



**İKİ FARKLI DAĞITIM TRANSFORMATÖRÜN SONLU ELEMANLAR  
YÖNTEMİ İLE MANYETİK ALAN VE TERMAL ANALİZİ**

**Husnul Amalia ARIANI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2021**



## 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.

Husnul Amalia ARIANI  
22/02/2021

# İKİ FARKLI DAĞITIM TRANSFORMATÖRÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MANYETİK ALAN VE TERMAL ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Husnul Amalia ARIANI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2021

## ÖZET

Solar enerjisinin gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla beraber daha karmaşık güç dağıtım sistemine ve daha fazla güç elektronik araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar daha fazla harmonik bileşenlerin üretilmesine neden olmaktadır. Güç sistem harmoniklerinin, dağıtım transformatörünün verimini ve faydalı ömrünü olumsuz olarak etkilediği görülmektedir. Bu tez çalışması, Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı bilgisayar destekli gelişmiş benzetim programı yardımıyla üç faz 250 kVA ve 160 kVA dağıtım transformatörünün teorik hesaplamalarını ispatlamıştır. Manyetik alan davranışları, boşa ve yükte çalışmasında kayıp sonuçları incelenmiştir. Bu yüksek lisans tezi, analiz parametrelerinin tanımlanması ve sonuçların elde edilmesi ile ilgili detaylı açıklamalar sunmuştur. Ayrıca, manyetik alan büyüklüğü ve transformatörün toplam kaybını elde etmek için hesaplama yöntemleri tezin içerisine dâhil edilmiştir. Tezin beşinci bölümünde, Kararlı- Rejim Isı İletimi ile kayıpların sonucunda transformatörün üzerinde meydana gelen ısınmalar incelenmiş ve IEEE C57.96-1999 standardına göre transformatörün faydalı ömrü tahmin edilmiştir. Fotovoltaik sisteme bağlanan transformatörün faydalı ömrü, normal çalışma durumuna göre %31 kadar azalması beklenmiştir. Analizin doğruluğu ve güvenilirliği teorik hesaplama sonuçlarıyla ispat edilmiştir. Bu çalışma sonuçları, daha fazla kayıp ve ısınma üretilerek fotovoltaik sistemin dağıtım transformatörünü olumsuz olarak etkilediğini göstermektedir.

Bilim Kodu : 90514

Anahtar Kelimeler : Transformatör, sonlu elemanlar yöntemi, SEY, manyetik alan, termal analizi

Sayfa Adedi : 118

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KARAKAYA

2. Danışman : Prof. Dr. İres İSKENDER

# MAGNETIC FIELDS AND THERMAL ANALYSIS OF TWO DIFFERENT DISTRIBUTION TRANSFORMERS USING FINITE ELEMENT METHODS

(M. SC. Thesis)

Husnul Amalia ARIANI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2021

## ABSTRACT

With the developments and the growth of solar energy, demands for a more complex power distribution system and more power electronic devices need to be used in the system are raising. These cause more harmonic components to be generated. It is observed that power system harmonics negatively affect the efficiency and the useful life of a distribution transformer. This thesis verify the theoretical calculations of a three-phase 250kVA and 160 kVA distribution transformer using an computer based-advanced simulation program that runs based on finite elements method (FEM), by analyzing its magnetic field behaviors and losses under no-load and full-load working conditions. This thesis presents detailed explanations on defining the parameters and obtaining the results, and also the calculation method for determining the magnitude of the magnetic field and the total losses of the transformer. In chapter 5 of the thesis, the temperature rise on the transformer is examined using steady-state thermal analysis and the useful life of the transformer is estimated based on the IEEE C57.96-1999 standard. The useful life of a transformer connected to the photovoltaic system is expected to decreases by 31% compared to its normal working conditions. The accuracy and the reliability of the analysis are confirmed by theoretical calculation results. These analysis results showed that the photovoltaic system affects the distribution transformer negatively by producing higher losses and heat.

Science Code : 90514  
Key Words : Transformer, finite element method, FEM, magnetic field,  
thermal analysis  
Page Number : 118  
Supervisor : Asst. Prof. Mehmet KARAKAYA  
Co Supervisor : Prof. Dr. İres ISKENDER

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca beni yönlendiren, her türlü desteğini benden esirgemeyen, çok kıymetli danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. İres ISKENDER ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KARAKAYA'ya yürekten teşekkür ederim. Hayatımın her alanında bana büyük sabırla destek olan ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli aileme ve arkadaşlarıma, pandemi döneminde tez çalışmalarına devam edebilmeme yardım eden Sayın Öğr. Gör. Emine TÜRKYILMAZ'a ve Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği tüm hocalarıma teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca, Türkiye'deki eğitimim boyunca bana maddi ve manevi destek sağlayan Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar'a sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                       | Sayfa |
|-------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                            | iv    |
| ABSTRACT.....                                         | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                         | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                     | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                             | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                               | xi    |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                              | xii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                          | xix   |
| 1. GİRİŞ.....                                         | 1     |
| 2. TRANSFORMATÖR.....                                 | 5     |
| 2.1. Kısa Tarihçesi.....                              | 5     |
| 2.2. Temel Kavramları .....                           | 6     |
| 2.2.1. Çalışma prensibi.....                          | 7     |
| 2.2.2. İdeal bir transformatör.....                   | 8     |
| 2.2.3. İdeal olmayan bir transformatör .....          | 9     |
| 2.3. Transformatörde Meydana Gelen Kayıplar.....      | 13    |
| 2.3.1. Boşta çalışmada oluşan kayıplar .....          | 13    |
| 2.3.2. Yükte çalışmada oluşan kayıplar .....          | 15    |
| 2.4. Dağıtım Transformatörünün Önemli Parçaları ..... | 16    |
| 2.4.1. Manyetik nüve.....                             | 17    |
| 2.4.2. Transformatörün sargıları.....                 | 19    |
| 2.4.3. Soğutma ortamı .....                           | 21    |
| 3. FOTOVOLTAİK SİSTME ( <i>PV SYSTEM</i> ).....       | 23    |

|                                                                                | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.1. Fotovoltaik Eviriciler (İnvertör).....                                    | 23           |
| 3.2. Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) .....                                    | 26           |
| 3.2.1. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu.....                              | 26           |
| 3.3. Alçak Geçiren Süzgeçler (Filtreler) .....                                 | 28           |
| 3.3.1. L filtresi .....                                                        | 30           |
| 3.3.2. LC filtresi .....                                                       | 30           |
| 3.3.3. LCL filtresi.....                                                       | 31           |
| 3.3.4. LLCL filtresi .....                                                     | 32           |
| 4. TRANSFORMATÖR ANALİZİNDE SAYISAL YÖNTEMLER .....                            | 33           |
| 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....                                             | 33           |
| 4.2. Transformatörün Benzetim Çalışması.....                                   | 34           |
| 4.2.1. Sınır koşulları ( <i>Boundary conditions</i> ) .....                    | 36           |
| 4.2.2. Transformatörün modellenmesi.....                                       | 37           |
| 4.2.3. Analiz sonuçları.....                                                   | 48           |
| 4.2.4. Kayıp hesaplamaları .....                                               | 66           |
| 5. DAĞITIM TRANSFORMATÖRÜNÜN ÜZERİNDE<br>FOTOVOLTAİK PANELLERİN ETKİLERİ ..... | 71           |
| 5.1. Fotovoltaik Sistemin Tasarımı .....                                       | 71           |
| 5.1.1. DC gerilim kaynağı ve SMPWM'li üç faz evirici.....                      | 71           |
| 5.1.2. LCL çıkış filtresi.....                                                 | 73           |
| 5.2. Fotovoltaik Sistemin Tasarımı .....                                       | 79           |
| 5.2.1. AC girişli analiz sonuçları.....                                        | 80           |
| 5.2.2. DC girişli analiz sonuçları.....                                        | 90           |
| 5.3. Transformatörün Termal Analizi .....                                      | 96           |
| 5.4. Sıcaklık Sonuçları .....                                                  | 103          |

**Sayfa**

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5. Fotovoltaik Sistemine Bağlanan Transformatörün Faydalı Ömür Tahmini..... | 106 |
| 6. SONUÇ .....                                                                | 108 |
| KAYNAKLAR .....                                                               | 111 |
| EKLER.....                                                                    | 115 |
| EK-1. Boşta çalışma durumunda transformatörün bağlantı şekli.....             | 116 |
| EK-2. Yükte çalışma durumunda transformatörün bağlantı şekli .....            | 117 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                | 118 |



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                              | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 1.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç payları (MW) .....                                                                        | 1     |
| Çizelge 2.1. Sık kullanılan CRGO tip manyetik nüve sınıf örnekleri.....                                                                              | 17    |
| Çizelge 3.1. 180° ve 120° iletimde eviricilerin gerilimleri .....                                                                                    | 26    |
| Çizelge 4.1. 250 kVA transformatörün parametreleri.....                                                                                              | 37    |
| Çizelge 4.2. 250 kVA transformatörün teknik bilgileri .....                                                                                          | 39    |
| Çizelge 4.3. Nüve saç bilgileri .....                                                                                                                | 40    |
| Çizelge 4.4. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları .....                                                                        | 65    |
| Çizelge 4.5. Boşta ve tam yükte çalışma durumundaki kayıp sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları .....                                  | 70    |
| Çizelge 5.1. LCL filtre tasarımı için gerekli parametreler .....                                                                                     | 75    |
| Çizelge 5.2. LCL filtresi için hesaplanan parametreler .....                                                                                         | 77    |
| Çizelge 5.3. Fotovoltaik sistemine bağlanan transformatörün parametreleri .....                                                                      | 79    |
| Çizelge 5.4. 160 kVA kuru-tip transformatörün analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları.....                                        | 88    |
| Çizelge 5.5. 160 kVA kuru-tip transformatörün tam yükte çalışma durumundaki kayıp sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları .....          | 90    |
| Çizelge 5.6. 160 kVA kuru-tip transformatörün DC girişli analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....                                                  | 95    |
| Çizelge 5.7. 160 kVA kuru-tip transformatörün DC girişli tam yükte çalışma durumundaki kayıp sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları ... | 96    |
| Çizelge 5.8. Transformatörde kullanılan malzemelerin özellikleri.....                                                                                | 99    |
| Çizelge 5.9. Üretilen mesh ile ilgili bilgiler .....                                                                                                 | 100   |
| Çizelge 5.10. AC ve DC girişli termal analiz sonuçlarının karşılaştırılması .....                                                                    | 104   |



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                           | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık büyüme yüzde oranları..... | 1     |
| Şekil 4.1. Transformatörde oluşan kayıplar .....                                | 66    |
| Şekil 4.2. Transformatörde oluşan stray (kaçak) kayıplar .....                  | 66    |
| Şekil 5.1. Üç fazlı evirici sistem tasarımının blok şeması .....                | 71    |
| Şekil 5.2. LCL filtresi tasarım aşamalarının akış diyagramı .....               | 74    |



## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                           | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 2.1. Faraday'ın keşfettiği ilk transformatör (Kaynak: MIT Burndy Library) .....                                           | 5     |
| Resim 2.2. 1885 yılında Great Barrington, Massachusetts'teki ilk AC güç istasyonunda kullanılan Stanley'in transformatörü ..... | 6     |
| Resim 2.3. Bir fazlı transformatörün manyetik akı çizgileri.....                                                                | 7     |
| Resim 2.4. İdeal bir transformatörün eşdeğer devresi .....                                                                      | 9     |
| Resim 2.5. Sarımlarda kaçak akıların oluşumu.....                                                                               | 9     |
| Resim 2.6. Geçek bir transformatörün modeli .....                                                                               | 10    |
| Resim 2.7. Transformatörün manyetik eşdeğer devresi .....                                                                       | 11    |
| Resim 2.8. Transformatör elektrik eşdeğer devresi .....                                                                         | 12    |
| Resim 2.9. Transformatörün T-eşdeğer devresi (eski sekonder değerler) .....                                                     | 13    |
| Resim 2.10. Transformatörün T-eşdeğer devresi (yeni sekonder değerler).....                                                     | 13    |
| Resim 2.11. Yağlı tip transformatörün parçaları .....                                                                           | 16    |
| Resim 2.12. Trafo tipleri (a) Tek faz çekirdek tipi (b) Üç faz çekirdek tipi .....                                              | 18    |
| Resim 2.13. Trafo tipleri (c) Tez faz mantel tipi (d) Üç faz mantel tipi .....                                                  | 19    |
| Resim 2.14. Üç adet bir fazlı transformatörün (a) üst üste konmuş durum ve (b) yan yana konmuş durum .....                      | 19    |
| Resim 2.15. Silindirik tip sargı .....                                                                                          | 20    |
| Resim 2.16. Silindirik sargı kesiti.....                                                                                        | 20    |
| Resim 2.17. Dilimli tip sargı .....                                                                                             | 21    |
| Resim 2.18. Dilimli sargı kesiti .....                                                                                          | 21    |
| Resim 2.19. a) ONAN tip ve b) ONAF tip transformatör .....                                                                      | 22    |
| Resim 3.1. Kapasitöre paralel bağlı gerilim kaynaklı evirici (VSI) .....                                                        | 24    |
| Resim 3.2. İndüktöre seri bağlı akım kaynaklı evirici (CSI) .....                                                               | 24    |
| Resim 3.3. Üç fazlı kare dalga invertör/evirici .....                                                                           | 25    |

| <b>Resim</b>                                                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 3.4. a) 180° ve b) 120° iletimde invertör/evirici.....                                                     | 25           |
| Resim 3.5. Üç faz sinuzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM) .....                                             | 27           |
| Resim 3.6. Fourier seri açılımına ilişkin eşdeğer devresi .....                                                  | 28           |
| Resim 3.7. Basit filtrelerin topolojisi; a) L filtresi, b) LC filesi, c) LCL filtresi,<br>d) LCLL filtresi ..... | 29           |
| Resim 3.8. L filtresi.....                                                                                       | 30           |
| Resim 3.9. LC filtresi.....                                                                                      | 30           |
| Resim 3.10. LCL filtresi .....                                                                                   | 31           |
| Resim 3.11. LLCL filtresi.....                                                                                   | 31           |
| Resim 4.1. Üç boyut transformatörün üstten görünümü .....                                                        | 35           |
| Resim 4.2. Farklı açılardan; a) yandan b) önden üç boyut transformatör tasarımı.....                             | 36           |
| Resim 4.3. Çözüm tipi seçenekleri .....                                                                          | 39           |
| Resim 4.4. Nüve kesiti.....                                                                                      | 40           |
| Resim 4.5. Üç faz üç bacaklı transformatörün nüve ve sargı modeli .....                                          | 40           |
| Resim 4.6. B-H eğrisi .....                                                                                      | 41           |
| Resim 4.7. B-P eğrisi .....                                                                                      | 42           |
| Resim 4.8. Demir kaybı hesaplamak için ayarları .....                                                            | 42           |
| Resim 4.9. Sarım sayısı belirlenmesi.....                                                                        | 43           |
| Resim 4.10. Benzetim bölgesi tanımlanması .....                                                                  | 44           |
| Resim 4.11. Devre çizimi ve sargı bağlantıları.....                                                              | 45           |
| Resim 4.12. Exponansiyel uygulanmadan önce tek faz transformatörün primer<br>akımı.....                          | 45           |
| Resim 4.13. Exponansiyel uygulandıktan sonra tek faz transformatörün primer<br>akımı.....                        | 45           |
| Resim 4.14. Maxwell - Twin Builder bağlantı kurulumu .....                                                       | 46           |
| Resim 4.15. Benzetim süresi ve örnekleme zamanı belirlenmesi.....                                                | 47           |

| <b>Resim</b>                                                                                                                                  | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 4.16. Alan hesaplamaları a) 0 ms'den ve b) 200 ms'den kaydedilmesi.....                                                                 | 47           |
| Resim 4.17. Üç boyutta transformatör modelinin mesh dağılımı.....                                                                             | 48           |
| Resim 4.18. Benzetim sonucunda üretilen eleman ve mesh sayısı.....                                                                            | 48           |
| Resim 4.19. Boşta çalışma durumunda transformatörün bağlantı şekli .....                                                                      | 49           |
| Resim 4.20. Transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu.....                                                              | 49           |
| Resim 4.21. Transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu<br>(yakından gösterim).....                                       | 50           |
| Resim 4.22. Primer sargının faz geriliminin dalga formu .....                                                                                 | 50           |
| Resim 4.23. Primer sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim) .....                                                             | 51           |
| Resim 4.24. Sekonder sargının faz geriliminin dalga formu .....                                                                               | 51           |
| Resim 4.25. Sekonder sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....                                                            | 51           |
| Resim 4.26. Sekonder sargının hat geriliminin dalga formu .....                                                                               | 52           |
| Resim 4.27. Sekonder sargının hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....                                                            | 52           |
| Resim 4.28. Boşta çalışma durumunda primer akımın dalga formu .....                                                                           | 53           |
| Resim 4.29. Boşta çalışma durumunda primer akımın dalga formu (yakından<br>gösterim) .....                                                    | 53           |
| Resim 4.30. Boşta çalışma durumunda sekonder akımın dalga formu .....                                                                         | 54           |
| Resim 4.31. Manyetik akı hesaplaması için kullanılan hesap makinesinin pencere<br>gösterimi.....                                              | 54           |
| Resim 4.32. Otomatik hesaplama sonucunda nüve kesit alanı .....                                                                               | 55           |
| Resim 4.33. Otomatik hesaplama sonucunda nüvenin hacmi.....                                                                                   | 55           |
| Resim 4.34. Üretilen manyetik akının dalga formu.....                                                                                         | 56           |
| Resim 4.35. Üretilen manyetik akı yoğunluğunun dalga formu .....                                                                              | 57           |
| Resim 4.36. Transformatörün boşta çalışma durumunda 92 ms'deki manyetik akı<br>dağılımı a) yandan gösterim b) önden gösterim .....            | 57           |
| Resim 4.37. Transformatörün boşta çalışma durumunda 92 ms'deki manyetik akının<br>a) yandan vektörel gösterim b) önden vektörel gösterim..... | 58           |

| <b>Resim</b>                                                                                                                              | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 4.38. Yükte çalışma durumunda transformatörün bağlantı şekli .....                                                                  | 59           |
| Resim 4.39. Tam yükte çalışmasında transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu.....                                   | 59           |
| Resim 4.40. Tam yükte çalışmasında transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu (yakından gösterim) .....              | 59           |
| Resim 4.41. Tam yükte çalışmasında primer sargının faz geriliminin dalga formu.....                                                       | 60           |
| Resim 4.42. Tam yükte çalışmasında primer sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....                                   | 60           |
| Resim 4.43. Tam yükte çalışmasında sekonder sargının faz geriliminin dalga formu...                                                       | 61           |
| Resim 4.44. Tam yükte çalışmasında sekonder sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....                                 | 61           |
| Resim 4.45. Tam yükte çalışmasında sekonder sargının hat geriliminin dalga formu...                                                       | 61           |
| Resim 4.46. Tam yükte çalışmasında sekonder sargının hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....                                 | 62           |
| Resim 4.47. Tam yükteki primer faz akımın dalga formu .....                                                                               | 62           |
| Resim 4.48. Tam yükteki primer faz akımın dalga formu (yakından gösterim).....                                                            | 63           |
| Resim 4.49. Tam yük çalışma durumunda primer hat akımın dalga formu.....                                                                  | 63           |
| Resim 4.50. Tam yük çalışma durumunda primer hat akımın dalga formu (yakından gösterim) .....                                             | 63           |
| Resim 4.51. Tam yük çalışma durumunda sekonder faz akımın dalga formu.....                                                                | 64           |
| Resim 4.52. Tam yük çalışma durumunda sekonder faz akımın dalga formu (yakından gösterim).....                                            | 64           |
| Resim 4.53. Tam yük çalışma durumunda sekonder hat akımın dalga formu .....                                                               | 64           |
| Resim 4.54. Tam yük çalışma durumunda sekonder hat akımın dalga formu (yakından gösterim).....                                            | 65           |
| Resim 4.55. Analiz sonucunda elde edilen Demir kaybı, Histerezis kaybı ve Eddy akım kaybının ortamala değerleri.....                      | 67           |
| Resim 4.56. Analiz sonucunda elde edilen Demir kaybı, Histerezis kaybı ve Eddy akım kaybının ortamala değerleri (yakından gösterim) ..... | 67           |

| <b>Resim</b>                                                                                                                | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 4.57. Transformatörün tam yük çalışmasında elde edilen kayıplar .....                                                 | 69           |
| Resim 4.58. Yüksek ve alçak gerilimin her faz için omik kaybı .....                                                         | 69           |
| Resim 5.1. Girişteki DC gerilim kaynağı .....                                                                               | 72           |
| Resim 5.2. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM) tasarımı .....                                                      | 72           |
| Resim 5.3. Benzetim çalışmasının sonucunda eviricinin çıkış gerilimi .....                                                  | 73           |
| Resim 5.4. LCL fitresi topolojisi ve oluşturan elemanları .....                                                             | 73           |
| Resim 5.5. Tasarlanan LCL filtresi.....                                                                                     | 77           |
| Resim 5.6. Eviricinin ve filtrenin tasarımı .....                                                                           | 78           |
| Resim 5.7. Filtrenin çıkış gerilimi .....                                                                                   | 78           |
| Resim 5.8. Filtrenin çıkış gerilimi (yakından gösterim).....                                                                | 78           |
| Resim 5.9. AC gerilimin dalga formu .....                                                                                   | 79           |
| Resim 5.10. Filtrenin çıkışında gerilimin dalga formu.....                                                                  | 79           |
| Resim 5.11. AC girişli analizinde transformatörün bağlantı şekli.....                                                       | 81           |
| Resim 5.12. AC girişli analizinde transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu.....                      | 81           |
| Resim 5.13. AC girişli analizinde transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu (yakından gösterim) ..... | 82           |
| Resim 5.14. AC girişli analizinde primer sargının hat geriliminin dalga formu .....                                         | 82           |
| Resim 5.15. AC girişli analizinde primer sargının hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....                      | 82           |
| Resim 5.16. AC girişli analizinde primer sargının faz geriliminin dalga formu .....                                         | 83           |
| Resim 5.17. AC girişli analizinde primer sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....                      | 83           |
| Resim 5.18. AC girişli analizinde sekonder sargının faz geriliminin dalga formu .....                                       | 83           |
| Resim 5.19. AC girişli analizinde sekonder sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....                    | 84           |
| Resim 5.20. AC girişli analizinde sekonder sargının hat geriliminin dalga formu .....                                       | 84           |

| <b>Resim</b>                                                                                             | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 5.21. AC girişli analizinde sekonder sargının hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim)..... | 85           |
| Resim 5.22. AC girişli analizinde primer hat akımının dalga formu.....                                   | 85           |
| Resim 5.23. AC girişli analizinde primer hat akımının dalga formu (yakından gösterim) .....              | 85           |
| Resim 5.24. AC girişli analizinde primer faz akımının dalga formu.....                                   | 86           |
| Resim 5.25. AC girişli analizinde primer faz akımının dalga formu (yakından gösterim) .....              | 86           |
| Resim 5.26. AC girişli analizinde sekonder hat akımının dalga formu.....                                 | 86           |
| Resim 5.27. AC girişli analizinde sekonder hat akımının dalga formu (yakından gösterim) .....            | 87           |
| Resim 5.28. AC girişli analizinde sekonder faz akımının dalga formu.....                                 | 87           |
| Resim 5.29. AC girişli analizinde sekonder faz akımının dalga formu (yakından gösterim) .....            | 87           |
| Resim 5.30. Alçak ve yüksek gerilimin her faz için Omik kaybı .....                                      | 89           |
| Resim 5.31. DC girişli analizi için çözüm süreci ve örnekleme zamanı .....                               | 90           |
| Resim 5.32. DC girişli analizinde transformatörün bağlantı şekli.....                                    | 91           |
| Resim 5.33. Fotovoltaik sisteminin devre tasarımı.....                                                   | 91           |
| Resim 5.34. DC girişli analizinde alçak tarafı faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim) .....     | 92           |
| Resim 5.35. DC girişli analizinde alçak tarafı hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim) .....     | 92           |
| Resim 5.36. DC girişli analizinde yüksek tarafı faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....     | 93           |
| Resim 5.37. DC girişli analizinde yüksek tarafı hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim).....     | 93           |
| Resim 5.38. DC girişli analizinde AG tarafı hat akımının dalga formu (yakından gösterim) .....           | 94           |
| Resim 5.39. DC girişli analizinde YG tarafı hat akımının dalga formu (yakından gösterim) .....           | 94           |

| <b>Resim</b>                                                                                            | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 5.40. DC girişli analizinde YG tarafı hat akımının üzerindeki dalgalanma (yakından gösterim)..... | 94           |
| Resim 5.41. Fotovoltaik sisteminde alçak ve yüksek gerilimin her faz için Omik kaybı .....              | 95           |
| Resim 5.42. Termal analizi için modüllerin tasarımı .....                                               | 98           |
| Resim 5.43. Yan bacaktaki oluşturulan mesh dağılımı .....                                               | 100          |
| Resim 5.44. Nüvenin köşesindeki oluşturulan mesh dağılımı .....                                         | 100          |
| Resim 5.45. AG ve YG sargılarındaki oluşturulan mesh dağılımı .....                                     | 101          |
| Resim 5.46. Uygulanan meshin özeti .....                                                                | 101          |
| Resim 5.47. Maxwell'den aktarılan ısı üretimi .....                                                     | 102          |
| Resim 5.48. Aktarılan kayıpların özeti .....                                                            | 102          |
| Resim 5.49. Varsayılan başlangıç sıcaklık .....                                                         | 103          |
| Resim 5.50. Sıcaklık dağılımı °C (celcius) cinsinde görüntülenmesi .....                                | 103          |
| Resim 5.51. AC gerilim kaynağına bağlanan transformatörün sıcaklık dağılımı .....                       | 105          |
| Resim 5.52. Fotovoltaik sistemine bağlanan transformatörün sıcaklık dağılımı .....                      | 105          |
| Resim 5.53. Naperian (doğal)-tabana göre faydalı ömür tahmininin eğrisi [54] .....                      | 107          |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler      | Açıklamalar                                                 |
|---------------|-------------------------------------------------------------|
| $\Phi_{\max}$ | Manyetik akı maksimum değeri (Wb)                           |
| $e$           | İndüklenen elektromotor kuvvet (Volt)                       |
| $N$           | Sargı sarım sayısı                                          |
| $B_{\max}$    | Manyetik akı yoğunluğu maksimum değeri (Wb/m <sup>2</sup> ) |
| $A$           | Nüve kesit alanı (m <sup>2</sup> )                          |
| $f$           | Frekans (Hz)                                                |
| $a$           | Transformatörün çevirme oranı                               |
| $\Phi_l$      | Kaçak akı                                                   |
| $\Phi_m$      | Nüvedeki ortak akı                                          |
| $L_{1,2}$     | Kaçak endüktans                                             |
| $L_M$         | Ortak endüktans                                             |
| $P_h$         | Histerezis kaybı (W/m <sup>3</sup> )                        |
| $K_h$         | Histerezis kayıp faktörü                                    |
| $n$           | Malzeme katsayısı, (demir = 1.5-2, ferrit = 2- 3)           |
| $P_e$         | Eddy akım kaybı (W)                                         |
| $K_c$         | Eddy akım kayıp faktörü                                     |
| $\sigma$      | İletkenlik (S/m)                                            |
| $\omega$      | Açısal frekans                                              |
| $d$           | İletkenin kalınlığı (m)                                     |
| $U_d$         | Girişteki DC kaynak gerilimi                                |
| $U_a$         | Faz-nötr gerilimi                                           |
| $U_{ab}$      | Faz arası gerilimi                                          |
| $m_a$         | Modülasyon genlik oranı                                     |
| $A_r$         | Referans/modülasyon dalgaının maksimum değeri               |
| $A_c$         | Taşıyıcı dalgaının maksimum değeri                          |
| $m_f$         | Modülasyon frekans oranı                                    |

**Simgeler****Açıklamalar**

|                  |                                               |
|------------------|-----------------------------------------------|
| $f_{sw}$         | Taşıyıcı frekans / anahtarlama frekans        |
| $f_o$            | Modülasyon frekansı, ana frekans              |
| $N$              | Sarım sayısı                                  |
| $R$              | Manyetik relüktans                            |
| $V$              | Nüve hacmi ( $m^3$ )                          |
| $L_i$            | Evirici tarafındaki endüktans                 |
| $L_g$            | Şebeke tarafındaki endüktans                  |
| $C_f$            | Filtrenin kondansatörü                        |
| $R_f$            | Seri bağlanan sönümleme direnci               |
| $V_i$            | Giriş gerilimi (evirici çıkış gerilimi)       |
| $V_g$            | Çıkış gerilimi (şebeke gerilimi)              |
| $t$              | Zaman (saat)                                  |
| $T$              | Hottest-spot mutlak sıcaklığı ( $^{\circ}K$ ) |
| $A_{10}, B_{10}$ | Faydalı ömür tahmininin katsayıları           |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|               |                                                |
|---------------|------------------------------------------------|
| <b>AC</b>     | Alternatif Akım ( <i>Alternative current</i> ) |
| <b>AG</b>     | Alçak Gerilim                                  |
| <b>ANSI</b>   | Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü          |
| <b>CRGO</b>   | <i>Cold Rolled Grain Oriented</i>              |
| <b>CSI</b>    | Akım Kaynaklı Eviriciler                       |
| <b>DC</b>     | Doğru Akım ( <i>Direct current</i> )           |
| <b>HST</b>    | En Sıcak-Nokta Sıcaklığı                       |
| <b>IEC</b>    | Uluslararası Elektroteknik Komisyonu           |
| <b>IEEE</b>   | Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü  |
| <b>IGBT</b>   | İzole Edilmiş Kapılı İki Kutuplu Transistör    |
| <b>KV</b>     | Kilo-Volt                                      |
| <b>KVA</b>    | Kilo-Volt-Ampere                               |
| <b>MOSFET</b> | Metal Oksit Alan Etkili Transistör             |

**Kısaltmalar****Açıklamalar****ms***Mili-second***MW**

Mega-Watt

**ONAN***Oil-Natural-Air-Natural***ONAF***Oil-Natural-Air-Fan***Prim**

Primer

**PV***Photovoltaics***Sek**

Sekonder

**SEY**

Sonlu Elemanlar Yöntemi

**SPWM**

Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

**STD**

Standart

**TEİAŞ**

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

**THD**

Toplam Harmonik Bozulma

**Top**

Toplam

**TOT**

Üst-Yağ Sıcaklığı

**Trafo**

Transformatör

**VSI**

Gerilim Kaynaklı Eviriciler

**YG**

Yüksek Gerilim



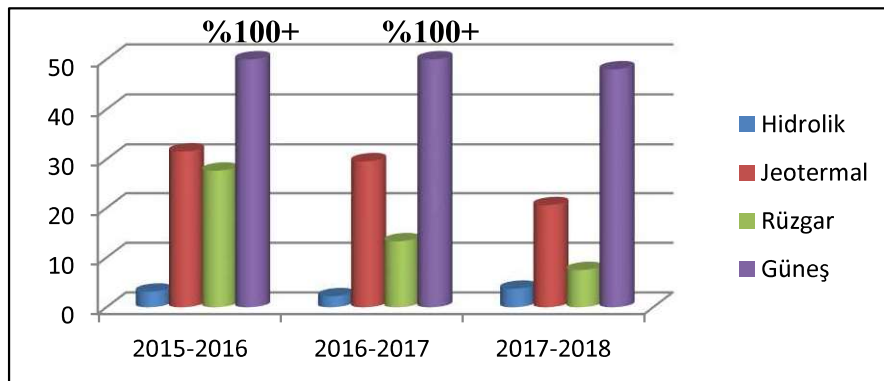
## 1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimi ve nüfusun artmasıyla birlikte, elektrik enerjisine gereksinimler gittikçe artmaktadır. Klasik enerji kaynakları hem sınırlı olduğundan hem de çevreye zarar verdiğinden dolayı günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının talebi daha yüksektir. Dünyada yenilenebilir enerji kaynakları, yıllık ortalama büyüme oranı %9,8 olmak üzere en hızlı büyüme oranına sahip enerji kaynaklarıdır [1]. Son 10 yılda Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç kapasitesi de ciddi bir şekilde artmıştır.

