalı PWM Üretiminin Gerçekleştirilmesi

Sayısal çıkış modüllerinden olan NI 9401'in iki çıkışı için iki sayıcı kuruldu. Bunun için Şekil 4.23'teki blok diyagram geliştirilmiştir. Bu sayede birbirinden 180 derece faz farklı, 10 kHz'lik iki kanal PWM sistemi elde edilmektedir. Faz farkı ve frekans sabit olarak ayarlanmıştır. Görev veya doluluk oranı (Duty) ise uyartım kontrol döngüsü çıkışına bağlı olarak elde edilmekte ve ayar değişkeni olarak uygulanmaktadır.



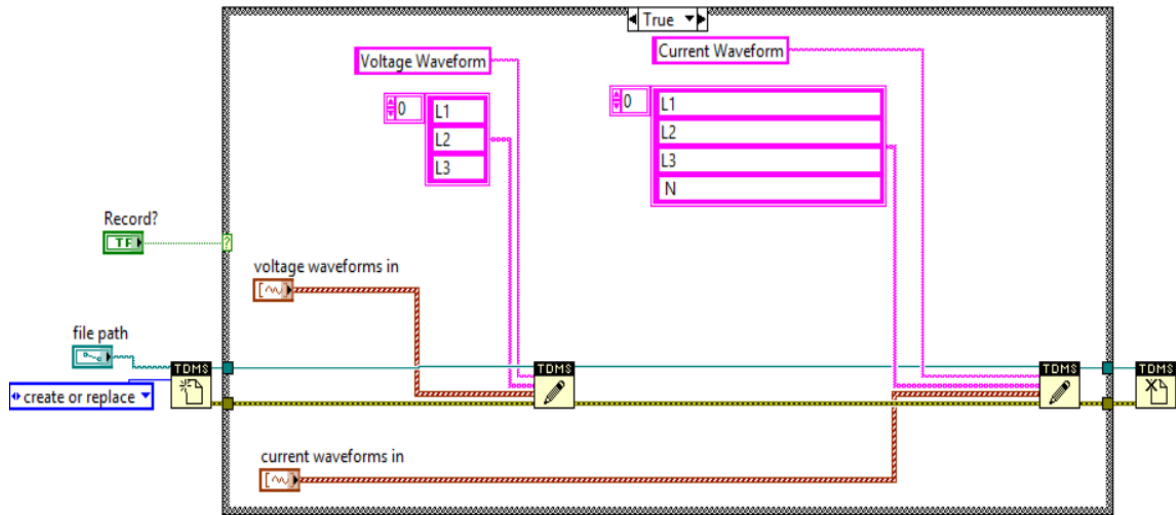
Şekil 4.23. LabVIEW ve cDAQ ile iki kanal faz kaymalı PWM üretimi blok diyagramı

4.7. Veri Kaydının Gerçekleştirilmesi

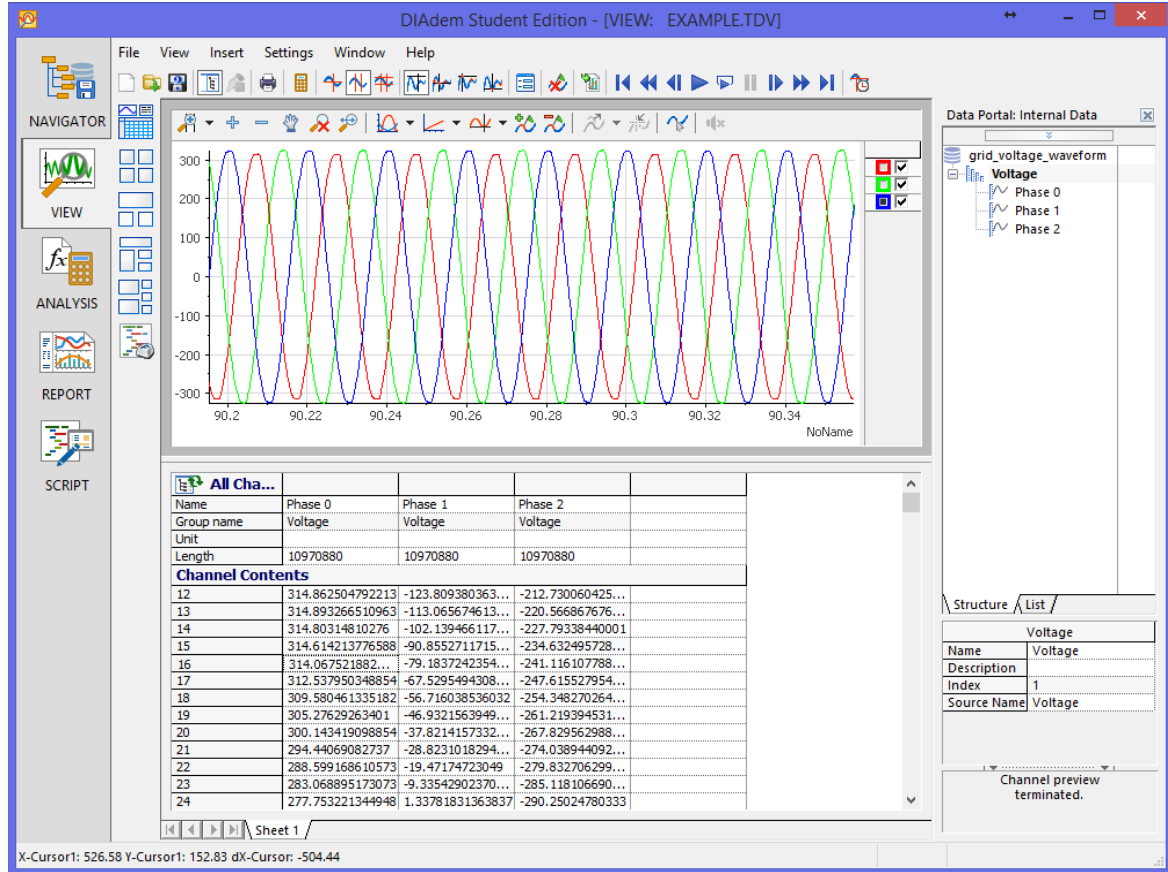
Veri kaydı konusunda gömülü Windows işletim sistemi bulunduran NI cDAQ-9139 içerisinde yer alan dâhili 32 GB alana veya şasiye takılacak bir çıkarılabilir hafıza modülüne kayıt edilmesi sağlanabilir. Kayıt edilecek parametrelerin ve bunların kayıt mantıklarının önceden karar kurulması, sabit hafızanın etkin kullanımı açısından önemlidir. Gömülü olmayan cDQA modelleri için bilgisayar kullanımı şarttır ve veri kaydı bu bilgisayardaki hafıza kapasitesi ile sınırlıdır. Kayıt yeri açısından, hafıza sınırlılığını aşma ve veri analizini kolaylaştırma imkânı sunan başka seçeneklerde mevcuttur. Bu seçenek, kaydedilecek parametreler için ağ paylaşımlı değişkenler yaratarak; bunlar üzerinden, LabVIEW yazılımının koşturulduğu başka bir bilgisayar sistemi kullanılabilir. Diğer bir çözüm de NI Technical Data Cloud (TDC) adı altında sunulan, küresel veri toplama ve erişim için bulut tabanlı hizmetleri kullanmaktır.

Veri kaydı için metin tabanlı dosya kaydı (.lvm), Microsoft excel tabanlı dosya kaydı (.xlms) veya LabVIEW tarafından desteklenen technical data management (TDMS) binary formatıdır (.tdm/.tdms). Bu şekilde, ölçülen sinyaller cDAQ sistemi bağlanıp, sistem çalıştırılmadan sistemin analizinde veya benzetiminde daha sonra da kullanılmak üzere kaydedilebilmektedir. LabVIEW kurulumu ile Microsoft excel bünyesine eklenen bir araç yardımı ile de bu formatın verileri en basit şekilde sekmeler ve tablolar halinde görüntülenebilmektedir. Bu format ile kayıtlı veriler üzerinde daha detaylı analiz ve çalışma amacıyla, NI tarafından sunulan TDMS sanal enstrümanları kullanılabilmektedir. Ayrıca NI tarafından sunulan NI DIADEM ve LabVIEW DataFinder Toolkit programlarını ile kayıt edilen veriler üzerinde veri işleme ve raporlama gibi birçok gelişmiş çalışma imkânı sunulmaktadır.

Şekil 4.24'teki blok diyagramın çalışmasına biraz değinecek olunursa verinin sürekli bir kaydı değil sadece kayıt edilmesi istendiğinde bir buton ile istendiği sürece 3 faz girişi gerilimi dalga formu bilgisi "file path" ile gösterilen yere, verilen dosya adıyla ve "tdms" uzantısıyla kaydeder. Şekil 4.25'te kayıt edilmiş 3 faz gerilim dalga formunun NI DIADEM ile görselleşmesine bir örnektir. Gerilim ve akım dalga formları dışında EK-1'de listelenen tüm ölçüm sonuçları, Şekil 4.24 benzeri yöntemler ile dâhili hafızaya kaydedilebilmektedir.



Şekil 4.24. Gerilim ve akım dalga formlarının kaydını gerçekleştiren blok diyagram



Şekil 4.25. Kayıt edilmiş 3 faz gerilim dalga formunun NI DIADEM ile analizi

4.8. Azaltan Dönüştürücü ile Uyarım

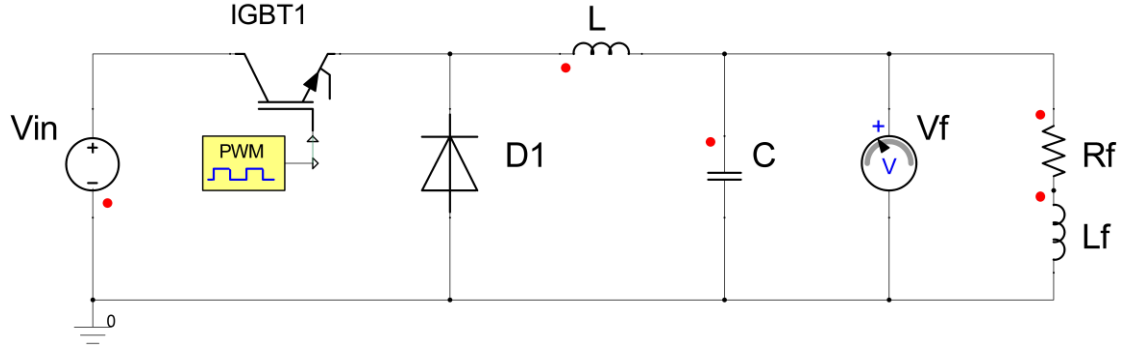
Tristör kontrollü doğrultucuların 1960'lı yıllarda geliştirilmesiyle birlikte otomatik uyarım akımı ayar sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Basit, dayanıklı, hesaplı ve 10 kW üstündeki yükler için önceki teknolojiye göre daha verimli olmaları sebebiyle tristörlü AVR'nin yaklaşık yarım asır önce başlayan serüveni günümüzde halen devam etmektedir (Dong-Hee, Tae-Hyoung ve Jin-Woo, August 2008). Statik uyarım sistemleri olarak da bilinen ve daha çok, büyük ölçekli senkron generatörlerin uyarım devrelerinde kullanılan, tristörlü sistemlerin; ölçme ve algılama devrelerindeki gecikmenin dışında, gerilim regülasyonun gerçekleşmeye başlaması için doğrultucunun darbe sayısına bölünmesiyle ortaya çıkan doğal bir minimum gecikme süresine ihtiyaç duyulur (Schaefer R. C., 1997). Örneğin 50 Hz ve altı darbeleri bir doğrultucu için bu süre, $1/(50 \cdot 6) = 3,33$ ms olmaktadır. Düzeltme gecikmesi olarak adlandırılabilir bu durum, yük değişimlerinin çok hızlı olduğu sistemler için generatör uç geriliminin kararlı olamaması gibi önemli bir probleme yol açabilmektedir. Ayrıca, tristör kontrollü uyarım sistemleri çıkış gerilimlerinde düşük frekanslı ve yüksek genlikli harmonik bileşenler içermektedir. Bu nedenle, rotor sargısı ve

şaft arasındaki kapasitif kuplaj vasıtasıyla şaft gerilimi indüklenmektedir. Bu yolla meydana gelen şaft gerilimi miktarını azaltmak üzere pasif yöntem olarak RLC devreleri kullanılmaktadır ancak bunlar sistemin tepki hızını yavaşlatmaktadır (Datta, Dubey ve Jain, 2014; Samieimoghaddam, Bina, Golkar ve Shokrikojori, 2016).

Diğer taraftan, son yıllarda, yarı iletken güç anahtarlarındaki elemanlarındaki gelişmelerle birlikte büyük uyartım güçlerinin yüksek frekansla çalışabilen anahtarlarla kontrol edilebilmesine imkân verebilmektedir. MOSFET ve IGBT gibi anahtarların kullanıldığı DA/DA güç dönüştürücülerin (azaltan ya da azaltan-artıran gibi) AVR sistemlerinde tercih edilmesine olanak vermektedir (Bayram, Sefa ve Balci, 2016). DA/DA güç dönüştürücülerin tristörlü kontrollü doğrultucu devrelerine göre daha az sayıda yarı iletken ihtiva etmeleri, üretimlerinin ve kontrollerinin daha kolay olması, daha hızlı dinamik tepkileri önemli üstünlüklerindendir. Statik uyartım sistemlerinin önemli bir sorunu olan şaft gerilimi azaltmak üzere, DC-DC azaltan dönüştürücüler aktif bir gerilim regülatörü olarak kullanılabilir. Azaltan dönüştürücü daha düşük toplam harmonik distorsiyon (THD) oluşturmaları sebebiyle parazittik kapasiteyi etkin bir şekilde ortadan kaldırmakta ve yüksek frekanslı ani gerilim yükselmelerini gidermektedirler. Böylece, şaftta indüklenen gerilimin önemli derecede azalmasını ve generatörün rulmanlarının ömrünün uzamasını sağlamaktadır (Anbarasu ve Dincan, 2010-2011; Datta, Dubey ve Jain, 2014; Erceg, Tusun ve Erceg, 2012). Tüm bu avantajları gelecekte uyartım devrelerinde daha da artan bir oranda kullanılacağı düşünülmektedir.

4.8.1. Klasik azaltan dönüştürücü

Sürekli iletim modunda (CCM) çalışan klasik azaltan dönüştürücü, DA giriş gerilim seviyesini daha düşük gerilim seviyesine indiren izolesiz bir DA-DA dönüştürücüdür. Anahtarlama periyodu sırasında güç anahtarının etkin süresi (doluluk oranı), duty olarak adlandırılır ve "D" harfi ile sembolize edilir ($0 < D < 1$). Çıkış gerilimi, doluluk oranı ile belirlenmektedir. Azaltan dönüştürücüler, % 90'ın üzerindeki verimlilikleri ile birlikte, küçük boyutlu ve düşük maliyetlidir ve yalnızca bir anahtar gerektiren basit yapıdadırlar. Aynı zamanda, hat gerilimindeki değişikliklere karşı oldukça dayanıklıdırlar. Güç anahtarının sürücü devresinde optik veya manyetik bir izolasyon olmalıdır (Erickson, 2007; Hauke, 2011-Revised 2015). Senkron generatörün uyartımında kullanılan azaltan dönüştürücü Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26. Klasik azaltan dönüştürücü

Klasik azaltan dönüştürücünün sürekli iletim modu için çıkış gerilimin duty saykılın bir fonksiyonu şeklinde olduğunu Eş. 4.20 göstermektedir. Süreksiz iletim modunun (DCM) aksine, yükten bağımsız yapısı oldukça basit ve güçlü bir çıkış gerilimi kontrolü sağlar. Sürekli iletim modunun ve azaltan dönüştürücünün böylesine yaygın kullanımını sağlayan da, bu güçlü ve basit kontrol yapısıdır (Erickson, 2007; Hauke, 2011-Revised 2015).

$$V_{out} = V_{in} \cdot D \quad (4.20)$$

Burada;

D : Doluluk oranı (duty ratio)

V_{in} : Giriş gerilimi (v)

V_{out} : Çıkış gerilimi (v)

Çıkış akımının anlık değeri Eş. 4.21 ile ve ortalama değeri de Eş. 4.22 ile hesaplanmaktadır.

$$i_{out}(t) = i_L(t) + i_C(t) \quad (4.21)$$

$$I_{out} = I_L + I_C \quad (4.22)$$

Burada;

I_{out} : Çıkış akımını (A)

I_L : İndüktör akımını (A)

I_C : Kondansatör akımını (A)

Eğer sistem kararlı ise kondansatör akımının DA bileşen değeri sıfır olmaktadır. Bu durumda, indüktör akımının ortalama değeri çıkış akımına eşittir (Eş.4.23).

$$I_L = I_{out} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4.23)$$

Buradan, çalışma modunun CCM veya DCM olacağı iki unsur tarafından belirlenir. Birincisi, indüktör akımının maksimum dalgacık değeri (ΔI_L) ve diğeri ise minumum yük yüzdesi için yük akımının değeridir. $D=0,5$ için ΔI_L maksimum değerini alır (Erickson, 2007; Hauke, 2011-Revised 2015).

$$\Delta I_L = \frac{(V_{in}-V_{out})}{L \cdot f_{switch}} \cdot \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (4.24)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_{in}-V_{out}}{L} \cdot D \cdot T_{switch} = \frac{V_{in}-DV_{in}}{L} \cdot D \cdot T_{switch} = \frac{V_{in}(1-D)DT_{switch}}{L} \quad (4.25)$$

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{V_{in}}{4 \cdot L \cdot f_{switch}} \quad (4.26)$$

Burada,

L : Endüktans değeri (henry)

ΔI_{Lmax} : Maksimum indüktör dalgacık akımı (A)

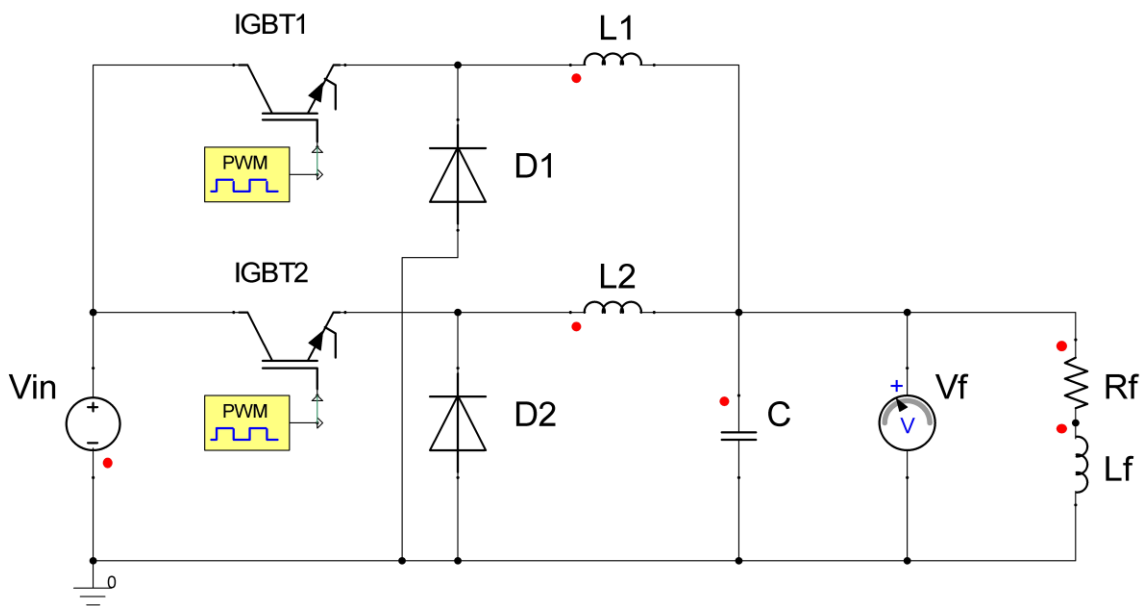
f_{switch} : Anahtarlama frekansı (Hz)

T_{switch} : Anahtarlama periyodu (s)

İndüktörün endüktans değeri çıkış gerilimini etkilemez ancak azaltan dönüştürücünün çıkış akım dalgacığı, anahtarlama frekansı ve indüktörün endüktans değerine bağlı olarak değişmektedir. Uygulamaya bağlı olmakla birlikte genellikle yük üzerinden geçen akımın dalgacık değerinin $\pm\%10$ olması kabul edilebilir bir aralıktır. Sonrasında ise bu aralığa bağlı olarak dönüştürücünün endüktans değeri belirlenmektedir. Frekans değeri artırıldığında dalgacık değeri azalırken anahtarlama kayıpları ile elektromanyetik girişim (EMI) artar. Frekans sabit tutularak indüktör değeri artırıldığında da dalgacık genliği azalır, ancak indüktör boyutları ve maliyeti artar. Çok büyük indüktör veya kondansatör kullanımı da duty saykıl değişimlerine yavaş cevap verilmesine yol açmaktadır. Ayrıca sürekli iletim modunda çalışma için kritik endüktans değerinin altına düşülmemelidir (Erickson, 2007; Hauke, 2011-Revised 2015).