Türkiye’nin coğrafi konumu nedeniyle güneş enerjisinin potansiyeli oldukça yüksektir. TEİAŞ’ın yayınladığı verilere göre, 2017 yılında güneş enerjisinin toplam kurulu güç payı 3.421 MW olarak hesaplanırken, 2018 yılında %48 oranında 5.063 MW’a arttığı görülmektedir [2]. Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının arasında son yılda en fazla büyüme oranına sahip olan kaynaktır. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç payları ve yıllık büyüme yüzde oranları aşağıda verilmektedir.

Çizelge 1.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç payları (MW)

|      | Hidrolik | Jeotermal | Rüzgâr | Güneş |
|------|----------|-----------|--------|-------|
| 2015 | 25.868   | 624       | 4.503  | 249   |
| 2016 | 26.681   | 821       | 5.751  | 833   |
| 2017 | 27.273   | 1.064     | 6.516  | 3.421 |
| 2018 | 28.291   | 1.283     | 7.005  | 5.063 |



Şekil 1.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık büyüme yüzde oranları

Elektrik enerjisi doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Fotovoltaik sisteminde kullanılan güneş/solar paneller DC elektrik enerjisi üretmektedir. Fakat elektrik enerjisinin taşınmasında AC tercih edilmektedir. Bunun nedenlerinden biri, alternatif akımlı elektrik enerjisinin yüksek gerilimlerde elde edilebilmesidir. İletim hattının kesiti, kullanılan gerilimin karesine ters orantılı olarak değiştiğinden dolayı elektrik enerjisinin uzak mesafelere ekonomik olarak iletilebilmesi için yüksek gerilimlere ihtiyaç vardır. Transformatör denilen hareket etmeyen (statik) elektrik makinesi ile gerilimin yükseltilip düşürülebilmesi de alternatif akımlı elektrik enerjisinin tercih edilmesinin başka bir nedenidir.

Doğru akımdan (DC) alternatif akıma (AC) dönüştürebilmesi için invertör ya da başka isim ile evirici kullanılmaktadır. Eviriciler, elektrik dağıtım sisteminde voltaj distorsiyonu ve akım harmoniği sorunlarını oluşturmaktadır. Solar enerjisinin yaygınlaşmasıyla beraber, akıllı şebeke ve daha karmaşık güç dağıtım sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, kullanılacak olan yarı iletken ve güç elektronik araçları da artacaktır. Bunlarla birlikte daha fazla harmonik bileşen üretilmektedir. Solar paneli ve eviricisi, dağıtım transformatörlerine önemli bir etki göstermektedir. Güç sistem harmoniklerinin, dağıtım transformatörünün verimine ve faydalı ömrüne nasıl bir etki gösterdiği birçok bilimsel yayında bahsedilmektedir [3]. Dağıtım transformatörleri, solar panelleri ve eviricilerinin etkilerini direkt olarak görmektedir çünkü dağıtım transformatörleri lineer yük ile beslenmesi için tasarlanmaktadır. Harmonikli dalgalar, transformatörde daha fazla bakır ve demir kaybına neden olmaktadır [4]. Bu kayıplar, transformatörün tüm metal bölgelerinde sıcaklık artışına ve faydalı ömrünün kısılmasına yol açmaktadır [5].

Transformatörün üzerindeki güç sistem harmoniklerinin ve fotovoltaik panellerin etkilerini kapsayan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [3, 6-14]. Fotovoltaik sistemin dağıtım transformatörünü olumsuz olarak etkilediği ve fotovoltaik sistemde dağıtım transformatörünün kaybı daha yüksek olduğu birçok bilimsel yazıda belirtilmektedir. Ancak, dağıtım transformatörünün üzerinde doğrudan ve ayrıntılı olarak bir çalışma olmadığı görülmektedir. Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı'nın sunduğu tez merkezinde, transformatör analizinde Sonlu Elemanlar Yöntemi uygulanan sadece dört tez bulunmaktadır [15-18]. Ayrıca, daha önce Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak fotovoltaik sistemde dağıtım transformatörü ile ilgili hiçbir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle, bu tez çalışması enerji dağıtımına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının önemli amaçlarından biri, Sonlu Elemanlar Yöntemine dayanarak, solar eviriciden üretilen harmonikli dalgaların dağıtım transformatörünün üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Yağlı tip dağıtım transformatörünün boşa ve tam yükte çalışma durumunda manyetik akı yoğunluğu, akı dağılımı ve kayıp hesaplamaları yapılmaktadır. Hem deneysel çalışmalardan hem de formüllerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmanın diğer önemli amaçları, Kararlı- Rejim Isı İletimi (*Steady- State Thermal*) ile kayıpların sonucunda transformatörün nüvesinde meydana gelen ısınmanın incelenmesi ve transformatörün faydalı ömür tahmini gerçekleştirilmesidir.

Tezin ikinci bölümünde, transformatörün genel bilgileri, çalışma prensibi, transformatördeki boşa ve yükte çalışma durumunda oluşan kayıplar, transformatörün nüve, sargı ve soğutma tipleri ile ilgili açıklamalar yer almaktadır. İdeal ve ideal olmayan bir transformatörün teorik hesaplamaları da bu bölümde bulunmaktadır.

Tezin üçüncü bölümünde fotovoltaiik sistem üzerinde durulmaktadır. Fotovoltaiik sistemin evirici, darbe genişlik modülasyonu ve filtre gibi önemli elemanları ile ilgili genel bilgiler verilmektedir. Ayrıca, filtre tipleri ve birbirine göre avantaj ve dezavantajları sunulmaktadır.

Dördüncü bölümde, Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne dayalı bilgisayar destekli benzetim programı kullanılarak 250 kVA gücündeki dağıtım transformatörünün tasarımı, boşa ve yükte çalışma analizleri bulunmaktadır. Bu bölümde, transformatörün üzerindeki kayıplar, manyetik alan, manyetik akıları ve diğer elektromanyetik hesaplamalar yer almaktadır. Bütün elektromanyetik hesaplamaların dağılımı ve vektörel gösterimi 3 boyutlu olarak sunulmaktadır. Bu bölümde, normal koşulda benzetim çalışmasından elde edilen sonuçların doğruluğu kontrol edilmektedir.

Beşinci bölümde, fotovoltaiik sistemin tasarımı, dağıtım transformatörü üzerindeki fotovoltaiik panellerin etkileri ve dağıtım transformatörünün termal analizi yapılmaktadır. Bu bölümde, çıkış filtresinin tasarımı adım adım açıklanmaktadır.

Sonuç bölümünde ise yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar özetlenip ve karşılaştırılmaktadır.





## 2. TRANSFORMATÖR

### 2.1. Kısa Tarihçesi

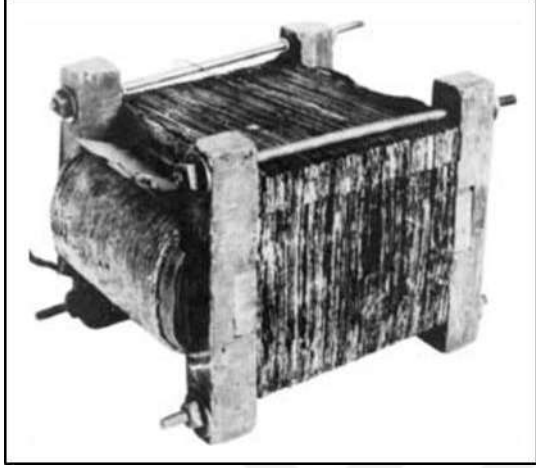
Michael Faraday'ın çalışması, elektrik ve manyetizma ilişkili olduğunu gösteren Danimarkalı fizikçi Hans Christian Oersted'dan başlamıştır. 1820 yılında Oersted, iletken malzemelerden geçen elektrik akımı, iletkenin etrafında manyetik alan oluşturduğunu göstermiştir. Elektrik akımı manyetik alanı oluşturabilir ise aynı mantık manyetik alan da elektrik akımı oluşturabileceği düşünülmüştür. 1831 yılında Faraday, iletken akımla manyetik alan için manyetik alan yüklenmiş olması gerektiğini keşfetmiştir. İlk deneylerde nüve, solid (katı) metal malzemesinden yapılmıştır fakat bu tip nüvelerde çok fazla Eddy akım kaybı oluşmasından dolayı nüveler demir tellerden yapılmıştır. Faraday'ın keşfettiği ilk transformatör Resim 2.1'de gösterilmektedir [19].



Resim 2.1. Faraday'ın keşfettiği ilk transformatör (Kaynak: MIT Burndy Library)

1882 yılında Lucien H. Gaulard ve John D. Gibbs, Faraday'ın transformatör kavramını geliştirerek transformatörün sekonder çıkışından akkor lambalar bağlamıştır. Gaulard ve Gibbs'in keşfettiği ve "İkincil Jeneratör" olarak adlandırılan bu sistem için patent elde etmişlerdir. Bu sistemin kusurları olsa da enerji iletiminin gelişmesine büyük katkı sağlamıştır. 1884 yılında Amerikalı mucit George Westinghouse ile genç mühendis William Stanley transformatör üzerinde çalışmalara başlamıştır. 1885 yılında Stanley, Massachusetts'teki AC güç istasyonunda bulunan ilk güç transformatörünü başarıyla geliştirmiştir. Westinghouse, transformatör imalatının daha kolay ve ucuz yapılabilmesi

için Stanley'in transformatöründe değişiklik yapmıştır. Transformatörün nüvesi "E" şeklinde demir levha, ince saçlardan yapılmıştır ve bu tip nüve yapısı şimdiye kadar yaygın olarak bulunmaktadır. Stanley'in transformatörü ile, jeneratörden çıkan elektrik enerjisinin uzak mesafelerde bulunan tüketicilere iletilmesi mümkün hale getirmiştir [19].



Resim 2.2. 1885 yılında Great Barrington, Massachusetts'teki ilk AC güç istasyonunda kullanılan Stanley'in transformatörü

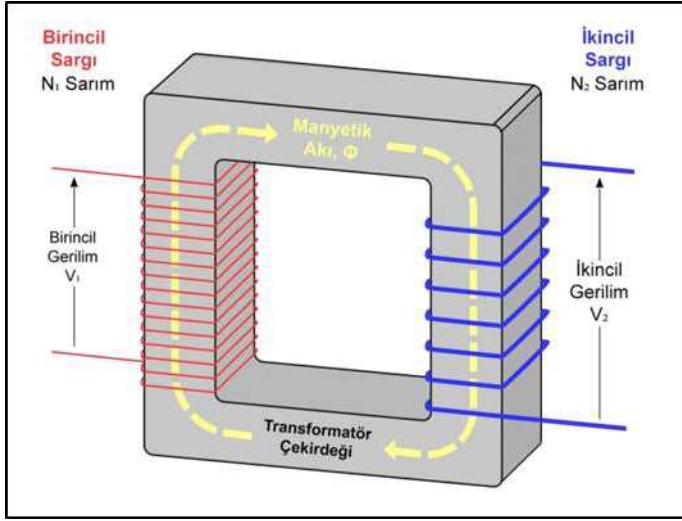
Günümüzdeki transformatörler güç ve gerilim bakımından daha fazla kapasiteye sahiptir. Güç birimi başına, ağırlığı da yüzyıl başında üretilen transformatörlere göre azalmıştır. Günümüzde kullanılan modern transformatörler daha iyi yalıtım ve soğutma sistemine sahiptir. Ayrıca, çevresel etkiler göz önüne alınarak enerjinin daha güvenilir ve verimli kullanılmasını sağlayacak enerji politikaları yürütülmektedir.

## 2.2 Temel Kavramlar

Bu alt bölümde transformatörün çalışma prensibi ve teorisi kısaca anlatılacaktır. Basit olarak, transformatörler silisyumlu saçlardan yapılan kapalı bir manyetik gövde ve yalıtılmış iletkenler ile sarılan sargılardan oluşan ve hareket etmeyen (statik) elektrik makineleridir. Transformatörün yapısında en basit halde iki sargı bulunmaktadır. Bu sargılardan birine primer veya birincil sargı, diğerine ise sekonder veya ikincil sargı denir [20]. Transformatör, sargılardan birine uygulanan alternatif gerilimi, elektromanyetik indüksiyon yoluyla diğer sargısında aynı frekans ve güçte fakat farklı gerilim ve akım değerlerine çevirmektedir. Transformatör, AC gerilim seviyesini ayarlamak dışında, yüksek seviyeli gerilimi ve akımı ölçmek için de kullanılmaktadır.

### 2.2.1. Çalışma prensibi

Faraday'ın indüksiyon yasasına göre, manyetik alan yardımıyla direkt metal bağlantısı olmadan iki iletken sargı arasında elektrik enerjisi aktarılabilir. Fakat bu yasa tek başına yetersizdir. İletken ve mıknatıs aynı anda birbirlerine göre hareketsiz durumdadır ise gerilimin indüklenmesinin mümkün olmadığı anlaşılmıştır. Lenz kanununa göre, bir iletkende gerilim indüklenmesi için o iletkenin değişken bir manyetik alan içinde bulunması veya sabit bir manyetik alan içinde hareket etmesi gerekmektedir. “ $e = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$ ” eşitliği tam olarak bunu ifade etmektedir.



Resim 2.3. Bir fazlı transformatörün manyetik akı çizgileri

Transformatörün primer tarafı alternatif gerilim kaynağına bağlandığında primer sargı sinüzoidal akım çekmektedir. Bu sinüzoidal akım, sinüzoidal akıyı üretmektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\phi = \phi_m \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

Primer sargıda zamana göre değişen akım, değişen manyetik alan üretmekte olup sekonder sargıda belli oranda bir elektromotor kuvvet (e.m.k) indüklenmesine neden olmaktadır.

$$e_1 = -N_1 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.3)$$

$e_1$  ve  $e_1$  sırasıyla primer ve sekonder sargının indüklenme gerilimini ifade eder. Eş. 2.1, Eş. 2.2 yerine koyulduğunda aşağıdaki eşitlikler elde edilmektedir;

$$e_1 = -N_1 \frac{\partial}{\partial t} (\Phi_m \sin(\omega t)) \quad (2.4)$$

$$e_1 = -N_1 \Phi_m \omega \cos(\omega t) = -N_1 \Phi_m \omega \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (2.5)$$

Eş. 2.5'ten indüklenen  $e$  gerilimi,  $\Phi$  akısından  $90^\circ$  geride olduğunu anlaşılr. Anlık akı yoğunluğu " $B = \frac{\Phi}{A}$ " eşitliği ile ifade edilir. İndüklenen e.m.k geriliminin maksimum ve RMS değerleri aşağıdaki gibi gösterilmektedir;

$$e_{max} = N \Phi_m \omega = N B_{max} A 2\pi f \quad (2.6)$$

$$e_{rms} = \frac{e_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{N B_{max} A 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4.44 N B_{max} A f \quad (2.7)$$

### 2.2.2. İdeal bir transformatör

İdeal bir transformatörde, sargıların gerilim ve akım arasındaki bağlantıları Eş. 2.2 ve Eş. 2.3 eşitliklerde gösterilir. Bu bağlantılar oranlanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir;

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.8)$$

Transformatörün yükseltici ya da düşürücü tip olduğu transformatörün çevirme oranı ile belirlenir.  $N_1 < N_2$  ise düşürücü transformatör,  $N_1 > N_2$  ise yükseltici transformatör denir. Transformatör ideal olduğu zaman, primer sargıdan sekonder sargıya kayıpsız bir şekilde enerji aktarılır. Böylece, transformatörün giriş ve çıkış güçleri eşitlenir.

$$P_{in} = V_1 I_1 \cos(\theta_1) \quad (2.9)$$

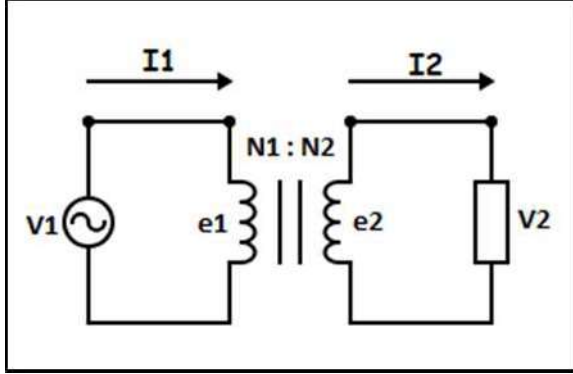
$$P_{out} = V_2 I_2 \cos(\theta_2) \quad (2.10)$$

İdeal durumunda  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açıları eşit ve enerji aktarımı için aşağıdaki eşitlik geçerlidir.

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.11)$$

Eş. 2.8 ve Eş.2.11 birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

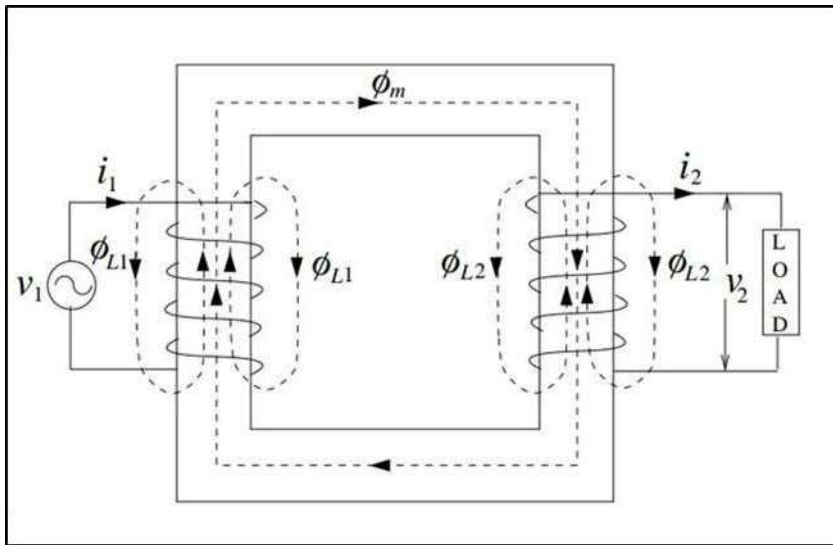
$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.12)$$



Resim 2.4. İdeal bir transformatörün eşdeğer devresi

### 2.2.3. İdeal olmayan bir transformatör

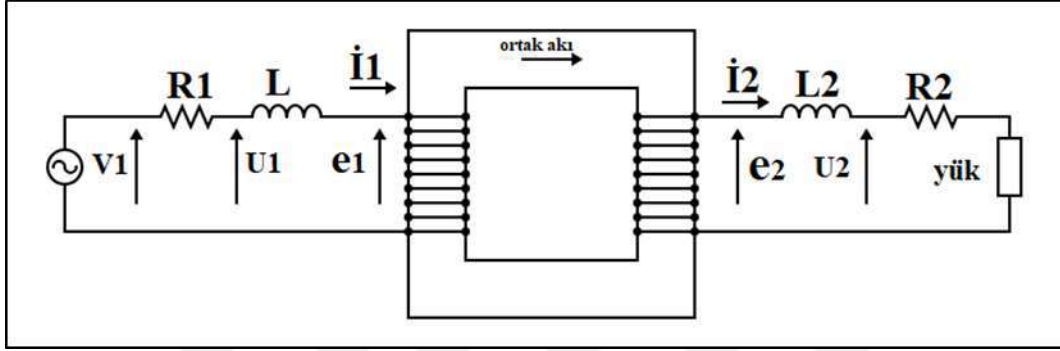
Yukarıdaki eşitlikler sadece ideal transformatörler için türetilmiştir. Ancak pratikte ideal nüve ve sargı özelliklerine sahip transformatör bulunmamaktadır. Gerçekte üretilen transformatörlerde kayıp ve kaçak akıları dikkate alınmaktadır. İndüksiyon gerçekleştiğinde akının büyük kısmı çekirdekten akar fakat küçük bir kısmı çekirdekteki hava boşluğundan geçmektedir. Bu akıya kaçak akı denir. Kaçak akı gerilim düşüşüne neden olmaktadır.



Resim 2.5. Sarımlarda kaçak akıların oluşumu

İdeal olmayan transformatörlerin özellikleri şunlardır [18];

- Sargıların direnci dikkate alınır,
- Manyetik akı kaybı mevcuttur (kaçak akılardan dolayı),
- Sargıların kapasitansı ihmal edilebilecek kadar küçük değildir,
- Nüvenin geçirgenliği sonsuz değildir.



Resim 2.6. Geçek bir transformatörün modeli

İdeal olmayan transformatördeki primer gerilim ve sekondere indüklenen gerilim eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilir [21]. Bu eşitliklerdeki 1 ve 2 alt indisler primer ve sekonder sargılarını temsil eder.

$$V_1 = R_1 i_1 + U_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$V_2 = R_2 i_2 + U_2 = R_2 i_2 + N_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \quad (2.14)$$

İdeal olmayan transformatördeki primer ve sekonder akı eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılmaktadır;

$$\phi_1 = \phi_{l1} + \phi_m \quad (2.15)$$

$$\phi_2 = \phi_{l2} + \phi_m \quad (2.16)$$

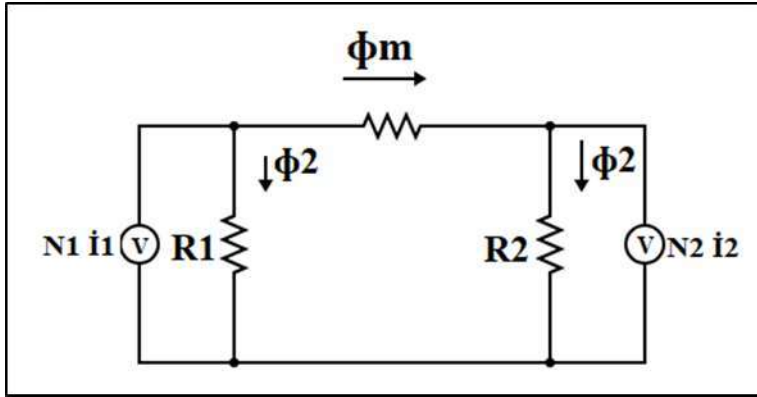
Eş. 2.13 ile Eş. 2.14 ve Eş. 2.15 ile Eş. 2.16 birleştirilirse aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$V_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = R_1 i_1 + N_1 \frac{\partial \phi_{l1}}{\partial t} + N_1 \frac{\partial \phi_m}{\partial t} \quad (2.17)$$

$$V_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + L_M \frac{\partial i_2}{\partial t} = R_1 i_1 + L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + e_1 \quad (2.18)$$

$$V_2 = R_2 i_2 + N_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = R_2 i_2 + N_2 \frac{\partial \phi l_2}{\partial t} + N_2 \frac{\partial \phi_m}{\partial t} \quad (2.19)$$

$$V_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + L_M \frac{\partial i_1}{\partial t} = R_2 i_2 + L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + e_2 \quad (2.20)$$



Resim 2.7. Transformatörün manyetik eşdeğer devresi

Yukarıdaki manyetik eşdeğer devresinden Eş. 2.21 elde edilir. Eşitlikteki R, relüktansı temsil eder.

$$\phi_m R_m = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (2.21)$$

Manyetik alanı oluşturan sargılardan geçen akıma uyartım akımı ( $i_\phi$ ) denir. Primerdeki uyartım akımı  $\phi_m$  ortak akıyı meydana getirmektedir.

$$\phi_m R_m = N_1 i_\phi \quad (2.22)$$

Eş. 2.21 ve Eş. 2.22 birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

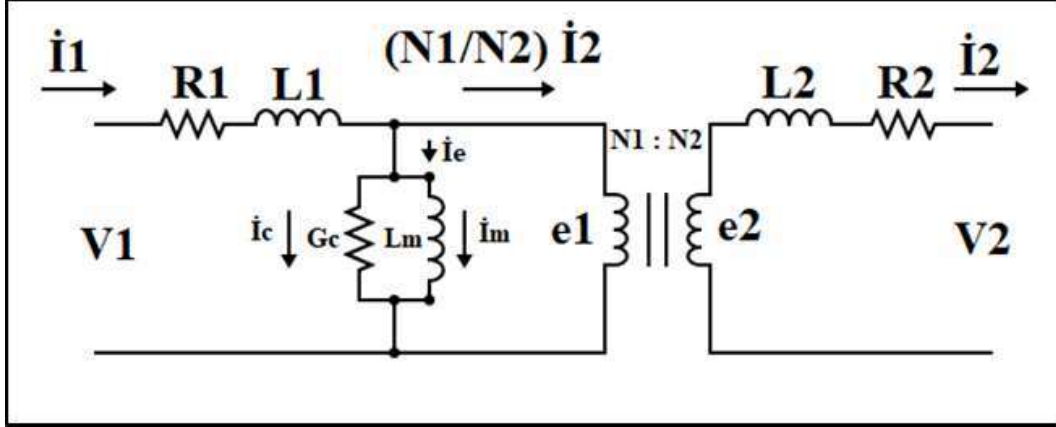
$$N_1 i_\phi = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (2.23)$$

$$i_1 = i_\phi + \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (2.24)$$

$$i_1 = i_\phi + i_2' \quad (2.25)$$

Eş. 2.25'te gösterildiği gibi primer akımı, uyartım akımı ile primere referans alınmış sekonder akımının toplamına eşittir. Uyartım akımı, nüve direncinden geçen akım ( $i_c$ ) ile mıknatıslanma akımının ( $i_m$ ) toplamıdır. Mıknatıslanma akımı manyetik akı ile aynı fazda

olup gerilim ile  $90^\circ$  kadar faz farklıdır. Gerilimle aynı fazda olan  $i_c$  akımı Histerezis ve Eddy akım kayıplarını beslemektedir.



Resim 2.8. Transformatör elektrik eşdeğer devresi

Teorik hesaplamaları daha kolay yapabilmek için transformatörün elektrik eşdeğer devresindeki sekonder parametreleri primere referans edilerek T-Eşdeğer devre şeklinde yazılmaktadır.

Dönüştürme işlemlerinden sonra sekonder direncinin, reaktansının, geriliminin ve akımının yeni değerleri aşağıdaki gibidir;

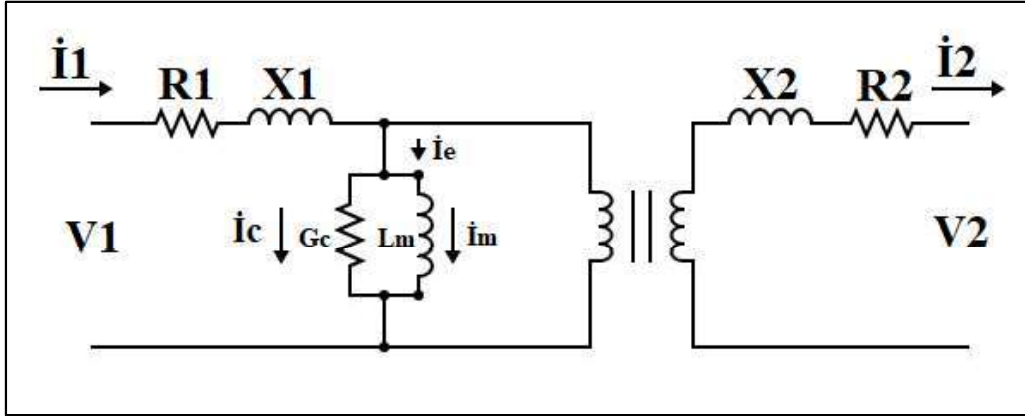
$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \quad (2.26)$$

$$X'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2 \quad (2.27)$$

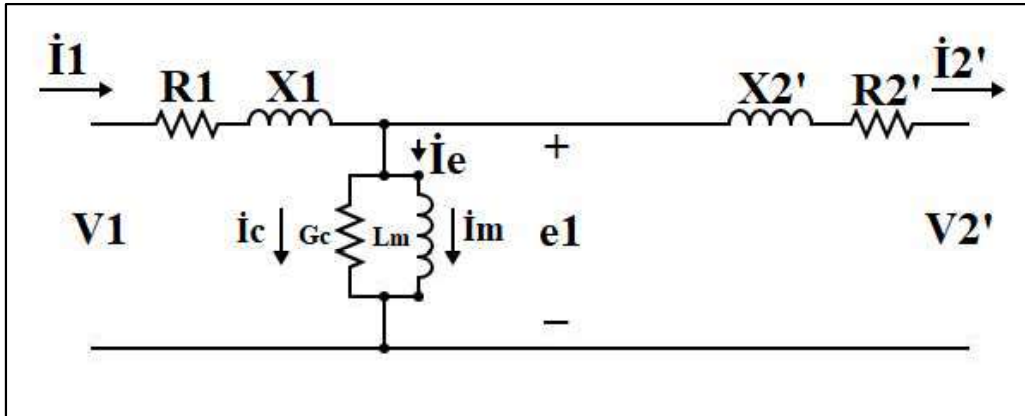
$$V'_2 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (2.28)$$

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (2.29)$$





Resim 2.9. Transformatorün T-eşdeğer devresi (eski sekonder değerler)



Resim 2.10. Transformatorün T-eşdeğer devresi (yeni sekonder değerler)

### 2.3. Transformatorde Meydana Gelen Kayıplar

Transformatorün kayıpları boşa ve yükte çalışma durumuna göre kayıplar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Boşa çalışma durumundaki kayıplar transformatorün sekonder tarafı açık devre olduğunda bulunur. Yükte çalışma durumundaki kayıplar ise transformatorün yüklendiği zaman sekonder sargısından akım geçtiğinde bulunmaktadır.

#### 2.3.1. Boşa çalışmada oluşan kayıplar

Boşa çalışma durumunda, nüvede demir kaybı meydana gelir. İletken malzemeden yapılmış olan nüve üzerinden akan alternatif akım iki farklı etki meydana getirir. Birincisi manyetik malzemenin mıknatıslanması sonucundan gelen manyetik etki, ikincisi ise malzeme bir iletken gibi davrandığından gelen elektrik etkisidir. Manyetik etkiden Histerezis kaybı, elektrik etkisinden ise Eddy akım kaybı oluşmaktadır [22].

### Histerezis kaybı

Transformatörün primer sargısından alternatif bir gerilim uygulandığında gerilimin frekansına bağlı olarak manyetik alanın kutupları da değişir. Meydana gelen bu kutup değişiminden dolayı malzemede bulunan moleküller, manyetik alan doğrultusunda yönelimlerini değiştirir. Birbirleriyle sürtünmeleri sonucunda oluşan ısı kaybı, Histerezis kaybı olarak tanımlanmaktadır [23]. B-H eğrisindeki kapalı alanın büyüklüğü Histerezis kaybına orantılıdır. Bu nedenle, Histerezis kaybı az olması istenirse kullanılan nüve malzemesinin B-H eğrisi ince olmalıdır. B-H eğrisinin verdiği alan yani Histerezis kaybı, grafik entegrasyonu (uyumu) yoluyla veya Planimetri kurallarına göre ya da Simpson kuralına göre belirlenebilir [23]. Bu modeller oldukça karmaşık ve uygulanması zordur. Bunun için, Histerezis kaybının yeterince doğru hesaplanması için deneylere dayanan daha basit olan ampirik (deneye dayalı) formül kullanılır. Birim hacimdeki toplam Histerezis kayıp değeri aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir [24].

$$P_h = k_h f B_{max}^n \quad (2.30)$$

### Eddy akım kaybı

Faraday indüksiyon yasasına göre, manyetik bir gövde üzerine sarılmış olan sargıdan zamana bağlı değişen bir akım geçirildiğinde gövde üzerinde bir gerilim indüklenir. Bu indüklenen gerilim, malzemenin içinde kapalı bir halka şeklinde akımlar dolaşmasına sebep olmaktadır. Bu akımlar “Foucault akımları” veya Eddy akım olarak adlandırılır. Eddy akım, girdaplara benzediği için girdap akım olarak da bilinmektedir. Bu akımlar nüvede ısı şeklinde bir enerji kaybı meydana getirir. Ayrıca, transformatörün yüksek verimli çalışmasına engel olur çünkü bu Eddy akımları, manyetik alan çizgilerinin dolaşımını zorlaştırır.

Nüve üzerinde oluşan Eddy akımlarının büyüklüğü nüvenin hacmine bağlıdır. Bu nedenle, Eddy akım kaybını azaltmak için transformatör nüveleri yalıtılmış ince saçlardan yapılmaktadır. Birim hacimdeki toplam Eddy akım kaybı, indüklenen geriliminin karesine orantılı olduğu için yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [24].

$$P_e = k_c f^2 B_{max}^2 \quad (2.31)$$

### 2.3.2. Yükte çalışmada oluşan kayıplar

Yükte çalışma durumundaki kayıplar genel olarak, sargı dirençlerinden akan akım etkisiyle meydana gelen Omik kaybı ve Eddy akım etkisiyle sargılara yansıtılan kayıplardan oluşmaktadır. Bu iki kayıp dışında, primer ve sekonder sargılarındaki kaçak akıların etkisiyle meydana gelen kayıp da mevcuttur. Kaçak akı kaybı, diğer kayıplara göre daha küçük olduğu için deneysel hesaplamalarda genellikle ihmal edilmektedir [25].

#### Omik kaybı

Transformatörün sekonder tarafına bir yük bağlandığı zaman primer ve sekonder sargılarından akım geçer. Her iki tarafta bulunan iletken dirençleri  $I^2R$  kadar kayıplara sebep olmaktadır. Bu kayıplar transformatörün bakır veya Omik kaybı olarak tanımlanır. Boşta çalışmada da Omik kaybı bulunur fakat boşta çekilen akım yani primer akımı çok küçük olduğundan dolayı ihmal edilir [25]. Transformatördeki toplam Omik kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$P_{CU} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.32)$$

$I_{1,2}$  ve  $R_{1,2}$  sırasıyla primer ve sekonder akımın etkin değerleri ve iletken dirençleridir. Primer ve sekonder iletken dirençleri bir Ohmmetre ile ölçülebilir fakat ölçülen direnç değerleri sargıların doğru akım (DC) dirençleri olup daha düşük bir değer elde edilmektedir.

#### Sargıda eddy akım kaybı

Yük durumu ne olursa olsun gerilim indüklenirse Eddy akımı oluşacaktır. Boşta çalışmada gibi yükte çalışma durumunda da Eddy akım kaybı bulunmaktadır.

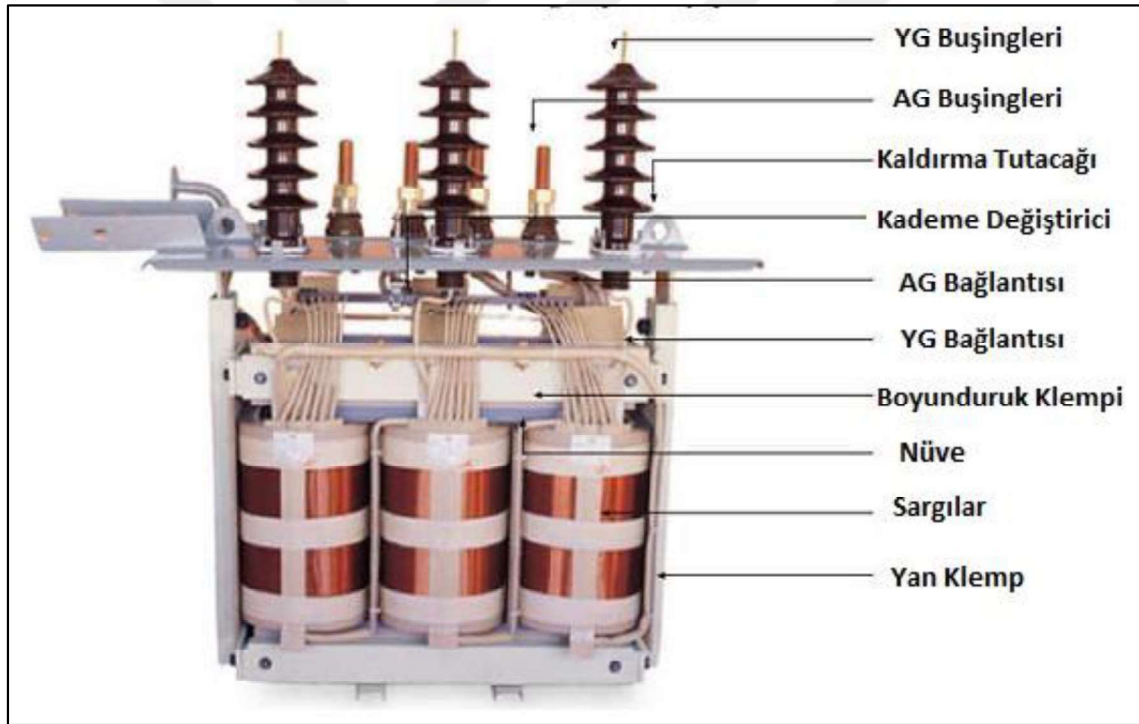
Sargı Eddy akım kaybı per-unit değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [18];

$$P_{CU,e} = \frac{\sigma \omega^2 B_m^2 d^2}{24} \quad (2.33)$$

## 2.4. Dağıtım Transformatörünün Önemli Parçaları

Elektrik enerjisinin dağıtılması ve iletilmesinde görev yapmak üzere transformatörün çeşitli tipleri bulunmaktadır. Kullanım amacına göre genel olarak transformatörler aşağıdaki gibi dört gruba ayrılmaktadır;

- Güç Transformatörü : Büyük güçlerin iletilmesinde kullanılır.
- Dağıtım Transformatörü : Düşük-orta güçlerin iletilmesinde kullanılır.
- Ölçü Transformatörü : Yüksek gerilim ve büyük akımların ölçülmesi için kullanılır.
- İzolasyon Transformatörü : Şebeke ve yükün birbirinden yalıtılması için kullanılır.



Resim 2.11. Yağlı tip transformatörün parçaları

Şekilde gösterildiği gibi transformatörün yapısı birçok parçanın birleşiminden oluşmaktadır. Bu bölümde, transformatörün önemli role sahip parçaları genel olarak anlatılacaktır. Dağıtım transformatörü tasarlarken aşağıdaki eleman ve hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir.

### 2.4.1. Manyetik nüve

Transformatör, yüksek verimli bir şekilde primerden sekonder tarafa manyetik olarak enerji aktarabilmesi için kullanılan nüve malzemesinin relüktansı çok düşük olması gerekmektedir. Bundan dolayı, manyetik nüveler genellikle 0,2-0,5 mm kalınlığında ince saçlar şeklinde özel silisyumlu yumuşak demir ve çelik malzemeden yapılır. Saçların birer yüzünün yalıtılması vernik, kâğıt, lak ve benzeri yalıtkanlar ile kaplanmasıyla sağlanmaktadır [25]. Nüve kesiti transformatörün gücüne göre yapılır. Büyük güçlü transformatörler için soğutma kanalları açılır. Nüve kayıplarını azaltmak için saf selülozdan yapılmış ince kâğıt levhalar, küçük saç paketlerine ayrılır. Nüve sıkıştırma plakalarıyla sıkıştırıldıktan sonra, epoksit yatay reçine ile emdirilmiş cam elyafı bantlar ile iyice sarılır. Daha sonra bu bantlar cıvatalı kilitlerle gerdirilir [23].

Çizelge 2.1 Sık kullanılan CRGO tip manyetik nüve sınıf örnekleri

| Sınıf | Kalınlığı (mm) |
|-------|----------------|
| M3    | 0,23           |
| M4    | 0,27           |
| M5    | 0,30           |
| M6    | 0,35           |

Dağıtım transformatörlerinde genel olarak Çekirdek Tipi ve Mantel Tipi olmak üzere iki çeşit nüve kullanılmaktadır.

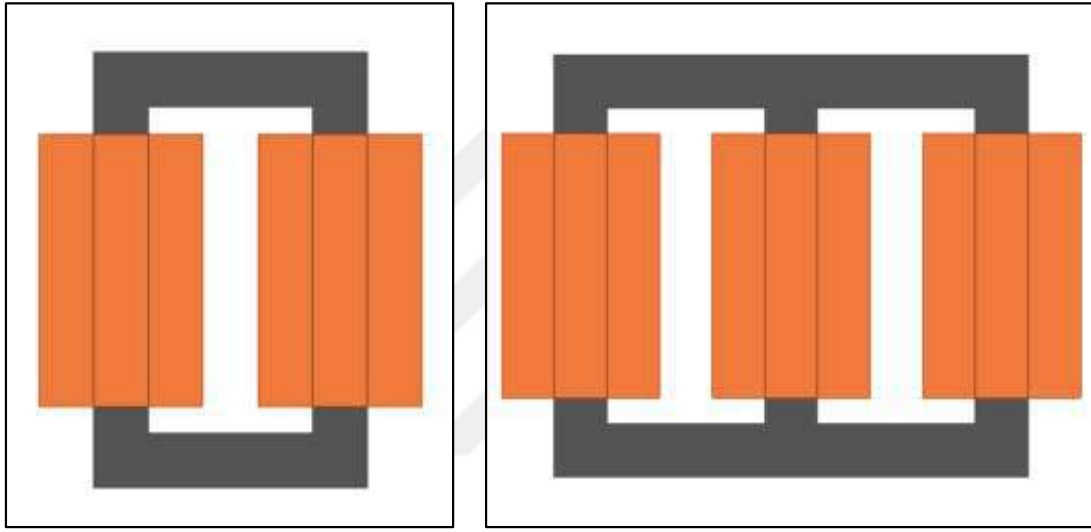
#### Çekirdek tipi nüve

Çekirdek tip transformatörlerde primer ve sekonder sargıları nüvenin her yan bacak üzerine yerleştirilmektedir. Bir ve üç fazlı transformatörlerde, sargıları daha kolay izole etmek amacıyla alçak gerilim sargısı nüve bacağının hemen üzerine, yüksek gerilim sargısı ise alçak gerilim sargısının üstüne yerleştirilir [20]. Çekirdek tipi nüvenin kesiti bütün bacaklarda aynıdır. Bu tip nüvelerde yalıtım için daha fazla yer bulunduğundan dolayı büyük güç ve yüksek gerilimde çalışılacak transformatörler için daha uygundur [25].

Çekirdek tip transformatörde, orta bacadan çıkan akımın geçtiği yol, yan bacaklarınkine göre daha kısadır. Orta bacağın relüktansı daha küçük olduğundan dolayı üretilen mmk (magneto-motor kuvvet / amper-tur) da daha az olacaktır. Sonuç olarak, orta bacak bir miktar daha az akım çekmektedir.

$$\mathcal{R} = \frac{mmk}{flux} = \frac{Ni}{\phi} \quad (2.34)$$

$$\mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A} \quad (2.35)$$

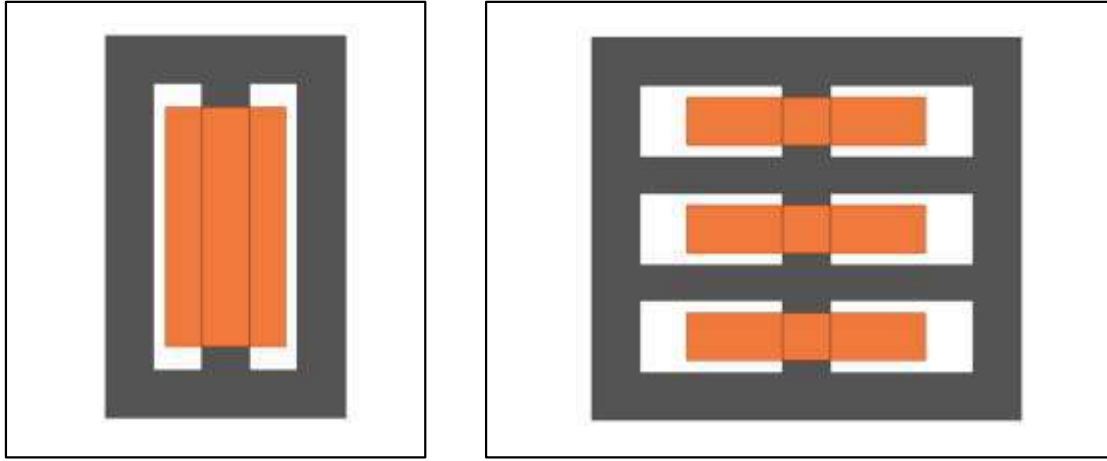


Resim 2.12. Trafo tipleri (a) Tek faz çekirdek tipi (b) Üç faz çekirdek tipi

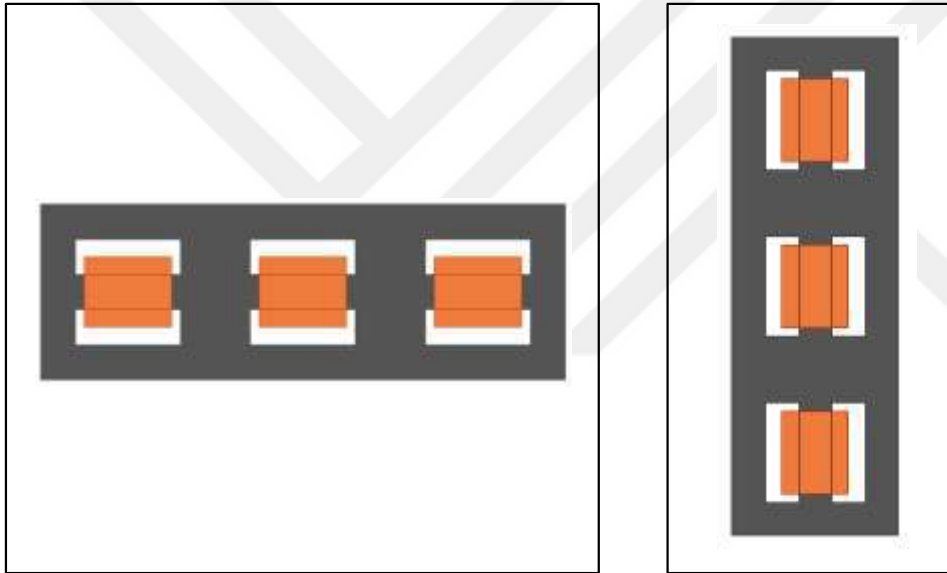
### Mantel tipi nüve

Mantel tip transformatörlerde primer ve sekonder sargılar, nüvenin orta bacağına yerleştirilmektedir. Mantel tipi nüvenin kesiti bütün bacağında aynı değildir. Orta bacak hem primer hem de sekonder sargıları taşıdığı için üretilen bütün akı bu bacadan yan bacaklara eşit olarak paylaşılır. Bu nedenle yan bacakların kesiti orta bacakdaki manyetik akının yarısını taşıyacak şekilde ayarlanmaktadır [25].

Mantel tip transformatörde, her faza ait akımın geçtiği yol birbirine eşit olduğu için her fazın akımı da aynıdır. Çekirdek tip transformatörde karşılaşılan sorun bu tipte yoktur. Üç fazlı Mantel Tip transformatör yapmak için sargıları yan yana veya alt alta koymak gerekir. Şekilde görüldüğü gibi mantel tip transformatörde daha fazla manyetik nüve malzemesi kullanıldığından dolayı daha ağırdır ve ekonomik değildir.



Resim 2.13. Trafo tipleri (c) Tez faz mantel tipi (d) Üç faz mantel tipi



Resim 2.14. Üç adet bir fazlı transformatörün (a) üst üste konmuş durum ve (b) yan yana konmuş durum

#### 2.4.2. Transformatörün sargıları

Transformatörün sargı iletkenleri bakır ve alüminyumdan yapılmaktadır. İletken kesiti ise yuvarlak veya dikdörtgen şeklindedir. Küçük güçlerdeki transformatörlerin iletken kesiti yuvarlak, büyük güçlerdeki transformatörlerin iletken kesiti ise dikdörtgendir. Dikdörtgen kesitli iletkenlerden yapılan sargılarda, iletken arasındaki hava boşluğu çok küçüktür çünkü nüve bacağına daha fazla sarım sarılmasına imkân sağlamaktadır [25].

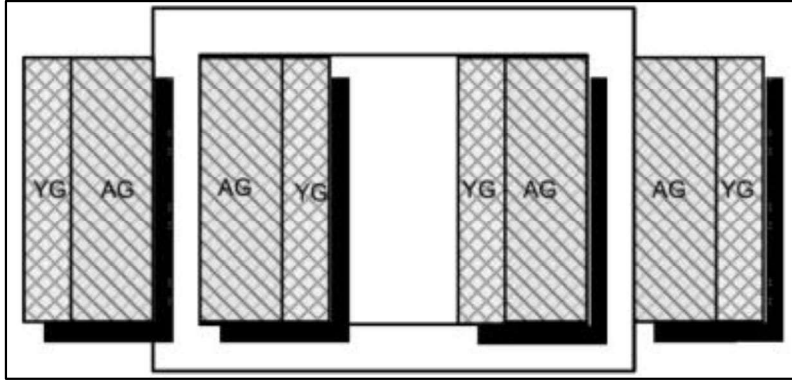
Sargı şekline bakarak silindirik ve dilimli tip sargı olarak iki farklı tipte yapılmaktadır. Transformatörün nüvesi hangi tipte olursa olsun sargı şekli bu iki tip sargıdan birisidir.

### Silindirik tip sargı

Silindirik tip sargılar makara şeklinde hazırlanıp nüveye yerleştirilir. Alçak gerilim sargısı içe, yüksek gerilim sargısı dışa gelecek şekilde yerleştirilir. Silindirik tip sargılar küçük güçlü transformatörlerde kullanılır.



Resim 2.15. Silindirik tip sargı



Resim 2.16. Silindirik sargı kesiti [25]

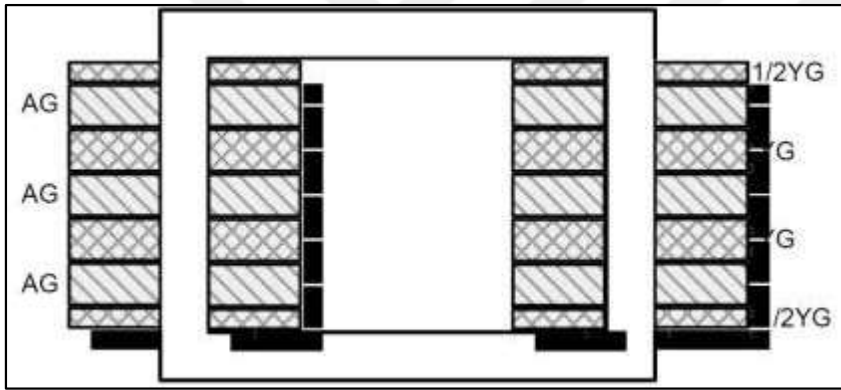
### Dilimli tip sargı

Dilimli tip primer ve sekonder sargılar dilimlere ayrılarak sarılır. Sargı dilimlerinin arası kağıt, plastik maddeler, pamuk, mika, pres bant, reçine, pertinaks ve benzer malzemeler ile yalıtılarak nüveye yerleştirilir [25]. Dilimli tip sargılar büyük güçlü transformatörlerde kullanılır. Dilimli tip sargıların imalatı silindirik tipe göre daha pahalıdır.





Resim 2.17. Dilimli tip sargı



Resim 2.18. Dilimli sargı kesiti [25]

#### 2.4.3. Soğutma ortamı

Transformatörde meydana gelen demir ve bakır kayıpları bir zaman sonra transformatörün sıcaklığını yükseltmektedir. Sargı ve nüvenin sıcaklığının daha fazla yükselmesini önlemek için ısı enerjisi transformatörün dışındaki çevreye iletilmesi gerekmektedir. Küçük güçlerdeki transformatörün soğutma ortamında hava, büyük güçlerde ise yağ kullanılmaktadır.

Standartlara göre transformatörde kullanılan soğutma yöntemi harf kodları ile gösterilmektedir. Dağıtım transformatörlerinde en yaygın olarak kullanılan soğutma tipi ONAN ve ONAF tipleridir. Kodun birinci harfi sargıların bulunduğu iç soğutma ortamını,

ikinci harfi iç soğutma ortamındaki dolaşım türünü, üçüncü harfi dış soğutma ortamını ve son harfi dış soğutma ortamındaki dolaşım türünü belirtmektedir.

ONAN soğutma tipi, yanma noktası  $\leq 300^{\circ}\text{C}$  olan mineral yağ veya sentetik sıvı yalıtkanın dolaşımı ile kendi kendine soğuyan transformatördür. Bu tip transformatörde kazan dışına konmuş radyatörlerden yağ geçirilir ve bu yağ radyatörlerdeki hava ile doğal konveksiyon yöntemiyle soğur. ONAF soğutma tipi ise, aynı yanma noktası  $\leq 300^{\circ}\text{C}$  olan mineral yağ veya sentetik sıvı yalıtkanın dolaşımı ile kendi kendine soğuyan transformatördür fakat bu tipte radyatörlere dışarıdan fan, vantilatör, pompa ve benzer araç yardımıyla hava üflenerek soğutma sağlanmaktadır [20].



Resim 2.19. a) ONAN tip ve b) ONAF tip transformatör

### 3. FOTOVOLTAİK SİSTEM (PV SYSTEM)

Fotovoltaik sistem, günümüzde en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı çeşitlerinden biridir. Fotovoltaik, fotondan elektrik üretimi anlamına gelir. Fotovoltaik (PV) sistem, fotoelektrik reaksiyonundan faydalanarak güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir.

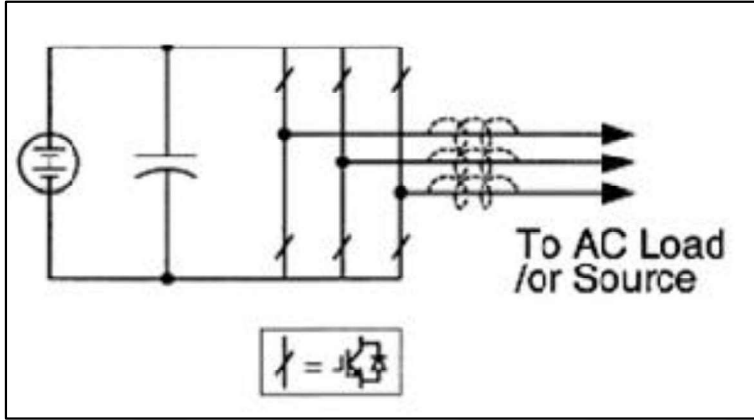
Fotovoltaik (PV) sistem, güneş paneli ve evirici olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Güneş panelleri, yarı iletken maddeler olup belli dalga boyundaki güneş ışınlarını doğru akım (DC) elektrik enerjisine çeviren parçalardır. Güneş panelleri standart boyut ve güçlerde imal edilir. PV sisteminin ikinci önemli elemanı olan eviriciler ise doğru akım (DC) elektrik enerjisini alternatif akım elektrik enerjisine dönüştüren elektronik cihazlardır (AC). Uygulama şekline göre fotovoltaik sistemler genel olarak ikiye ayrılmaktadır; şebekeden bağımsız sistemler (*off-grid*) ve şebekeye bağlı sistemler (*on-grid*). Şebekeye bağlı sistemlerde, Maksimum Güç Noktası İzleyici (*Maximum Power Point Tracer*) bir akıllı kontrol cihazı eklenir. MMPT, şebekeye bağlı sistemlerde şebekeye mümkün olabilecek en yüksek güneş gücünü aktarmasını sağlamaktadır.

#### 3.1. Fotovoltaik Eviriciler (İnvertör)

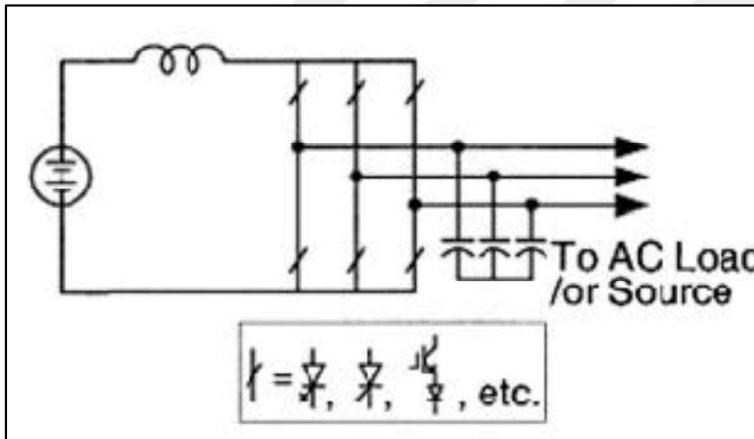
Fotovoltaik eviriciler, şebekeye gönderilmeden önce güneş panellerinde üretilen doğru akım elektrik enerjisini, alternatif akım elektrik enerjisine dönüştüren güç elektronik elemanlarıdır. Eviriciler, tek fazlı veya üç fazlı olabilir.

Eviricilerde, transistör veya tristör gibi yarı iletken anahtarlama elemanları kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılmakta olan IEEE ve IEC standartlarına uygun yüksek güç kalitesi sağlayabilmek için büyük güçlerde kullanılan tristöre göre daha küçük güçlü Metal Oksit Alan Etkili Transistör (MOSFET) veya İzole Edilmiş Kapılı İki Kutuplu Transistör (IGBT) kullanılması tercih edilmektedir [27]. MOSFET veya IGBT kullanılan eviriciler yaklaşık olarak aynı toplam harmonik bozulma (TDH) değeri vermektedir [3]. Çıkış dalga şekline göre eviriciler, gerilim kaynaklı eviriciler (VSI) ve akım kaynaklı eviriciler (CSI) olarak iki grupta sınıflandırılır. Gerilim kaynaklı eviricilerin çıkış voltajının büyüklüğü sabit ve yük akımının dalga şekli yük karakteristiğine bağlı iken;

akım kaynaklı eviricilerde akım büyüklüğü sabit olup gerilimin dalga şekli yük karakteristiğine bağlı olmaktadır. Şebekeye bağlı sistemlerde gerilim kaynaklı eviriciler (VSI) daha yaygın kullanılır çünkü çıkış gerilimi ve frekans değerleri kontrol edilebilir.

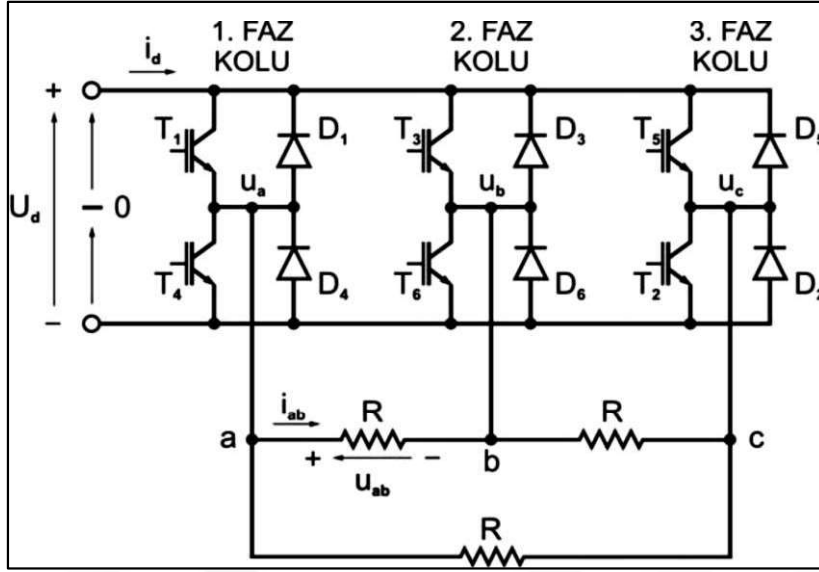


Resim 3.1. Kapasitöre paralel bağlı gerilim kaynaklı evirici (VSI)

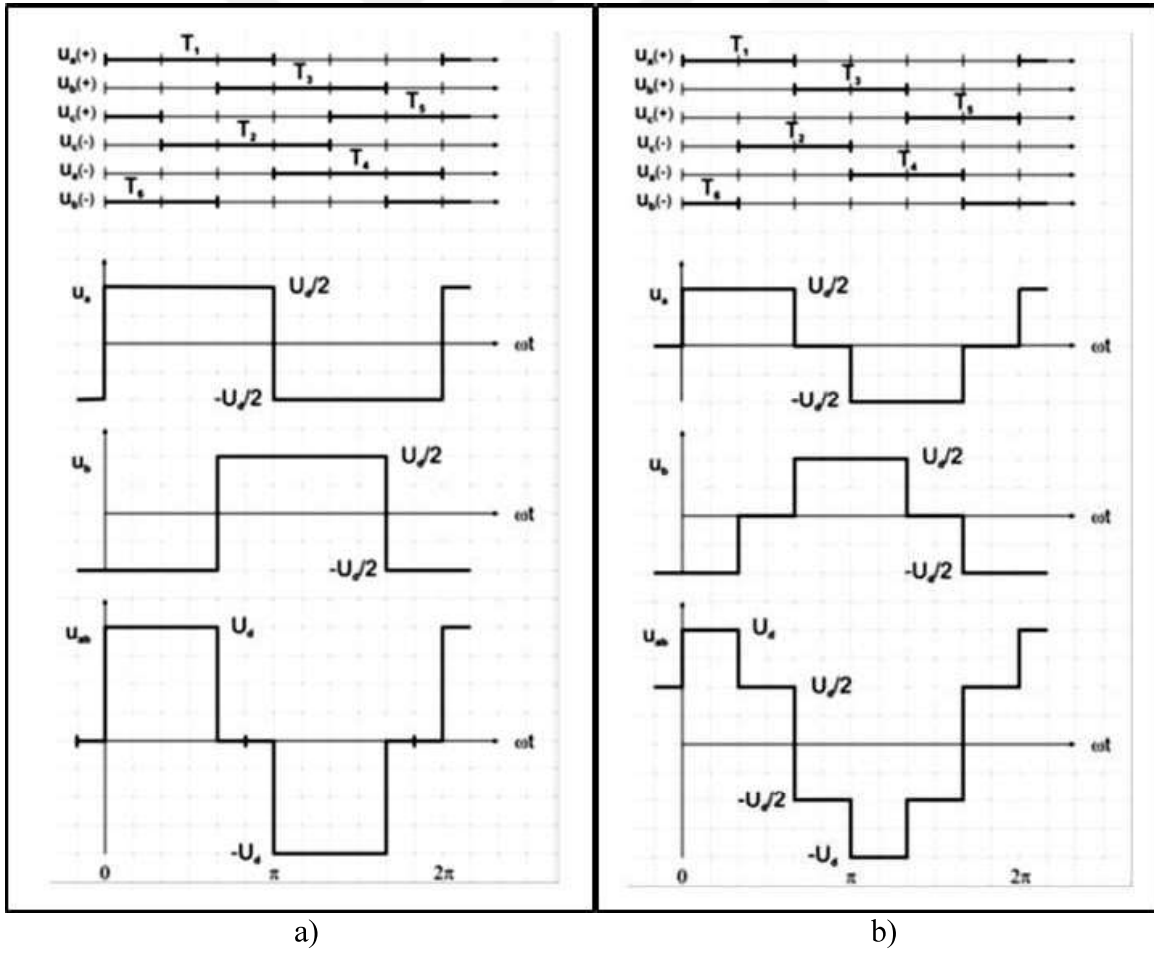


Resim 3.2. İndüktöre seri bağlı akım kaynaklı evirici (CSI)

İletim süresine göre eviriciler,  $180^\circ$  iletimde ve  $120^\circ$  iletimde eviriciler olarak ikiye ayrılır [28]. Üç fazlı eviricilerde  $180^\circ$  iletimde olanı tercih edilmektedir.  $120^\circ$  iletimde eviricilerde, her faza ait 2 transistörün arasında  $60^\circ$  kadar boşluklar olmasından dolayı, yükün özelliklerine bağlı olarak çıkış geriliminde bozulmalar bulunmaktadır. Bu nedenle, tabloda gösterildiği gibi  $120^\circ$  iletimde eviricilerde daha düşük bir çıkış gerilimi elde edilmektedir.