4.8.2. Faz kaymalı azaltan dönüştürücü

Dönüştürücüde kullanılan güç anahtarının yüksek frekanslı çalışması, bazı çözümler kullanılmadığı sürece yüksek EMI'nin en önemli nedeni olmaktadır. DA-DA dönüştürücüler, yenilenebilir enerji kaynakları, DA motor sürücüleri, güç kaynakları ve pil şarj cihazları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir dönüştürücüden çıkış akımını veya gerilimini istenen değerde tutabilmesi beklenir ve çıkış genliğindeki dalgalık, kabul edilebilir bir değer ile sınırlandırılmalıdır. Bununla birlikte, güç düzeyleri arttıkça, bu çözümler kontrol ve güç devreleri tasarımlarında bazı güçlükler neden olabilir ve bazen elektromanyetik gürültüye karşı koymayı zorlaştırır veya bazen imkânsız hale getirir. Dönüştürücünün boyutları, güç dönüştürücünün frekansını artırarak azaltılabilmektedir. Ancak bu durumda, anahtarlama kaybı artmakta ve dönüştürücü verimliliği, artan anahtarlama frekansı ile azalmaktadır. Yüksek akım değerleri ile çalıştırılacak olan indüktör tasarımı standart nüvelerle gerçekleştirilemez ve bu nedenle, güç seviyesinin artışı ile üretimleri zorlaşmakta ve boyutlar büyümektedir. Faz kaymalı azaltan dönüştürücüler olarak da bilinen faz kaydırmalı dönüştürücüler genellikle bu dezavantajları ortadan kaldırmak için yüksek güçlü genel dönüştürücü tasarımlarında önerilmektedir (Baba, 2012; Esteki, Poorali, Adib ve Farzanehfard, 2015; Sefa, Balci, Altin ve Ozdemir, 2012; Sefa, Battal ve Balci, 2013). Senkron generatörün uyartımında kullanılan iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü

Bunun yanında hacim, verim ve kontrol edilen parametreler gibi başka iyileştirmeler sağlamak amacıyla; çok seviyeli, faz kaymalı ve kaskat gibi farklı topolojiler ve kontrol metotları geliştirilmiştir. Yüksek güç uygulamaları için tek anahtar ile yüksek frekansta anahtarlama güçleşeceği için çok fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü topolojileri geliştirilmiştir. Böylece, birden fazla anahtar ile akım paylaşımı yapılabilmekte ve frekans katlama etkisi ile çıkış gerilimindeki dalgacık içeriği azalmaktadır. Aynı zamanda manyetik devre elamanlarının boyutları küçülmekte ve bu durumda standart nüvelerle tasarım kolaylaşmaktadır. Ayrıca, kuplajlı indüktör tasarım seçenekleri ile çıkış gerilimindeki dalgacığı azaltmanın yanında, kayıplar azalmakta ve boyutlar küçülmektedir (Baba, 2012; Esteki, Poorali, Adib ve Farzanehfard, 2015; Sefa, Balci, Altin ve Ozdemir, 2012; Sefa, Battal ve Balci, 2013).

Faz kaymalı dönüştürücülerde; tek fazlı dönüştürücünün anahtarlama frekansı yapısı değiştirilmeden, diğer fazlara kaydırılmış olarak uygulanarak, daha yüksek frekans değerlerinde çalışılıyormuş gibi etki oluşturur. Senkron generatörlerde kullanılmak üzere önerilen faz kaymalı azaltan dönüştürücü; geleneksel azaltan dönüştürücülere göre, daha düşük dalgacık genliği ile çalışmayı sağlar. Ayrıca, gerçekte kanallar daha düşük frekans değerlerinde çalıştırıldığından daha düşük boyutlu ve maliyetli EMI filtresi gerektirir. Bunun yanı sıra, bakım kolaylığı (maintanace), güvenilirlik (reliability) ve daha yüksek hata toleransı sağlar. Aynı akımı gerilim ve frekans değerine sahip bir geleneksel dönüştürücüye göre, faz kaymalı dönüştürücü için gereken çıkış kapasitörü daha düşük değerlidir. Bunun sebebi; “n” fazlı bir faz kaymalı dönüştürücü için çıkış kondansatör akımının dalgacık frekansı, tek fazlı dönüştürücüye göre “n” kat fazla bir değerde olmasıdır (Sefa, Battal ve Balci, 2013).

Her fazın anahtarlama frekansı ve doluluk oranı aynıdır. Eş. 4.27’e göre, n fazlı bir faz kaymalı dönüştürücü için her kanalın anahtarlama açısı (S_a) birbirine eşit ve sırasıyla kaydırılması ile elde edilir.

$$S_a = \frac{2\pi}{n} \quad (4.27)$$

İki fazlı bir sistemde, birinci kanalın açısı sıfır iken ikinci kanalın açısı 180 derece olacaktır. Bu açı farkıyla, tüm dönüştürücünün artan etkin dalgacık frekansı ile dalgacık genliği; sıcaklık stresi ve anahtarlama kaybı olmaksızın azalır. Yani, akım-gerilim dalga formu

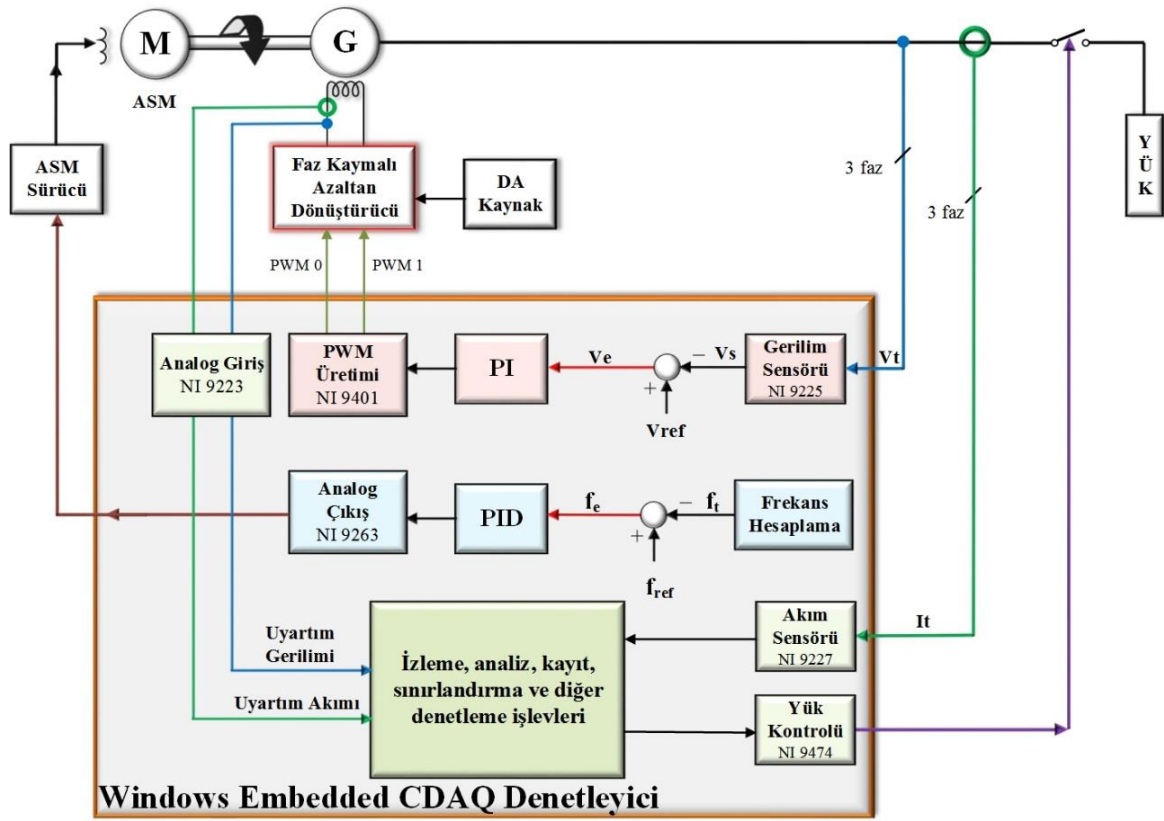
iyileşir. “n” fazlı bir faz kaymalı dönüştürücüdeki her bir faz, toplam gücün $1/n$ 'i kadarını sağlar. Azaltan dönüştürücü çıkışında elde edilen toplam akım, her bir indüktör akımının toplamıdır. İndüktör akımlarının ortalama değeri azaldığından, gerekli indüktör değeri de azalır. Dolayısıyla da indüktör tarafından depolanan enerji miktarı ve dönüştürücünün boyutları azalır. Depolanan enerjinin azalmasının ve frekansın etkisinin artmasının sonucu olarak, dönüştürücünün geçici durum cevabı iyileşir ve düşük güç seviyelerinde daha yüksek verim sağlanır. İki veya dört fazlı sistemler daha kolay uygulanabilir olsa da, kanal sayısının 10'a kadar artırılabilmesi mümkündür. Toplam çıkış akımı içeriğindeki dalgacık frekansı (f_{output_ripple}), anahtarlama frekansı (f_{switch}) ile kanal sayısının çarpılması ile bulunur (Sefa, Battal ve Balci, 2013). Bu çalışmada, iki fazlı faz kaymalı dönüştürücü için anahtarlama frekansı 10 KHz olduğundan, Eş. 4.28'a göre çıkış akımı dalgacık frekansı değeri 20 KHz olmaktadır.

$$f_{output_ripple} = n \cdot f_{switch} \quad (4.28)$$

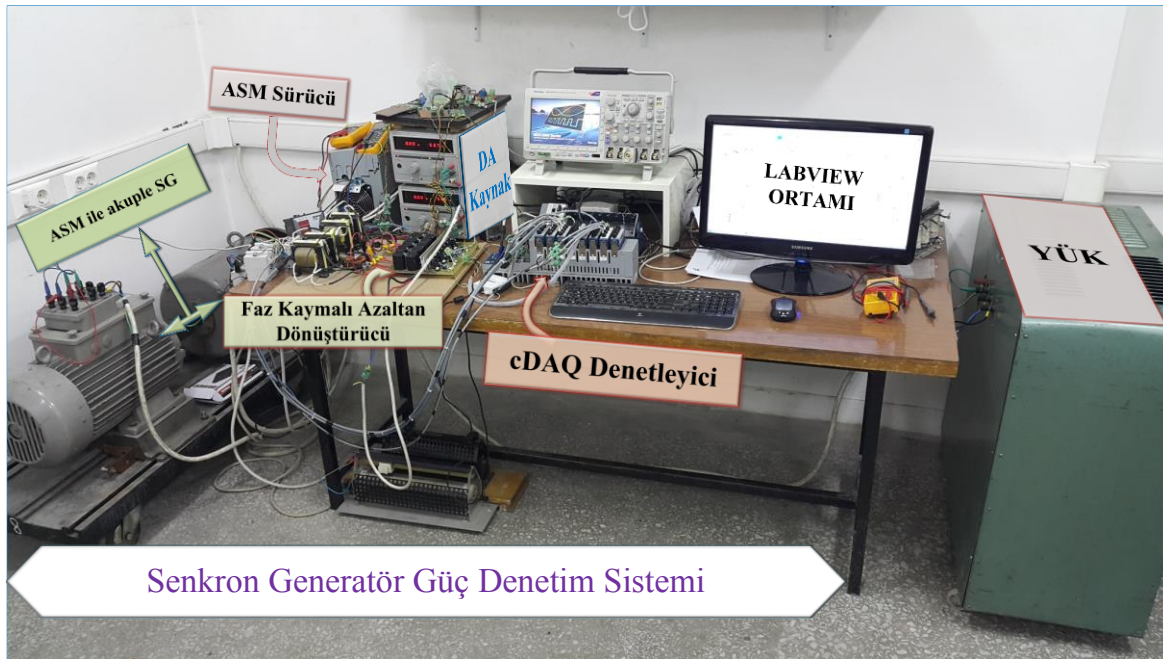
4.9. Önerilen Senkron Generatör Güç Denetim Sistemi

Senkron generatörlerde güç denetimini sağlayan bir LFC ve AVR düzeneğinin şematik ve blok diyagramları sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir. Bunlara göre Şekil 4.28'deki gibi kurulan blok şema, tez düzeneğini temsil etmektedir ve bu şemaya göre kurulan uygulama düzeneği Resim 4.1'de verilmiştir. Tez çalışmasının merkezinde, gömülü sistem Windows işletim sistemine sahip bir kompakt DAQ ve içerisinde koşturulan bir VI yer almaktadır.

Bu düzenekte, bir ASM motor sürücüyeye bağlı ASM, senkron generatöre akuple edilerek SG için gerekli olan mekanik enerji sağlanmıştır. Danfoss marka FC 302 sürücü ile cDAQ üzerinde bulunan NI 9263 analog çıkış modülü ile 0-10 volt arası gerilim değişimi uygulanarak ASM devir kontrolü yapılmaktadır. Dolayısıyla frekans değeri ve aktif güç kontrol edilmektedir. NI 9263 Çıkış akımı 1mA ile sınırlı olduğundan motor sürücünün ihtiyaç duyduğu akımı sağlayabilmek için LM358 opamp ile bir tampon devresi eklenmiştir.



Şekil 4.28. CompactDAQ ile senkron generatör güç denetimi düzeneği blok şeması



Resim 4.1. CompactDAQ ile senkron generatör güç denetimi sistem resmi

İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü yapısı kullanılarak statik uyarım yapılmıştır. Dönüştürücü için kullanılan IGBT ve diyot bilgisi Çizelge 4.2’de verilmiştir. Güç anahtarları için gerek duyulan PWM sinyalleri ise NI 9401 modülü ile üretilmektedir. DA kaynak olarak 0-56 volt ayarlı iki adet Kenwood PD56-10AD doğrusal gerilim kaynağı seri olarak bağlanmıştır. Çıkış gerilimi tam yükte, SG’nin uyarımı için sürekli 2 A akımı ve kısa bir sürede içinde biraz fazlasını sağlayabilecek şekilde 110 volt olarak sabitlendi. Bunun yanı sıra seri kaynak sisteminin verebileceği akım sınırı ayarı, tezde kullanılan SG için belirtilen uyarım akımı sınırı olan 2 A değerinin biraz üzerinde akım sağlayabilecek şekilde ayarlandı. Elbette ki böyle ayarlanmasındaki sebep, aşırı yük altında standartlar gereği belirli sürelerde çalışma şartlarını sağlayabilmektir.

Çizelge 4.2. Azaltan dönüştürücü komponentleri

Komponent	Tipi	Paketi
Yüksek gerilim IGBT (opsiyonel diyotlu)	IXDH 30N120 D1	TO-247 AD (IXDH)
Hızlı toparlama epitaxial Diyot	IXDH DSEI 30-06A	TO-247 AD

Uyarım akımı ve gerilimini ölçümü için NI 9223 analog giriş modülü kullanılmıştır. Uyarım akımının ölçümü için bir akım trafosu bağlanmıştır. Bu modül ± 10 volt gerilim seviyesinde olduğu için birer gerilim bölücü eklenmiştir.

Generatör tarafından üretilen üç faz gerilim okuma işi ise NI 9225 300 Vrms analog giriş gücü ölçme modülü ile gerçekleştirilmektedir. Kademeli bir yüke bağlanmış olan generatörden çekilen akımların okunma işi, her bir faza bağlı APEC marka akım trafolarına bağlı NI 9227 akım girişi modülü gerçekleştirmektedir. Dalga formu olarak elde edilen üç faz gerilim ve akım bilgisinin NI LabVIEW Electrical Power Suite araçlarına uygulanması ile yapılan tüm güç analizleri, EN 50160 ve IEC 61000-4-30 gibi standartlara uygundur. Güç izleme sistemlerinde olması beklenen ve EK-1’de listelenen ölçümler EN 50160 ve IEC 61000-4-30 gibi standartlara göre yapılmıştır (Bkz. Ek-2).

4.9.1. Gerilim ve frekans denetleme işlevleri

Generatör terminal geriliminin AVR ile ve terminal gerilimi frekansının LFC ile denetlenmesi için iki ayrı kontrol döngüsü kullanılmıştır. Daha önce de bahsedildiği üzere

bu iki döngü arasındaki karşılıklı bağlantı ihmal edilebildiğinden birbirinden bağımsız kontrol yapılmaktadır (Saadat, 1999: 528). Gerilim seviyesini kontrol etmek üzere Çizelge 4.3'teki parametreler ile kurulan PI denetleyici, üç fazın RMS değerlerinin Eş. 4.7 ile hesaplanan ortalama RMS gerilim değerine göre bir kontrol sağlamaktadır.