Resim 3.3. Üç fazlı kare dalgı invertör/evirici



Resim 3.4. a) 180° ve b) 120° iletimde invertör/evirici

Çizelge 3.1. 180° ve 120° iletimde eviricilerin gerilimleri

| Üç Fazlı 180° İletimde Evirici    | Üç Fazlı 120° İletimde Evirici           |
|-----------------------------------|------------------------------------------|
| $U_a = \frac{U_d}{2}$             | $U_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2}$ |
| $U_{ab} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d$ | $U_{ab} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_d$        |

### 3.2. Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM)

Eviricinin çıkış gerilimini denetlemek için iki metot bulunmaktadır; frekans modülasyonu ve darbe genişlik modülasyonu [29]. Darbe genişlik modülasyonu, üç fazlı evirici için en yaygın kullanılan anahtarlama kontrol yöntemidir. PWM'nin birçok modülasyon tekniği bulunmaktadır. En yaygın kullanılan PWM tekniği de sinüzoidal darbe genişlik modülasyonudur (SPWM). Diğer PWM teknikleri aşağıdaki gibi listelenmektedir [30];

- Sinüzoidal PWM
- Rastgele PWM
- Minimum Dalgacık Akımı PWM
- Uzay Vektör PWM (SVPWM)
- Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu (SHE) PWM
- Harmonik İlaveli PWM
- Sigma-delta modülasyon
- Anma akım kontrollü SPWM
- Delta modülasyon
- Histerezis bant akım kontrolü (HBCC-PWM)

PWM eviriciler, çıkış gerilimini ve frekansı aynı anda denetleyebilir. PWM kontrolü uygulanarak gerilim ve akım harmonik bozulmaları düşük seviyeye getirilebilmektedir.

#### 3.2.1. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu

Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonunda, bir sinüzoidal kontrol gerilimi ile daha yüksek frekanslı bir üçgen sinyal karşılaştırılır. Sinüzoidal gerilime referans veya

modülasyon dalga, üçgen sinyale ise taşıyıcı (*carrier*) dalga denilmektedir. Aynı üçgen taşıyıcı dalga, üç fazlı eviricinin bütün fazlarına uygulanabilir. Taşıyıcı dalga, testere dişi bir dalga şeklinde de olabilir. Testere dişi dalgalar simetrik olmadığı için taşıyıcı dalga olarak üçgen sinyal daha çok tercih edilmektedir. Üçgen taşıyıcı dalga -1 ile 1 arasında değişir ve frekansı eviricinin anahtarlama frekansını belirlemektedir. Taşıyıcı frekansının yükseltilmesi ile gerilim ve akım toplam harmonik bozulma (TDH) değerleri azalmaktadır [3]. Fakat taşıyıcı frekans eviricinin anahtarlama kaybını etkilediği için taşıyıcı, yani anahtarlama frekansı, dikkatli olarak belirlenmelidir.

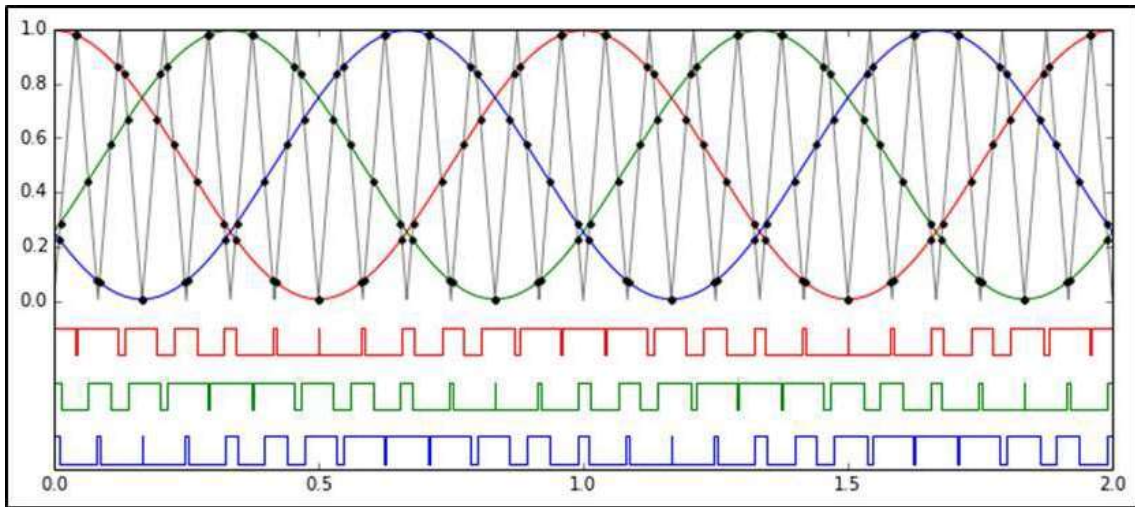
Modülasyon genlik oranı ayarlanarak çıkış geriliminin denetimi yapılmaktadır [28]. Modülasyon genlik oranı 0 ile 1 arasında değişir ve buna lineer çalışma denir. Modülasyon genlik oranı  $>1$  ise lineer olmayan çalışma veya aşırı modülasyon denmektedir. Modülasyon frekans oranı üçün tek katları olmalıdır [31].

$$m_a = \frac{A_r}{A_c} \quad m_f = \frac{f_{sw}}{f_o} \quad (3.1)$$

Lineer çalışmada ( $m_a \leq 1$ ), faz- nötr geriliminin maksimum değeri  $\frac{U_d}{2}$  olduğu için faz arası çıkış geriliminin maksimum değeri aşağıdaki gibi yazılmaktadır [31];

$$U_{ab(maks)} = \sqrt{2} U_{ab(rms)} = \sqrt{2} \left( m_a \frac{\sqrt{3} U_d}{\sqrt{2} 2} \right) = 0.866 m_a U_d \quad (3.2)$$

$$0 < m_a \leq 1$$

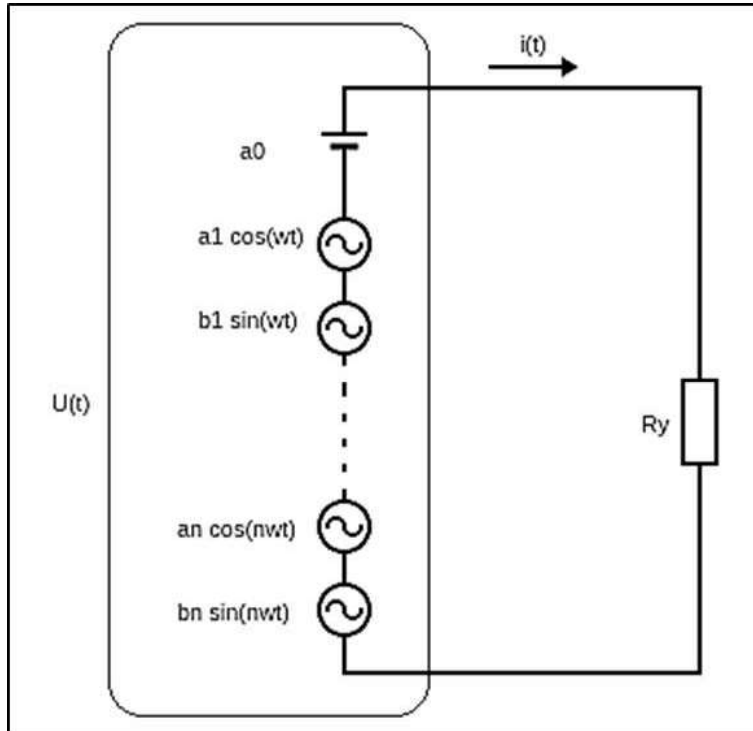


Resim 3.5. Üç faz sinuzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM)

### 3.3. Alçak Geçiren Süzgeçler (Filtreler)

Şebekeye tam sinüzoidal şeklinde gerilim ve akım gönderilmesi istenmektedir. Bunu sağlamak için eviricilerin çıkışlarına filtreleme teknikleri uygulanmaktadır. Süzgeç devreleri, girişteki belli frekans büyüklükleri çıkışa aktaran veya girişteki belli frekans büyüklükleri çıkışa aktarmayan, dolayısıyla istenmeyen frekansları yani harmonikleri yok eden devrelerdir. Süzgeç yerine filtre ismi daha yaygın kullanılmaktadır. Direnç, kondansatör ve bobin gibi pasif devre elemanlarından oluşan filtre devreleri, pasif filtreler olarak tanımlanmaktadır. Diyot, transistör ve tristör gibi aktif devre elemanlarından oluşan filtre devrelerine ise aktif filtreler denir. Alçak geçiren filtreler, girişteki küçük frekanslı dalgaları aktarıp büyük frekanslı dalgaları aktarmayan filtre devreleridir. Eviricilerin çıkış geriliminin temel frekansı sinüzoidal şeklinde olması için çıkışlarına alçak geçiren pasif filtre uygulanmaktadır. Filtre devrelerinin çıkışından harmonik bozulmalar içermeyen akım ve gerilimler elde edilmesi sağlanmaktadır. Şebekeye aktarılan temel frekans akımının toplam harmonik distorsiyonu (THD) değeri IEC 61727, IEEE 1547-2003 ve IEEE 929-2000 uluslararası standartlarına göre %5'in altında olması gerekmektedir [32]. Bir eviricinin çıkış gerilimine ait Fourier seri açılımı aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir [33];

$$U(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n \omega_0 t) + b_n \sin(n \omega_0 t)] \quad (3.3)$$

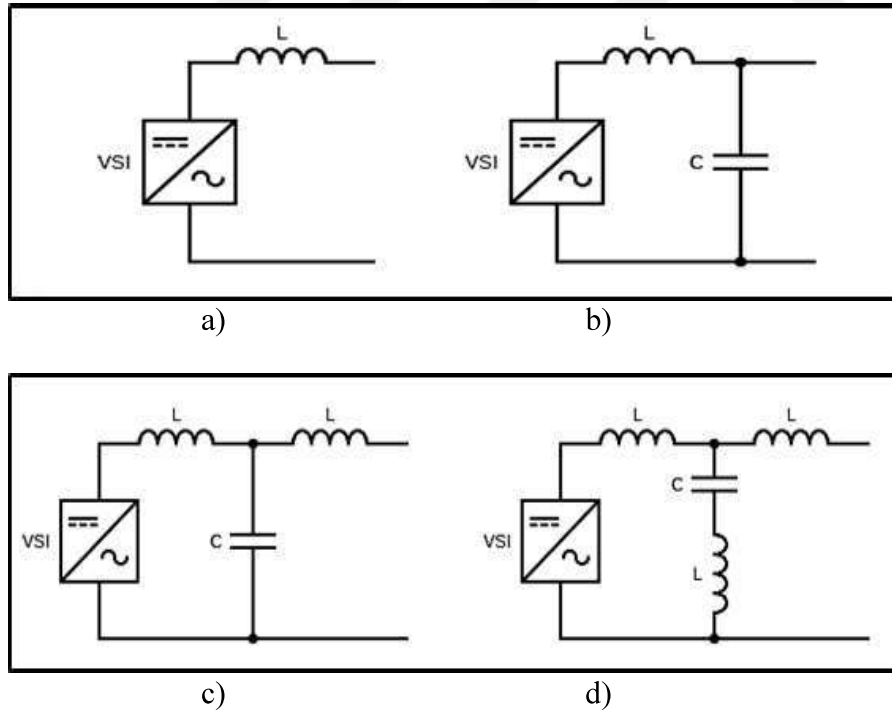


Resim 3.6. Fourier seri açılımına ilişkin eşdeğer devresi



Fourier seri açılımındaki her bir terim, Resim 3.6'daki gibi tek bir kaynak gibi gösterilebilir. Seri açılımındaki istenmeyen harmonik bileşenler dikkate alınarak filtre devre elemanları tasarlanmaktadır. Ayrıca, filtre tasarımı yapılırken kullanılan elemanların verimi, ağırlığı ve maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır.

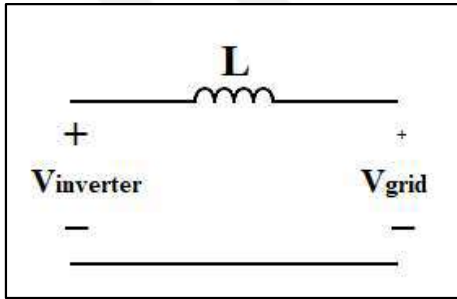
Bu bölümde, eviricilerde kullanılan alçak geçiren pasif süzgecin farklı devre yapıları incelenmiştir. Ayrıca, fotovoltaik sistemler için en uygun hangi alçak geçiren pasif filtre devresinin kullanılması gerektiği de açıklanmıştır. Dirençlerdeki gerilim düşümü etkisinden dolayı direnç içeren pasif filtrelerin çıkış geriliminde azalma görülmektedir [33]. Bu nedenle, bu çalışmada sadece kondansatör ve bobin içeren filtreleme teknikleri üzerinde inceleme yapılmaktadır. Aşağıda L, LC, LCL ve LLCL gibi kondansatör ve bobinin kombinasyonlarını içeren pasif filtreler genel olarak açıklanmaktadır. Filtrelerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. İstenen çıkış elde edilebilmesi için her açıdan değerlendirme yapılarak parametreler doğru bir şekilde hesaplanmalıdır.



Resim 3.7. Basit filtrelerin topolojisi; a) L filtresi, b) LC filtesi, c) LCL filtresi, d) LLL filtesi

### 3.3.1. L filtresi

L filtresi birinci dereceden bir filtre olup basit ve tasarımı diğer filtreler göre daha kolaydır. L filtresi tasarımında esas olarak sadece akım dalgalanma miktarına bakılmaktadır. Fakat yeterli olarak harmoniklerin yok edilebilmesi için anahtarlama frekansı çok yüksek olması gerekmektedir [34]. Anahtarlama frekansı yüksek olursa kullanılacak olan anahtarlama elemanlarının maliyeti artar. Filtrenin endüktans değeri artırılarak anahtarlama frekansının düşürülmesi mümkün fakat IEEE STD 519 akım harmonik limitlerine uyulması oldukça zordur. Ayrıca, büyük endüktanslar yine yüksek maliyete sebep olmaktadır.



Resim 3.8. L filtresi

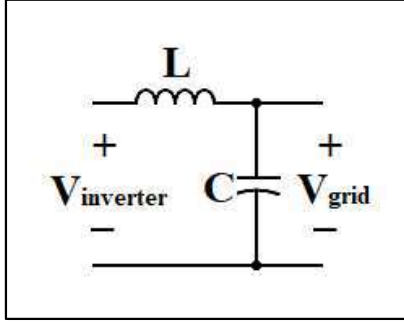
### 3.3.2. LC filtresi

LC filtresi ikinci dereceden bir filtre olup L filtresine göre boyutu daha küçük ve maliyeti daha düşüktür. LC filtresinde bulunan şönt eleman sayesinde L filtreye göre daha düşük toplam harmonik distorsiyonu (THD) değerleri elde edilebilir. Filtredeki bobine paralel olarak bağlanan kondansatör, şönt eleman olarak davranmaktadır. LC filtresi bağlanarak eviricinin çıkış akımından yüksek anahtarlama frekansının bileşenleri yok edilmektedir. Fakat LC filtresinde eklenmiş olan şönt elemanından dolayı, L filtresine göre daha fazla reaktif güç kaybı meydana gelmektedir [34]. LC filtre tasarımı için rezonans frekansı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

Genellikle LC filtresi şebekeden bağımsız sistemler için tercih edilmektedir. Şebekenin kendi endüktansı mevcuttur ve şebekeye bağlı sistemlerde LC filtresi şebeke endüktansına

seri olarak bağlanmış olur [35]. Bu durumda, LC filtresi bağlanırken LCL filtre durumu meydana gelir ve tasarımı zorlaştırır [32]. Bu tezde yapılan çalışmalar için LC filtre tasarımı uygun değildir.

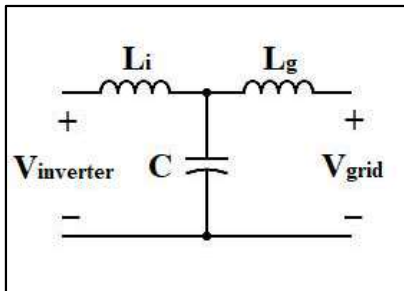


Resim 3.9. LC filtresi

### 3.3.3. LCL filtresi

LCL filtresi üçüncü dereceden bir filtre olup diğer filtrelere göre boyutu daha küçük ve maliyeti daha düşüktür. Ayrıca, L ve LC filtrelerine göre evirici anahtarlama harmonikleri daha iyi azaltılmaktadır. LCL filtre uygulamasında, alçak anahtarlama frekansı ile daha düşük toplam harmonik distorsiyonu (THD) değeri elde edilebilir. Fakat LCL filtresinin tasarımı daha karmaşıktır. Akımın dalgalanma oranı, rezonans frekansı ve güç değerleri gibi birçok parametre dikkate alınmalıdır [32]. Ayrıca, LCL filtre içeren sistemin kararlılığının sağlanabilmesi için daha karmaşık akım denetleyicilere ihtiyaç duyulmaktadır [30]. LCL filtre tasarımı için rezonans frekansı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

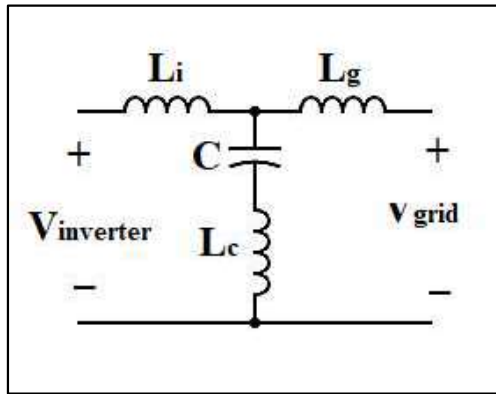
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \quad (3.5)$$



Resim 3.10. LCL filtresi

### 3.3.4. LLCL filtresi

LLCL filtresi, günümüzde boyutu ve maliyeti en düşük düzeyde olan alçak geçiren pasif filtredir. LCL filtresine göre büyük ölçüde akım harmonikleri azaltmaktadır. Ayrıca, LCL filtresi ile karşılaştırıldığında LLCL filtresindeki şebeke endüktansının büyüklüğü %81.67 kadar azaltılmıştır [36]. LLCL filtresinin önemli üstünlükleri olmasına rağmen, kararlı hal durumunda kalması oldukça zordur [32].



Resim 3.11. LLCL filtresi

## 4. TRANSFORMATÖR ANALİZİNDE SAYISAL YÖNTEMLER

Sayısal yöntemler, analitik yöntemler ile çözülemeyen kısmi diferansiyel eşitlikleri gibi matematik problemlerinin aritmetik işlemler ile çözülebilmelerini sağlamaktadır [37]. Sayısal bilgisayarların gelişmesiyle karmaşık yapı ve sınır şartlarına sahip elektromanyetik problemlerin hızlı ve doğru çözümü mümkün hale gelmektedir. Sayısal yöntemler aynı kavramlara sahip olsa da farklı lineer eşitlik sistemleri mevcuttur. Farklı sayısal çözüm yöntemleri şunlardır [38,39];

- Sonlu Elemanlar Yöntemi / *Finite Element Method* (FEM)
- Sonlu Farklar Yöntemi / *Finite Difference Method* (FDM)
- Sınır Elemanları Yöntemi / *Boundary Element Method* (BEM)
- Sonlu Hacim Yöntemi / *Finite Volume Method* (FVM)
- Manyetik Eşdeğer Devre Yöntemi / *Magnetic Equivalent Circuit Method* (MEC)
- Momentler Yöntemi / *Method of Moments* (MoM)
- Nokta Yansıtma Yöntemi / *Point Mirroring Method*
- Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Yöntemi / *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD)
- İletim Hattı Matris Yöntemi / *Transmission-Line Matrix* (TLM)
- Vb.

Her yöntemin avantaj ve dezavantajları vardır. Çeşitli sayısal çözüm yöntemleri içerisinde elektromanyetik alan problemlerinin çözümü için en popüler yöntem olan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tercih edilmektedir [38,40].

### 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlayan sayısal bir yöntemdir. Sonlu Elemanlar Yönteminde kullanılan teoriler, 1943 yılında Alman matematikçi *Richard Courant* tarafından sunulmuştur. Başta Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) yapısal analiz problemlerinin çözümü için uygulanmıştır. 1968 yılında, elektromanyetik problemlerin hesaplanması ve analizi için uygulanmaya başlamıştır [41]. Sonlu Elemanlar Yöntemi, elektromanyetik, magnetostatik, ısı iletimi, yapı mekaniği, akışkanlar dinamiği ve akustik dalgalar gibi farklı bilim dallarında diferansiyel

eşitliklerinin çözümünü sunabilmektedir. Sonlu Elemanlar Yönteminin en büyük avantajı, karmaşık şekilleri analiz edebilmesidir. Başka önemli avantajları da aşağıdaki gibidir [42];

1. Kararlı ve doğru analiz sonuçları üretebilme
2. Eddy akımı ve doğrusal olmayan davranışları analizlerde doğru olarak hesaba katabilme
3. Doğal sınır koşullarının fonksiyonel formülasyonlarıyla örtük olması

Sonlu Elemanlar Yönteminin mantığı aşağıdaki dört madde üzerinde özetlenebilir [43];

- Çözüm bölgesinin sayısı sınırlı değerde alt bölgelere indirgenmesi
- Ortaya çıkan eşitliklerin uygun yöntem ile türetilmesi
- Alt bölgelerin birleşimi
- Eşitlik sistemlerinin çözümü

Çözüm bölgesi, “*mesh*” denilen alt bölgelerden oluşmaktadır ve gerektiğinde bazı alt bölgelere daha hassas çözümler yapılabilir. Mesh elemanı ne kadar çok oluşturulursa çözüm o kadar hassas olur. Doğruluk ve benzetim süresi, mesh eleman sayısına bağlıdır. Eleman sayısı ve doğruluk artarken, benzetim süresi de artmaktadır [44].

#### 4.2. Transformatörün Benzetim Çalışması

Önceki bölümde açıklandığı gibi, fotovoltaik panellere bağlı durumdan transformatörler olumsuz olarak etkilenmektedir. Oluşabilecek önemli etkilerden biri daha fazla kayıp meydana gelmesidir. Bu durumda, transformatör üzerinde detaylı olarak analiz yapılmalıdır. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elektromanyetik alan problemleriyle ilgili analiz yapmak için genel olarak aşağıdaki adımlar takip edilmelidir [38,40];

1. Ön işleme (*Pre-processing*): elektromanyetik alan problemi tanımlanması
2. İşleme (*Processing*): mevcut probleme ait sayısal çözüm üretilmesi
3. İşlem sonrası (*Post-processing*): elde edilen çözümler ile elektromanyetik alan incelenmesi

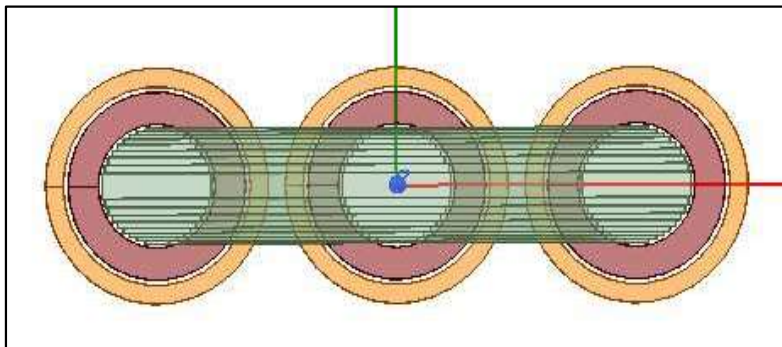
Bu çalışmada yer alan benzetim programına dayalı analizler yukarıdaki adımlara göre yapılmaktadır.

Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı bilgisayar destekli mühendislik benzetim uygulamalarının kullanımının avantajları farklı açılardan aşağıdaki gibi özetlenebilir [18];

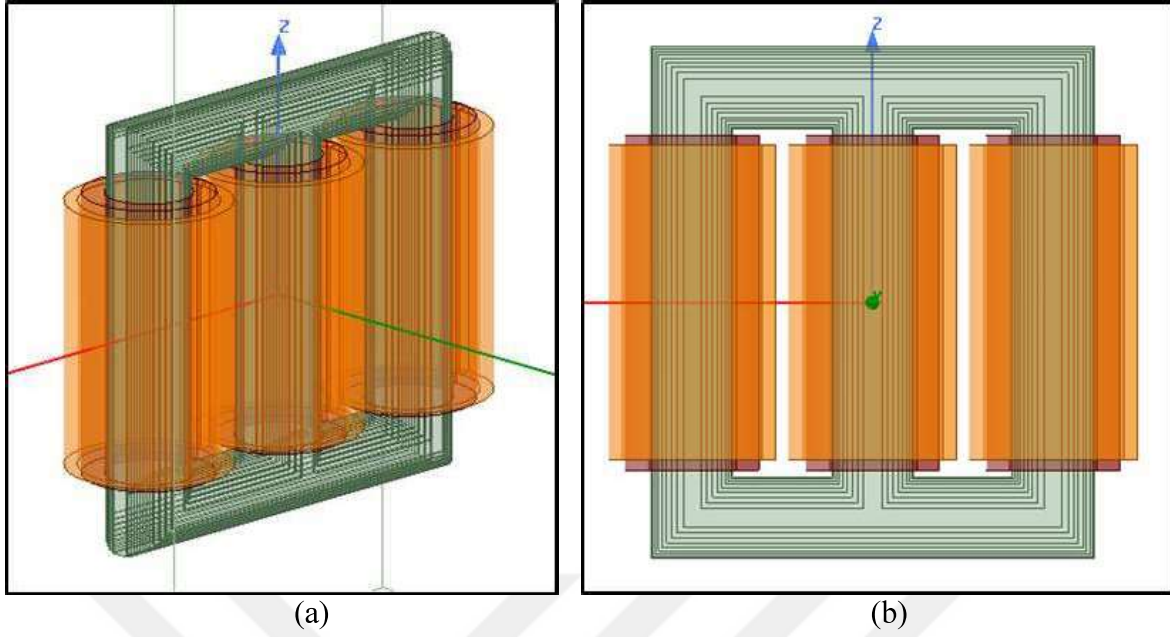
- Bilimsel : Teorileri pratik uygulamaya geçirebilmek
- Tasarım : Prototip tasarımında kolaylık, zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak
- Optimizasyon : Prototip tasarımında kolaylık, zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak
- Eğitim : Manyetik alan gibi anlaşılması zor olan konuları görsel hale getirebilmek

ANSYS firmasının Maxwell yazılımı, elektrik makinelerin analizi için yaygın olarak kullanılan bilgisayar destekli benzetim uygulamasıdır. ANSYS Maxwell, Sonlu elemanlar Yöntemine dayanır ve gerçek sistemin fiziksel problemleri bilgisayar ortamında 2 veya 3 boyutlu modeller oluşturarak sistemin davranışları ile ilgili bilgi vermektedir.

Bu çalışmada, transformatör üzerinde 3 boyutlu geçici durum analizi yapılmaktadır. 3 boyutlu analiz sonucunda elde edilen kayıplar, gerçek transformatörün kayıp değerlerine daha yakın olduğu tespit edilmektedir. 3 boyut modeli, 2 boyut modeline göre daha iyi sonuçlar vermektedir [17]. 3 boyutlu modeller ile farklı açılardan elektromanyetik kuvvetlerin incelenebilmesi bu metodun başka bir avantajıdır. Ancak, 3 boyut analizinin büyük bir dezavantajı vardır. 3 boyut modelinde daha fazla mesh kullanılmaktadır. Bu nedenle, 3 boyut analizinin 100 ms'lik sürede çalıştırılması ortalama olarak 24 saat harcamaktadır.



Resim 4.1. Üç boyut transformatörün üstten görünümü



Resim 4.2. Farklı açılardan; a) yandan b) önden üç boyut transformatör tasarımı

#### 4.2.1. Sınır koşulları (*Boundary conditions*)

Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı bilgisayar destekli benzetim çalışmalarında sınır koşulları dikkate alınmalıdır. Dirichlet ve Neumann sınır şartları, önemli ölçüde kısmi diferansiyel eşitliklerin probleminin boyutunu küçültmek için uygulanmaktadır [18]. Sorunu doğru tanımlamak ve etkili bir şekilde doğru çözüm elde etmek için sınır koşullarının uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir.

##### Dirichlet sınır koşulu

Vektör potansiyelin değeri, modelin sınırında tanımlanmaktadır ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$A = A_0 \quad (4.1)$$

Homojen olmayan Dirichlet sınırı, akının z-yönünde herhangi bir değişiklik olmadığı kabul edilerek iki sınır arasında öngörülen akıyı hesaplamak için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır. Eşitlikteki L, iki sınır arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

$$\oint B \cdot ds = \oint A \cdot dl = L(A_2 - A_1) \quad (4.2)$$



### Neumann sınır koşulu

Neumann sınır koşulu, sınır boyunca yüzeyin normal türevini belirtmektedir. Bu koşulda, yüzey sınıra diktir yani yüzey normaline göre türevi sifıra eşit olmalıdır. Homojen formu aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (4.3)$$

### 4.2.2. Transformatörün modellenmesi

Bu çalışmada 250 kVA dağıtım transformatörü *ANSYS Electronics Desktop* 19.2 versiyonu ile modellenip analiz yapılmaktadır. Çalışmada incelenen transformatörün parametreleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. 250 kVA transformatörün parametreleri

| Transformatörün Parametreleri                |                    |                  |          |
|----------------------------------------------|--------------------|------------------|----------|
| Transformatör Modeli                         | Hermetik           |                  |          |
| Anma gücü                                    | 250 kVA            |                  |          |
| Anma giriş gerilimi                          | 11 kV              |                  |          |
| Anma çıkış gerilimi                          | 0,4 kV             |                  |          |
| Primer anma akımı                            | 13,12 A            |                  |          |
| Sekonder anma akımı                          | 360,84 A           |                  |          |
| Anma frekans / Faz sayısı                    | 50 Hz / 3          |                  |          |
| Boşta akımın yüzdesi (%I <sub>0</sub> + %30) | % 0,23             |                  |          |
| Bağlantı grubu                               | Dy <sub>n</sub> 11 |                  |          |
| Boşta kayıp                                  | 288 – 300 W        |                  |          |
| Yükte kayıp                                  | YG <sub>DC</sub>   | AG <sub>DC</sub> | AC kaybı |
|                                              | 1 202 W            | 961 W            | 109 W    |
| Manyetik akı                                 | 1,49 T             |                  |          |
| Isınma (sıcaklık)                            | Ortam              | Yağ              | Sargı    |
|                                              | 40°C               | 60°C             | 65°C     |
| Soğutma tipi                                 | ONAN               |                  |          |

Transformatörün modellenmesi ve analizi aşağıda verilen aşamaları kapsar. Aşağıdaki adımlardan sonra benzetim süreci başlamaktadır.

1. Çözüm tipi belirlenmesi
2. Model oluşturulması
3. Malzeme tanımlanması
4. Parametre belirlenmesi
5. Mesh oluşturulması
6. Simülasyon bölgesi tanımlanması
7. Uyarım devresi kurulması
8. Analiz kurulumu (*Analysis setup*) ayarlanması

### Çözüm tipi belirlenmesi

ANSYS Maxwell, aşağıdaki çözüm tipleri sunmaktadır [45];

Statik Manyetik : DC akım, statik harici manyetik alanı ve kalıcı mıknatıs sebepleriyle meydana gelen statik manyetik alanları, kuvvetler, torklar ve endüktansların hesaplamaları.  
(*Magnetostatic*)

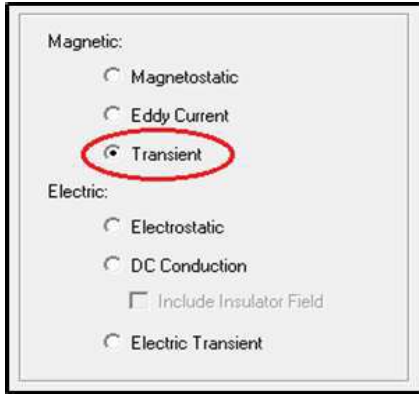
Eddy Akımı : AC akımı ve salınımlı harici manyetik alan sebepleriyle meydana gelen manyetik alanlar, kuvvetler, torklar ve empedansların hesaplamaları.  
(*Eddy Current*)

Geçici Durum : Zamanla değişen veya hareket eden elektrik kaynaklarından geçici durum manyetik alan hesaplamaları.  
(*Transient*)

Statik Elektrik : Elektrik yüklerinden meydana gelen statik elektrik alanları, kuvvetler, torklar ve kapasitansların hesaplamaları.  
(*Electrostatic*)

DC İletimi : Elektrik potansiyelinden hesaplanan gerilim, elektrik alan ve akım yoğunluğu analizleri.  
(*DC Conduction*)

Geçici Durum Elektrik : Zamanla değişen gerilim, yük dağılımı ve uyarma akımının sebepleriyle meydana gelen geçici durum elektriksel alan hesaplamaları.  
(*Transient Electric*)



Resim 4.3. Çözüm tipi seçenekleri

Manyetik alan, indüklenen akım ve gerilim, akı bağları ve kayıplar gibi analizin çıktıları zaman fonksiyonunda ifade edilmesi için çözüm tipi olarak *Transient* seçilmektedir.

#### Model oluşturulması

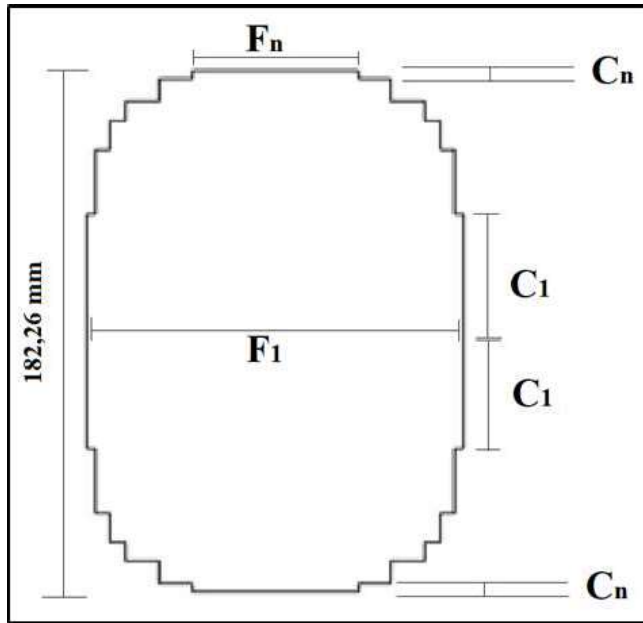
Transformatör çizimi Maxwell'de veya import yapılarak *Solid Works* yazılımı gibi başka çizim programında yapılabilir. Bu çalışmada, transformatörün bütün bileşenlerinin çizimi doğrudan Maxwell üzerinde yapılmaktadır. 3 boyutlu model çiziminde dikkat edilmesi gereken parametreler aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. 250 kVA transformatörün teknik bilgileri

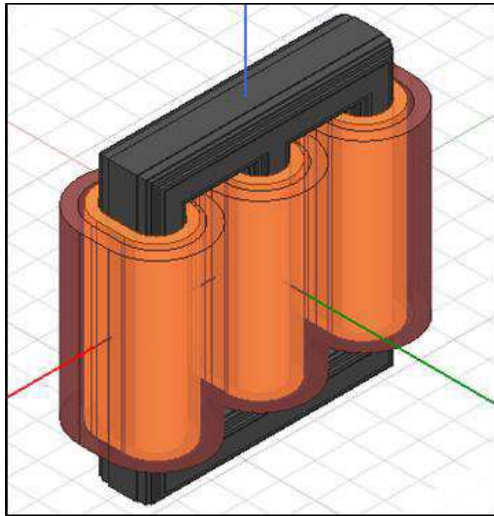
| YG sargısı          |                        |
|---------------------|------------------------|
| Malzeme türü        | Alüminyum              |
| Sarım sayısı        | 1810                   |
| Sargı yüksekliği    | 462 mm                 |
| Sargı kalınlığı     | 33 mm                  |
| AG sargısı          |                        |
| Malzeme türü        | Alüminyum              |
| Sarım sayısı        | 38                     |
| Sargı yüksekliği    | 540 mm                 |
| Sargı kalınlığı     | 26 mm                  |
| Nüve                |                        |
| Malzeme kalınlığı   | 0,23 mm                |
| Kesit alanı         | 18.360 mm <sup>2</sup> |
| Boyunduruk uzunluğu | 596 mm                 |
| Yan bacak uzunluğu  | 700 mm                 |

Çizelge 4.4. Nüve saç bilgileri

| Nüve saç bilgileri |                 |
|--------------------|-----------------|
| $F_1 \dots F_n$    | $C_1 \dots C_n$ |
| 120                | 41,06           |
| 110                | 22,50           |
| 100                | 10,13           |
| 90                 | 6,75            |
| 70                 | 7,88            |
| 50                 | 2,81            |



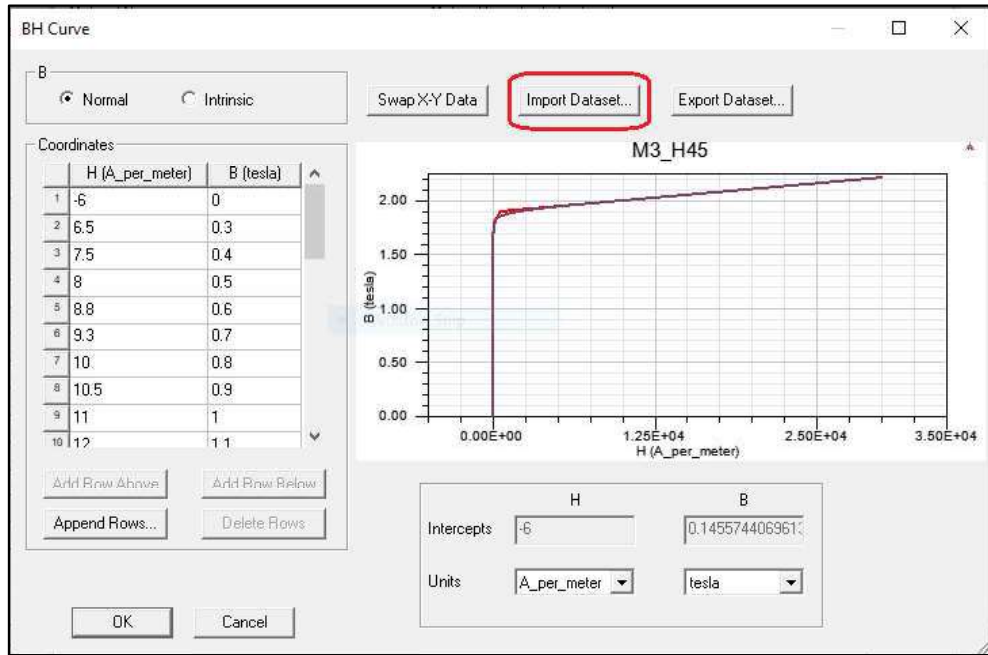
Resim 4.4. Nüve kesiti



Resim 4.5. Üç faz üç bacaklı transformatörün nüve ve sargı modeli

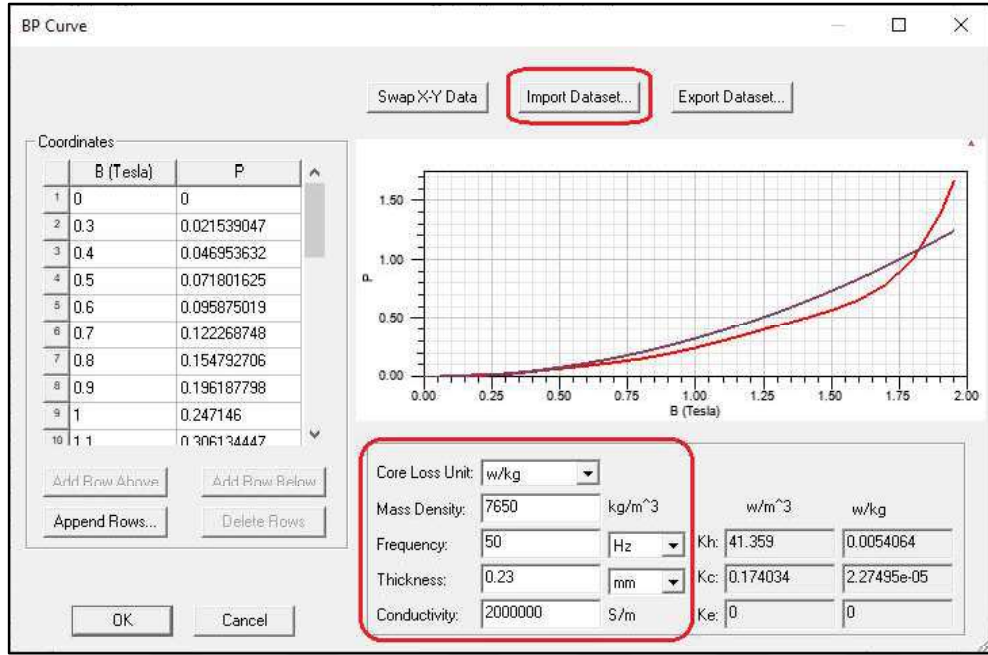
### Malzeme tanımlanması

Transformatörün nüvesinde M3 tipinde elektriksel çelik malzeme kullanılmaktadır. Histerezis eğrisi, malzeme tanımlanmasında önemli hususlardan biridir. Histerezis eğrisi, manyetik alan yoğunluğu (B) ile manyetik alan şiddeti (H) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. B ve H değerleri tabloda doldurularak veya *txt* dosyası yüklenerek otomatik olarak eğri oluşturulur.

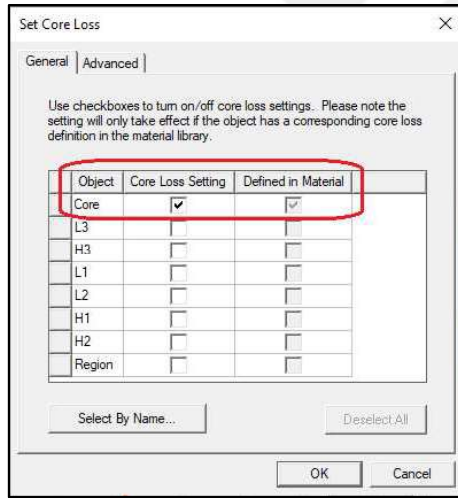


Resim 4.6. B-H eğrisi

Demir kaybı hesaplaması için B-P eğrisi, kütle yoğunluğu, frekans, malzeme kalınlığı ve iletkenlik gibi parametreler belirtilmelidir. B-P eğrisi demir kaybı karakteristiklerini göstermektedir. Bu parametreler doldurularak boşta kayıp hesaplamasında kullanılan Histerezis Kayıp Faktörü (Kh) ve Eddy Akım Kayıp Faktörü (Kc) otomatik olarak hesaplanmaktadır. Demir kaybı hesaplaması için gereken parametreler aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Resim 4.7. B-P eğrisi



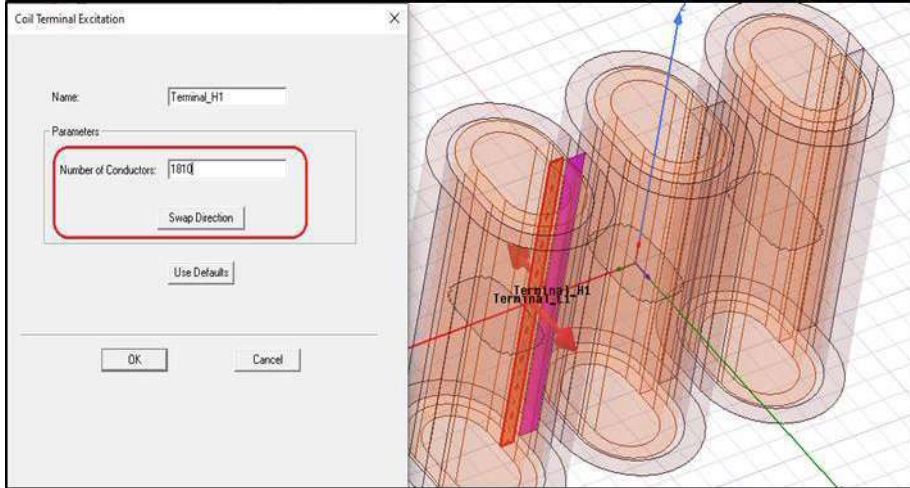
Resim 4.8. Demir kaybı hesaplamak için ayarları

Malzemede kayıp parametreleri tanımlandıktan sonra, yukarıdaki resimde gösterildiği gibi demir kaybı hesaplama seçeneği aktifleşecektir. Ek olarak, Eddy akım etkisi otomatik olarak verilen kayıp faktöründen hesaplandığı için ayarlardaki Eddy akım etkisi kapatılmalıdır.

### Parametre belirlenmesi

Transformatörün önemli parametrelerden biri sarım sayısıdır. Her bir faz için sarım sayısı belirtilmelidir. Menüden *Maxwell 3D* → *Excitations* → *Assign* → *Coil Terminal* seçilerek

şekilde gösterildiği gibi yeni pencere açılır. *Number of Conductor* kutucuğuna sarım sayısı girilmektedir. Sarım sayısı birden fazla olduğu için *Stranded* seçeneği seçilmelidir. Ayrıca, primer ve sekonder sargılar birbirine göre ters yönde sarıldığı için primer ve sekonderin ok yönlerinin farklı olmasına dikkat edilmelidir.



Resim 4.9. Sarım sayısı belirlenmesi

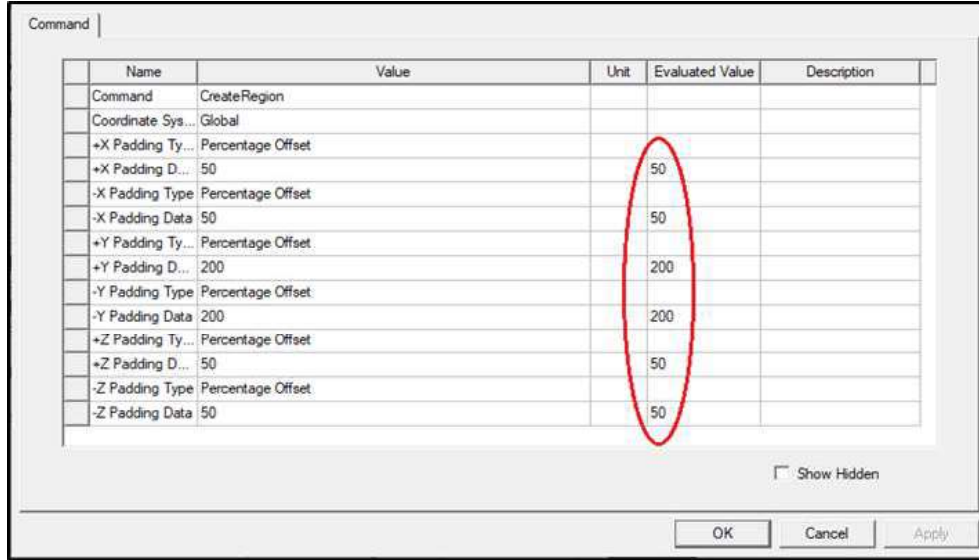
### Mesh oluşturulması

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi Sonlu Elemanlar Yönteminin prensibi sonlu sayıda *mesh* denilen küçük elemanlar oluşturarak analiz yapmaktır. Geometrik modelin şekline ağ oluşturulmasına mesh işlemi denmektedir. Güvenilir sonuçlar elde edilmesi için yüksek sayıda mesh oluşturulmalıdır. Geçici durum analizinde otomatik olarak mesh oluşturulmaz. Manuel olarak *Mesh Operation*'dan sınır değerleri girilmesi gerekmektedir. Hacimsel mesh üretmek isteniyorsa seçeneklerden *Inside Selection* seçilmektedir. Yüzeysel mesh için ise *On Selection* seçilmektedir. Bu çalışmada, transformatörün nüve ve sargılarına hacimsel *mesh* üretilmektedir.

### Benzetim bölgesi tanımlanması

Maxwell'de analiz yapmak için tasarlanan modeller benzetim bölgesi içerisine yerleştirilmelidir. Benzetim bölgesinin malzemesi vakum olarak belirtilir. Transformatörün manyetik ve elektrik alan dağılımları sadece transformatörün etraflarında yoğunluk gösterdiğinden, bu analiz için şekildeki gibi küçük oranda benzetim bölgesi yeterli

olmaktadır. Simülasyon bölgesi tanımlaması önemli bir role sahiptir. Şekli ve genişliği/büyüklüğü analiz edilecek modele uyumlu değil ise *Mesh* doğru olarak oluşturulamaz. Mesh sayısı düşük olur ve gerçek bir sonuç vermez.



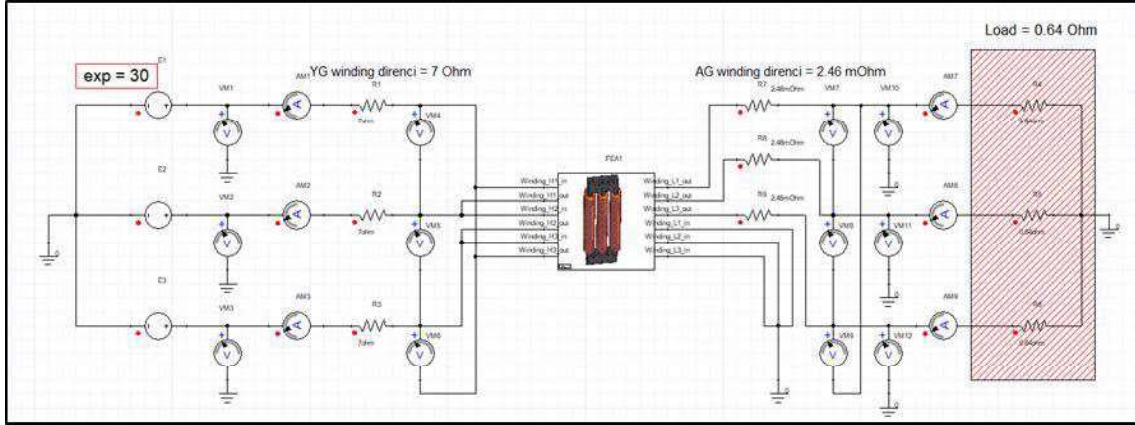
Resim 4.10. Benzetim bölgesi tanımlanması

#### Uyartım devresi kurulması

Geçici durum Maxwell analizinde tasarlanan transformatörün beslenmesi 3 farklı yöntem ile yapılabilir. Birinci yöntem, sargılardan iletilen akımın belirlenmesidir. Bu yöntem genellikle statik veya harmonik analizlerde kullanılır [18]. İkinci yöntem, anma gerilimin ve sargı dirençlerinin belirlenmesidir. Transformatörün boşa çalışma durumunda analiz yapmak için bu yöntem uygulanabilir. Boşa çalışmada, sekonder tarafın açık devre gibi davranması için sekonder sargının direnci Mega-Ohm ( $M\Omega$ ) mertebesinde yazılmaktadır. Üçüncü yöntem ise harici bir uyartım devresine bağlanmasıdır. Bu yöntem başka bir elektrik devre çizim programı ile gerçekleştirilir ve transformatörün bağlantı gruplarına göre analiz yapılmaktadır. Bu çalışmada, transformatörün beslenmesi için ANSYS firmasından *Twin Builder* yazılımı kullanılmaktadır. *Co-Simulation* aracılığıyla Maxwell ile *Twin Builder* arasında bağlantı sağlanmaktadır.

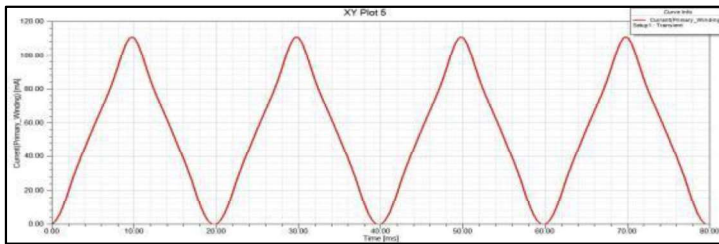
Aşağıdaki şekilde gösterilen harici uyartım devresi, transformatörün bağlantı gruplarına göre tasarlanmaktadır. Bu çalışmada incelenen transformatör delta-yıldız olarak bağlanmaktadır.



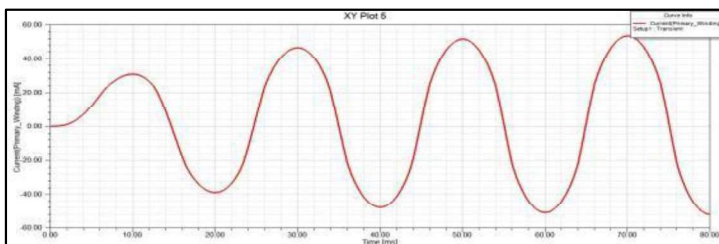


Resim 4.11. Devre çizimi ve sargı bağlantıları

Transformatörler, ilk devreye alındığı zaman çok yüksek akım çekerler. Bu akıma enerjilendirme (inrush) akımı denir. Transformatörün enerjilendirilmesi esnasında transformatör doyum bölgesinde çalışmaktadır [46]. Çalışma noktasının bu bölgeye doğru kayması transformatörün elektriksel parametrelerinin doğru olarak sağlanamadığı anlamına gelmektedir. Transformatörün enerjilendirme (inrush) akımının olumsuz etkisinden kurtulmak için gerilim eşitlikleri eksponansiyel ile çarpılır. Böylece, her fazın giriş gerilimi sıfırdan başlanıp yavaş yavaş kararlı duruma ulaşmaktadır. Eksponansiyeldeki katsayının büyüklüğü kararlı duruma ulaşma süresine bağlıdır. Katsayı ne kadar büyük seçilirse *steady-state* süresi o kadar kısa olur. Ancak, eksponansiyel katsayısı çok büyük olursa eksponansiyel eşitliğin sonucu 1 olup eksponansiyelin etkisi yok olur.



Resim 4.12. Exponansiyel uygulanmadan önce tek faz transformatörün primer akımı



Resim 4.13. Exponansiyel uygulandıktan sonra tek faz transformatörün primer akımı

Bu çalışmada, uyartım devresinde yerleştirilen gerilim kaynakları aşağıdaki gibi yazılmaktadır;

$$V_a = V_{peak} (1 - e^{(-150*time)}) \sin(2\pi f * time) \quad (4.4)$$

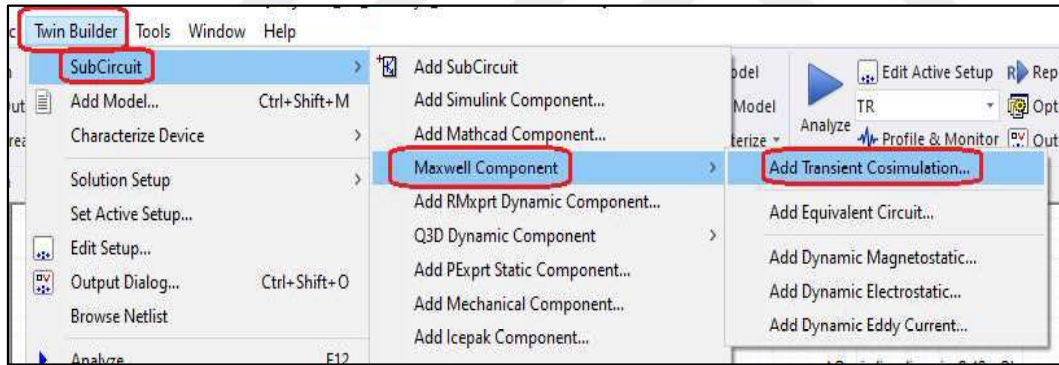
$$V_b = V_{peak} (1 - e^{(-150*time)}) \sin\left(2\pi f * time + \left(\frac{2}{3}\pi\right)\right) \quad (4.5)$$

$$V_c = V_{peak} (1 - e^{(-150*time)}) \sin\left(2\pi f * time + \left(\frac{4}{3}\pi\right)\right) \quad (4.6)$$

Transformatörlerde sargı dirençleri mevcuttur. Bu dirençler Omik kaybına sebep olmaktadır. Her faza ait sargı direnci aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$R_{primer} = \frac{P_{loss(YG)}/3}{I_0^2} = \frac{1202/3}{7,57^2} = 6,992 \cong 7 \Omega \quad (4.7)$$

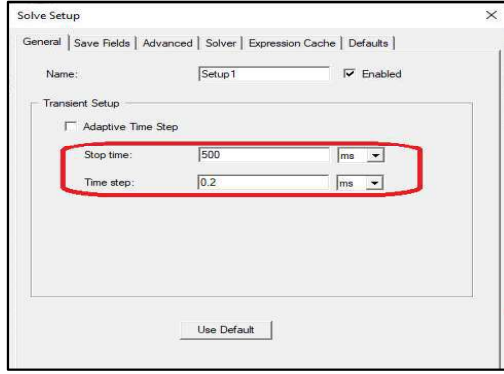
$$R_{sekonder} = \frac{P_{loss(AG)}/3}{I_0^2} = \frac{961/3}{360,84^2} = 2,46 \text{ m}\Omega \quad (4.8)$$



Resim 4.14. Maxwell - *Twin Builder* bağlantı kurulumu

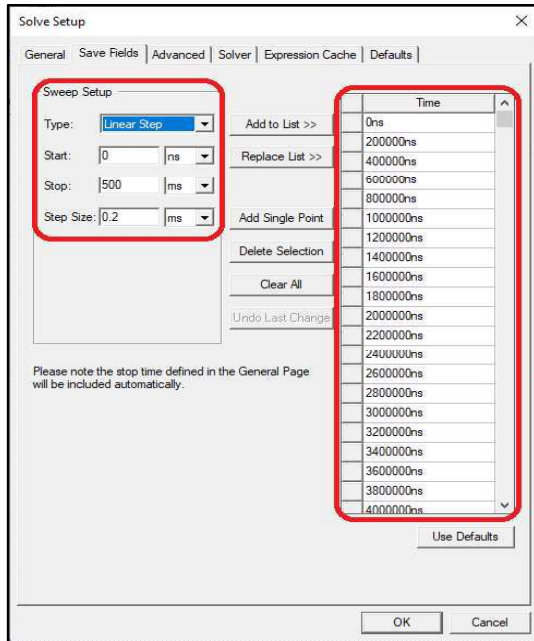
#### Analiz kurulumu (*Analysis setup*) ayarlanması

Geçici durum analizinde çözüm süreci ve örnekleme zamanı belirlenmelidir. Örnekleme zamanı azaltıldığında zaman daha hassas bir dalga şekli çizdirilir ve böylece analiz sonucunun doğruluğu artmaktadır. Örnekleme zamanı periyoda bağlı seçilmektedir. Bu çalışmada, 0,2 ms'lik adımlarda örnekleme alınmıştır. Böylece, bir periyotta 100 tane örnekleme alınmıştır.

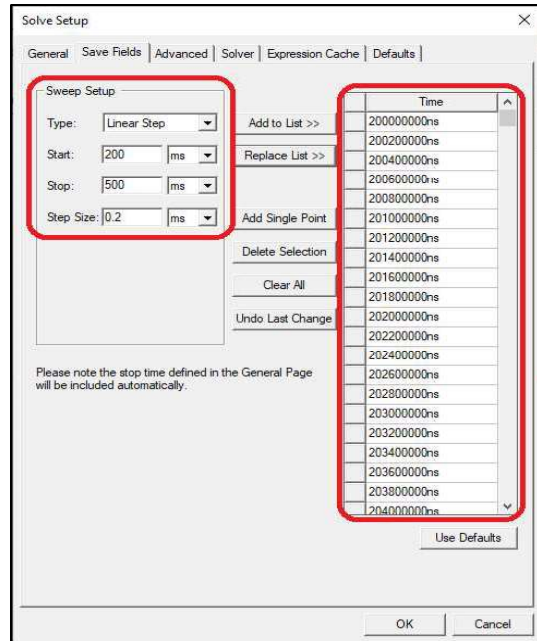


Resim 4.15. Benzetim süresi ve örnekleme zamanı belirlenmesi

Maxwell yazılımı, alan hesaplamaları çözüm süreci boyunca sadece belirli zaman aralığında kaydedilmesine izin vermektedir. Geçici durum genellikle ilk üç veya dört periyot boyunca sürmektedir. Bu nedenle, geçici durum analizinde kararlı duruma ulaşmak için bir miktar süre gerekli olmaktadır. Bu süre eksponansiyel değerinin büyüklüğü ayarlanarak kısaltılabilir. Analiz süresi ve örnekleme zamanı belirlendiğinde ulaşma süresi göz önüne alınmalıdır. Analiz süresini azaltmak adına geçici durum sürecinde alan hesaplamaları kaydedilmeyebilir. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi alan hesaplamaları sadece 200 ms'den sonra kaydedilebilir. Alan kaydetme zaman aralığı ve örnekleme zamanı doldurulduktan sonra listeye eklendiğine dikkat edilmelidir. Bu çalışma için transformatörün 500 ms'lik süreye kadar çalıştırılması yeterli bulunmuştur.



(a)

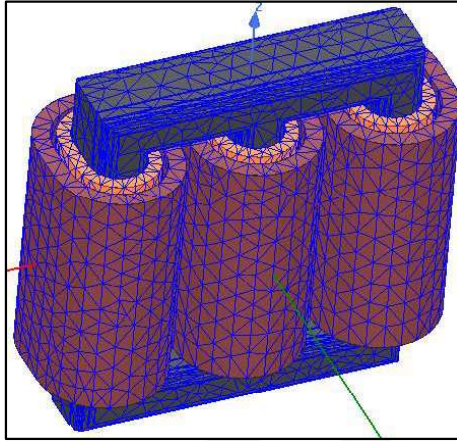


(b)

Resim 4.16. Alan hesaplamaları a) 0 ms'den ve b) 200 ms'den kaydedilmesi

### 4.2.3. Analiz sonuçları

İşleme (*processing*) süresi bittikten ve sayısal çözümler üretildikten sonra elde edilen çözümler görsel haline getirilmektedir. Bu aşamaya işlem sonrası (*post-processing*) denir. Bu aşamada, akımlar, gerilimler, manyetik akı ve manyetik akı yoğunluğu grafik şeklinde raporlanmaktadır. Ayrıca, Maxwell yazılımında üretilen mesh sayısı ve dağılımı aşağıdaki gibi görüntülenebilir.



Resim 4.17. Üç boyutta transformatör modelinin mesh dağılımı

Simulation: 

Setup1

Design Variation: 

VpeakH="15556.349186104V"

...