Çizelge 4.3. Uyarım kontrol döngüsü PI denetleyici parametreleri

Parametre	Değer
Kp	1,44
τ_i	0,005

Frekans değerini kontrol etmek üzere Çizelge 4.4'teki parametreler ile kurulan PID denetleyici, ölçülen ortalama yarım saykıl frekans değerine göre kontrol sağlamaktadır. Tüm ölçümler ve hesaplamalar ile birlikte, bunlara bağlı yapılan tüm izleme, kayıt ve kontrol işlemleri bağımsız (gömülü işletim sistemli) cDAQ şasisi üzerinde çalışan bir LabVIEW yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4. Frekans kontrol döngüsü PID denetleyici parametreleri

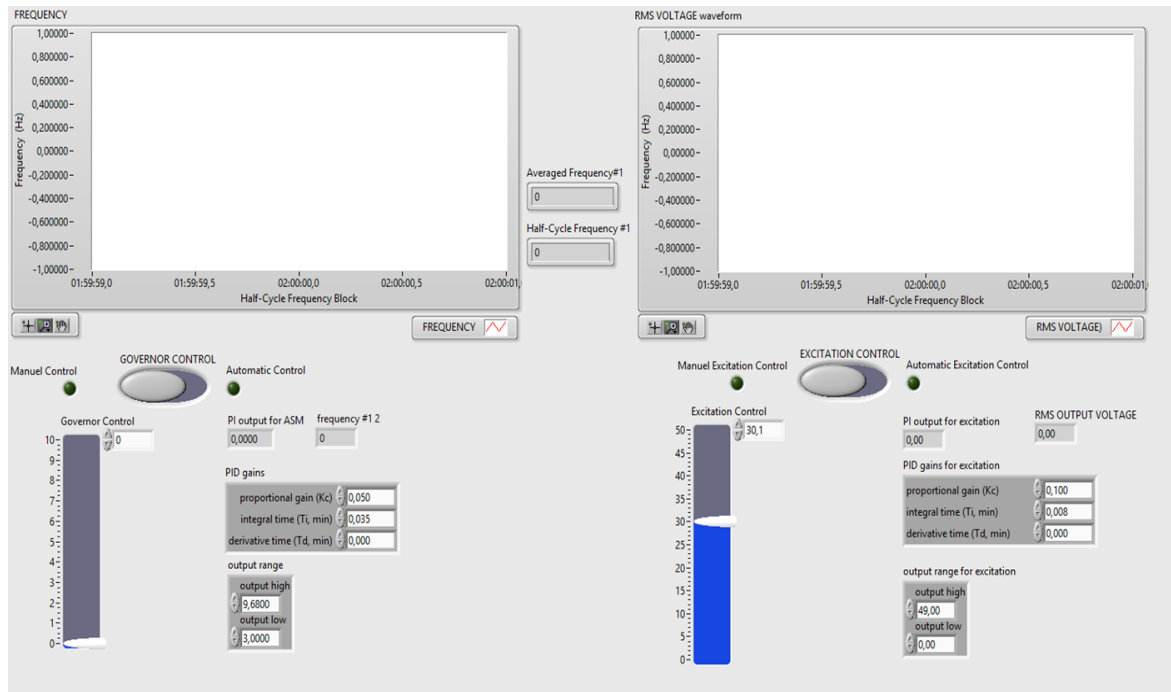
Parametre	Değer
Kp	0,090
τ_i	0,006
Td	0,001

Uyarım kontrol döngüsünde süreç değişkeni olarak kullanılan terminal gerilimini elde etmek için örnekleme hızı 50 KS/s ve okunan örnek sayısı 1.000 olarak ayarlandı. Bu, 50 Hz'lik bir sistem için bir saykıl yani 0,02 saniye ölçme süresi anlamına gelmektedir ve Eş. 4.28 ile hesaplanmaktadır. Güç analizi döngüsünde, IEC 61000-4-30 standardına göre 50 Hz için 10 saykıl yani 200 mili saniyelik bir ölçüm penceresi gerekmektedir. Bundan dolayı, uyarım kontrol döngüsü ve güç analizi işlevleri, geliştirilen VI içerisinde tamamen ayrı döngülerde işlenmektedir.

$$\text{ölçüm süresi (s)} = \frac{\text{örnek sayısı (sample)}}{\text{örnekleme hızı (sample/s)}} \quad (4.28)$$

Kontrol işlevleri arayüzü

LabVIEW ile tasarlanan ve cDAQ üzerinde koştan sanal enstrümanın kontrol işlevleri arayüzü Şekil 4.29’da verilmiştir. Bu arayüzden, birbirinden bağımsız denetlenen uyartım ve governor döngüleri için parametre girişleri, kontroller ve izleme enstrümanları bulunmaktadır. Her iki döngü için de elle veya otomatik denetleme seçeneği mevcuttur. Elle ayarlamalar, otomatik çalışmayı takip etme özelliğine sahiptir. Bunun anlamı otomatik denetlemeden çıkıldığında, elle denetleme otomatik denetleme çıkış değerinden devam etmektedir.



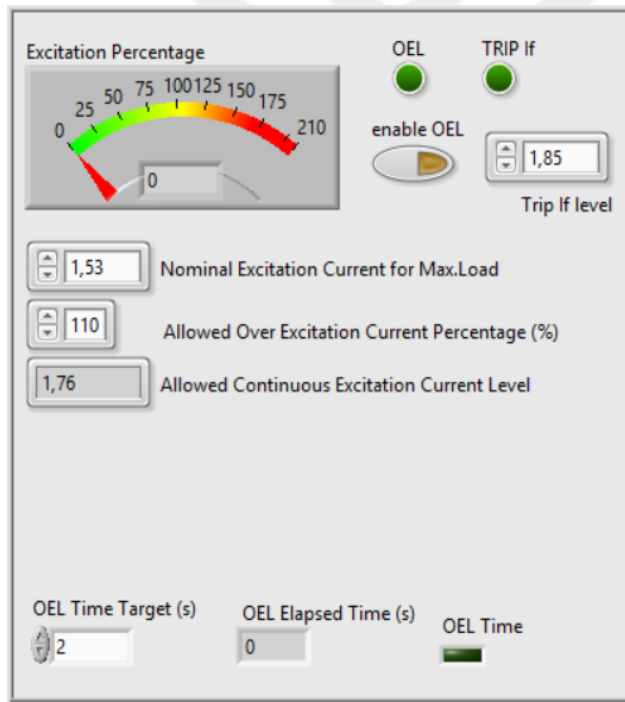
Şekil 4.29. Kontrol işlevleri arayüzü

4.9.2. Sınırlandırma ve koruma işlevleri

Sınırlandırma ve koruma işlevi için tasarlanan tüm arayüzler, ilgili sınırlandırma fonksiyonunun aktif ya da pasif hale getirilmesi için bir buton kontrolüne ve sınırlandırma için süre kullanıcı tanımlı zaman ayarlarına sahiptir. Herhangi bir sınırlandırma veya koruma işlevi için şart oluşur ise, her bir işlevin sağ üst köşesine yerleştirilmiş bir durum LED’i ile bu belirtilmektedir. Sınırlandırma işlevlerinin tamamı devralma yöntemini kullanmaktadır.

Aşırı uyartım sınırlandırma (OEL) ve koruma işlevi

Aşırı uyartım sınırlandırma (OEL) işlevi için Şekil 4.30'daki arayüz tasarlanmıştır. Bu işlev istendiğinde aktif ya da pasif yapılabilir. Girilen anma uyartım akımına ve izin verilen aşım yüzdesine göre çalışmaktadır. Bu değerlere göre hesaplanan maksimum izin verilen uyartım akımı geçildiğinde, OEL bu aşım izin verilen zaman süresince müsaade etmektedir. Ancak, bu süre içerisinde izin verilen uyartım akımı seviyesinin altına inilmediğinde, ister AVR isterse de MVR çalışma modunda olunsun, uyartım akımı seviyesi normale gelene kadar uyartım akımı düşürülmektedir. Uyartım akımı normale döndüğünde, önceki çalışma MVR modu ise uyartım kontrolünün yine bu şekilde çalışması sağlanmaktadır. Eğer önceki çalışma durumu AVR ise, uyartım yeniden AVR moduna devredilmektedir.

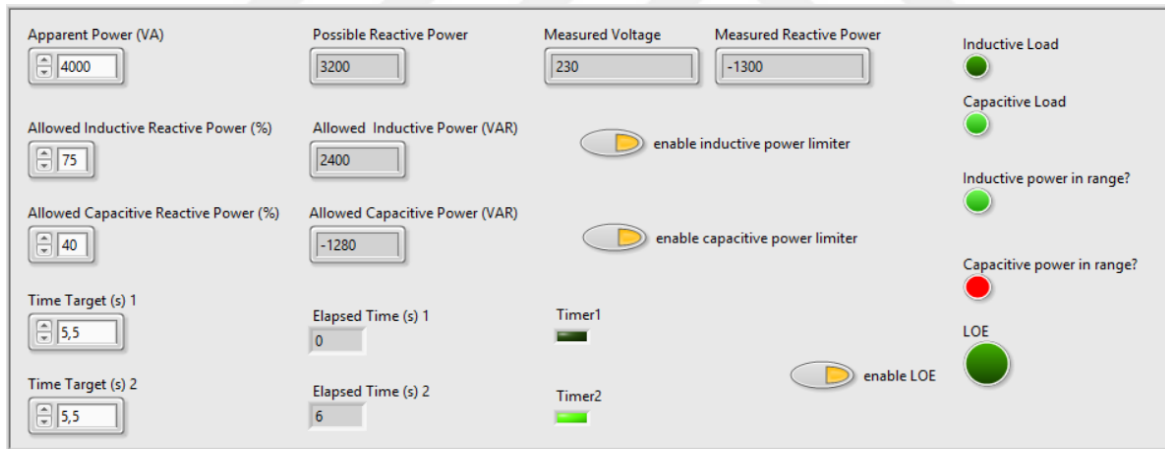


Şekil 4.30. Aşırı uyartım sınırlandırma (OEL) ve koruma işlevleri ön paneli

Uyartım akımı kullanıcı tarafından belirtilen tehlikeli seviyenin üzerinde aşılır ise gecikmeksizin uyartım kontrolü devralınarak uyartım kesilir. Aynı zamanda ana tahrik sistemi görevini üstlenen döner sistemin durdurulması sağlanmaktadır. Bu tezde ana tahrik sistemi, bir asenkron motordur.

Düşük uyarım sınırlandırma ve koruma işlevi

Düşük uyarım sınırlandırma (UEL) ve koruma işlevi için Şekil 4.31'deki arayüz tasarlanmıştır. Bu işlev istendiğinde aktif ya da pasif yapılabilir. Ancak, generatör yüklü iken işlevsel hale gelebilmektedir. İzin verilen reaktif güç aşım yüzdesine göre çalışmaktadır. Bu değerlere göre hesaplanan maksimum izin verilen kapasitif reaktif güç geçildiğinde, bu aşım izin verilen zaman süresince müsaade etmektedir. Ancak, bu süre içerisinde izin verilen kapasitif reaktif güç seviyesinin altına inilmediğinde, ister AVR isterse de MVR çalışma modunda olunsun, terminal gerilimi de belirtilen aralıkta ise reaktif güç seviyesi normale gelene kadar uyarım akımı artırılmaktadır. Normale döndüğünde, önceki çalışma MVR modu ise uyarım kontrolünün yine bu şekilde çalışması sağlanmaktadır. Eğer önceki çalışma durumu AVR ise, uyarım yeniden AVR moduna devredilmektedir. Eğer belirtilen süre içerisinde normal duruma gelinmez ise veya uyarım kaybı (LOE) devreye girecek kadar bir kapasitif reaktif güç söz konusu ise LOE koruma devreye girerek uyarımı kesmekte ve yük bağlantısını ayırmaktadır.

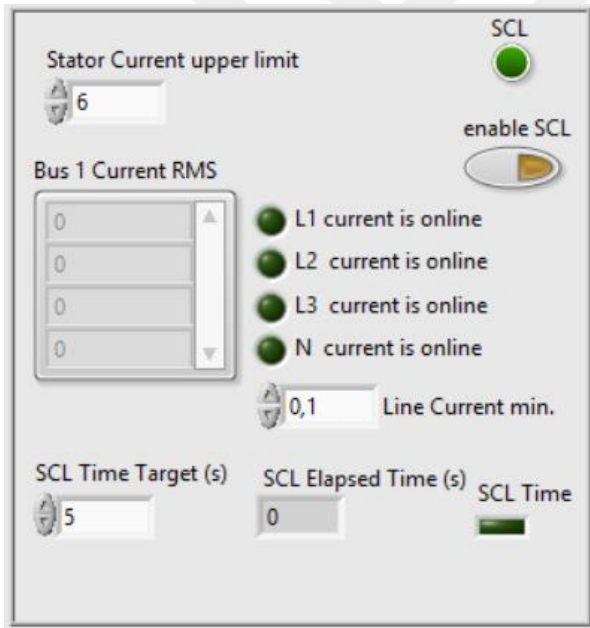


Şekil 4.31. Düşük uyarım sınırlandırma (UEL) ve koruma işlevleri ön paneli

Bu panel aynı zamanda ölçülen gerilim seviyesi belirlenen aralıkta ve reaktif güç aşımı belirtilen aralık dışında ise devreye giren bir OEL özelliği sunmaktadır. UEL fonksiyonu ile arasındaki fark, devreye girme reaktif güç seviyesi ve uyarımı artırmak yerine bunun azaltılarak reaktif güç seviyesi normalleştirilmeye çalışılmaktadır. Uyarımı azaltabilmesi için terminal gerilimi seviyesinin izin verilen aralıkta olması şartı aramaktadır. Bu, verilen sürede başarılabilir ise veya uyarım kaybı devreye girecek kadar bir endüktif reaktif güç söz konusu ise LOE koruma devreye girerek uyarımı kesmekte ve yük bağlantısını ayırmaktadır.

Stator akımı sınırlandırma (SCL) ve koruma işlevi

Stator akımı sınırlandırma (SCL) ve koruma işlevi için Şekil 4.32'deki arayüz tasarlanmıştır. Bu işlevler istendiğinde aktif ya da pasif yapılabilir. Girilen anma stator akımına ve izin verilen aşım yüzdesine göre çalışmaktadır. Bu değerlere göre hesaplanan maksimum izin verilen stator akımı geçildiğinde, SCL bu aşım izin verilen zaman süresince müsaade etmektedir. Ancak, bu süre içerisinde izin verilen stator akımı seviyesinin altına inilmediğinde, ister AVR isterse de MVR çalışma modunda olunsun, stator akımı seviyesi normale gelene kadar uyarım akımı düşürülmektedir. Uyarım akımı normale döndüğünde, önceki çalışma MVR modu ise uyarım kontrolünün yine MVR modunda çalışması sağlanmaktadır. Eğer önceki çalışma durumu AVR ise, uyarım yeniden AVR moduna devredilmektedir.

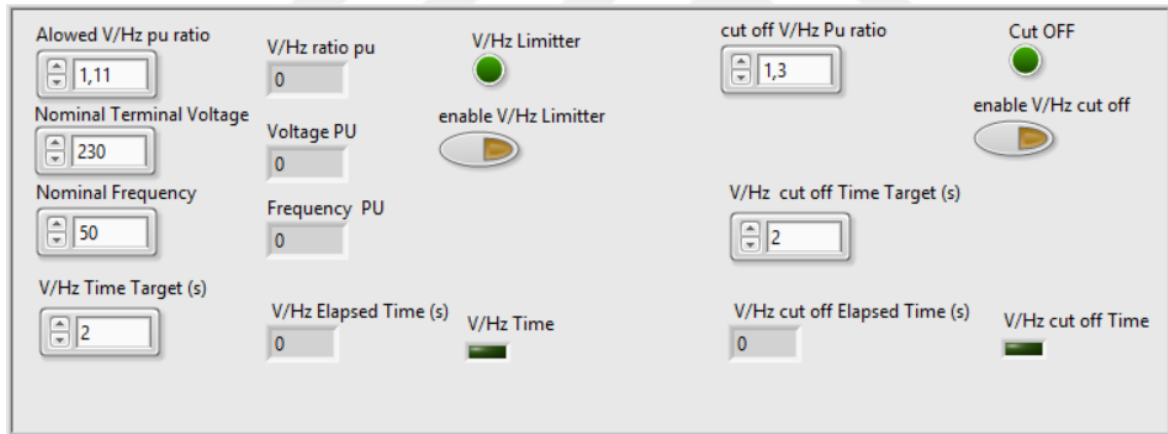


Şekil 4.32. Stator akımı sınırlandırma (SCL) ve koruma işlevleri ön paneli

Stator akımı kullanıcı tarafından belirtilen tehlikeli seviyenin üzerinde aşıldığında ise gecikmeksizin koruma durumuna geçerek generatör yükten ayrılmaktadır. Başka bir sınırlandırma veya koruma devreye girmediğinde uyarım ve döner sistemlerin çalışması devam etmektedir. Dolayısıyla, bu koruma devreye girdikten sonra sistemin baştan başlatılması gerekmemektedir. Sistemin tekrar devreye girmesinin herhangi bir sakınca yoksa tekrar yüklenmesi yeterlidir. Bu koruma işlevi istendiğinde pasif yapılabilir.

Gerilim/Frekans sınırlandırma ve koruma işlevi

Gerilim(V)/Frekans(Hz) sınırlandırma işlevi için geliştirilen kullanıcı arayüzü Şekil 4.33'teki verilmiştir. İzin verilen V/Hz oranı, pu cinsinden kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Anma gerilimi ve frekansı, izin verilen aralıkta olması şartı ile istendiğinde değiştirilebilmektedir. Bu aralık, gerilim için 230-242 Volt ve frekans için 49-51 Hz olarak belirlenmiştir. Diğerleri gibi bu sınırlandırıcı da istendiğinde aktif veya pasif yapılabilmektedir. Aktif durumda ve V/Hz oranı belirtilen pu oranını aştığında, bu aşım için izin verilen süre boyunca beklenmektedir. Eğer V/Hz oranı bu süre içerisinde normal değerlere dönmez ise uyarım kontrolü devralınır. Uyarımı düşürmek sureti ile terminal gerilimi azaltılarak V/Hz oranı izin verilen seviyenin altına inmesi sağlanmaktadır. Bu sınırlandırma devreye girdiğinde AVR'den devralınmış ise, sistem normale dönünce yine AVR kontrolüne geçilmektedir. MVR modunda çalışırken devreye girmesi söz konusu ise süreç sonunda MVR modunda kalınmaktadır.



Şekil 4.33. Volt/Hertz oranı sınırlandırma (V/Hz) ve koruma işlevleri ön paneli

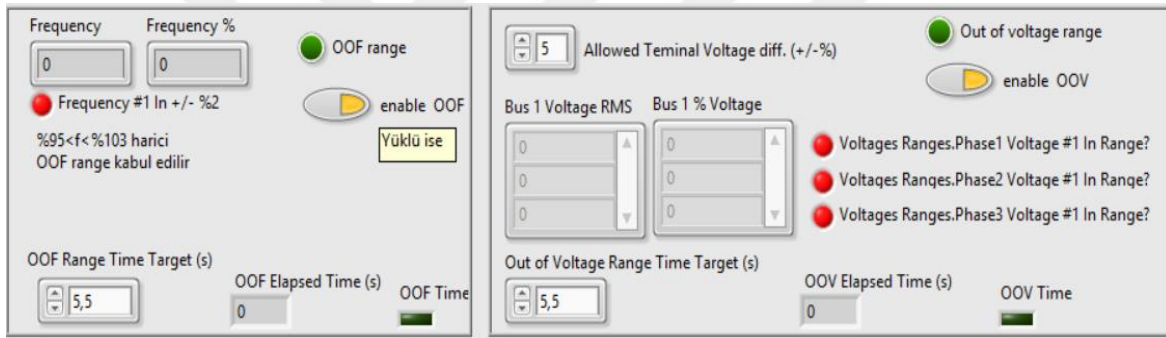
V/Hz oranı kullanıcı tanımlı bir tehlike oranını geçer ise yine kullanıcı tanımlı süre sonrasında sistem koruma durumuna geçerek uyarım ve döner sistemlerin kapatılması sağlanmaktadır. Bu koruma işlevi istendiğinde pasif yapılabilmektedir. Bu koruma devreye girmiş ise, tekrar devreye girmesi için baştan başlatılmalıdır.

Anma frekansı-gerilimi sınırlandırma ve koruma işlevi

Bu sınırlandırma işlevi için Şekil 4.34'teki arayüz tasarlanmıştır. Çalışmasında, V/Hz oranı sınırlandırıcı için girilen anma gerilimi seviyeleri kullanılmaktadır. Generatörlerin, anma

güç faktöründe, gerilimde $\pm\% 5$ ve frekansta $\pm\% 2$ aralıklarla sürekli olarak anma değerini sağlamaları gerekmektedir. Anma frekans değerinin $\% 98$ ila $\% 102$ 'si arasındaki sürekli, aralık dışında çalışma için ise zaman kısıtlaması uygulanmaktadır. Ancak, anma frekans değerinin $\% 95$ 'inden az veya $\% 103$ 'ün üstünde ise bu süre daha kısa tutulmaktadır.