Profile

Force

Torque

Mesh Statistics

Total number of elements: 68770

|        | Num Tets | Min edge length | Max edge length | RMS edge length | Min tet vol | Max tet vol    | Mean tet vol | Std Devn (vol)  |
|--------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|----------------|--------------|-----------------|
| Core   | 17255    | 11.8709         | 87.197          | 52.2876         | 12.1997     | 29139.4        | 3455.47      | 3694.26         |
| H1     | 2857     | 24.8822         | 67.6092         | 53.4185         | 846.359     | 19265.6        | 6090.53      | 2676.32         |
| H2     | 3023     | 25.3073         | 68.3206         | 53.4089         | 537.074     | 19206.1        | 5753.41      | 2806.65         |
| H3     | 2954     | 23.2636         | 67.3905         | 53.1788         | 382.365     | 15077.7        | 5889.05      | 2672.5          |
| L1     | 3992     | 14.3582         | 70.7637         | 41.2662         | 88.2314     | 9539.85        | 2407.19      | 1238.74         |
| L2     | 3662     | 18.9605         | 61.0265         | 42.4464         | 42.4731     | 10132.7        | 2622.32      | 1324.74         |
| L3     | 3928     | 17.542          | 68.7989         | 41.3371         | 144.25      | 9696.99        | 2444.91      | 1218.96         |
| Region | 31099    | 8.99873         | 2385.54         | 138.859         | 1.75962     | 1.5783e+008... | 160205       | 2.30388e+006... |

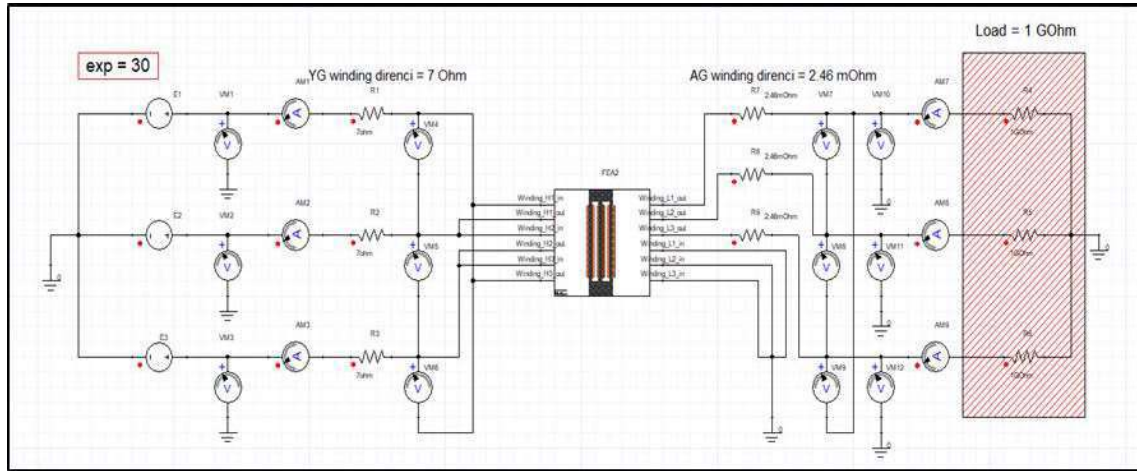
Export...

Close

Resim 4.18. Benzetim sonucunda üretilen eleman ve mesh sayısı



### Boşta çalışma durumundaki analiz sonuçları



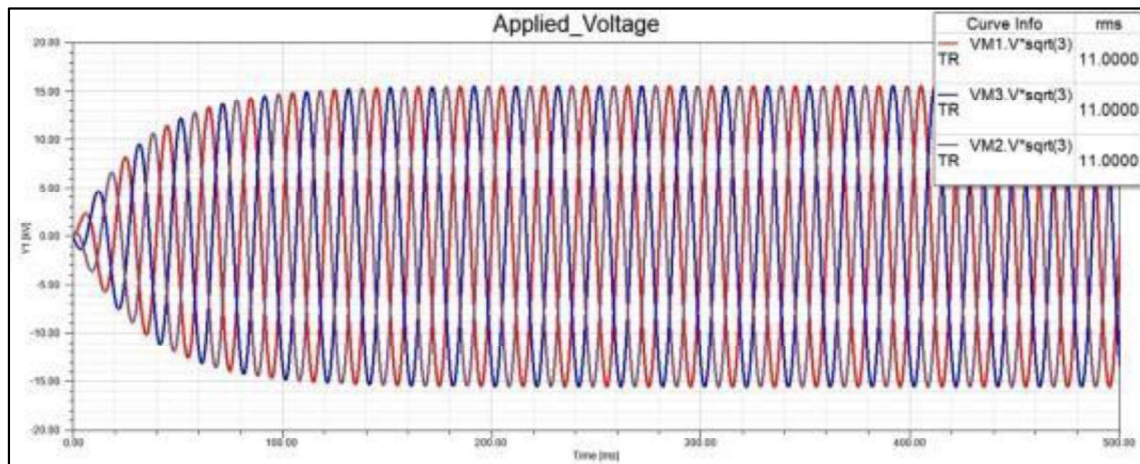
Resim 4.19. Boşta çalışma durumunda transformatörün bağlantı şekli

Üç boyutlu boşta çalışma durumunda uygulanan giriş gerilimi Resim 4.18 ve Resim 4.19’da verilmiştir. Her fazın giriş gerilimi sıfırdan başlanıp yavaş yavaş kararlı duruma (*steady-state*) ulaşmaktadır. Kararlı duruma ulaşma süresi yani geçici durum (*transient*) süresi, eksponansiyel katsayısına bağlıdır. Katsayının büyüklüğü 30 olarak seçilmiştir.

$$1 - e^{-x \sigma} = 0.95 \quad (4.9)$$

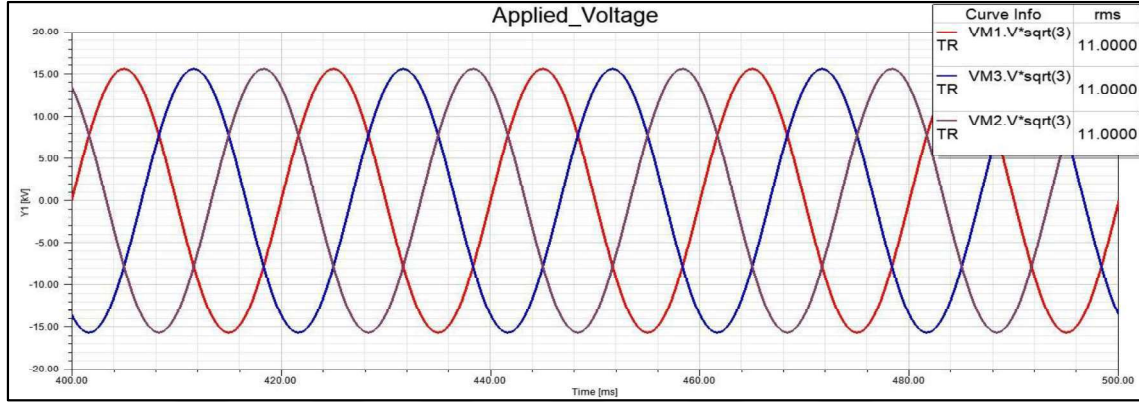
$$1 - e^{-(30 \sigma)} = 0.95 \quad (4.10)$$

$$\hookrightarrow \sigma = \frac{-\ln(1-0.95)}{30} = 0.09986 \text{ s} \cong 100 \text{ ms} \quad (4.11)$$



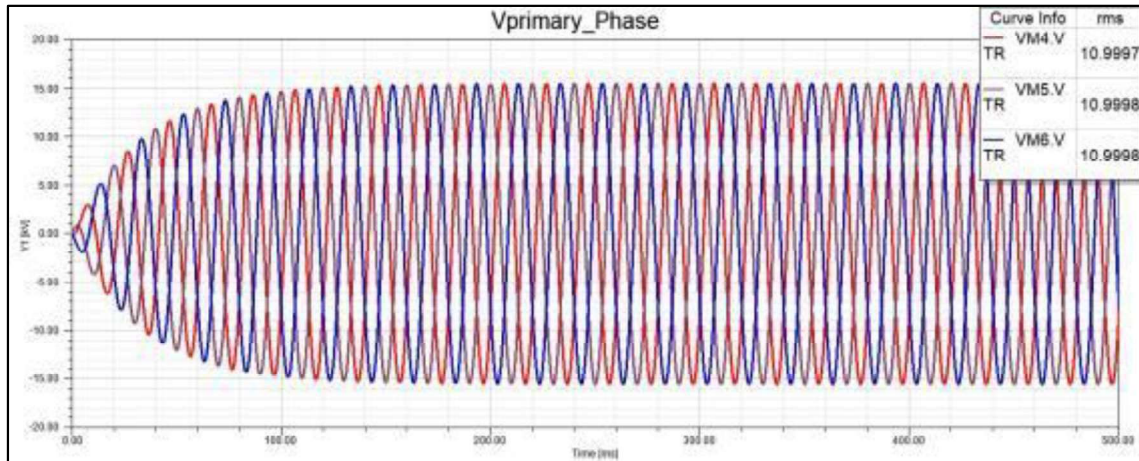
Resim 4.20. Transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu

Eşitlikteki  $\sigma$ , geçici durum süresini ifade etmektedir. Dalga formunda gösterildiği gibi 100 ms'den sonra giriş gerilimi ancak kararlı duruma ulaşmaktadır. Etkin değeri hesaplamak için 100 ms'den sonraki veriler kullanılmaktadır. Uygulanan giriş geriliminin etkin (rms) değeri 11 kV'tur.

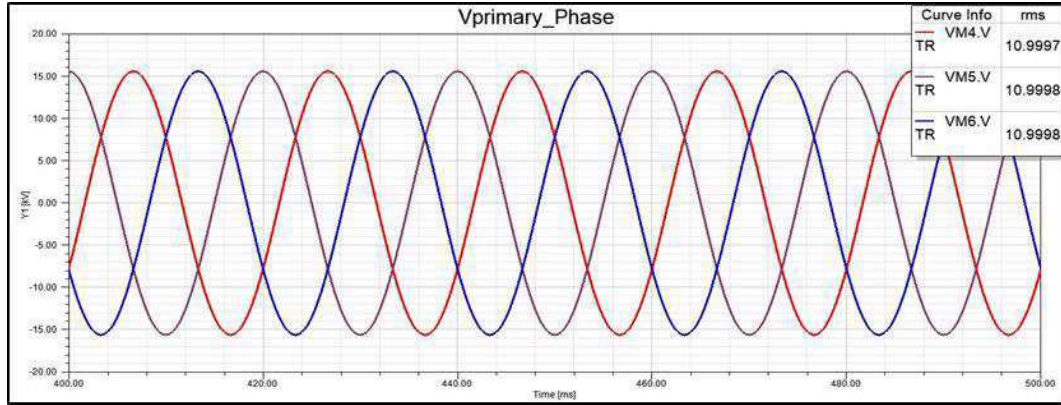


Resim 4.21. Transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu (yakından gösterim)

Primer sargısına indüklenen gerilim aşağıdaki Resim 4.20 ve Resim 4.21'de verilmektedir. Primer tarafı delta bağlı olduğu için faz ve hat geriliminin değerleri aynı olmaktadır. Analiz sonucuna göre primer sargısına indüklenen gerilimin etkin değeri yaklaşık olarak 11 kV bulunmaktadır.

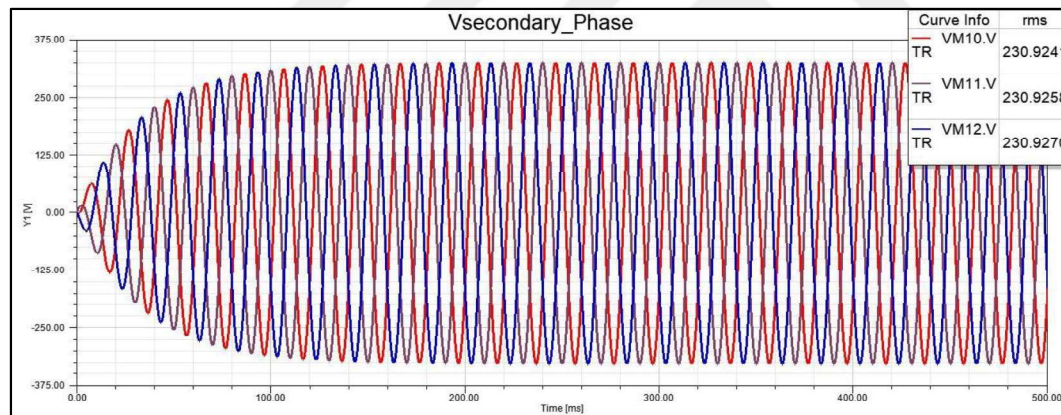


Resim 4.22. Primer sargının faz geriliminin dalga formu

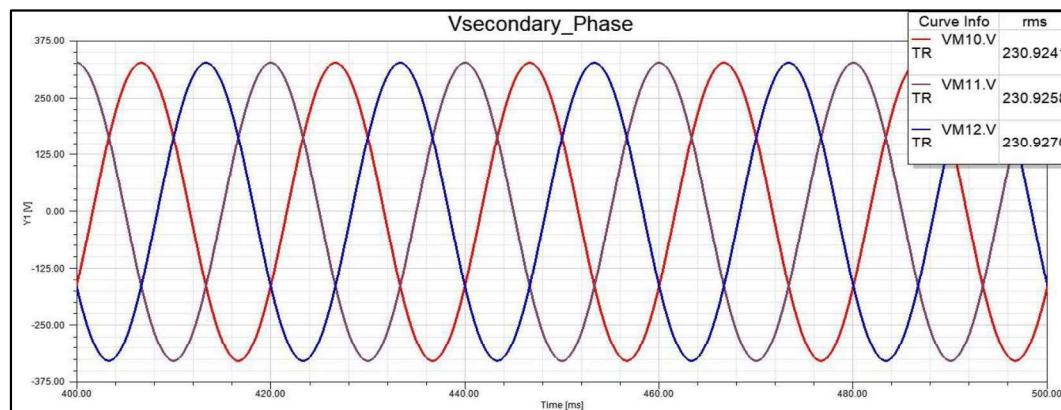


Resim 4.23. Primer sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

Sekonder sargının faz ve hat geriliminin dalga formları sırayla Resim 4.24, Resim 4.25, Resim 4.26 ve Resim 4.27'de gösterilmektedir. Analiz sonucuna göre sekonder tarafının hat gerilimi 399.97 V olarak bulunmuştur. Analiz sonucunda elde edilen gerilim değerleri, transformatörün işaret plakasında verilen gerilim bilgilerine benzemektedir.

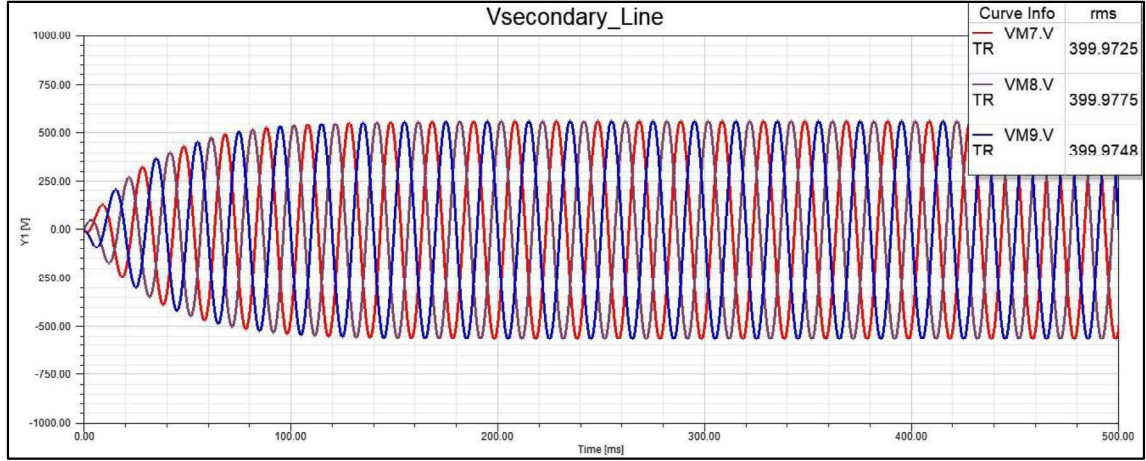


Resim 4.24. Sekonder sargının faz geriliminin dalga formu

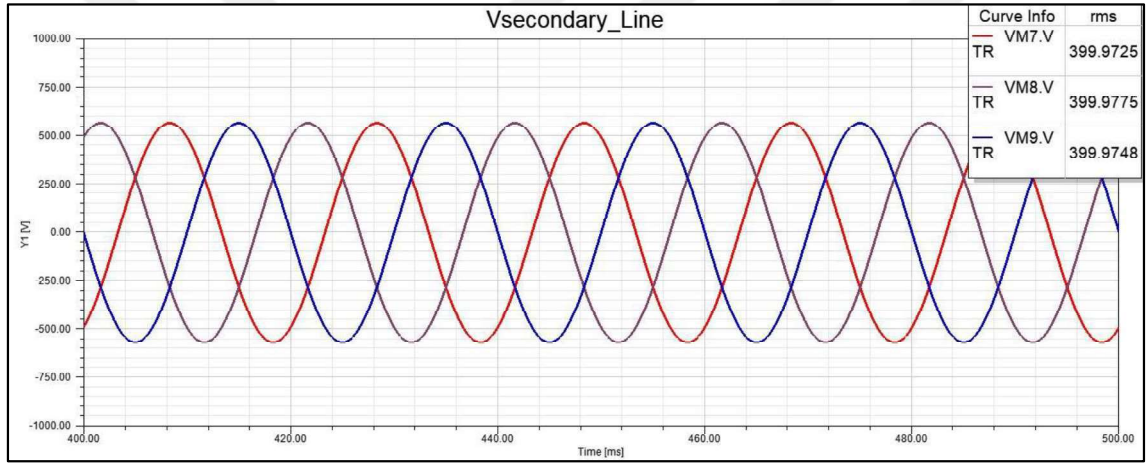


Resim 4.25. Sekonder sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim)





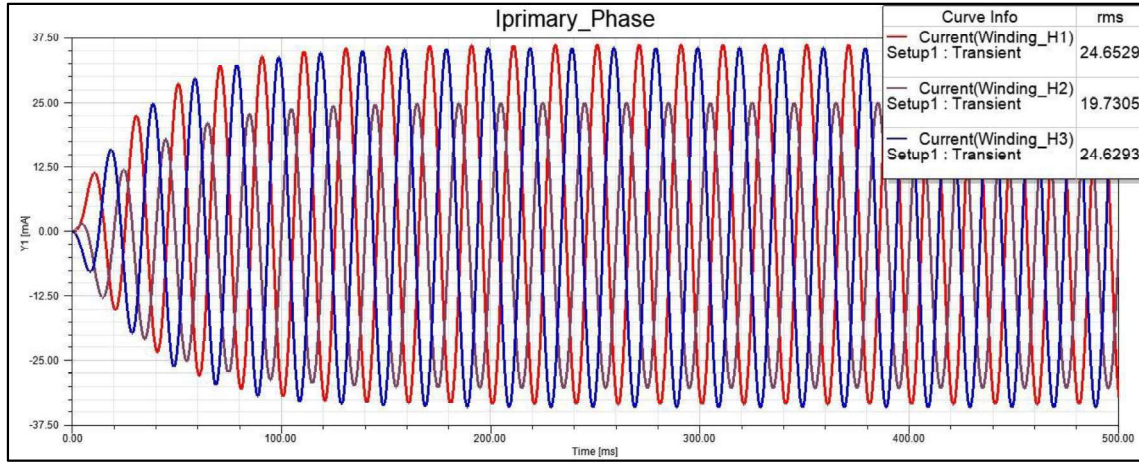
Resim 4.26. Sekonder sargının hat geriliminin dalga formu



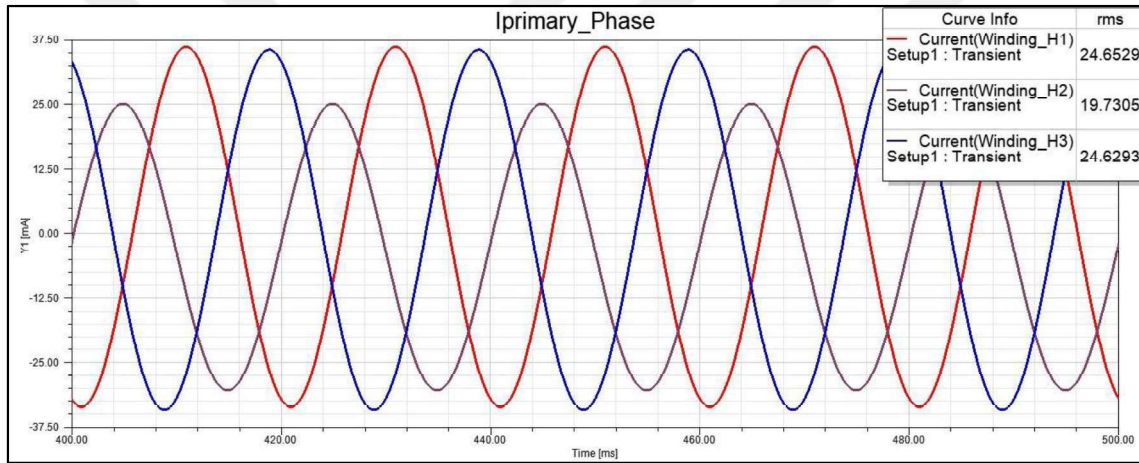
Resim 4.27. Sekonder sargının hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

Pratikte, yüksüz (*no-load*) akım, düşük gerilim sargısından elde edilmektedir. Fakat bu benzetim analizinde *no-load* akımı yüksek gerilim sargısından alınmaktadır. *No-load* akımı yüzde olarak incelendiği için düşük veya yüksek gerilim sargısından elde edilmesi fark etmemektedir. Boşta çalışma durumunda akımın dalga formu Resim 4.28 ve Resim 4.29’da verilmiştir. Üç bacaklı transformatörlerde, fazların akım değeri aynı olmamaktadır. Akımın aldığı yol daha uzun olduğu için orta bacadan geçen akımın etkin değeri bir miktar daha düşük olmaktadır.





Resim 4.28. Boşta çalışma durumunda primer akımın dalga formu



Resim 4.29. Boşta çalışma durumunda primer akımın dalga formu (yakından gösterim)

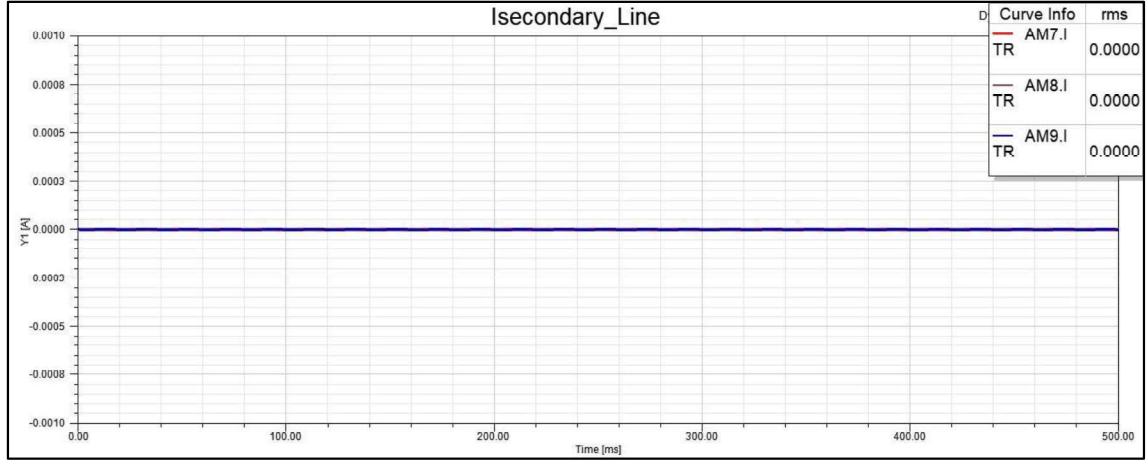
Yukarıdaki analiz sonucuna göre boşta (*No-load*) akımının etkin değeri 23,0042 mA olarak bulunmaktadır. Boşta akımın yüzde değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\% I_0 = \frac{\text{Boşta Faz Akımı}}{\text{Nominal Faz Akımı}} = \frac{23,0042 \times 10^{-3}}{13,12} \times \% 100 = \% 0.175 \quad (4.12)$$

Boşta akım, yüksek gerilimden elde edildiği için yukarıdaki formülde yüksek gerilimin nominal akım değeri kullanılmaktadır. Transformatörün işaret plakası bilgilerinde verilen boşta akım yüzde değeri ise aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$\% I_0 + \%30 = \% 0,23 \quad (4.13)$$

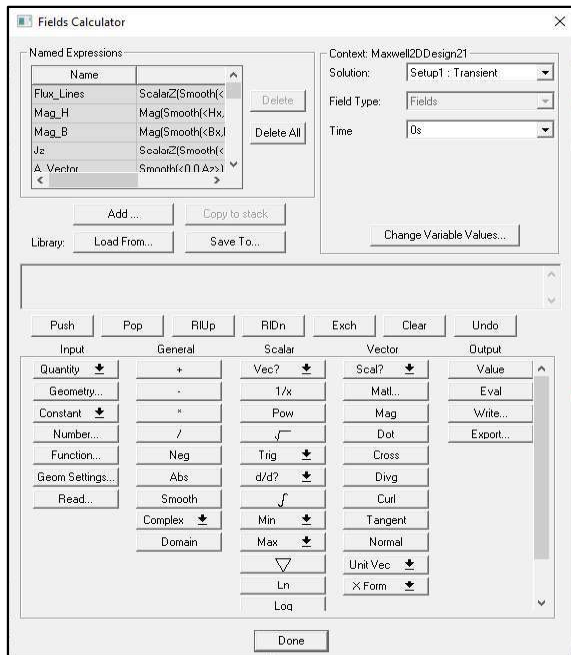
$$\% I_0 = \% 0,23 \times \frac{100}{130} = \% 0.177 \quad (4.14)$$



Resim 4.30. Boşta çalışma durumunda sekonder akımın dalga formu

Boşta çalışma durumunda sekonder tarafında yük bağlanmadığı için sekonder akım değeri Resim 4.30'da gösterildiği gibi sıfır olmalıdır. Sekonder sargısından hiç akım geçmemektedir.

Nüvenin kesit alanı ve hacmi benzetim analizi ile aşağıdaki gibi elde edilebilir. Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değerinin bulunması için, nüvenin kesit alanının bilinmesi gerekmektedir. Kesit alanı ( $A$ ), manyetik akı ( $\Phi$ ) ve manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ) Maxwell'deki hesap makinesi yardımıyla bulunmaktadır.

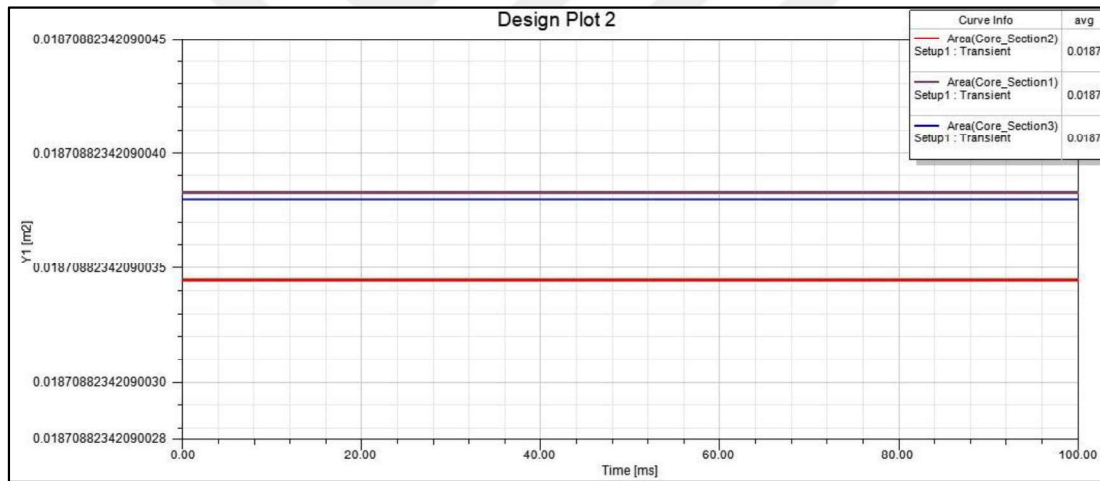


Resim 4.31. Manyetik akı hesaplaması için kullanılan hesap makinesinin pencere gösterimi

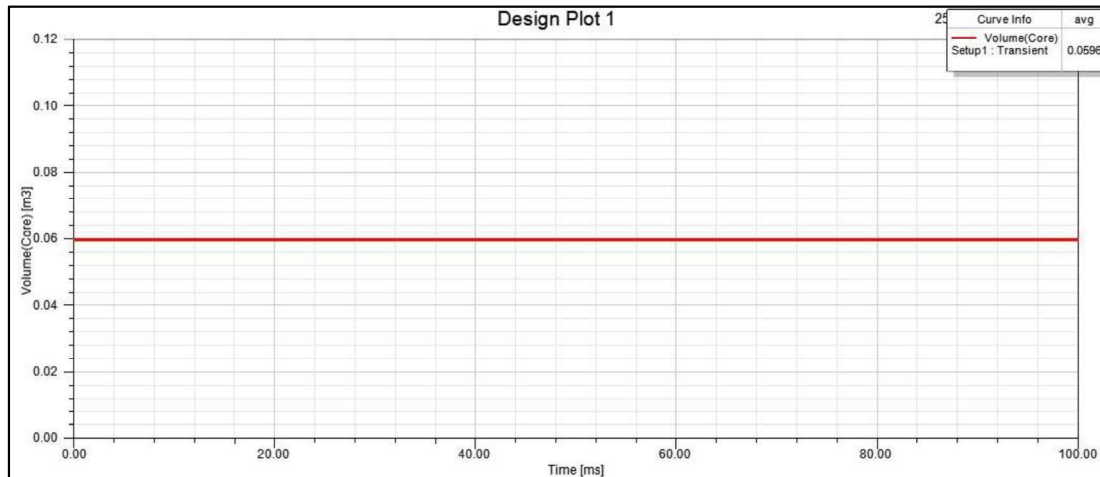
Alan ve hacim hesaplaması yapmak için aşağıdaki hesap makinesi komut sıralamaları takip edilmektedir;

- *Input* → *Number* → *Scalar* = 1 → *OK*
- *Input* → *Geometry* → *Surface (Core\_Section)* → *OK*  
(veya)  
*Input* → *Geometry* → *Volume (Core)* → *OK*
- *Scalar* → ]
- *Output* → *Eval*

Alan ve hacim hesaplama sonucu otomatik olarak sırayla  $m^2$  ve  $m^3$  olarak ifade edilmektedir. Nüvenin kesit alanının ortalama değeri  $0.0187 m^2$  olarak bulunmaktadır.