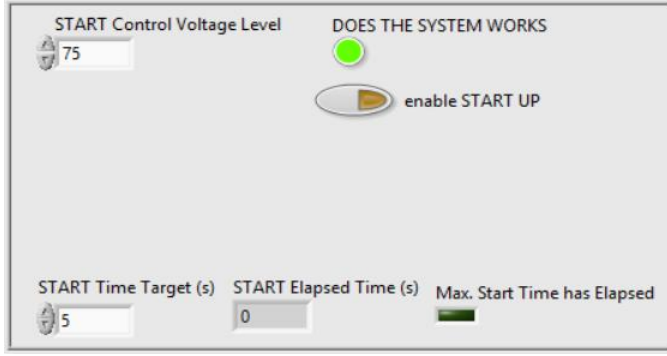
Bu frekans ve gerilim sınırlandırma işlevleri aktif edilmiş ve sistem yüklü ise devreye girebilen bir sınırlandırmadır. Herhangi bir faz gerilimi için varsayılan $\pm\% 5$ aralığı dışına çıkıldığında veya frekans için yukarıda bahsedilen aralık dışına çıkılma oranına bağlı olarak, izin verilen süre tükendiğinde, hala aralık dışında bulunuluyor ise koruma fonksiyonu devreye girerek sabit ve döner parçaların koruması sağlanmaktadır. Bu koruma işlevi istediğinde pasif yapılabilmektedir. Bu koruma bir kez devreye girdiğinde, genel sistemin tekrar devreye alınabilmesi için yazılım yeniden başlatılmalıdır.



Şekil 4.34. Terminal gerilimi-frekansı sınırlandırma ve koruma işlevleri ön paneli

Sistem hatası koruma işlevi

Bu koruma işlevi için Şekil 4.35'teki arayüz tasarlanmıştır. Sistem çalışma komutunu aldıktan sonra, kullanıcı tanımlı süre içerisinde yine kullanıcı tanımlı gerilim seviyesinde bir terminal gerilimi üretilmemiş ise sistem koruma durumuna geçmektedir. Bu koruma işlevi istediğinde pasif yapılabilmektedir. Bu koruma, bir kere devreye girdikten sonra sistemin tekrar devreye girmesi yazılımın yeniden başlatılması gerekmektedir.



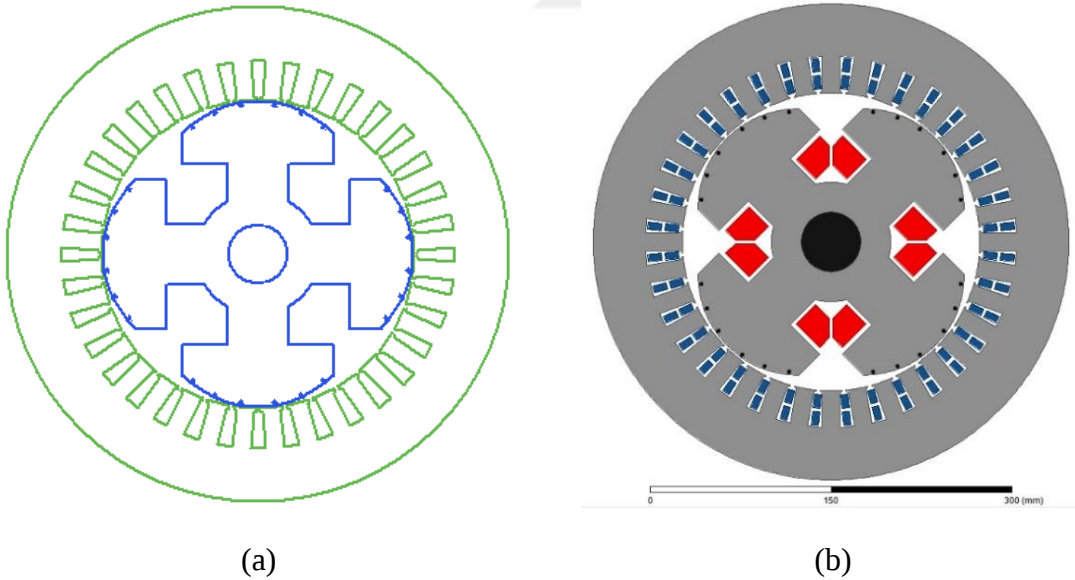
Şekil 4.35. Sistem başlatma izleme ve koruma işlevleri ön paneli

5. BENZETİMSEL VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tezin amacı ve kapsamına uygun olarak tasarlanmış olan sistem ile belirli bir güç değerindeki senkron generatörün (4.5 KVA) giriş ve çıkış parametreleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan önce uyartım devresi ile birlikte parametrelerine uygun olarak elektromanyetik SEA yazılımında tasarlanmış olan senkron generatör güç elektroniği yazılımı ile birlikte çalıştırılarak sistemin eş zamanlı benzetimleri yapılmıştır. Eş zamanlı benzetimler daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Daha sonra deney düzeneği kurulmuş ve güç elektroniği devresi ile birlikte senkron generatör uyartım sisteminin farklı çalışma şartları için performansı test edilmiştir.

5.1. Benzetimsel Çalışmalar

Benzetim çalışmalarına ilişkin olarak Çizelge 5.1’de teknik parametreleri verilen senkron generatör Ansys-Maxwell Rmxprt yazılımı ile Şekil 5.1’de görülebileceği gibi iki boyutlu olarak modellenmiştir.



Şekil 5.1. Senkron generatörün Maxwell modeli (a) Rmxprt görseli, (b) Maxwell 2D görseli

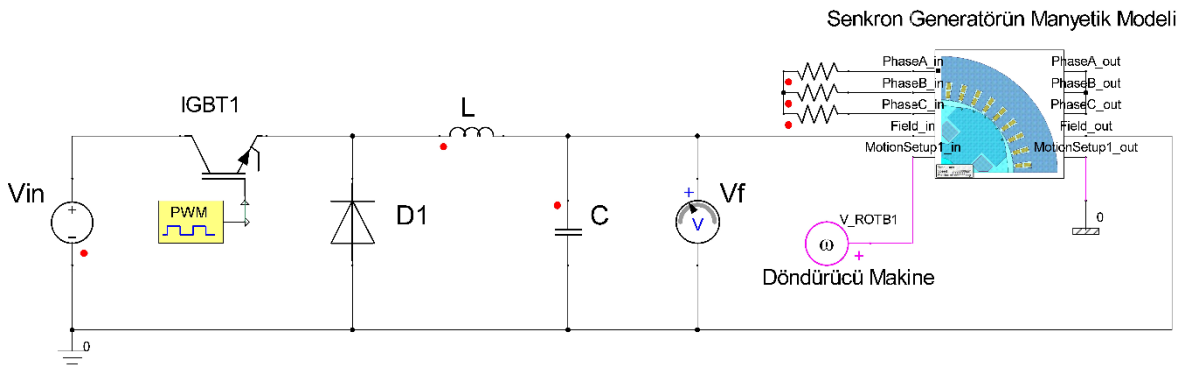
Çizelge 5.1. Senkron generatörün etiket değerleri

Teknik Parametreler	Genel Veriler
Anma görünür güç değeri	4,5 kVA
Anma güç faktörü	0,8 endüktif (geri)
Anma gerilim değeri	400 V (230 V faz gerilimi)
Sargı bağlantısı	Yıldız
Kutup sayısı	4
Frekans değeri	50 Hz
Anma hız değeri	1500 rpm
Maksimum uyarım akımı değeri	1,88 A
Uyarım sargısı endüktans değeri	560 mH
Uyarım sargısı omik direnç değeri	44,2 Ω
Maksimum uyarım gerilimi değeri	85

Ansyz-Simplorer yazılımı ile tasarlanmış iki farklı güç elektroniği devresinde bulunan (Bkz Şekil 5.2 ve Şekil 5.3) senkron generatörün eşdeğer devresi, uyarım sisteminin etkileşimli olarak eş zamanlı benzetimi yapılmıştır. Böylece, generatörün yüksüz ve tam yük koşulları arasındaki geçiş dinamikleri ve generatörün uyarım devresiyle toplam tepkisi gözlemlenebilmektedir.

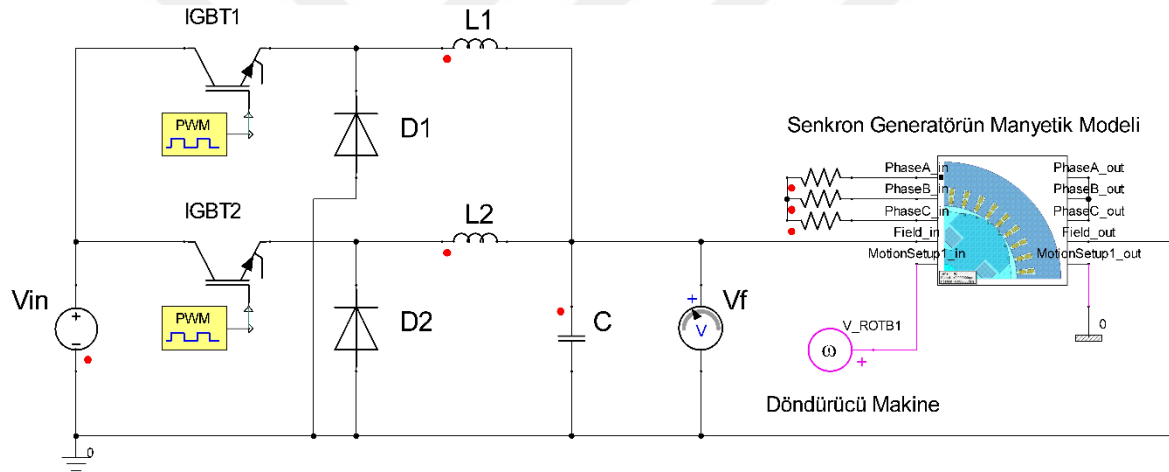
5.1.1. Senkron generatörün azaltan dönüştürücü ile statik uyarım benzetimi

Azaltan dönüştürücülerin çalışma frekansına ve devre yapılarına göre, üç farklı topolojinin benzetimi yapılmıştır. İlk topoloji, Şekil 5.2’de verilen klasik azaltan dönüştürücü devresidir.



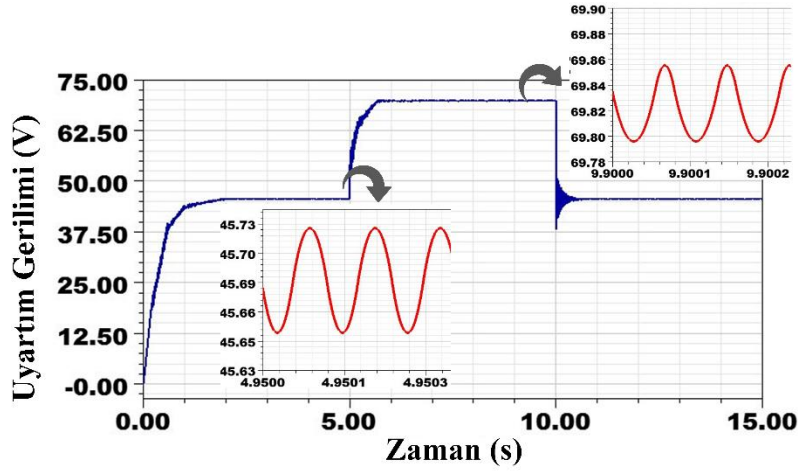
Şekil 5.2. Klasik azaltan dönüştürücülü statik uyarım benzetim modeli

Klasik azaltan dönüştürücünün benzetiminde anahtarlama frekansı 10 kHz olarak belirlenmiştir. Düşük güç değerlerinde kullanılacak birçok uygulamada, daha kompakt bir tasarım elde etmek, filtre bileşenlerinin değerini düşürmek ve hızlı bir geçici durum tepkisi elde etmek için anahtarlama frekansı daha yüksek değerlerde olabilmektedir. Ancak, anahtarlama frekansının maksimum değeri özellikle orta ve yüksek güç uygulamaları için sınırlılık arz eder. Ayrıca anahtarlama frekansı arttıkça anahtarlama kayıpları ve EMI de artışa neden olur. Bu nedenle, faz kaymalı azaltan dönüştürücü devresi ile önerilen uyartım sistemin benzetimi yapılmıştır (Bkz Şekil 5.3). Böylece, anahtarlama frekansını arttırmadan yüksek anahtarlama frekansı etkisi elde edilebilmektedir. Bu iki durumu daha etkin karşılaştırabilmek amacıyla, 20 kHz'de çalışan bir klasik azaltan dönüştürücü topolojisinin benzetimi de ilave edilmiştir.

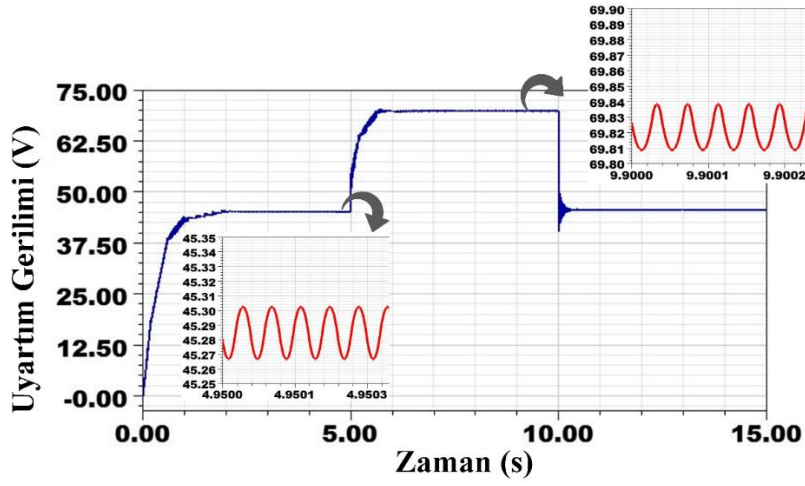


Şekil 5.3. İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücülü statik uyartım benzetim modeli

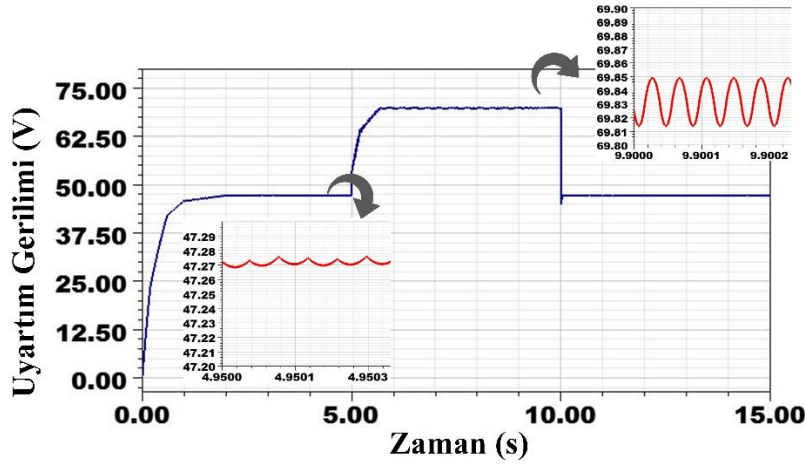
Hem kalıcı durum, hem de geçici durumda test edebilmek için generatör yüksüz durumdan tam yüklü duruma sonra ise tam yüklü durumdan tekrar yüksüz duruma geçirilmiştir. DA/DA dönüştürücünün çıkış gerilimi, uyartım gerilimi olarak da adlandırılabilir; benzetimi yapılan üç farklı topoloji için yük koşullarına bağlı olarak elde edilen uyartım gerilimi dalga formları Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Buradan görüleceği üzere, önerilen faz kaymalı azaltan dönüştürücünün geçici durum tepkisi daha kısa sürede tamamlanmakta olup, hem yüksüz durumdan tam yüklü duruma, hem de tam yük durumdan yüksüz duruma geçişteki osilasyonu azaltmaktadır. Buna ek olarak, 10 kHz'de çalışan klasik azaltan dönüştürücünün dalgacık geriliminin genliği, 20 kHz'de çalışan klasik azaltan dönüştürücüsünden ve önerilen faz kaymalı dönüştürücünden (2x10 kHz) daha yüksektir.



(a)



(b)



(c)

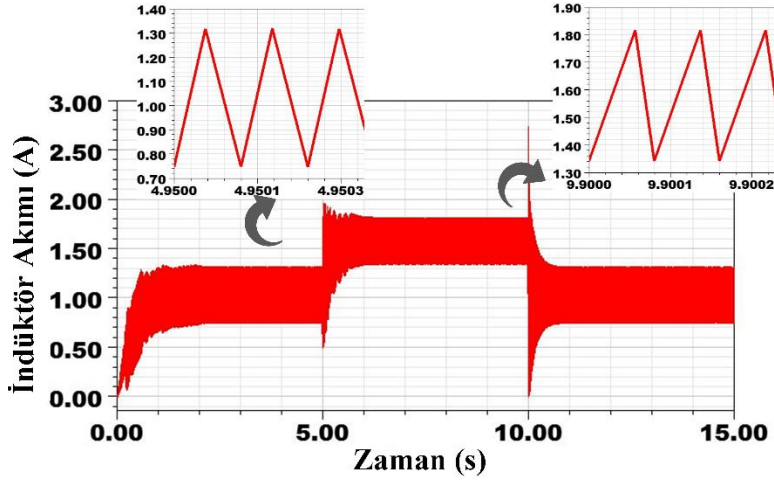
Şekil 5.4. Boşta ve tam yük koşullarında uyartım gerilimi dalga formları (a) klasik azaltan dönüştürücüyle (10 kHz'de), (b) klasik azaltan dönüştürücüyle (20 kHz'de), (c) iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücüyle (2x10 kHz)

Dönüştürücü çıkış gerilimi üzerindeki anahtarlama frekansı etkisi aynı olduğu için, 20 kHz'de çalışan klasik azaltan dönüştürücüsü ve önerilen faz kaymalı azaltan dönüştürücüsü (2x10 kHz) için gerilim dalgacık değerlerinin genliği hemen hemen aynıdır. Bununla birlikte, önerilen faz kaymalı dönüştürücü, daha düşük anahtarlama frekansı ile aynı performansı sağlamaktadır. Böylece, önerilen faz kaymalı dönüştürücü EMI'yi de azaltmaktadır. Üç topoloji için benzetim sonuçlarından elde edilen veriler ile birlikte güç elektroniği devresinin parametreleri de Çizelge 5.2'de verilmiştir.

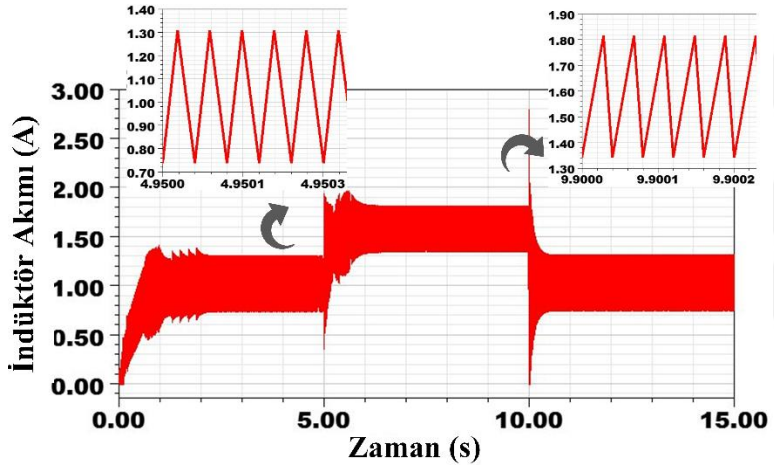
Çizelge 5.2. Benzetim sonuçlarına göre elektriksel parametreler

Parametreler	Klasik Azaltan Dönüştürücü				Faz kaymalı Azaltan Dönüştürücü	
Anahtarlama Frekansı	10kHz		20kHz		10kHz	
Yük Durumu	Yüksüz	Yüklü	Yüksüz	Yüklü	Yüksüz	Yüklü
Duty Oranı	0,47	0,71	0,47	0,71	0,47	0,71
Kaynak Gerilimi	100 V				100 V	
Uyartım gerilimi değeri	47 V	71 V	47 V	71 V	47 V	71 V
Uyartım gerilimi dalgacık miktarı	0,07 V	0,05 V	0,05 V	0,04 V	0,05 V	0,03 V
Kondansatör akımı RMS değeri	0,17 A	0,14 A	0,16 A	0,14 A	0,02 A	0,12 A
Kaynak akımı dalgacık miktarı	1,06 A	1,3 A	1,06 A	1,26 A	1,06 A	1,12 A
İndüktör akımı	1,06 A	1,6 A	1,06 A	1,6 A	1,06 A	1,6 A
İndüktör akımı dalgacık miktarı	0,58 A	0,48 A	0,55 A	0,54 A	0,07 A	0,56 A
Ortalama indüktör akımı	1,6 A		1,6 A		2 x 0,8 A	
İndüktörde depolanan enerji	5,6 mJ		2,8 mJ		2x 0,35 mJ	
Endüktans Değeri	4,4 mH		2,2 mH		2 x 1,1 mH	
Kondansatör Değeri	100 uF/ ESR 12 mΩ					

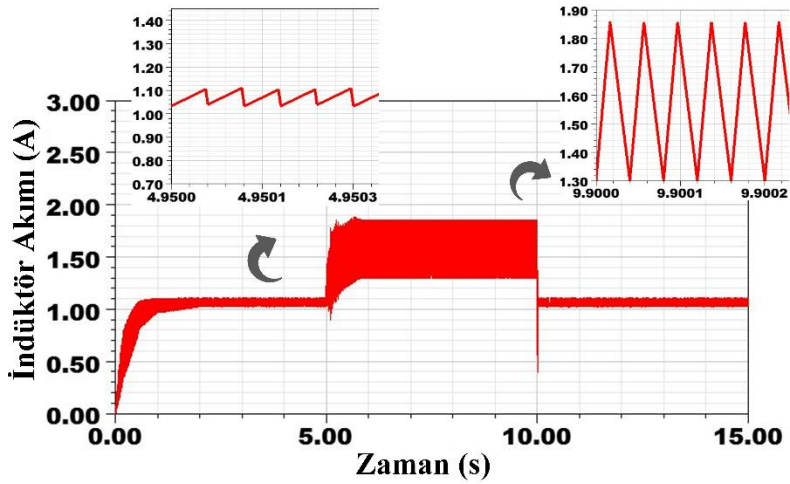
Klasik azaltan dönüştürücünün indüktör akımı dalga formları incelendiğinde yüklü durumdan yüksüz duruma veya tersi geçiş anlarında görüleceği gibi (Şekil 5.5 (a)) kalıcı duruma ulaşma süresinin diğerlerine göre uzun olduğu açıktır. Bu gecikme, kanal sayısının az olması ile anahtarlama frekansının düşük olması şeklinde açıklanabilecektir. Şok endüktans değerinin 2,2 mH ve anahtarlama frekansının 20 kHz olduğu klasik azaltan dönüştürücülü uyartım sistemi için tam yüklü durumdan, yüksüz duruma geçiş sürecindeki indüktör akımı salınımının sönümlenmesi, Şekil 5.5 (b)'de verilen benzetim sonuçlarına göre biraz daha iyi olmaktadır. Ancak, indüktör akımı salınımının sönümlenmesi faz kaymalı azaltan dönüştürücü için diğer dönüştürücülere göre çok daha iyi olmaktadır (Bkz. Şekil 5.5 (c)).



(a)



(b)

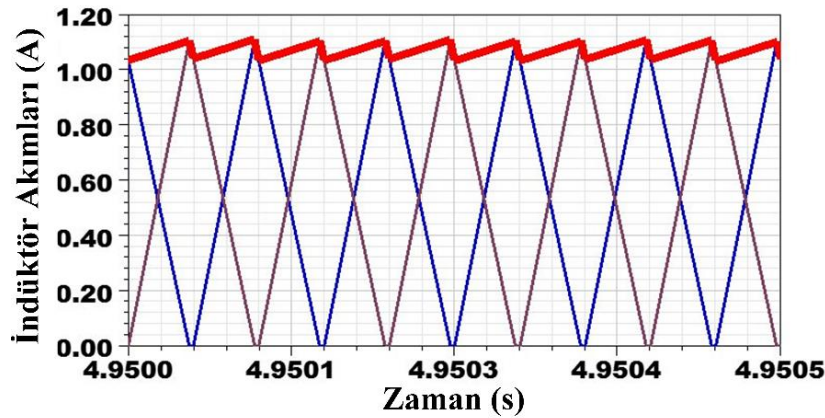


(c)

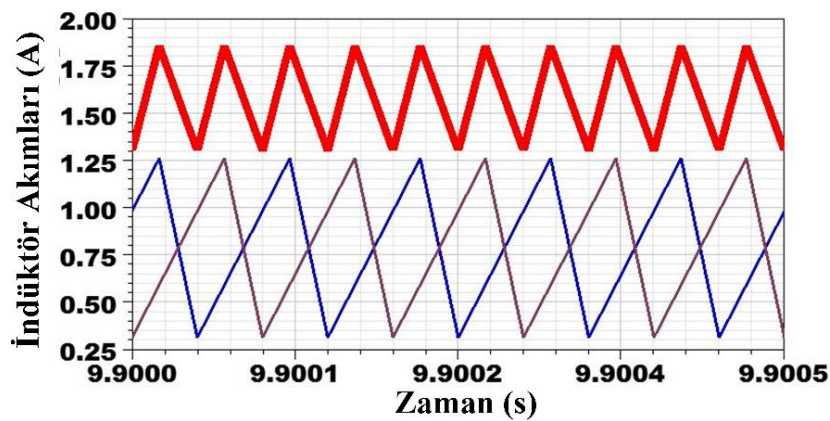
Şekil 5.5. Boşta ve tam yük koşullarında dönüştürücü indüktör akımı dalga formları (a) klasik azaltan dönüştürücüyle (10 kHz'de), (b) klasik azaltan dönüştürücüyle (20 kHz'de), (c) iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücüyle (2x10 kHz)

İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü ile benzetimi yapılan uyarım sisteminde tam yükten yüksüz duruma geçerken, generatörün terminallerinde anma gerilimini üretebilecek uyarım akımı değerine daha kısa sürede ve daha yumuşak şekilde ulaşmaktadır. Gerçek dinamik yükler düşünüldüğünde azaltan dönüştürücü topolojisi ve dinamik cevabı daha da önem kazanmaktadır.

İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücünün yüksüz ve tam yüklü koşulları için her kanalın (L1 ve L2) indüktör akım dalga formları ve kırmızı renkte çizilmiş olan toplam indüktör akım dalga formu ($L1 + L2$) Şekil 5.6'da verilmiştir. Burada, faz kaymalı azaltan dönüştürücü indüktör akımının dalgacık frekansı 20 kHz olarak elde edilmiştir ve bu Eş. 4.28 ile uyumludur.



(a)



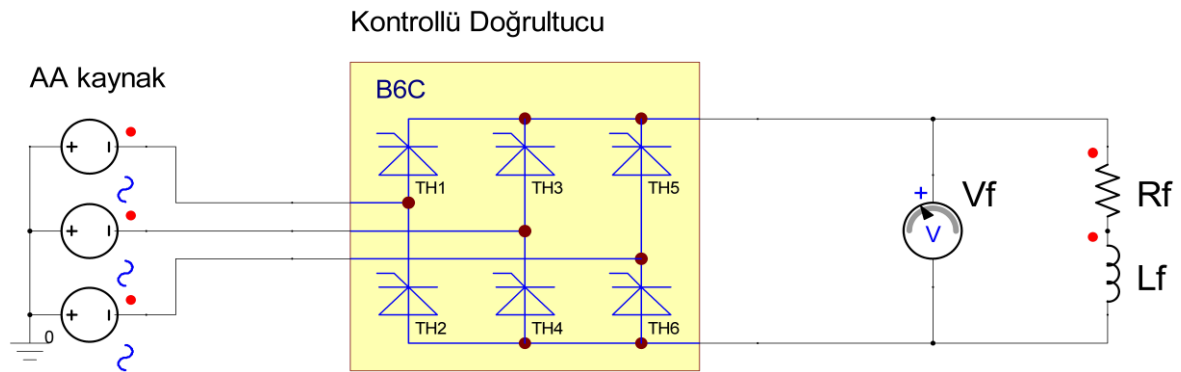
(b)

Şekil 5.6. İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücünün indüktör akımı dalga formları
(a) yüksüz durumu, (b) tam yük durumu

Sonuç itibarı ile faz kaymalı azaltan dönüştürücü devresinin kaynak akımı dalgalanması, çıkış gerilimi dalgalanması daha düşük ve indüktörde depolanan enerji açısından daha düşük değerli olduğu görülmektedir. Kaynak akımı dalgacık seviyesi, özellikle yüksek güç seviyelerinde ve yüksek orandaki yakıt hücreleri gibi akım dalgacığına duyarlı bazı güç kaynakları için çok önem kazanmaktadır. İndüktörde depolanan enerji doğrudan indüktörün boyutunu etkileyeceğinden faz kaymalı azaltan dönüştürücü hacim, ağırlık ve kayıplar açısından daha üstündür. Ayrıca, çıkış gerilimi dalgacık seviyesinin tristöre göre yok denilecek kadar düşük seviyede olması, önerilen sistemin uyarım gerilimi kaynaklı shaft gerilimini ortadan kaldırdığı söylenebilir.

5.1.2. Senkron generatörün tristörlü doğrultucu ile statik uyarım benzetimi

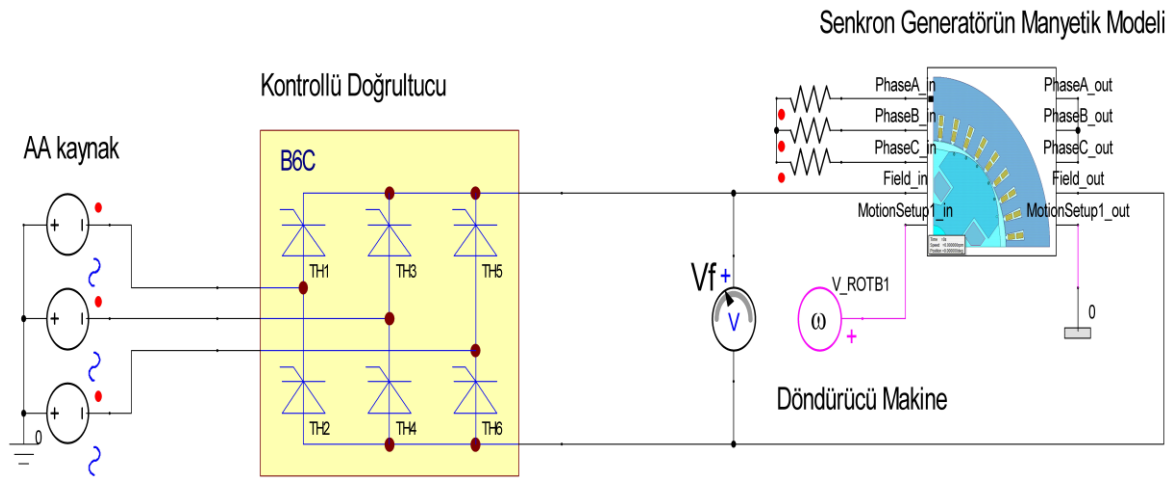
Generatörlerin uyarım sistemlerinde tristörler ile kurulan kontrollü doğrultucu devreleri ile uygulamada sıkça karşılaşılabilmektedir. Şekil 5.7’de görülen tristörlü doğrultuculu uyarım devreleri, azaltan dönüştürücü devrelerinin geçici durum hızlı tepkileri açısından değerlendirildiğinde tatmin edici olmamasına rağmen özellikle çok büyük güçteki generatör uyarım sistemlerinde halen yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5.7. Kontrollü doğrultucu devresi

Bu çalışmada önerilen azaltan dönüştürücülü uyarım sisteminin tristörlü kontrollü doğrultucu devreleri ile senkron generatörün yüklenme durumlarına göre tepki sürelerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla Şekil 5.8’de verilen benzetim devresi kullanılmıştır. Kontrollü doğrultucu devresinin yüksüz ve tam yüklü durumlardaki DA çıkış gerilim değerleri azaltan dönüştürücülü uyarım devresinin uyarım gerilim değerleri ile aynı olması sağlanmıştır. Dolayısıyla generatör boşa çalışırken uyarım gerilim değerinin yaklaşık 47 V olabilmesi

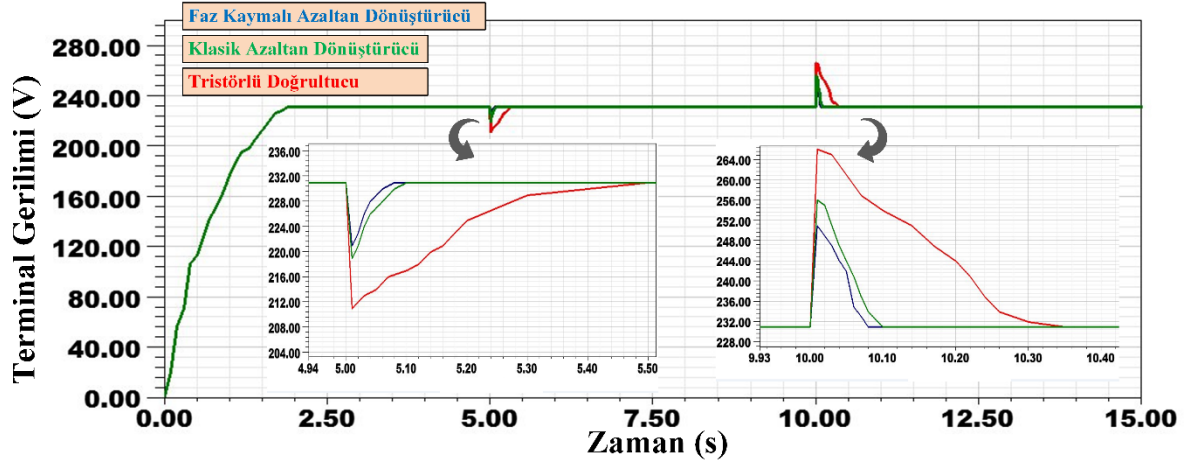
için tristörlerin tetikleme açıları 85 derece ve generatör yüklü iken uyarım gerilim değerinin 71 V olabilmesi için tristörlerin tetikleme açıları yaklaşık 30 derece geciktirilmiştir. Kontrollü doğrultucu girişindeki üç fazlı AA kaynak gerilimin etkin değeri ise yaklaşık 60 V civarındadır. Döndürücü makinenin devir sayısı ise 4 kutuplu senkron generatör için 1500 rpm olarak belirlenmiştir. Şekildeki generatöre ait manyetik eşdeğer devresi Maxwell 2D yazılımında modellenmiştir. Böylece, azaltan dönüştürücü devreleri ile benzetimleri aynı yüklenme ve uyarım şartları altında elde edilmiştir. Uyarım gerilimindeki dalgacık seviyesi boş çalışma için 27,5 V ve tam yüklü çalışma için 38,4 V olarak görülmüştür. Önerilen sisteme göre oldukça yüksek olan dalgacık seviyesi, shaft gerilimini oldukça artıracaktır.



Şekil 5.8. Kontrollü doğrultucu tabanlı uyarım sistemine ait benzetim devresi

5.1.3. Senkron generatör terminal gerilimin yük değişimine cevabı

Generatörün yük değişimlerine ait benzetim çalışmaları 5. saniyede yüksüz durumdan tam yüklü duruma geçiş ve 10. saniyede ise tam yükten yüksüz duruma geçiş olarak yapılmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmalarda, Eş. 4.7 ile hesaplanan ortalama RMS gerilim değeri süreç değişkeni olarak kullanılmıştır. Üç farklı uyarım sistemi için 230 V rms terminal gerilim değeri referans alınarak Şekil 5.9'da görülen kademeli yük değişimi için generatörün terminal gerilimi cevap grafiği elde edilmiştir. Bu grafikte, tristörlü kontrollü doğrultucu kırmızı renkli, klasik azaltan dönüştürücü için yeşil renkli ve önerilen iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü için mavi renkli eğriler ile temsil edilmektedir.



Şekil 5.9. Kademeli yük değişimi için terminal gerilimi tepkisi benzetim sonuçları

Tristör kontrollü doğrultucu ile yapılan uyartım sisteminde hem yüklü duruma geçişte, hem de yüksüz duruma geçişte azaltan dönüştürücülere göre tepki cevabının yaklaşık olarak dört kat daha uzun sürede olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca yüklenme durumunda terminal geriliminin 5. saniyedeki anlık olarak 210 V seviyelerine kadar düştüğü ve yaklaşık olarak 260 ms sürede toparlandığı, buna karşın klasik azaltan ile yapılan uyartım sisteminin 50 ms sürenin altında toparlandığı ve yaklaşık 218 V değerine kadar düştüğü belirlenmiştir. Önerilen iki fazlı faz kaymalı dönüştürücülü uyartım sisteminde ise yüklü duruma geçişteki anda generatörün terminal geriliminin yaklaşık olarak 222 V değerine kadar düştüğü belirlenmiştir. Toparlanma süresi ise yaklaşık 25 ms kadar olmaktadır. Terminal gerilimi cevabı olarak $\pm\%2$ 'lik hata aralığına girme süreleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3.Yüzde ikilik kabul dilime girmesine göre terminal gerilimi cevabı

UYARTIM	$\pm\%2$ 'lik hata aralığına ulaşma		Terminal Gerilimi	
	225,4	234,6	En düşük gerilim	En yüksek gerilim
	Yüklenince	Yükten ayrılınca		
Tristör Doğrultuculu	260 ms	268 ms	210,8	266,8
Azaltan Dönüştürücülü	50 ms	78 ms	218	256
Faz Kaymalı Azaltan Dönüştürücülü	25 ms	66 ms	222	250,8

Generatörün terminal gerilimi yüklü durumdan yüksüz duruma geçiş anında (10. saniye) tristör kontrollü doğrultucu ile yapılan uyartım sisteminde yaklaşık olarak 265 V olmakta ve $\pm\%2$ 'lik hata aralığına için 268 ms sürede sönümlenmektedir. Klasik azaltan dönüştürücülü uyartım sisteminde bu değerler 256 V ve yaklaşık olarak 78 ms olarak belirlenmiştir.

Önerilen iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücülü uyartım sisteminde gerilim en yüksek 250 V değerine çıkmaktadır. Terminal gerilimi için $\pm 2\%$ 'lik hata aralığına girme süresi ise 66 ms olmaktadır. Bu sonuçlara göre, generatör uyartım sistemleri için azaltan dönüştürücü devrelerinin tepki sürelerinin kontrollü doğrultucu devrelerine kıyasla oldukça tatmin edici düzeylerde olduğu çok açıktır. Ayrıca önerilen iki fazlı azaltan dönüştürücü devresinin, klasik azaltan dönüştürücüye göre daha iyi bir dinamik cevap sağladığı belirlenmiştir.