Resim 4.32. Otomatik hesaplama sonucunda nüve kesit alanı



Resim 4.33. Otomatik hesaplama sonucunda nüvenin hacmi

Belirli bir kesit alanından/yüzeyden geçen manyetik akı hesaplaması yapmak için aşağıdaki hesap makinesi komut sıralamaları takip edilmektedir;

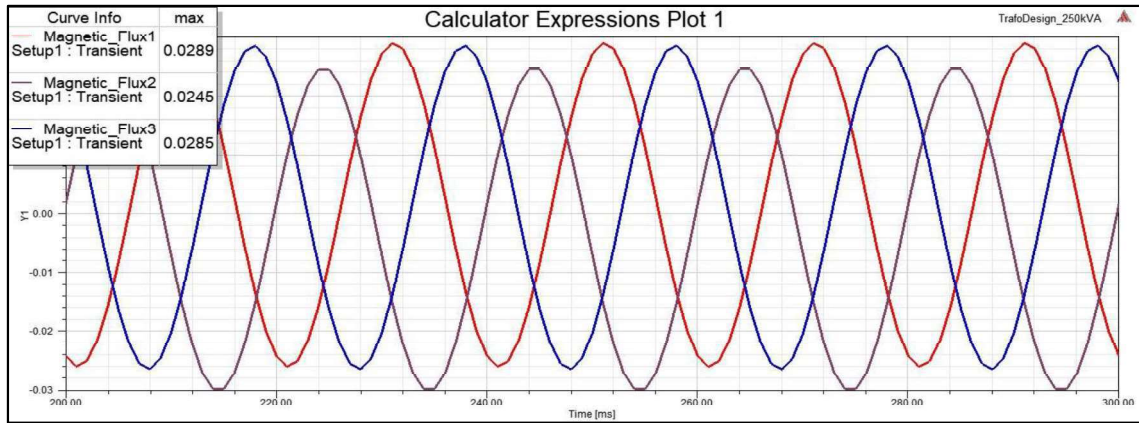
- $Input \rightarrow Quantity \rightarrow B$
- $Input \rightarrow Geometry \rightarrow Surface(Core\_Section) \rightarrow OK$
- $Vector \rightarrow Normal$
- $Scalar \rightarrow \int$
- $Output \rightarrow Eval$

Yukarıdaki işlemler, Eş. 4.15'te gösterilen manyetik akının genel formülünden gelmektedir. Nüvenin üç bacağından geçen manyetik akının maksimum değeri birbiriyle farklıdır. Ortalama değer alınırsa 0.0273 Wb bulunmaktadır.

$$\Phi_s = \int_s B \cdot n dA \quad (4.15)$$

Manyetik akı, boşta akım ile direkt olarak ilişkilidir. Bu nedenle, manyetik akının ve boşta akımın dalga formu aynı olmalıdır. Manyetik akı ile akımın arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir.

$$N i = R \Phi \quad (4.16)$$



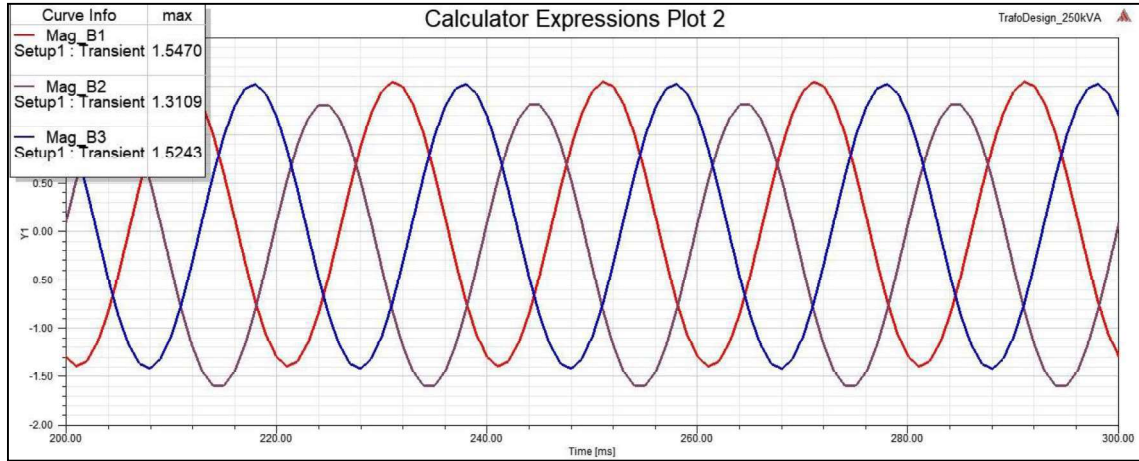
Resim 4.34. Üretilen manyetik akının dalga formu

Resim 4.34'te gösterilen akı yoğunluğu maksimum değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$B_{max} = \frac{\Phi_{max}}{A} \quad (4.17)$$

$$B_{max} = \frac{0.0273 \text{ Wb}}{0.0187 \text{ m}^2} \cong 1.46 \text{ T} \quad (4.18)$$

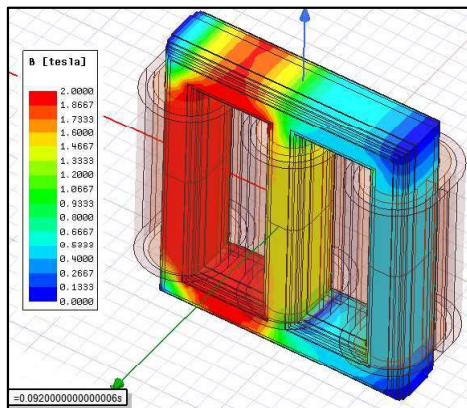




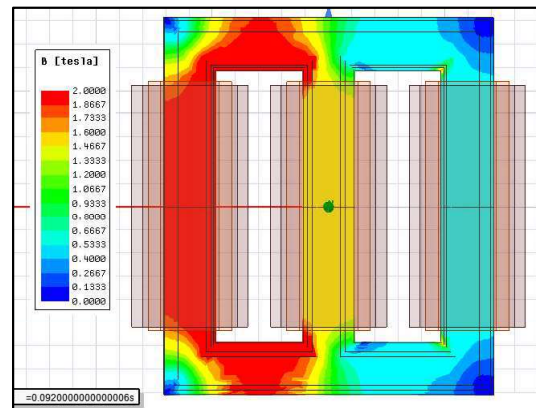
Resim 4.35. Üretilen manyetik akı yoğunluğunun dalga formu

Üç faz transformatörlerde, bir bacağın diğer iki bacadan 120 derece faz farkı bulunmaktadır. Boşta çalışma durumunda nüvede akı dağılımı ve dağılımının vektörel olarak görüntüsü aşağıda verilmektedir. Şekilde gösterildiği gibi transformatörün sol bacağındaki akı dağılımı diğer iki bacağına göre farklıdır. Resim 4.36 ve Resim 4.37'ten aşağıdaki gibi yorumlar yapılabilir;

- 1) 92 ms'de transformatörün sol (1 numaralı) bacağında manyetik akı yoğunluğu diğer iki bacadan daha yüksektir.
- 2) 92 ms'de transformatörün sol (1 numaralı) bacağında yukarıya veya pozitif yöne doğru akı akmaktadır. Böylece, anlık manyetik akı değeri pozitifdir.
- 3) 92 ms'de transformatörün sol (1 numaralı) bacağından diğer iki bacağına göre daha yüksek akım geçmektedir.

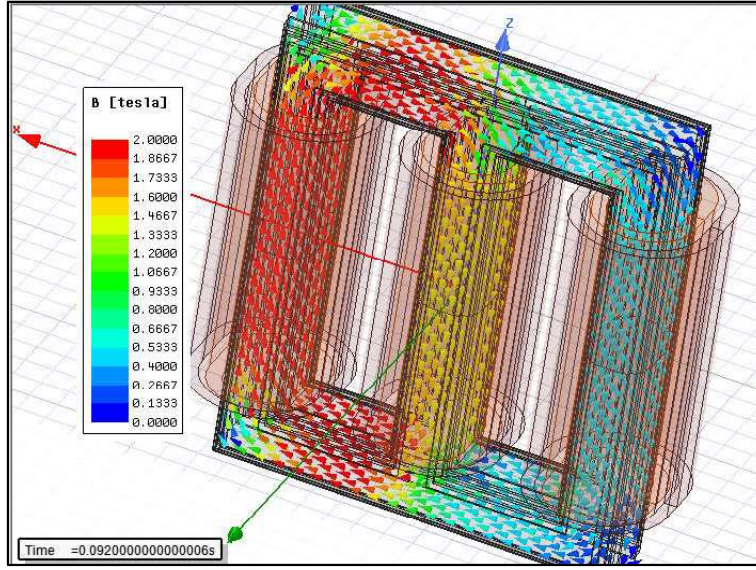


(a)

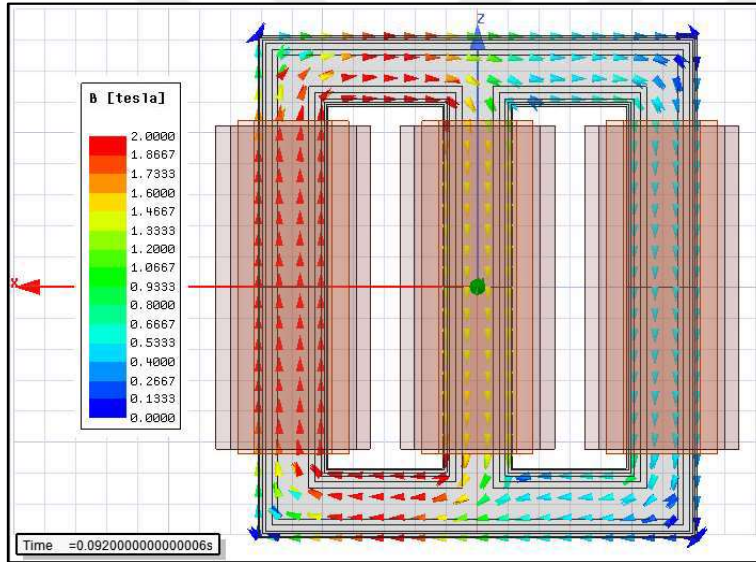


(b)

Resim 4.36. Transformatörün boşta çalışma durumunda 92 ms'deki manyetik akı dağılımı  
a) yandan gösterim b) önden gösterim



(a)



(b)

Resim 4.37. Transformatörün boşa çalışma durumunda 92 ms'deki manyetik akının  
a) yandan vektörel gösterimi b) önden vektörel gösterimi

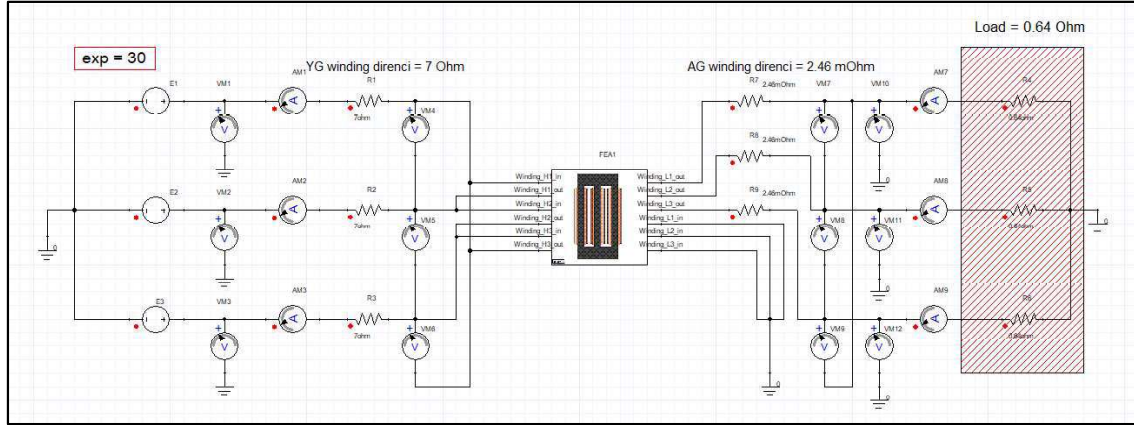
#### Yükte çalışma durumundaki analiz sonuçları

Yükte çalışma durumunda, yük (*load*) transformatörün sekonder tarafında bağlanmaktadır. Yük hesaplanırken yükün bağlanma şekline dikkat edilmelidir. Resim 4.37'de gösterildiği gibi yük yıldız şeklinde bağlanmaktadır. Tam yükün değeri aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

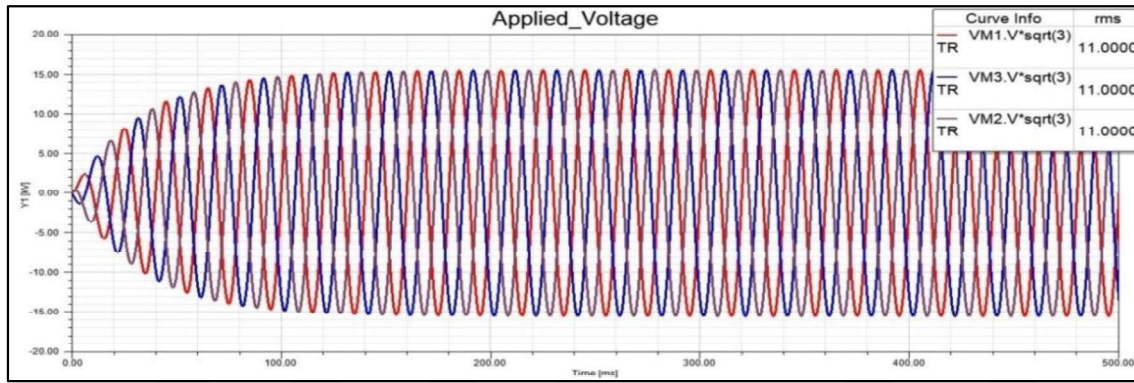
$$Z_{Load(Y)} = \frac{(V_{faz(sek)})^2}{S/3} = \frac{(230.94)^2}{250\,000/3} = 0.64 \, \Omega \quad (4.19)$$

veya

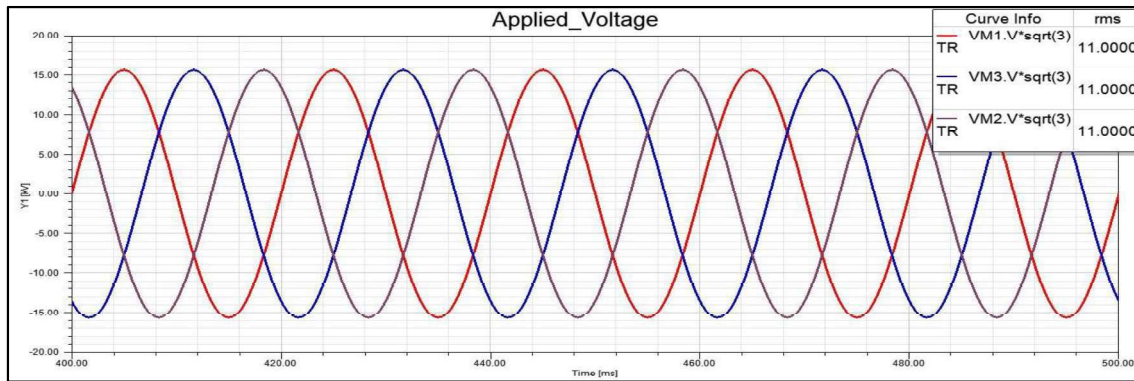
$$Z_{Load(Y)} = \frac{V_{faz(sek)}}{I_{faz(sek)}} = \frac{230.94}{360.84} = 0.64 \, \Omega \quad (4.20)$$



Resim 4.38. Yükte çalışma durumunda transformatörün bağlantı şekli



Resim 4.39. Tam yükte çalışmasında transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu



Resim 4.40. Tam yükte çalışmasında transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu (yakından gösterim)

Yükte çalışma durumunda uygulanan giriş gerilimi Resim 4.36 ve Resim 4.37’de verilmiştir. Boşta çalışmadaki gibi gerilimler ve akımlar sıfırdan başlanıp yavaş yavaş kararlı duruma (*steady-state*) ulaşmaktadır. İndüklenen primer ve sekonder gerilim, aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.



$$e_{rms} = \frac{e_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{NB_{max}A 2\pi f}{\sqrt{2}} \quad (4.21)$$

$$e_{rms (prim)} = \frac{N_{(prim)}B_{max}A 2\pi f}{\sqrt{2}} = \frac{1810 \times 1.49 \times 0.0184 \times 2\pi \times 50}{\sqrt{2}} = 11.023 \text{ kV} \quad (4.22)$$

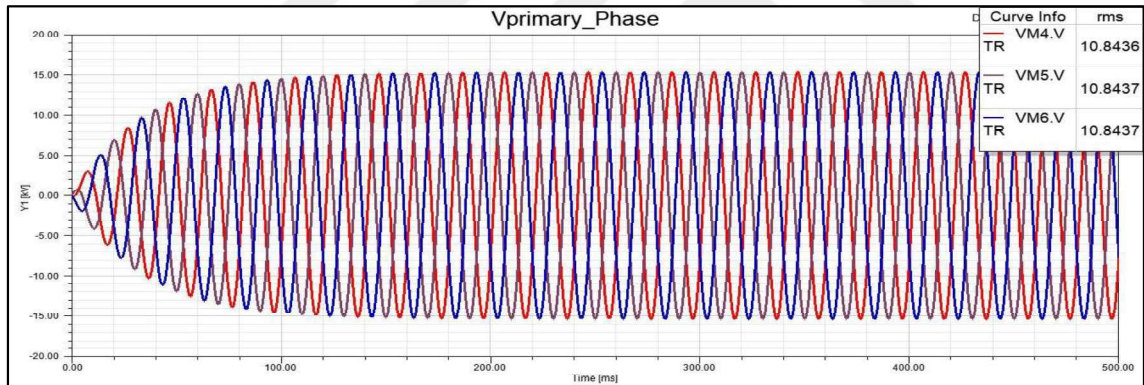
$$e_{rms (sek)} = \frac{N_{(sek)}B_{max}A 2\pi f}{\sqrt{2}} = \frac{38 \times 1.49 \times 0.0184 \times 2\pi \times 50}{\sqrt{2}} = 231.43 \text{ V} \quad (4.23)$$

Transformatörün sekonder sargısı yıldız bağlı olduğu için faz ile hat gerilimi aynı değildir. Primer ve sekonder tarafının hat gerilimleri aşağıdaki gibidir.

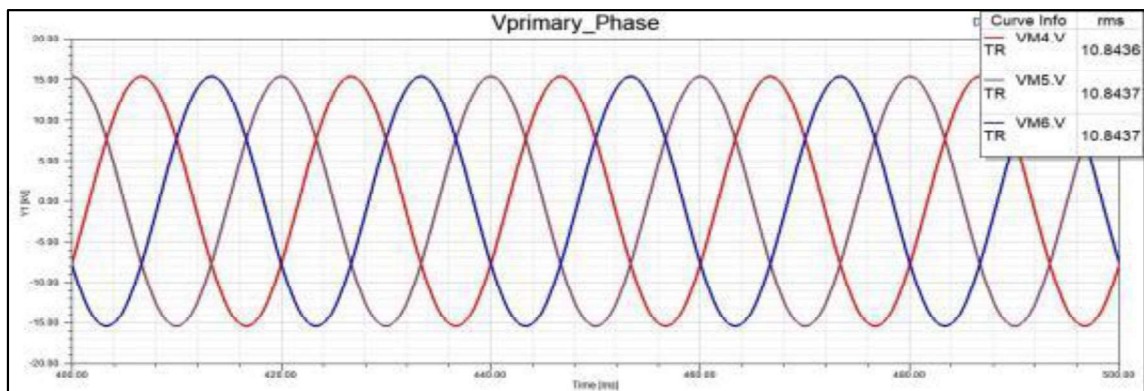
$$e_{hat (prim)} = e_{faz (prim)} = 11.023 \text{ kV} \quad (4.24)$$

$$e_{hat (sek)} = e_{faz (sek)} = 231.43 \times \sqrt{3} = 400.85 \text{ V} \quad (4.25)$$

Benzetim çalışmasının sonucunda elde edilen indüklenen gerilimler aşağıda gösterilmektedir.

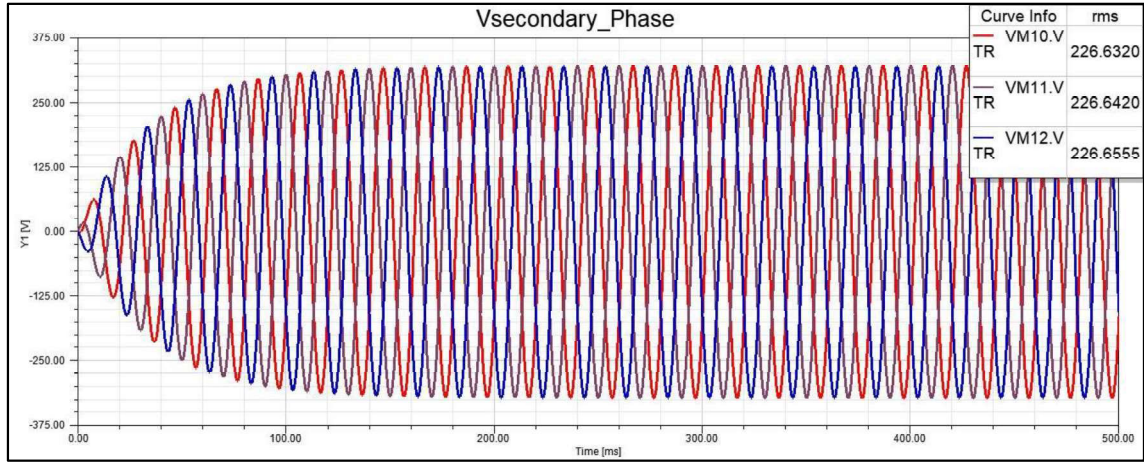


Resim 4.41. Tam yükte çalışmasında primer sargının faz geriliminin dalga formu

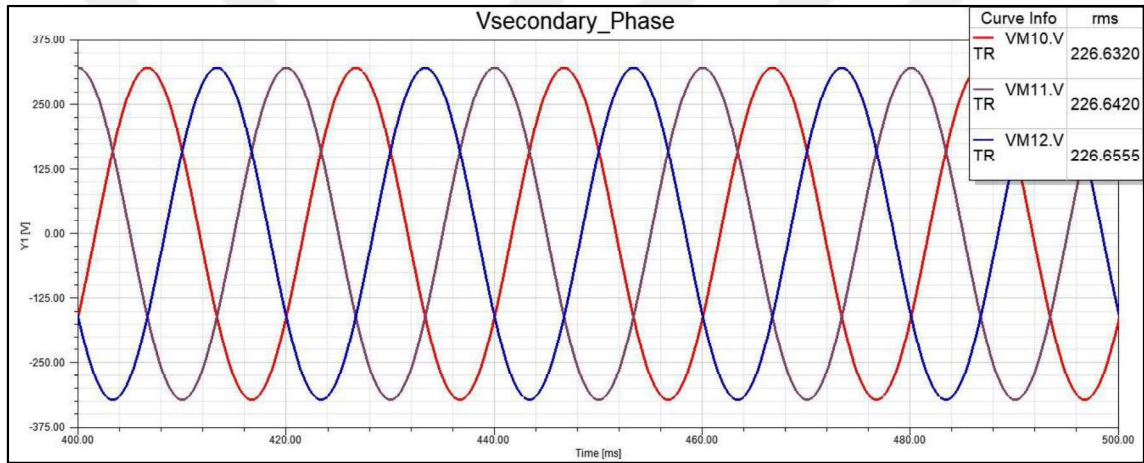


Resim 4.42. Tam yükte çalışmasında primer sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

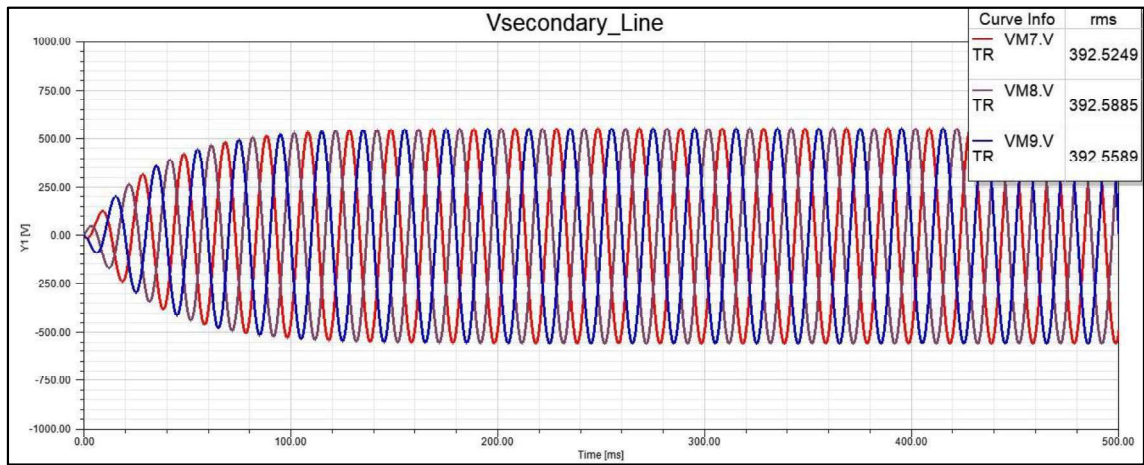




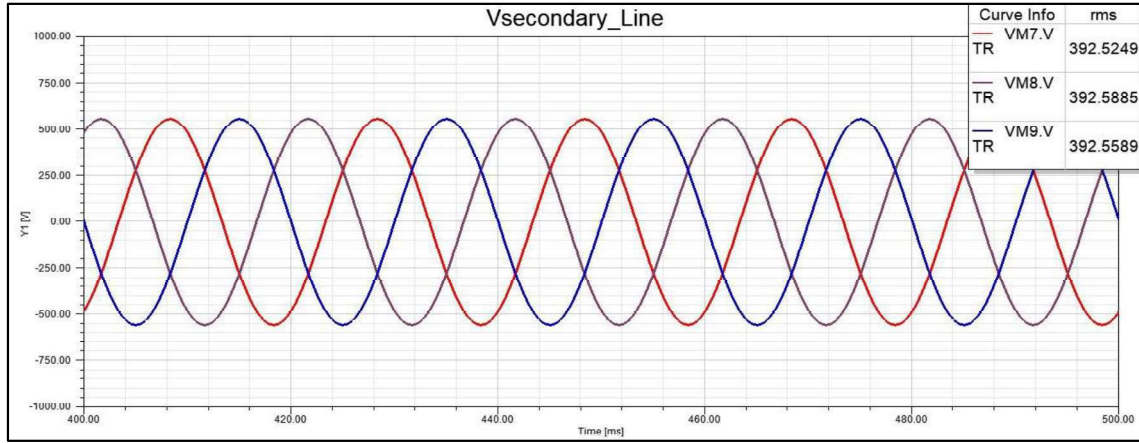
Resim 4.43. Tam yükte çalışmasında sekonder sargının faz geriliminin dalga formu



Resim 4.44. Tam yükte çalışmasında sekonder sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim)



Resim 4.45. Tam yükte çalışmasında sekonder sargının hat geriliminin dalga formu



Resim 4.46. Tam yükte çalışmasında sekonder sargının hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

Benzetim çalışmasında kullanılan transformatör 250 kVA'lık bir transformatördür. Transformatör, hattın gerilimini 11 kV'tan 400 V'a düşürmektedir. Bu bilgiler kullanılarak nominal akımlar hesaplanabilir.

$$S = \sqrt{3} I_{hat} V_{hat} \quad (4.26)$$

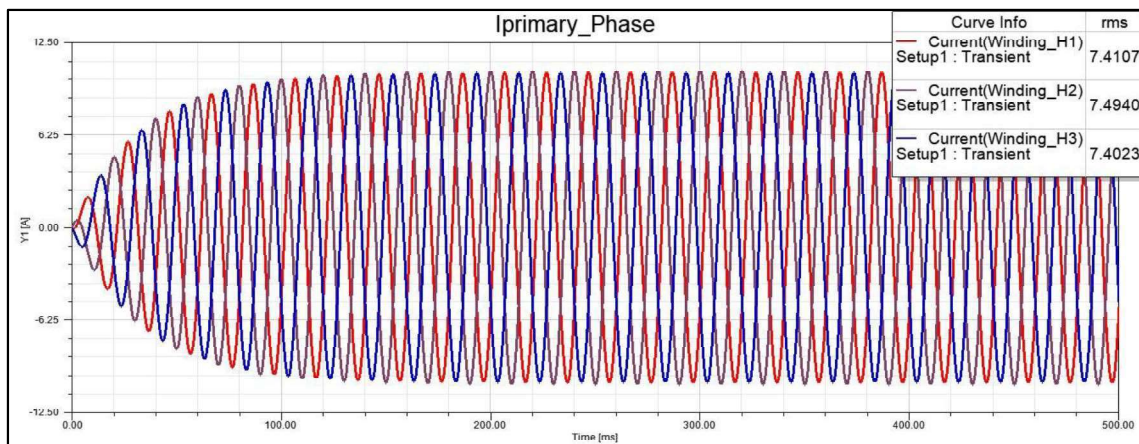
$$I_{hat}(prim) = \frac{S}{\sqrt{3} V_{hat}(prim)} = \frac{250\,000}{\sqrt{3} \times 11\,000} = 13.12\,A \quad (4.27)$$

$$\text{Delta bağı} \rightarrow I_{faz}(prim) = \frac{I_{hat}(prim)}{\sqrt{3}} = \frac{13.12}{\sqrt{3}} = 7.57\,A \quad (4.28)$$

$$I_{hat}(sek) = \frac{S}{\sqrt{3} V_{hat}(sek)} = \frac{250\,000}{\sqrt{3} \times 400} = 360.84\,A \quad (4.29)$$

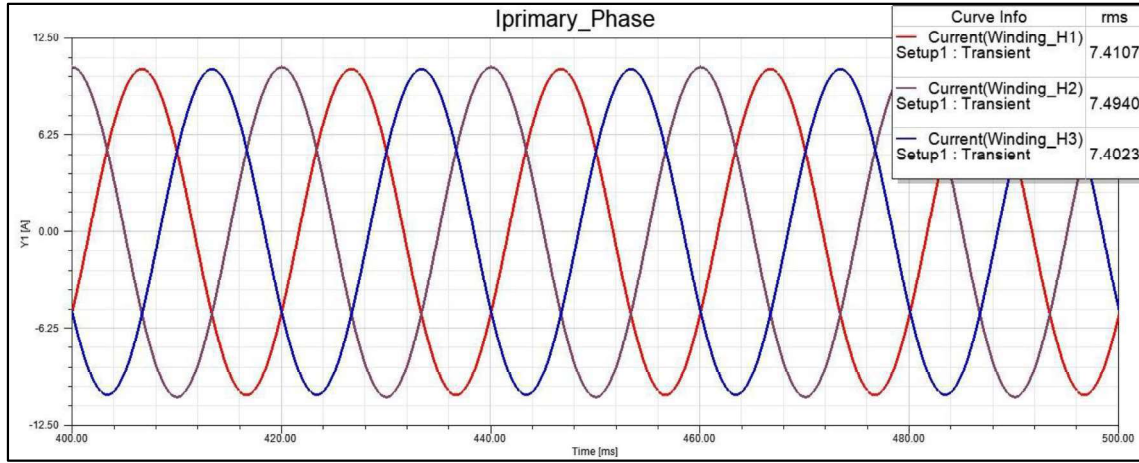
$$\text{Yıldız bağı} \rightarrow I_{faz}(sek) = I_{hat}(sek) = 360.84\,A \quad (4.30)$$

Analiz sonucunda elde edilen tam yükte akımların dalga formları aşağıda gösterilmektedir.