5.2. Deneysel Çalışmalar

Bu tezde önerilen iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü ile yapılan AVR sisteminin performansı belirleyebilmek için yapılan deneysel çalışmalarda generatörün yük değişimlerine göre terminal geriliminin toparlanma süresi ve bu süreçteki gerilim regülasyon değerleri incelenmiştir. Böylece, daha öncesinde benzetim çalışmaları ile performansı belirlenen AVR sisteminin uygulamadaki başarımı ile diğer parametreler ele alınarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Eş. 2.11'e göre tezde kullanılan senkron generatörün gerilim regülasyonu;

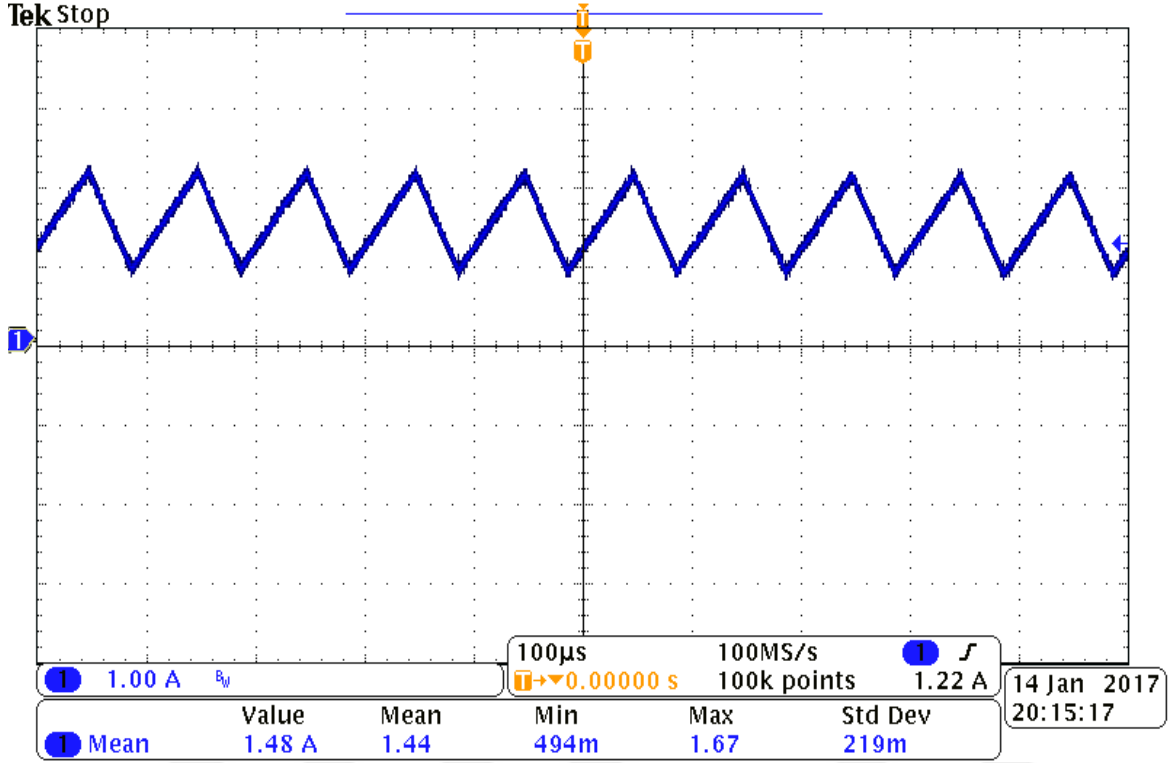
$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100 = \frac{230 - 170}{170} \times 100 = 35,3$$

Eş. 2.12'ye göre tezde kullanılan senkron generatörün frekans regülasyonu

$$SD = \frac{f_{nl} - f_{fl}}{f_{fl}} \times 100 = \frac{49,8 - 48}{48} \times 100 = 3,75$$

Klasik azaltan dönüştürücülü AVR sisteminde 10 kHz anahtarlama frekansında 4,4 mH değerinde indüktör bağlı iken dönüştürücünün indüktör akım dalgacık değeri tepeden tepeye yaklaşık olarak 0,48 Amper olmaktadır. Anahtarlama frekansı 10 kHz değerinde, dönüştürücü devresindeki indüktörün endüktans değeri de 2,2 mH olarak seçilse idi bu durumda indüktör akım dalgacık genliği iki kat artarak 0,96 Amper olacaktı. Böylece, deney düzeneğinde kullanılan 2,2 mH endüktans değerindeki indüktör ile ölçülen indüktör akımı skop görüntüsü klasik azaltan dönüştürücü devresi için Şekil 5.10'da verilmiştir. Bu

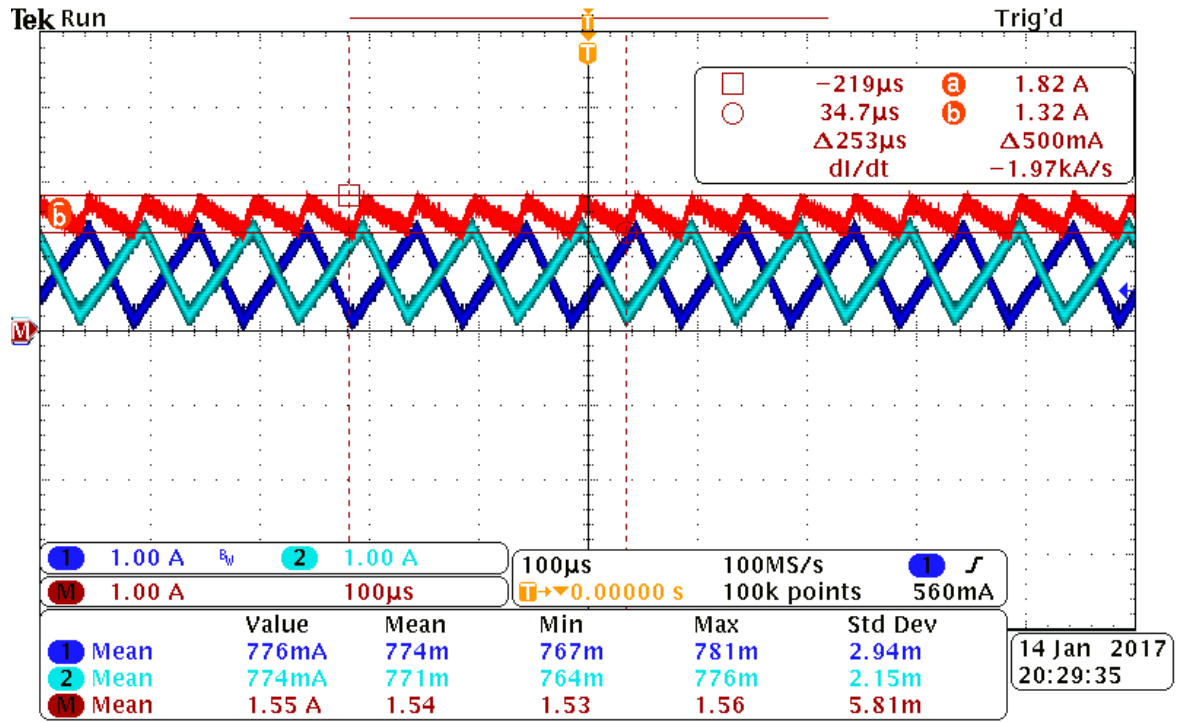
durumda deneysel olarak klasik azaltan dönüştürücünün indüktör akım dalgacık değeri yaklaşık 1,17 Amper olarak belirlenmiştir.



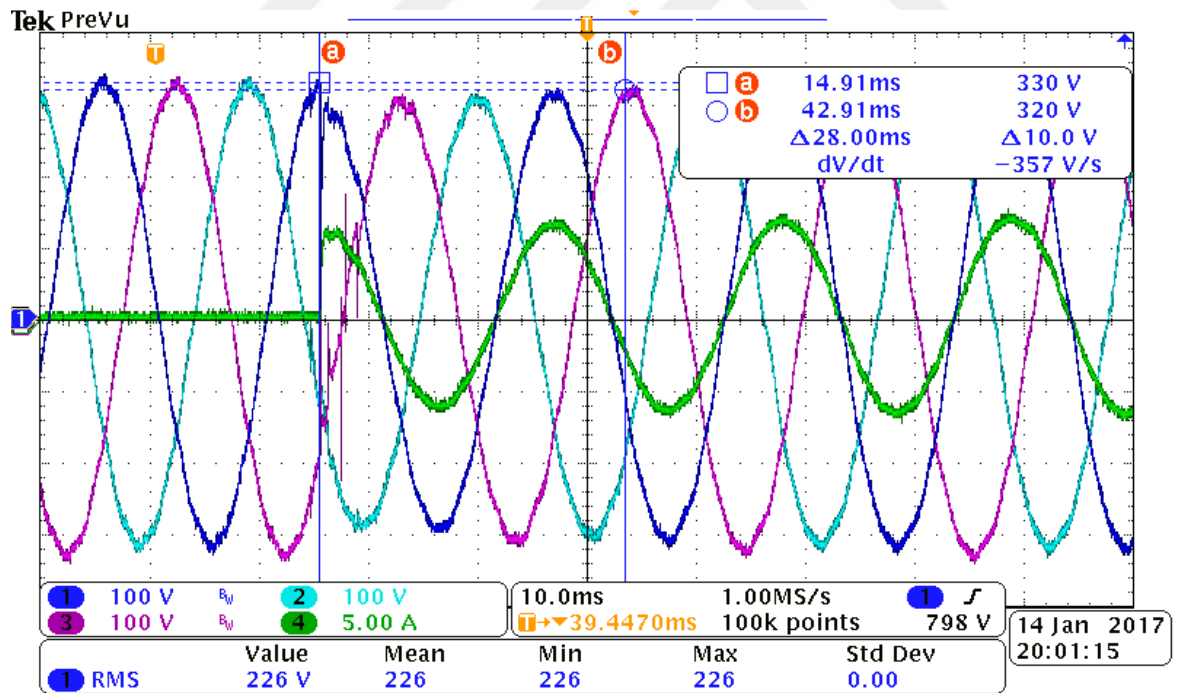
Şekil 5.10. Klasik azaltan dönüştürücü için indüktör akımı dalga formu

İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü devresinde her bir kanala ait indüktör akımı ile toplam indüktör akımı dalga formları Şekil 5.11’de görülmektedir. Burada indüktör akım dalgacık akımı tepeden tepeye yaklaşık 0,50 Amper olarak ölçülmüştür ve bu değer 4,4 mH indüktörlü klasik azaltan dönüştürücü devresine göre oldukça iyi seviyededir.

Senkron generatörün yüksüz durumdan yüklü duruma geçişteki üç faz terminal gerilim ve yük akımı dalga formları Şekil 5.12’de verilmiştir. Bu dalga formlarından yüklenme anında generatör gerilim regülasyonu yaklaşık olarak % 2 değerinde; terminal geriliminin 230 V değerine tekrar toparlanması için geçen sürenin 28 ms kadar olduğu belirlenmiştir. Böylece, önerilen iki fazlı azaltan dönüştürücülü AVR sisteminin oldukça hızlı bir geçici durum cevabı olduğu görülmektedir.



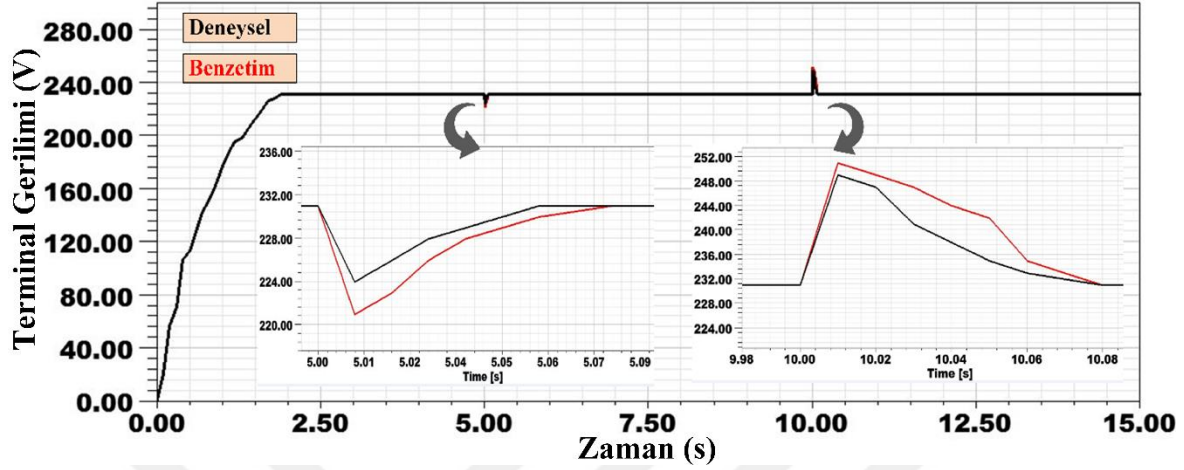
Şekil 5.11. İki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücü için indüktör akımı dalga formu



Şekil 5.12. Generatörün yüklenme durumu ile terminal gerilimi dalga biçimleri

Generatörün yük değişimlerine karşı terminal gerilimlerinin 230 V referans değerine gelmesi için geçen süreler ile gerilim regülasyonu açısından deneysel ve benzetim çalışmalarında elde edilen grafikler Şekil 5.13 ile verilmiştir. Bu grafikte, siyah renkli eğri deneysel sonuç

ve kırmızı renkli eğri ise benzetim sonuçlarını ifade etmektedir. Bu eğrilere göre terminal gerilimi cevabı olarak $\pm\%2$ 'lik hata aralığına girme süreleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Yük değişimi için terminal gerilimi cevabının benzetim ve deney sonuçları

Çizelge 5.4. Önerilen uyarım sistemli AVR için benzetim ve uygulama sonuçları

UYARTIM	$\pm\%2$ 'lik hata aralığına ulaşma		Terminal Gerilimi	
	Yüklenince	Yükten ayrılınca	En düşük	En yüksek
Benzetim Sonuçlar	25 ms	66 ms	222	250,8
Deneysel Sonuçlar	22 ms	56 ms	224	249

Tristör doğrultucu bir deneysel düzenek kurulmamıştır. Ancak, tristörlü uyarım sistemi için yapılan benzetim çalışmasında, $\pm\%2$ 'lik hata aralığına girme süresi 260ms olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, karşılaştırma amacıyla yapılan araştırmalarda mevcut bir ürün olan MX321 AVR cihazı için anma geriliminin $\%97$ 'sine 300 ms sürede ulaşabildiği görülmüştür (İnternet: Stamford). Ayrıca, tristörlü bir statik uyarım sisteminde çıkış geriliminin $\pm\%2$ 'lik hata aralığına girme süresinin en düşük 200 ms olabildiği rapor edilmiştir (McGeorge, 1993: 50, 52). Tristörlü sistem için mevcut veriler ve önerilen sisteminin deneysel sonuçları karşılaştırıldığında, önerilen iki fazlı faz kaymalı statik uyarım sistemin yüksek dinamik tepki üstünlüğü açıkça görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Orta ve büyük güçlü senkron generatörlerde statik uyarım sistemleri tristörün güç elektroniğinde yer almasına bağlı olarak 1960'lı yıllardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer uyarım yöntemleriyle karşılaştırıldığında statik uyarım sistemleri, tepkilerinin hızlı olması, akım-gerilimlerinin kolay izlenebilmesi, denetlenebilmesi ve olası sorunlarının daha kolay giderilebilmesi açısından daha avantajlı olmaktadır. Ancak, bu sistemler göreceli olarak diğer uyarım sistemlerinden hızlı olmasına rağmen tristörlü doğrultucuların doğasından ileri gelen dinamik tepkilerinin yavaş olması ve yüksek şaft gerilimi indüklemeleri gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu tezde, belirtilen bu olumsuzluklara çözüm olabilecek, yüksek frekanslı ve modüler olarak uyarım gücünün artışına izin veren faz kaymalı azaltan dönüştürücülü yeni bir statik uyarım sistemi önerilmiştir.

Önerilen sistemi gerçekleştirmek üzere önce manyetik devre elemanları ve güç anahtarlarının çalışabilme sınırlılıkları belirlenmiştir. Buna uygun olarak laboratuvar ortamında uygulanabilecek bir generatör için düzenek hazırlanmıştır. Daha sonra, sonlu elemanlar analizi tabanlı bir yazılım olan Maxwell ortamında, deneysel çalışmalarda kullanılacak olan senkron generatörün iki boyutlu elektromanyetik modellemesi yapılmıştır. Böylelikle modellenen generatör önce önerilen faz kaymalı azaltan ve klasik azaltan dönüştürücüler ile daha sonra ise tristör kontrollü doğrultucu ile uyarım sargıları beslenmiştir. Burada amaç farklı yük değerleri ve çalışma şartları için uygulama öncesi modellerin test edilmesidir. Benzetimler, güç elektroniği devreleri ile generatörün oluşturduğu elektromekanik sistemlerin eş zamanlı çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bir fazlı azaltan ve iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücülerden oluşan statik uyarım sistemleri için elde edilen benzetim sonuçlarının, deneysel olarak kurulan uyarım sistemi ile uyumlu ve dinamik cevap açısından tristörlü uyarım devrelerinden daha hızlı olduğu görülmüştür. Benzetim ve deneysel sonuçların birbirine olan bu yakınlığı, SEA yazılımlarının gerçeğe yakın sonuçlar verdiği ve deneysel çalışmalar öncesinde avantaj sağladığı açıktır.

Tristörlü bir statik uyarım sisteminde çıkış geriliminin $\pm 2\%$ 'lik hata aralığına girme süresi en düşük 200 ms olabildiği rapor edilmiştir (McGeorge, 1993: 50, 52). Bu süre, tristörlü statik uyarım için gerçekleştirilen eş zamanlı benzetim sonucuna göre 260 ms olarak tespit edilmiştir. Önerilen iki fazlı faz kaymalı azaltan dönüştürücülü statik uyarım kontrol sistemi

için terminal gerilimi, generatör boştaki çalışırken tam yüklendiğinde, 28 ms içerisinde anma geriliminin % 2'si ile belirtilen kabul alanına girmiştir. Buna göre, dinamik yük ve sistem koşulları için tristör kontrollü sistemlerin yavaş tepki dezavantajını ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, tristör kontrollü sistemlerin çıkış gerilimlerindeki küçük dereceli harmonik bileşenlerden dolayı meydana gelen ekstra şaft gerilimini yok etmekte ve generatörün yataklama dolayısıyla bakım ve onarım sürecini uzatacaktır. Elde edilen veriler, faz kaymalı azaltan dönüştürücülü sistemin adım cevabı açısından klasik azaltan dönüştürücülere göre daha iyi performans sunduğunu da göstermiştir. Ayrıca, indüktör akımı dalgacık seviyesi ve indüktör içinde depolanan enerji miktarı azalmıştır. Böylece hacim, ağırlık ve kayıplar açısından avantaj sağlanmıştır. Öte yandan bu çalışma, senkron generatörlerin uyarım sisteminin faz kaymalı azaltan dönüştürücü ile tasarımı konusunda yapılan ilk çalışmadır. Dolayısıyla, DA/DA güç dönüştürücülerin tristörlü kontrollü doğrultucu devrelerine göre kontrol kolaylığı, hızlı tepki vermeleri ve şaft gerilimini önemli oranda azaltmaları gibi olumlu yönleri ile AVR devrelerinde daha da artan bir oranda tercih edileceği düşünülmektedir.

Önerilen sistem, orta ve büyük ölçekli bir senkron generatörün statik uyarım sisteminin emülasyonunu yapabilecek laboratuvar ölçekli bir generatör için kontrol, koruma ve izleme gibi ihtiyaçlara tam çözümdür. Tüm ölçüm, izleme, kayıt, yüksek frekanslı faz kaydırmalı PWM üretimi ve tüm kontrol işlemlerinin koşturulduğu gömülü işletim sistemli NI CompactDAQ denetleyici kullanılmıştır. Dayanıklı ve kompakt yapısıyla, ölçüm ve kontrol işlevleri için çok yönlü bir endüstriyel platform kurulmuştur. Bu platform üzerinde çalışan ve süreci yöneten sanal enstrüman ise LabVIEW yazılım ortamında tasarlanmıştır. Önerilen sistemde harmonikler ve kırpışma (flikler) gibi zor hesaplanan çok sayıda güç kalitesi parametresi IEC 61000-4-30 ve EN 50160 standartlarına uygun olarak ölçülmüştür. Olay kaydı otomatik olarak yapılmakta iken, diğer tüm parametreler operatör kontrolünde kayıt edilebilmektedir. Tez sürecinde geliştirilmiş olan genel yazılım yapısı ve alt programlar neredeyse hiç değişmeden PXI veya cRIO gibi başka NI platformlarına kolaylıkla aktarılabilecek yapıdadır. Böylece, önerilen sisteme daha modüler bir yapı kazandırılarak gelecek çalışmalar için avantaj sağlanmıştır.

Önerilen sistem diğer üstün özelliği ise, tristör kontrollü uyarım sistemlerinde ayrıca güç kalitesi analizörü kullanılarak ölçülebilecek olan güçler, akımlar, gerilimler, harmonikler, eğilim gibi tüm üç fazlı sistem parametreleri IEC normlarına uygun olarak kurulan modüler sistemin kendisi tarafından ölçülebilmekte ve uyarım akımı bunlara göre kontrol

edilmektedir. Bu üstün özelliğin uygulama maliyetini ciddi oranda düşüreceği ve diğer sistemlerde olduğu gibi çok sayıda cihazla haberleşmesinden dolayı kontrol ve koruma anlamında bir gecikmeye sebep olmayacağı açıktır.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler ise, geliştirilen senkron generatör güç denetleme sisteminin şebeke veya diğer generatörler ile paralel bağlanmasına yönelik çalışmalar yapılabilecektir. Bunun için gereken donanım ve performans ihtiyacı, mevcut CompactDAQ denetleyici yapısı ve şasisi üzerinde bulunan NI C-modülleri ile hali hazırda yeterlidir. Sadece, LabVIEW yazılımına alt program eklenmesi ve şebeke etkileşimi için PLL yapısı ve buna ilişkin denetleyici yapısının kurulması gerekecektir. Bu sayede, mevcut santrallerde ayrı bir cihaz ile gerçekleştirilen bu işlev, aynı donanım ile başarılabilecektir. Son olarak, uyarım sistemi denetleyicisi olarak doğrusal olmayan veya dayanıklı kontrol tekniklerinin uygulanmasına yönelik araştırmalar yapılabilecektir.



KAYNAKLAR

- Abacı, K., Tugal, M. A. ve Yamancli, V. (2013). *AC ve Statik Tip Uyartım Sistemlerinde Güç Sistem Stabilizerlerinin Kararlılığa Etkisinin Araştırılması*. III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, 1-8.
- Anbarasu, A., and Dincan, C. (2010-2011). Reactive Power Control And Fault Ride Through Capabilities Of Synchronous Generator; *Aalborg University, Aalborg, Denmark*, 1-146
- Anderson, P. M., and Fouad, A. A. (1994). *Power System Control and Stability* (2nd Edition). New York: Wiley-IEEE Press, 1-672.
- Ateş, M. (Ağustos 2012). Kapulukaya HES Senkron Generatör Statik Uyartım Sistemi ve Kapulukaya HES İçin Uyartım Sistemi Arızaları Analizi; *EÜAŞ, Kırıkkale*, 1-22.
- Baechle, M., Knazkins, V., Smulders, P. A., and Stutz, D. (2012). *Improving the performance of the stator current limiter of excitation control systems*. Power and Energy Society General Meeting, 1-7.
- Bayram, M. B., Bülbül, H. İ., Can, C., and Bayındır, R. (2013). *Matlab/GUI Based Basic Design Principles of PID Controller in AVR*. Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on, 1017-1022.
- Bayram, M. B., Sefa, I., and Balci, S. (2016). *An Interleaved Buck Converter For Excitation System Of Synchronous Generators*. ECRES – 4th European Conference on Renewable Energy Systems, ID 387
- Beghi, A., Cervato, A., and Rampazzo, M. (2015). *A Remote Refrigeration Laboratory for Control Engineering Education*. IFAC-PapersOnLine, 48(29), 25-30.
- Cengiz, G. (2015). *Development Of A Hardware-In-The-Loop Wind Energy Conversion System Emulator*. The Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- Çolak, İ. (2010). *Senkron Makinalar* (İkinci Baskı). Ankara: Seçkin, 1-174.
- Datta, A. K., Dubey, M., and Jain, S. (2014). Modelling and Simulation of Static Excitation System in Synchronous Machine Operation and Investigation of Shaft Voltage. *Advances in Electrical Engineering*, 2014, 1-9.
- Deepak, M., and Shubhanga, K. N. (2012). *Development of A Digital Excitation System for Synchronous Generator on RTAI-Linux Platform*. Green Technologies (ICGT) 2012 International Conference on, 46-51.
- Dong-Hee, L., Tae-Hyoung, K., and Jin-Woo, A. (2008). *Control of digital AVR in stand alone generator for improved dynamic characteristics*. Power Electronics Specialists Conference, 1978-1982.

- Dos Santos, H. F., Sadowski, N., and Batistela, N. J. (2016). Synchronous Generator Fault Investigation by Experimental and Finite-Element Procedures. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(3), 1-4.
- Dube, T. R. (2016). *Investigating The Capabilities Of Sel 787 Transformer Protection Relay Using Low Level Simulators*. The Degree of Bachelor Thesis, Murdoch University, Murdoch, Australia.
- ELCOM. (2009). ENA-Node instrument firmware functionality; *ENA Elcom Network Analyzer*, Ostrava, Czech Republic, 1-14.
- Erceg, G., Tonkovic, N., and Erceg, R. (2001). Excitation Limiters for Small Synchronous Generators. *AUTOMATIKA*, 42(1-2), 63-69.
- Erceg, I., Tusun, S., and Erceg, G. (2012). *The use of programmable automation controller in synchronous generator excitation system*. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2055-2060.
- Erickson, R. W. (2007). DC-DC Power Converters. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1-18.
- Esteki, M., Poorali, B., Adib, E., and Farzanehfard, H. (2015). Interleaved Buck Converter With Continuous Input Current, Extremely Low Output Current Ripple, Low Switching Losses, and Improved Step-Down Conversion Ratio. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(8), 4769-4776.
- Faiz, J., Shahgholian, G., and Arezoomand, M. (2007). *Analysis and Simulation of the AVR System and Parameters Variation Effects*. Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. POWERENG 2007. International Conference on, 450-453.
- Gaing, Z. L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384-391.
- GE Energy Control Solutions Inc. (2015). EX2100e SCT/PPT Voltage Regulator Excitation System; GE Energy and SF596695, *Independence, Missouri*, 18-49.
- Griffo, A., Wrobel, R., Mellor, P. H., and Yon, J. M. (2013). Design and Characterization of a Three-Phase Design and Characterization of a Three-Phase. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 9(5), 2106-2115.
- Hasanien, H. M. (2013). *Design Optimization of PID Controller in Automatic Voltage Regulator System Using Taguchi Combined Genetic Algorithm Method*. IEEE Systems Journal, 7(4), 825-831.
- Horinek, M., and Bilik, P. (2010). *Power Analyzer for Converter Testing Based on cRIO Hardware Platform*. Applied Electronics (AE) 2010 International Conference on, 1-4.
- Horowitz, I. M. (1963). *Synthesis of Feedback Systems* (First Edition). New York: Academic Press, 246-249.

- IEEE. (1995). Recommended models for overexcitation limiting devices. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10(4), 706-713.
- IEEE. (1995). Underexcitation Limiter Models For Power System Stability Studies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10(3), 524-531.
- IEEE. (1996). Computer Models for Representation of Digital-Based Excitation Systems . *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11(3), 607-615.
- IEEE Std 421.1™-2007. (2007). *IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines*. New York, USA: IEEE, 1-38.
- IEEE Std 421.4™-2014. (2014). *IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specifications*. New York: IEEE, 1-57.
- IEEE Std 421.5™-2016. (2016). *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. New York: IEEE, 1-207.
- IEEE Std C37.102™-2006. (2007). *IEEE Guide for AC Generator Protection - Redline*. New York: IEEE, 1-190.
- IEEE Std C50.12™-2005. (2006). *IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above*. New York: IEEE, 1-45.
- IEEE Task Force on Excitation Limiters (1995). Underexcitation Limiter Models For Power System Stability Studies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10(3), 524-531.
- Iranian, M. E., and Zabihinejad, A. (2011). Modeling and Implementation of Generator and Network Simulator for Static Exciters using Matlab and Labview. *Journal of Applied Science*, 11(3), 414-425.
- İnternet: Hauke, B.. Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage. Texas Instruments.URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Flit%2Fan%2Fslva477b%2Fslva477b.pdf&date=2017-03-18>, Son Erişim Tarihi: 18.03.2017.
- İnternet: Kinetics Industries. Synchronous Motor Field Excitation Systems. URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kinetics-industries.com%2Fpapers%2FQA-Kinetics-Excitation-030510.pdf&date=2017-03-18>, Son Erişim Tarihi: 18.03.2017.
- İnternet: Miložić, N., Joksimović, D., and Mandi, G.. Monitoring Synchronous Power Generators with LabVIEW and NI CompactDAQ.URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fsine.ni.com%2Fcs%2Fapp%2Fdoc%2Fp%2Fid%2Fcs-12919&date=2017-03-18>, Son Erişim Tarihi: 18.03.2017.

Internet: National Instruments. LabVIEW 2015 Help . National Instruments Technical Support. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ni.com%2Fpdf%2Fmanuals%2F371361m.zip&date=2017-03-18>, Son Erişim Tarihi: 18.03.2017.

Internet: National Instruments Corporation. NI CompactDAQ Hands-On Student Manual. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fdownload.ni.com%2Fevaluation%2Facademic%2Fcdaq_hands_on.zip&date=2017-03-18, Son Erişim Tarihi: 18.03.2017.

Internet: Stamford. MX321 Automatic Voltage Regulator. Northern Lights. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.northern-lights.com%2Fmedia%2FPDFs%2Fmanual_pdfs%2FStamford-MX321-avr.pdf&date=2017-03-18, Son Erişim Tarihi: 18.03.2017.

Internet: Whitby Hydro Energy Corporation. Generator and Exciter Basics. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.whitbyhydro.on.ca%2Fpdf%2F5.2.C_GenBasics.pdf&date=2017-03-18, Son Erişim Tarihi: 18.03.2017.

Jerkovic, V., Miklosevic, K., and Spoljaric, Z. (2010). *Excitation System Models of Synchronous Generator*. SIP 2010 28th International Conference Science in Practice, 77-82.

Kanjilal, M., Patra, A. K., Krishn, J., and Bhattacharya, K. D. (2012). Coordination of Loss of Excitation with Capability Curve and Steady State Stability Limit for a Large Alternator. *International Journal of Electrical Engineering*, 5(5), 501-521.

Katschnig, A. G., Nowak, F., Bächle, M., and Taborda, J. (2010). *New Digital Excitation System Models in addition to IEEE.421.5 2005*. Power and Energy Society General Meeting, 1-6.

Khan, I. A., Yinliang, X., and Tahir, B. (2015). *Design and manufacturing of digital MOSFET based-AVR for synchronous generator*. Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2015 IEEE International Conference on, 217-222.

Kiameh, P. (2002). *Power Generation Handbook: Selection, Applications, Operation, Maintenance* (First Edition). New York: McGraw – Hill, 31.1-33.21.

Kitauchi, Y., Shirasaki, T., Hayashi, K., Banjo, M., and Kitamura, S. (2000). Recent Developments on Generator Excitation Control System. *Hitachi Review*, 49(2), 66-70.

Koritarov, V., Guzowski, L., Feltes, J., Kazachkov, Y., Lam, B., Moran, C. G., and Donalek, P. (2013). Review of Existing Hydroelectric Turbine-Governor Simulation Models, Argonne National Laboratory and ANL/DIS-13/05, *South Cass Avenue, Argonne, Illinois*, 1-18.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control* (First Edition). New York: McGraw-Hill Inc., 315-460.

- Lahti, R. (2015). *Measurements of Harmonic Distortion in Maritime Power Systems*. The Master of Science Thesis, Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering, Trondheim, Norveç.
- Lane, I. J., Rogers, D. F., and Vance, P. A. (1961). Design and Tests of a Static Excitation System for Industrial and Utility Steam Turbine-Generators. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 80(3), 1077-1085.
- Law, B. E. (2001). *Simulation of The Transient Response Of Synchronous Machines*. The Degree of Bachelor Thesis, The Dean Faculty of Engineering University of Queensland, St Lucia Queensland, Avustralya.
- Mallesham, G., Mishra, S., and Jha, A. (2009). *Maiden Application of Ziegler-Nichols Method to AGC of Distributed Generation System*. Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09, IEEE/PES, 1-7.
- Mangalekar, Y. V., and Ugale, R. T. (2015). *Electric Motor Power Quality Assessment Using LabVIEW based Smart Power Analyzer*. IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), 318-323.
- Marignetti, F., Minutillo, M., Perna, A., and Jannelli, E. (2011). Assessment of Fuel Cell Performance Under Different Air Stoichiometries and Fuel Composition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(6), 2420-2426.
- McArdle, M. G. (2000). *Implementation of a digital AVR for small alternators*. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000. Proceedings. DRPT 2000. International Conference on, 620-625.
- Mccann, S. G. (2013). *Design of Experiments and Analysis for Drive Train Test Rig*. The Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- McGeorge, H. D. (1993). *Marine Electrical Equipment and Practice* (Second Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 50-52.
- McWilliam, M. K. (2008). *Development of a Wind Tunnel Test Apparatus for Horizontal Axis Wind Turbine Rotor Testing*. The Master of Science Thesis, The University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- Monti, C., Neri, C., and Pollastrone, F. (2015). Instrumentation, control and data acquisition system with multiple configurations for test in nuclear environment. *Fusion Engineering and Design*, 96-97, 873-877.
- Murdoch, A., Boukarim, G. E., D'Antonio, M. J., and Lawson, R. A. (2001). *Generator over excitation capability and excitation system limiters*. Power Engineering Society Winter Meeting, 1, 1-6.
- Pajuelo, E., Gokaraju, R., and Sachdev, M. S. (2010). *Coordination of overexcitation limiter, field overcurrent protection and generator control*. Power and Energy Society General Meeting, 1-7.

- Peşint, M. A. (1975). *Elektrik Makinaları - Senkron Makinalar* (İlk Baskı). Ankara: Yüksek Teknik Öğretmen Okulu Yayını, 1-343.
- Polak, A. (2013). Concept of Measurements and Acquisition System for Identification Process of a Synchronous Ship Generator. *Solid State Phenomena*, 196, 13-19.
- Prajapati, M., Patel, J., Chandwani, H., and Patel, V. (2013). Digital Excitation System for Synchronous Generator. *Journal of Electrical Engineering*, 1-6.
- Ritonja, J. (2015). *Direct and indirect adaptive control for synchronous generator semiconductor's excitation system*. Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 1-10.
- Saadat, H. (1999). *Power System Analysis* (First Edition). New York: McGraw-Hill, 527-585.
- Samieimoghaddam, M., Bina, M. T., Golkar, M. A., and Shokrikojori, S. (2016). Optimal design of voltage regulators for static excitation system in synchronous generator to reduce shaft induced-voltage. *Turkish Journal Of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 1-22.
- Sang-Hoon, P., Jae-Sung, Y., Sang-Seuk, L., Su-Won, L., and Chung-Yuen, W. (2009). *Output voltage control of synchronous generator for ships using a PMG type digital AVR*. Energy Conversion Congress and Exposition, 417-421.
- Schaefer, R., and Kim, K. (2002). Excitation control of the synchronous generator. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(2), 37-43.
- Schaefer, R. C. (1997). *Application of static excitation systems for rotating exciter replacement*. Pulp and Paper Industry Technical Conference, 199-208.
- Sefa, I., Balci, S., Altin, N., and Ozdemir, S. (2012). *Comprehensive analysis of inductors for an interleaved buck converter*. IEEE 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), DS2b.5-1 - DS2b.5-7.
- Sefa, I., Battal, F., and Balci, S. (2013). *Modeling and implementation of DSPIC based interleaved buck converter*. IEEE- Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 1652-1657.
- Seng, T., Khalid, M., and Yusof, R. (1999). Tuning of a neuro-fuzzy controller by genetic algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 29(2), 226-236.
- Senjyu, T., Gibo, N., and Uezato, K. (1992). *Cooperative control of AVR and GOV for improving transient stability of power systems using fuzzy controller*. Neural Networks to Power Systems, 1993. ANNPS '93., Proceedings of the Second International Forum on Applications of, 34-40.

- Shabib, G., Gayed, M. A., and Rashwan, A. M. (2010). *Optimal Tuning of PID Controller for AVR System using Modified Particle Swarm Optimization*. Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), 305-310.
- Silva, A. S., dos Santosa, R. c., Bottura, F. B., and Oleskovicz, M. (2017). Development and evaluation of a prototype for remote voltage monitoring based on artificial neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 57, 50-60.
- Thapar, O. D. (2002). *Modern Hydroelectric Engineering Practice In India: Electro-Mechanical Works* (First Edition). Roorkee, Uttarakhand, India: Alternate Hydro Energy Centre, 241-259.
- Tibebu, E. (2013). *An automatic voltage regulating system with Bluetooth communicating devices for brushless excitation of a synchronous generator*. The Master of Science Thesis, Uppsala University, İsveç.
- Travis, J., and Kring, J. (2006). *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun* (Third Edition). New Jersey: Prentice Hall, 1-1236.
- Venayagamoorthy, G. K., and Harley , R. G. (1999). *A robust artificial neural network controller for a turbogenerator when line configuration changes*. Africon, 1999 IEEE, 917-922.
- Yan, C., Venayagamoorthy , G. K., and Corzine , K. (2012). AIS-Based Coordinated and Adaptive Control of Generator Excitation Systems for an Electric Ship. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(8), 3102-3112.
- Zhu, Q., Wen, C., and Xie, W. (2012). *Advances in Information Technology and Industry Applications*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 136, 163-168.
- Zhu, Q., Wen, C., and Xie, W. (2012). General environment integrated monitoring and data management system based on virtual instrument. Lecture Notes in Electrical Engineering. *Advances in Information Technology and Industry Applications*, 136, 163-168.
- Ziegler, J. G., Nichols, N. B., and Rochester, N. Y. (1942). Optimum Settings for Automatic Controller. *Transactions of ASME*, 64, 759-768.





EK-1. Ölçülen büyüklüklerin listesi

Gerilim üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- 3-faz gerilim dalga şekilleri,
- 3-faz için yarım ve 1 saykıl RMS gerilim değerleri ve grafikleri.
- 3 fazın yarım saykıl RMS gerilimlerinin ortalaması ve grafiği (PID ile gerilim kontrolü için)
- 3-faz 10 saykıl RMS gerilim değerleri ve grafikleri
- 10 saniye RMS gerilim değeri
- 3-faz birikimli (aggregated) RMS gerilim
- Under-voltage deviasyon
- Over-voltage deviasyon
- Gerilim spektra
- 3-faz harmonik gerilim değerleri (1. ile 50. arası)
- 3-faz gerilim THD [%]
- 3-faz gerilim THDG [%]

Akım üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- 3-faz akım dalga şekilleri,
- 3-faz akım 10 saykıl RMS akım değerleri ve grafikleri
- Akım spektra
- 3-faz akım THD [%]
- 3-faz akım THDS [%]

Frekans üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- Yarım saykıl frekans
- 1 saykıl frekans
- Ortalama frekans ve grafiği
- 10 saniyelik birikimli (aggregated) frekans

Güç üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- Güç ve enerji değerleri
- 1 saykıl görünür güç, aktif güç ve reaktif güç
- 3-faz birikimli (aggregated) aktif güç

EK-1. (Devam) Ölçülen büyüklüklerin listesi

Harmonik üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- Gerilim spektra ve grafiği
- Grup spektra ve grafiği
- Akım spektra
- 3-faz harmonik gerilim değerleri (1. ile 50. arası)
- 3-faz gerilim THD [%]
- 3-faz akım THD [%]
- 3-faz gerilim THDG [%]
- 3-faz akım THDS [%]

Kırpışma (Flicker) üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- 3-faz P_{st} (short-term flicker)
- 3-faz P_{lt} (long-term flicker)
- 3-faz P_{inst} (instantaneous flicker) grafiği

Unbalance üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- Gerilim ve temel gerilim
- Akım ve temel akım
- Sıfır, pozitif ve negatif diziler

Event detection üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- Gerilim olayları
- RCV olayları

Signalin voltage detection üzerine yapılan ölçümler ve/veya grafikler:

- 3-faz sinyalizasyon gerilim RMS değerleri
- Sinyalizasyon gerilim grafikler

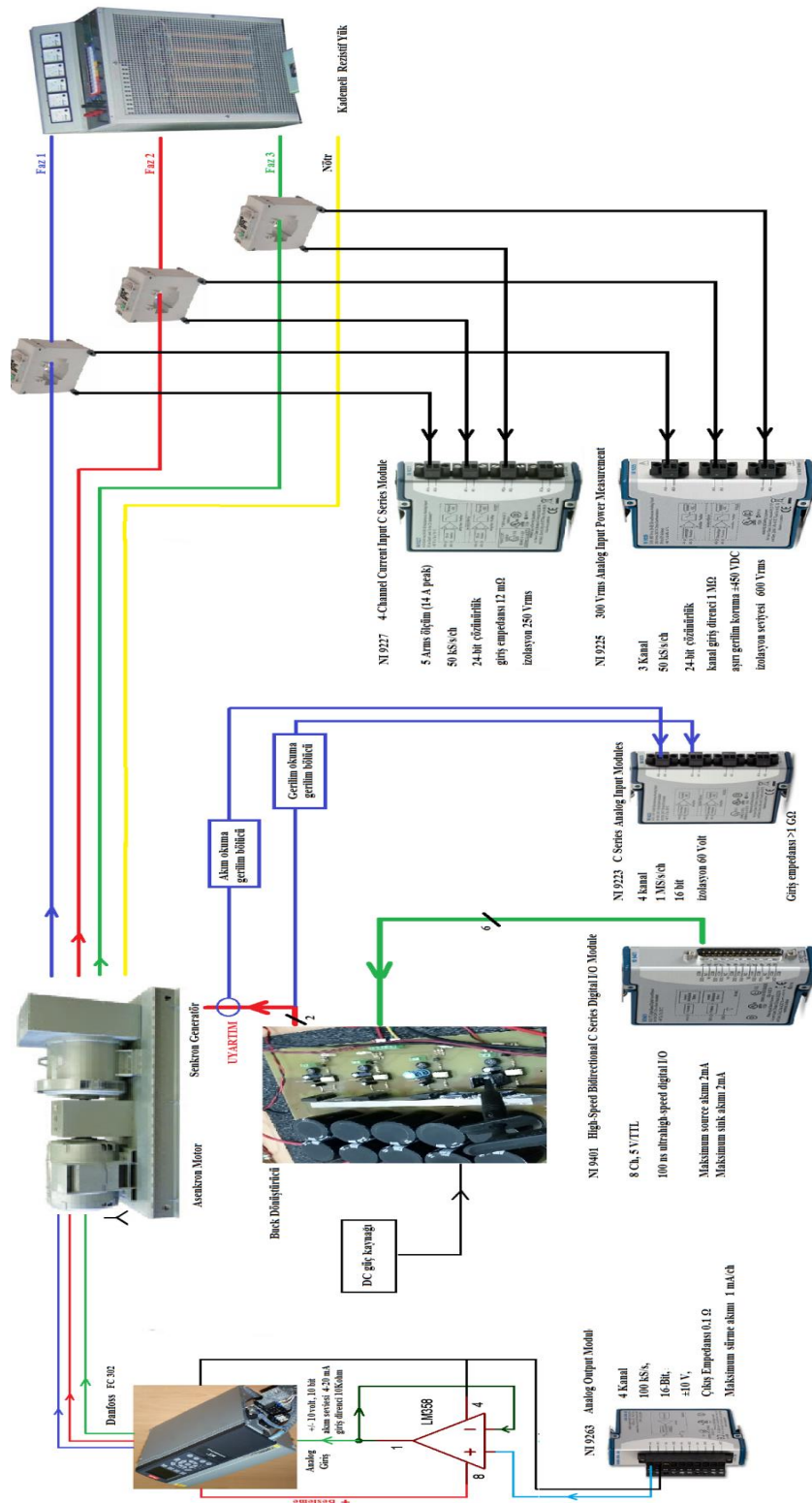
Uyartım sisteminden:

- Uyartım gerilimi ve akımı değerleri

EK-2. IEC 61000-4-30 standardı

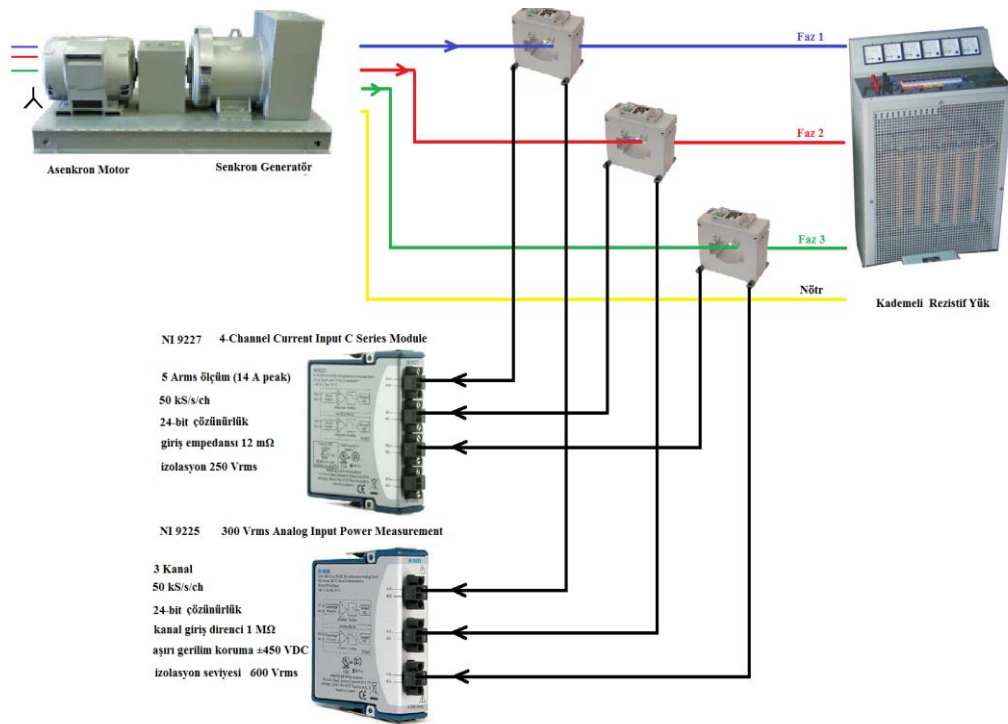
IEC 61000-4-30 standardı, güç kalitesi ölçüm metotları için geliştirilmiştir. 50 Hz ve 60 Hz frekansları için AC güç sistemlerinde, güç kalitesi parametrelerinin ölçümü ve sonuçların yorumlanması için metotları tanımlar. Bu standardın kapsamına giren her bir parametre için ölçümlerin A ve S olmak üzere iki sınıfı vardır (İnternet: National Instruments). Sınıf A, sözleşmeli uygulamalardaki anlaşmazlıkların çözümünde ve standartlar ile uyumu doğrulamak gibi hassas ölçümlerin gerekli olduğu yerlerde kullanılır. Sınıf A gerekliliklerine uygun farklı iki cihaz ile aynı sinyal üzerinde yürütülen herhangi bir parametrenin ölçümleri, bu parametre için belirli bir belirsizlik içinde eşleşen sonuçlar üretir. S sınıfı, muhtemelen parametrelerin kısıtlı bir alt kümesi ile birlikte araştırmalar veya güç kalitesi değerlendirmesi gibi istatistik uygulamalar için kullanılır. A sınıfı ile eşdeğer ölçüm aralıklarını kullanmasına rağmen, S sınıfı işlem gereksinimleri daha düşüktür. Bazı araştırmalar, bir şebeke üzerinde birden fazla ölçüm yerinin güç kalitesi parametrelerini değerlendirebilir. Diğer araştırmalar, bir süre boyunca tek bir yerin veya bir bina içerisindeki lokasyonlarda ya da hatta bir ekipman tek büyük bir parçası içinde güç kalitesi parametrelerini değerlendirir. IEC 61000-4-30 kapsamındaki parametrelerin bir kısmını veya tamamını ölçen bir alet için tüm parametrelerin ölçümünde aynı sınıfın kullanılması tercih edilir (İnternet: National Instruments).

EK-3. Senkron generatör güç denetim sistemin ayrıntılı bağlantıları

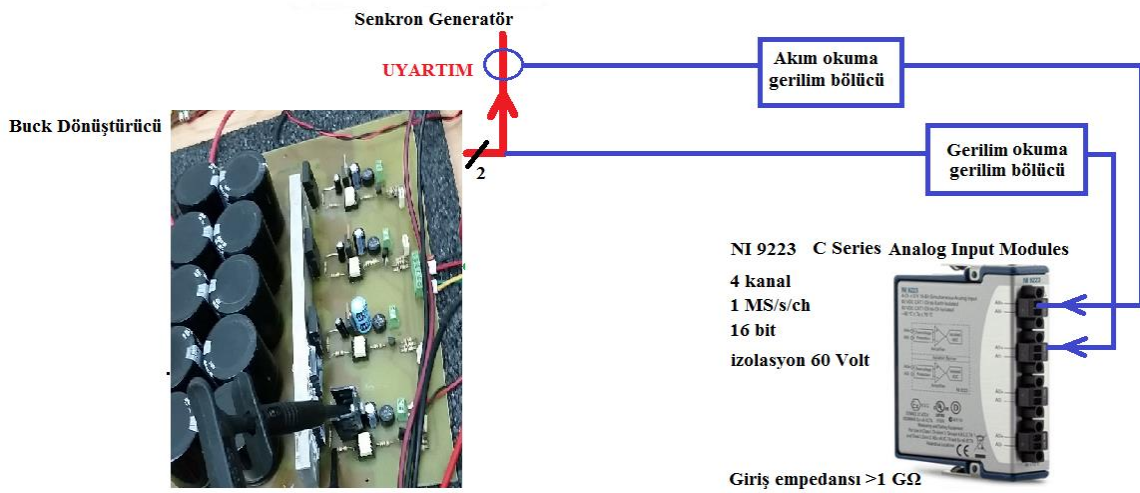


Şekil 3.1. Sistem üzerindeki NI C-modüllerinin ayrıntılı bağlantıları

EK-3. (devam) Senkron generator güç denetiminin düzeneği ayrıntılı bağlantıları

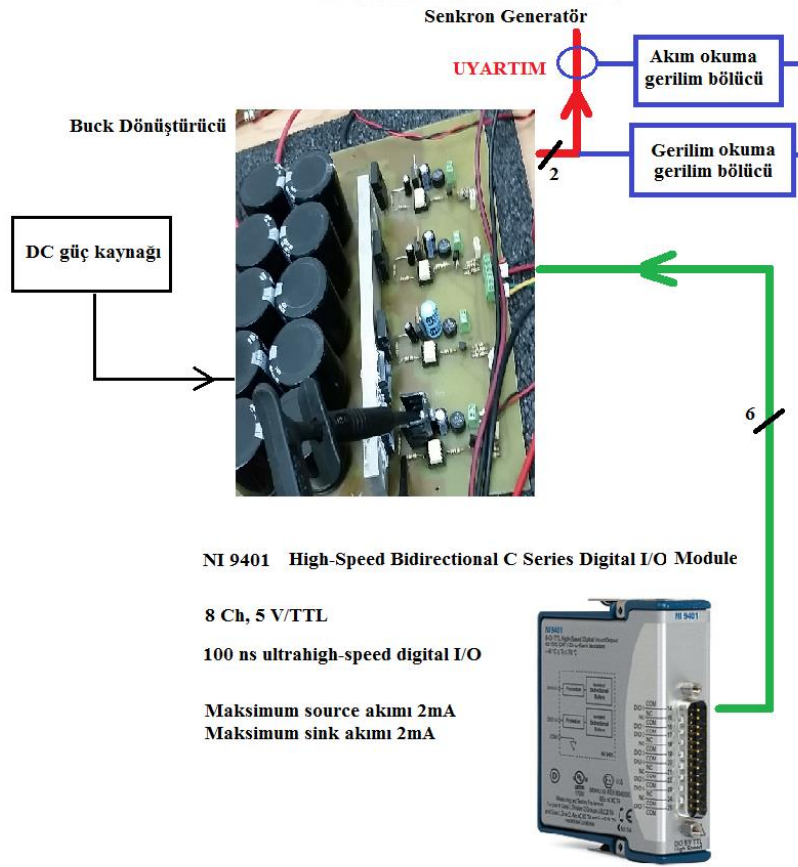


Şekil 3.2. NI 9225 ve NI 9227 analog giriş modüllerinin ayrıntılı bağlantıları

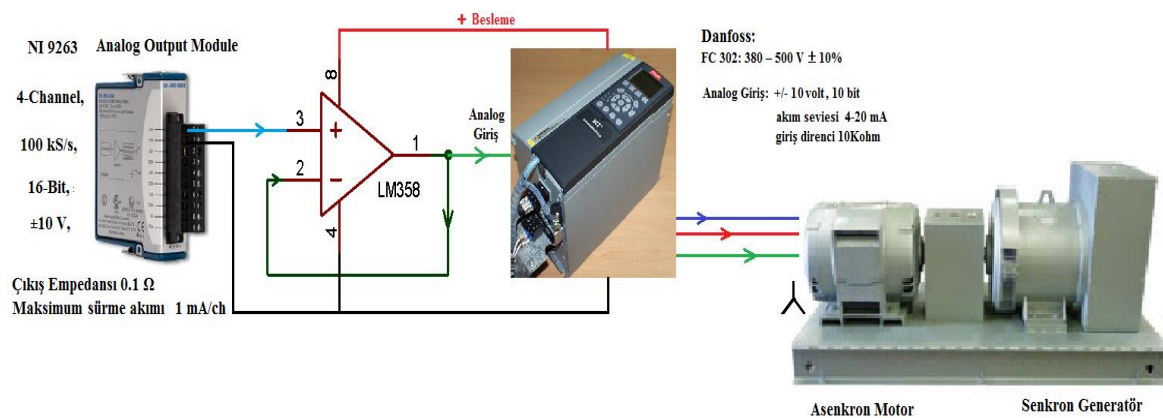


Şekil 3.3. NI 9223 analog giriş modülünün ayrıntılı bağlantısı

EK-3. (devam) Senkron generator güç denetiminin düzeneği ayrıntılı bağlantıları



Şekil 3.4. NI 9401 yüksek hızlı sayısal G/Ç modülünün ayrıntılı bağlantısı

Şekil 3.5. NI 9263 ± 10 volt analog çıkış modülünün ayrıntılı bağlantısı

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAYRAM, Mustafa Baha
 Uyuğu : TC
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1978, Çorum
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (312) 318 90 97
 Cep Telefonu : 0 (505) 778 42 82
 e-mail : bahabayram@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Elektrik Eğitimi	Devam Ediyor
Yüksek lisans	Marmara Üniversitesi / Elektronik ve Telekomünikasyon	2007
Lisans	Marmara Üniversitesi / Elektronik ve Telekomünikasyon Öğretmenliği	2003
Lise	Keçiören Endüstri Meslek Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-Halen	Milli Eğitim Bakanlığı	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Bayram, M. B., Sefa, I., Balci, S. (2016). *An Interleaved Buck Converter For Excitation System Of Synchronous Generators*. ECRES–4th European Conference on Renewable Energy Systems, ID387.

Bayram, M. B., Sefa, I., Balci, S. (In press). A Static Exciter with Interleaved Buck Converter for Synchronous Generators, *International Journal of Hydrogen Energy*,

Bayram, M. B., Bülbül, H. İ., Can, C., Bayındır, R. (2013). *Matlab/GUI Based Basic Design Principles of PID Controller in AVR*. IEEE- Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 1017-1022.

Bayram, M. B., Akar, A. (2007, 5-9 December). *Design Of 10 Gigabit Pmd Sublayer By Optsim Virtual Instrument*. 5th International Conference On Electrical And Electronics Engineering (ELECO), 121.

Bayram, M. B., Akar, A. (2007, 20-22 Haziran). *Çok Modlu Fiber Optik Sistemler için Gigabit Ethernet PMD Altkatmanı Tasarımının OPTSIM ile Gerçekleştirilmesi*. Ulusal Teknik Eğitim, Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu (UMES 2007), ID036.

Balci, S., Sefa, I., and Bayram, M.B. (2014). *Core Material Investigation of Medium Frequency Power Transformers*. IEEE-16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 861-866.

Sefa, I., Balci, S., and Bayram, M.B. (2014). *A Comparative Study of Nanocrystalline and SiFe Core Materials for Medium-Frequency Transformers*. IEEE International Conference–6th Edition, Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 43-48.

Hobiler

Yüzmek, balık tutmak, kitap okumak, sinema izlemek ve müzik dinlemek

DİZİN

A

AA uyarım · 59
 ABSTRACT · v
 AGC · 20
 ana tahrik sistemi · 19
 anahtarlama açısı · 107
 anma frekans değeri · 19
 anma gerilim değeri · 19
 Ansys-Maxwell · 6
 AVR · 2, 20, 29, 32, 35
 azaltan dönüştürücü · 5, 102

B

bilezik · 7

C

Çalışma frekansı · 18
 cDAQ · 75
 CompactDAQ · 3, 75

D

DA uyarım · 57
 Danışman · 3
 DAQ · 3, 71
 döner alan hızı · 9

F

Faraday kanunu · 10
 Faz kaymalı azaltan dönüştürücü
 · 106
 fırça · 7
 frekans regülasyonu · 16

G

Generatör Kontrol Döngüleri · 20
 Gerilim dalga formu · 13
 gerilim regülasyonunu · 15

Güç katsayısı · 14

H

Harmonik · 11
 hız regülasyonu · 27

K

Kapasite eğrisi · 44
 kesirli adım · 12
 Key Words · v
 kısa devre çubukları · 13

L

LabVIEW · 4, 71, 79, 87, 98, 110
 Lenz kanunu · 10
 LFC · 20
 LOE · 47, 114

M

mekanik hız · 9
 MVR · 32

N

Negatif bileşenli harmonik · 12
 NI DAQ asistanı · 85
 NI DAQmx · 80
 NI MAX · 84

O

OEL · 45, 47, 113
 ÖZET · iv

P

PID · 3, 36
 Pozitif bileşenli harmonik · 12
 prime mover · 19

PSS · 30
 PWM · 100

R

reaktif güç · 18
 reaktif güç kontrolü · 19
 rotor · 7

S

SCL · 50, 115
 senkron motor · 18
 Sıfır bileşenli harmonik · 12
 Simplorer · 6
 soğutma · 7
 sonlu elemanlar analizi · 5
 ST uyarım · 5
 Statik uyarım · 2, 63
 Stator · 7

T

tam adım · 12
 TDMS · 101
 terminal gerilimi · 15, 18
 THD · 103

U

UEL · 47, 48, 114
 uyarım akımı · 18
 uyarım kontrol sistemi · 28
 Uyarım sistemi · 28

V

Veri kaydı · 100
 Volt/Hertz sınırlandırıcı · 53

Y

yıldız bağlantı · 13



GAZİ GELECEKTİR..