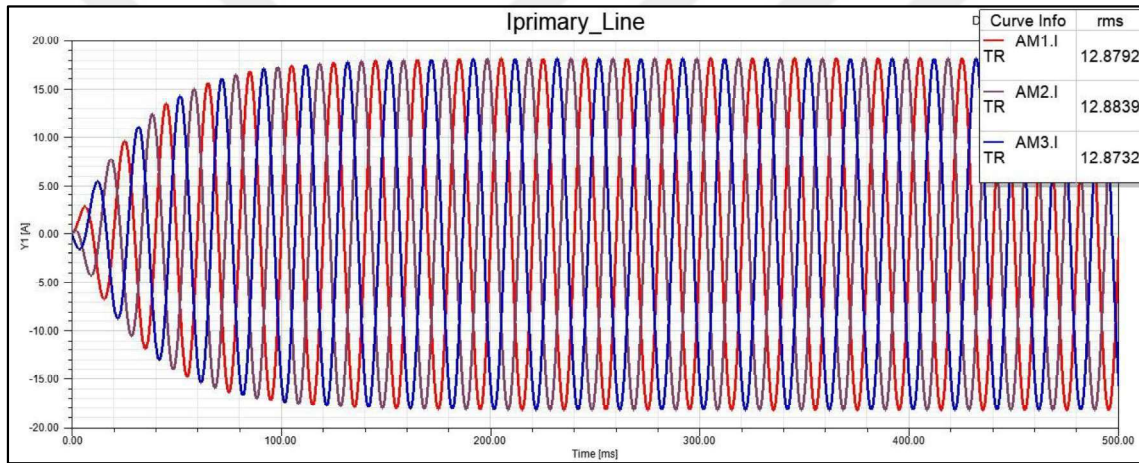


Resim 4.47. Tam yükteki primer faz akımının dalga formu

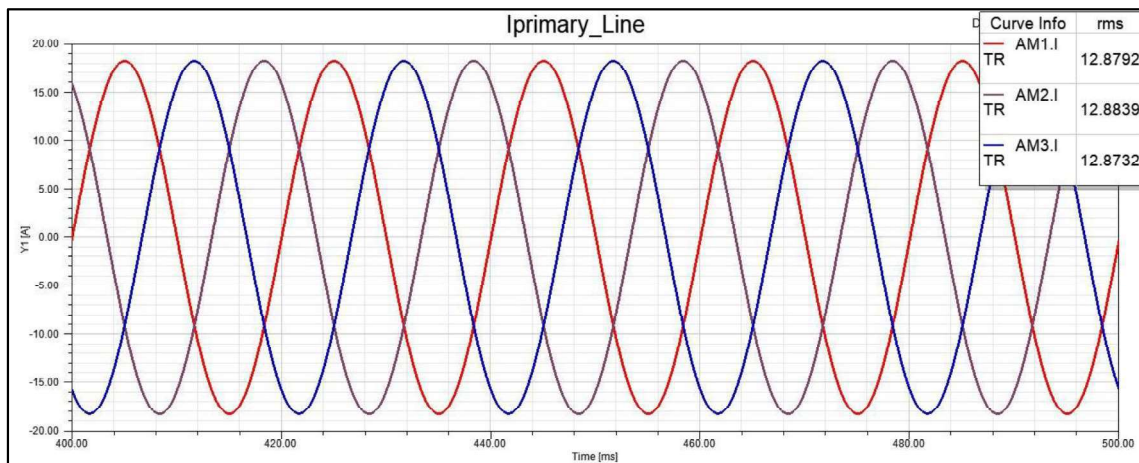




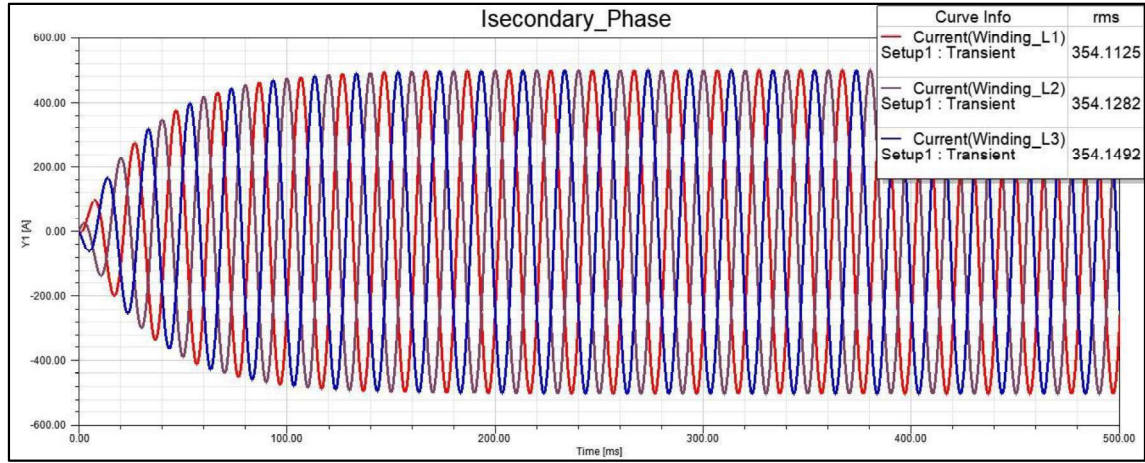
Resim 4.48. Tam yükteki primer faz akımın dalga formu (yakından gösterim)



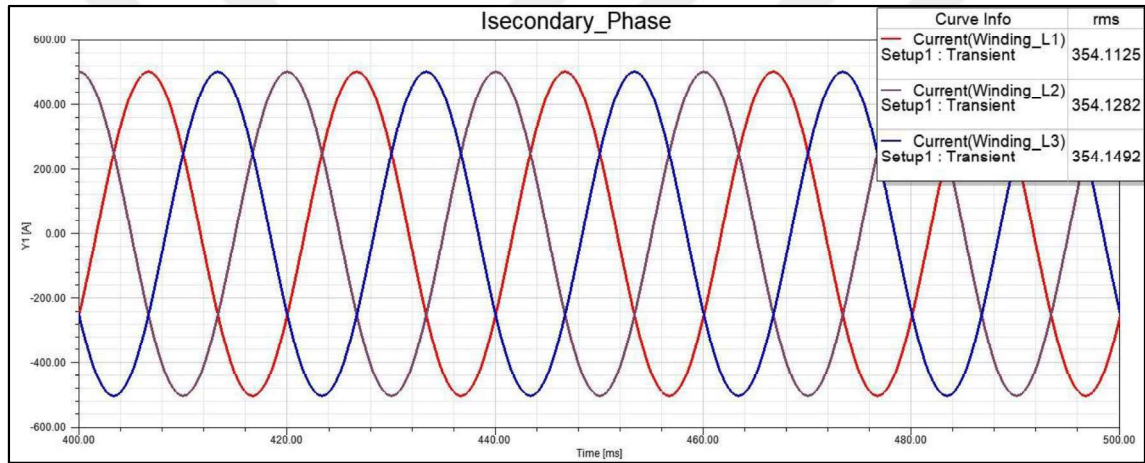
Resim 4.49. Tam yük çalışma durumunda primer hat akımın dalga formu



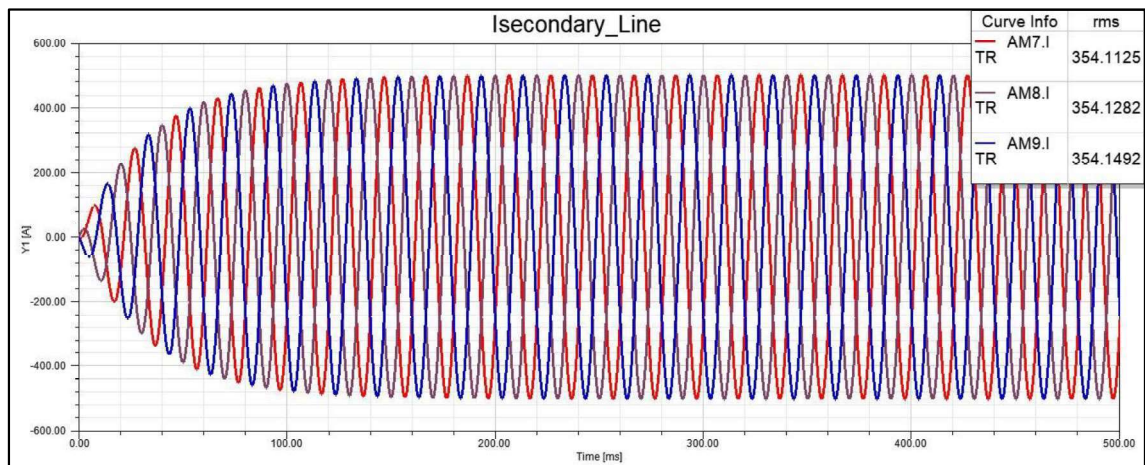
Resim 4.50. Tam yük çalışma durumunda primer hat akımın dalga formu (yakından gösterim)



Resim 4.51. Tam yük çalışma durumunda sekonder faz akımın dalga formu

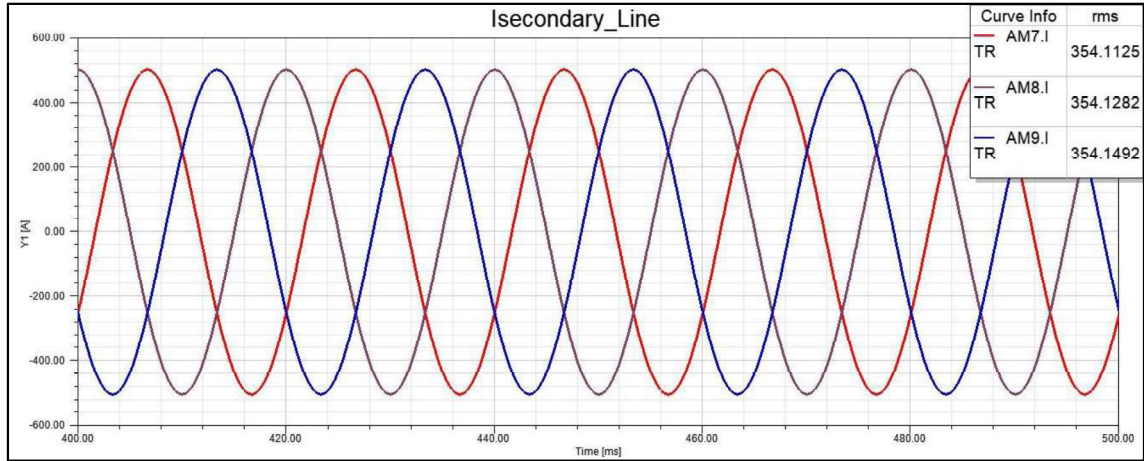


Resim 4.52. Tam yük çalışma durumunda sekonder faz akımın dalga formu (yakından gösterim)



Resim 4.53. Tam yük çalışma durumunda sekonder hat akımın dalga formu





Resim 4.54. Tam yük çalışma durumunda sekonder hat akımının dalga formu (yakından gösterim)

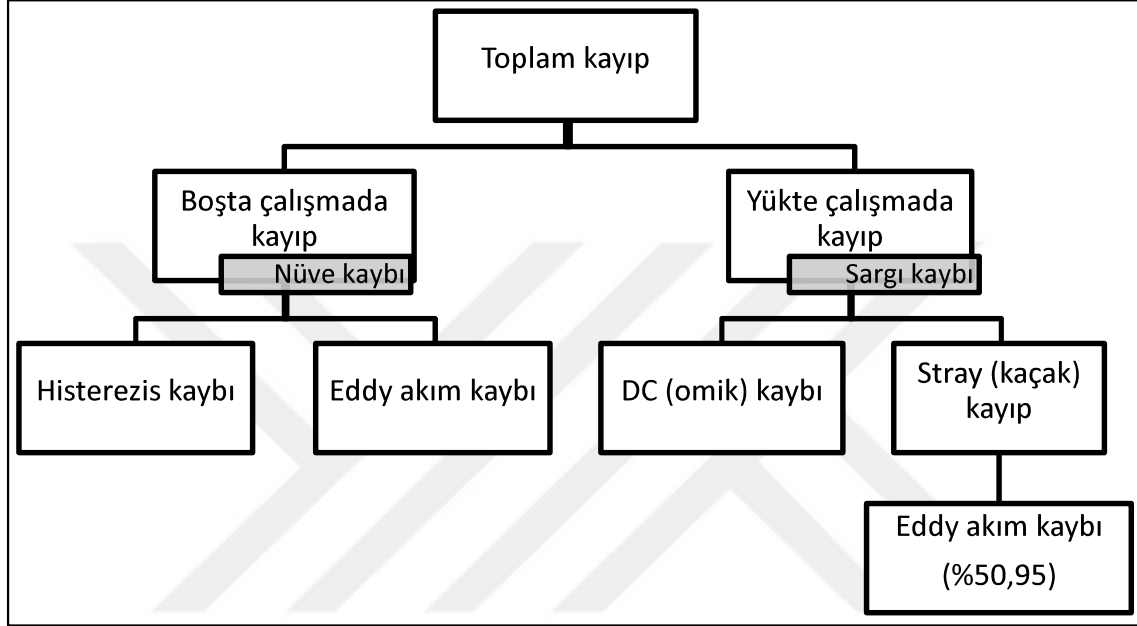
Boşta ve tam yükte çalışma durumundaki analiz sonuçları ile transformatörün işaret plakasında verilen bilgiler aşağıdaki tabloda karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, analizin doğruluğu yüzde şeklinde raporlanmaktadır.

Çizelge 4.5. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları

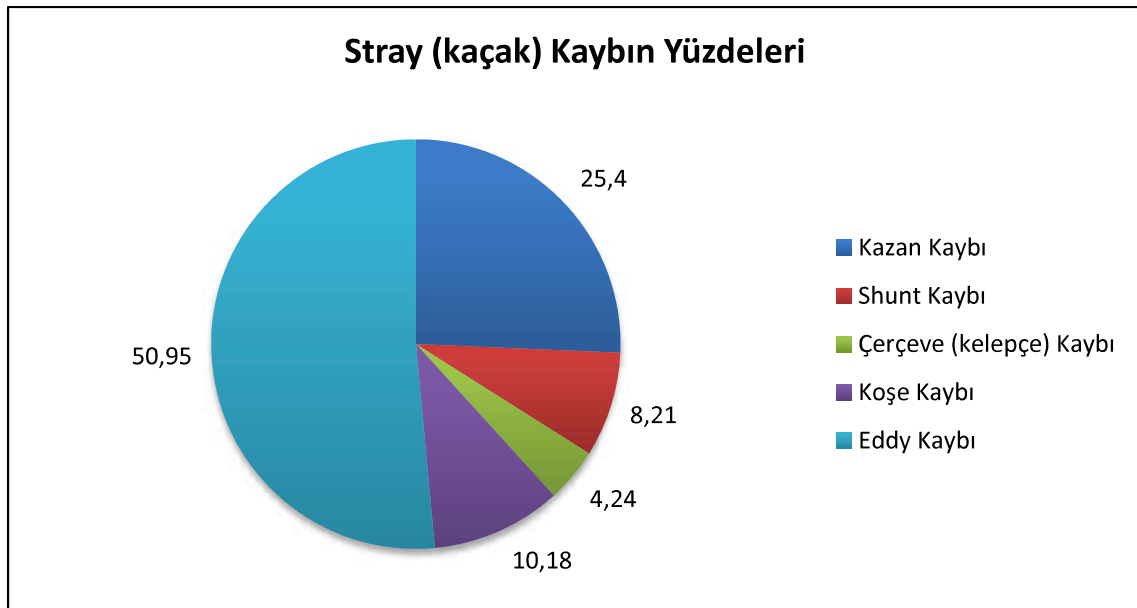
|                           | İŞARET<br>PLAKASI     | HESAPLAMA<br>SONUCU | ANALİZ<br>SONUCU      | ANALİZİN<br>DOĞRULUĞU (%) |
|---------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|
| Primer gerilimi           | 11 kV                 | 11,023 kV           | 10,8437 kV            | % 98,58                   |
| Sekonder gerilimi         | 400 V                 | 400,85 V            | 392,5574 V            | % 98,14                   |
| Primer nominal<br>akımı   | 13,12 A               | 13,12 A             | 12,8788 A             | % 98,16                   |
| Sekonder nominal<br>akımı | 360,84 A              | 360,84 A            | 354,1299 A            | % 98,14                   |
| Boşta akımın<br>yüzdesi   | % 0,177               | -                   | % 0,175               | % 98,87                   |
| Manyetik akı<br>yoğunluğu | 1,49 T                | -                   | 1,46 T                | % 97,99                   |
| Nüve kesit alanı          | 0,0184 m <sup>2</sup> | -                   | 0,0187 m <sup>2</sup> | % 98,37                   |

#### 4.2.4. Kayıp hesaplamaları

Transformatörün kayıp sonuçları çalışma durumuna göre sunulmaktadır. Kayıp sonuçları Maxwell'deki hesap makinesi yardımıyla bulunmaktadır. Transformatörün kayıpları aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi başlıklara ayrılmaktadır.



Şekil 4.1. Transformatörde oluşan kayıplar



Şekil 4.2. Transformatörde oluşan stray (kaçak) kayıplar (Kaynak: IJSETR 2016)

### Boşta çalışma durumundaki kayıp hesaplamaları

Boşta çalışma durumunda, nüvede demir kaybı meydana gelir. Transformatorün demir kaybı, Eddy akım kaybı ve Histerezis kaybının toplamından elde edilmektedir. Demir kaybı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$P_e = k_c f^2 B_{max}^2 V \quad (4.31)$$

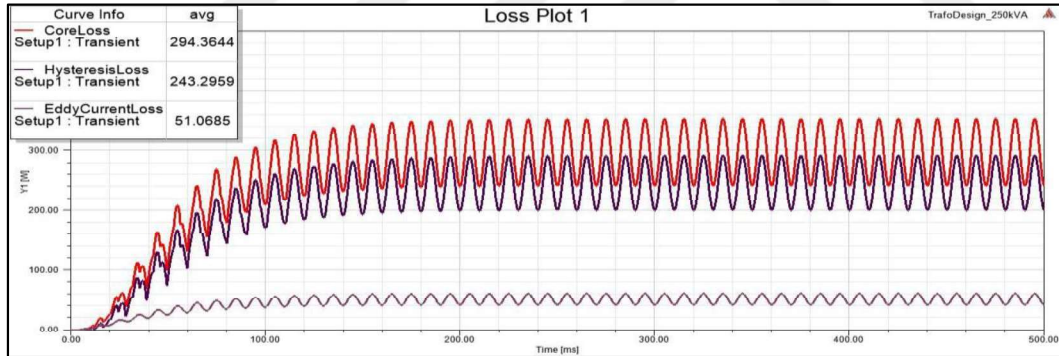
$$P_e = 0.17 \times 50^2 \times 1.49^2 \times 0.06 = 56.612 \text{ W} \quad (4.32)$$

$$P_h = k_h f B_{max}^n \quad (4.33)$$

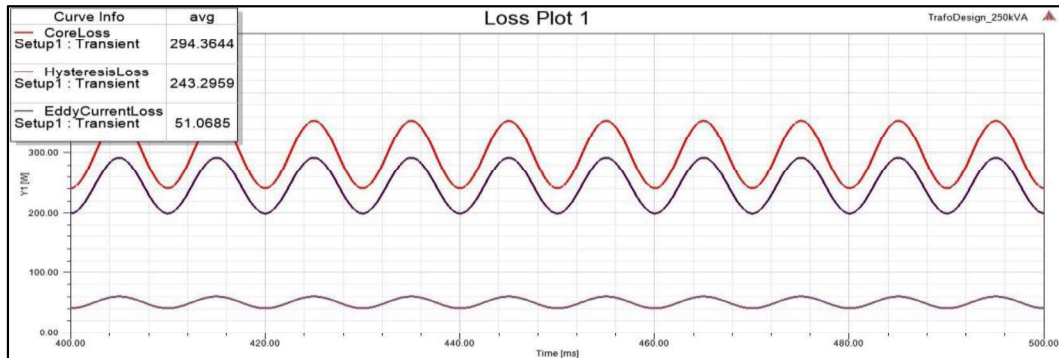
$$P_h = 41.36 \times 50 \times 1.49^{1.6} \times 0.06 = 234.855 \text{ W} \quad (4.34)$$

$$P_{demir} = P_e + P_h = 56.612 + 234.855 = 291.467 \text{ W} \quad (4.35)$$

Benzetim çalışması ile elde edilen demir kaybı (*core loss*) ortalama değeri 294,3644 Watt'tır ve Resim 4.55 ile Resim 4.56'te gösterilmektedir.



Resim 4.55. Analiz sonucunda elde edilen Demir kaybı, Histerezis kaybı ve Eddy akım kaybının ortalama değerleri



Resim 4.56. Analiz sonucunda elde edilen Demir kaybı, Histerezis kaybı ve Eddy akım kaybının ortalama değerleri (yakından gösterim)

### Yükte çalışma durumundaki kayıp hesaplamaları

Yükte çalışma durumundaki kayıplar genel olarak, sargı dirençlerinden akan akım etkisiyle meydana gelen Omik kayıp ve Eddy akım etkisiyle sargılara yansıtılan kayıplardan oluşmaktadır. Maxwell analizinde yükte çalışmadaki Eddy akım kaybı bulunamamaktadır. Maxwell'de Eddy akım etkisi sadece *solid* malzemelerde dâhil edilebilir. Örneğin, nüve *solid* bir malzeme olarak tanımlandığı için boşta çalışma durumunda nüvedeki Eddy akım kaybı hesaplanabilmektedir. Primer ve sekonder sarım sayısı sırayla 1810 ve 38'dir. Sarım sayıları yüksek olduğundan dolayı iletkenin 38 veya 1810 kez çizilmesi mümkün değildir. Model oluşturulmasında sargılar tek parça halinde çizilir ve *stranded* malzeme olarak tanıtılmaktadır. Sargılara Eddy akım etkisi dâhil edilememektedir. Bu nedenle, Eddy akım etkisiyle sargılara yansıtılan kayıplar hesaplanmamaktadır. Transformatördeki her faz için toplam omik kayıp Eş. 4.36'da gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{CU} = I_{(prim)}^2 R_{(prim)} + I_{(sek)}^2 R_{(sek)} \quad (4.36)$$

Transformatör teorik hesaplamasında, transformatörün sekonder parametreleri primere referans edilmektedir. Formülde aşağıdaki sekonder direncinin ve akımının yeni değerleri kullanılmaktadır.

$$I'_{(sek)} = \frac{N_{(sek)}}{N_{(prim)}} I_{(sek)} = \frac{38}{1810} \times 360.84 = 7.576 \text{ A} \quad (4.37)$$

$$R'_{(sek)} = \left( \frac{N_{(prim)}}{N_{(sek)}} \right)^2 R_{(sek)} = \left( \frac{1810}{38} \right)^2 \times (2.46 \times 10^{-3}) = 5.581 \Omega \quad (4.38)$$

$$P_{CU} = (7.57^2 \times 7) + (7.576^2 \times 5.581) = 401.13 + 320.33 = 721.46 \text{ W @faz} \quad (4.39)$$

$$\hookrightarrow P_{YG(DC)} = 3 \times 401.13 = 1203.39 \text{ W} \quad (4.40)$$

$$\hookrightarrow P_{YG(DC)} = 3 \times 320.33 = 960.99 \text{ W} \quad (4.41)$$

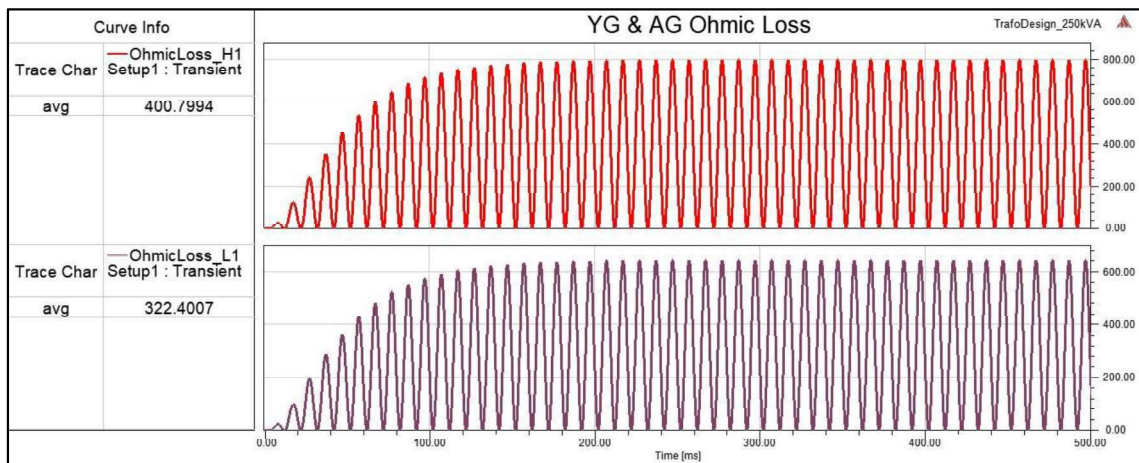




Resim 4.57. Transformatörün tam yük çalışmasında elde edilen kayıplar

Yukarıdaki resim üç farklı kayıp göstermektedir; *SolidLoss*, *StrandedLoss* ve *StrandedLossR*'dir. *SolidLoss*, Eddy akım etkisiyle oluşan kaybı ifade etmektedir. Sargılar *Stranded* olduğu için raporda *SolidLoss* sıfır olarak gösterilir. *StrandedLoss*, harici uyartım devresindeki Omik kaybı ifade etmektedir. *StrandedLossR* ise direkt olarak eksitasyon (*excitation*) yoluyla hesaplanan Omik kaybı göstermektedir. Bu benzetim çalışması harici uyartım devresi ile yapıldığı için *StrandedLossR* değeri sıfırdır. Resim 4.57'te gösterildiği gibi Omik kaybın her faz için ortalama değeri 721,5962 W olarak bulunmaktadır.

Omik kayıp, yüksek ve alçak gerilimin kaybı olarak ayrı grafiklerde de elde edilebilir. Aşağıdaki grafikler, yüksek ve alçak gerilimin her faz için omik kaybı sırayla 400,7994 W ve 322,4007 W olduğunu göstermektedir.



Resim 4.58. Yüksek ve alçak gerilimin her faz için omik kaybı

Boşta ve tam yükte çalışma durumundaki kayıp sonuçları ile transformatörün hesaplama sonucunda elde edilen kayıp değerleri aşağıdaki tabloda karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, analizin doğruluğu yüzde şeklinde raporlanmaktadır.

Çizelge 4.7. Boşta ve tam yükte çalışma durumundaki kayıp sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları

|                     | İŞARET<br>PLAKASI                         | HESAPLAMA<br>SONUCU             | ANALİZ<br>SONUCU                    | ANALİZİN<br>DOĞRULUĞU<br>(%) |
|---------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
|                     | Boşta Çalışma Durumundaki Kayıp Sonuçları |                                 |                                     |                              |
| Demir kaybı         | 288 - 300 W                               | 291,467 W                       | 294,3644 W                          | % 99,01                      |
| Eddy akım kaybı     | -                                         | 56,612 W                        | 51,0685 W                           |                              |
| Histerezis kaybı    | -                                         | 234,855 W                       | 243,2959 W                          |                              |
|                     | Yükte Çalışma Durumundaki Kayıp Sonuçları |                                 |                                     |                              |
| Bakır (sargı) kaybı | 2272 – 2350 W                             | -                               | -                                   |                              |
| YG (omik) kaybı     | 1202 W                                    | 1203,39 W<br>(401,13 W<br>@faz) | 1202,3982 W<br>(400,7994 W<br>@faz) | % 99.92                      |
| AG (omik) kaybı     | 961 W                                     | 960,99 W<br>(320,33 W<br>@faz)  | 967,2021 W<br>(322,4007 W<br>@faz)  | % 99.35                      |

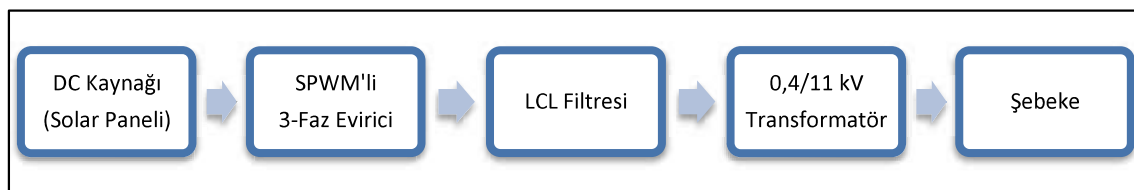
## 5. DAĞITIM TRANSFORMATÖRÜNÜN ÜZERİNDE FOTOVOLTAİK PANELLERİN ETKİLERİ

Bu bölümde, ilk olarak solar panellerine bağlanacak SPWM'li evirici sistemin tasarımı incelenmektedir. Eviricinin çıkışına LCL filtresi ve endüktif yük bağlanmaktadır. Daha sonra, endüktif yük yerine transformatör bağlanıp incelenmektedir. Primer ve sekonder voltaj ve geriliminin Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) değerleri transformatörün bağlantı şeklinden etkilenmemektedir [3]. Ayrıca, yıldız bağlantıda nötr noktasının topraklanması primer ve sekonderin THD değerlerini etkilememektedir [3].

Bu bölümün ikinci yarısında kuru-tip dağıtım transformatörünün termal analizi yapılmaktadır. Normal AC girişli çalışma durumunda ve fotovoltaik sistemine bağlı durumunda iken Geçici Durum Termal Analizi ile kayıpların sonucunda transformatörün sargılarında ve nüvesinde meydana gelen sıcaklık artışı incelenmektedir. Ayrıca, transformatörün faydalı ömrü tahmin edilecektir.

### 5.1. Fotovoltaik Sistemin Tasarımı

Fotovoltaik sistemde bulunan SPWM'li evirici tasarımı yapılmaktadır. Evirici sistem, elektrik devre çizim programı olan *Twin Builder* yazılımı ile modellenir. Üç fazlı evirici sistem tasarımının blok şeması aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Üç fazlı evirici sistem tasarımının blok şeması

#### 5.1.1. DC gerilim kaynağı ve SMPWM'li üç faz evirici

Güneş paneli doğru akım (DC) elektrik enerjisi şeklinde gerilim üretmektedir. Bu çalışmada, güneş panelinin çıkış gerilimi  $700 V_{DC}$  olarak bulunmaktadır ve değeri  $400V_{AC}$  olan transformatörün faz arası gerilimine dönüştürülmektedir. DC gerilimi, AC çıkış maksimum geriliminin altında ise yarı iletken ve filtre elemanlarına karşı gerilim

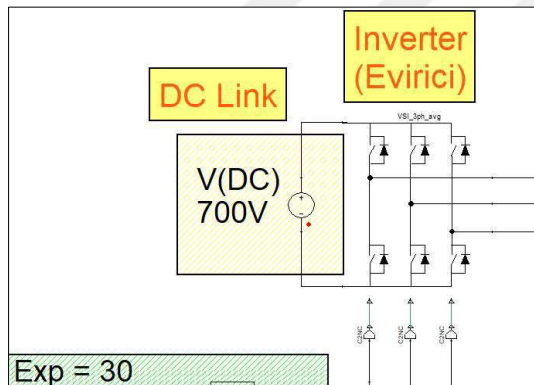
düşüşünden dolayı çıkış akımının kontrol edilmesi kolay olmamaktadır. Bu nedenle, DC giriş gerilimi yüksek bir değer seçilmelidir [30]. Bu çalışmada  $120^\circ$  iletimde bir evirici kullanılmaktadır. Üçüncü bölümdeki açıklamaya göre, girişteki DC kaynak geriliminin minimum değeri aşağıdaki gibi bulunmaktadır [28];

$$U_{ab} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_d \quad (5.1)$$

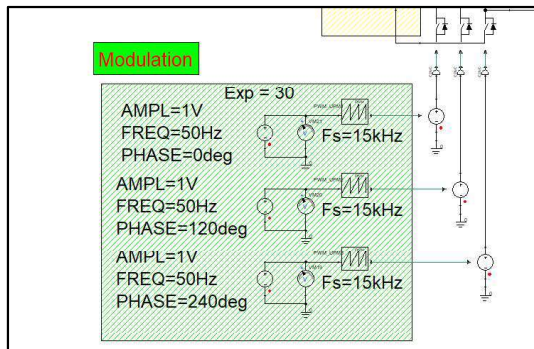
$$U_d = 400 \sqrt{2} = 565.7 \text{ Volt} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Güneş panelinin DC gerilimi (V}_{DC}) &> \text{AC çıkış maksimum gerilimi (V}_{AC(pik)}) \\ 700 &> 400\sqrt{2} \end{aligned}$$

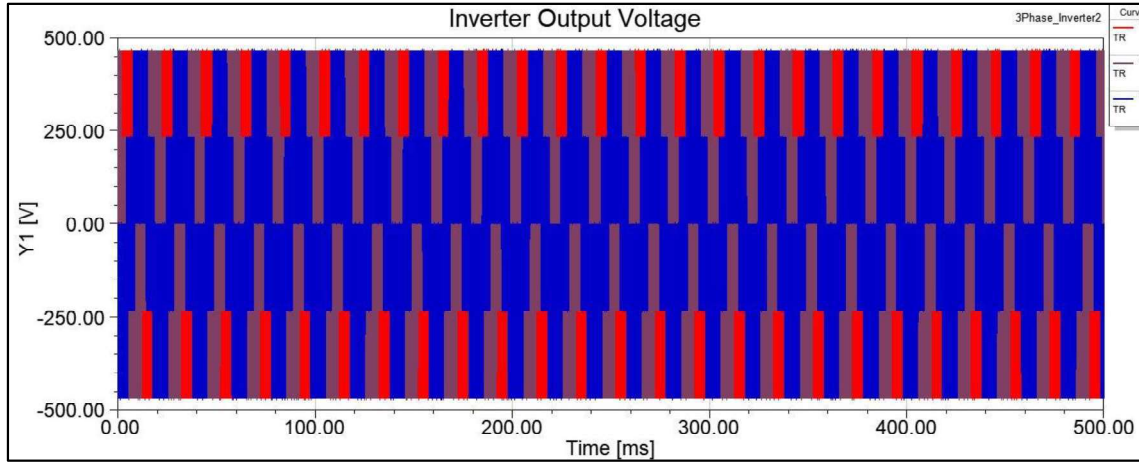
Bu çalışmada eviricinin çıkış gerilimini denetlemek için anahtarlama frekansı 15 kHz olan bir Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM) kullanılmaktadır. Modülasyon genlik oranı ayarlanarak çıkış geriliminin denetimi yapılmaktadır [28]. Modülasyon genlik oranı 0 ile 1 arasında değişmektedir.



Resim 5.1. Girişteki DC gerilim kaynağı



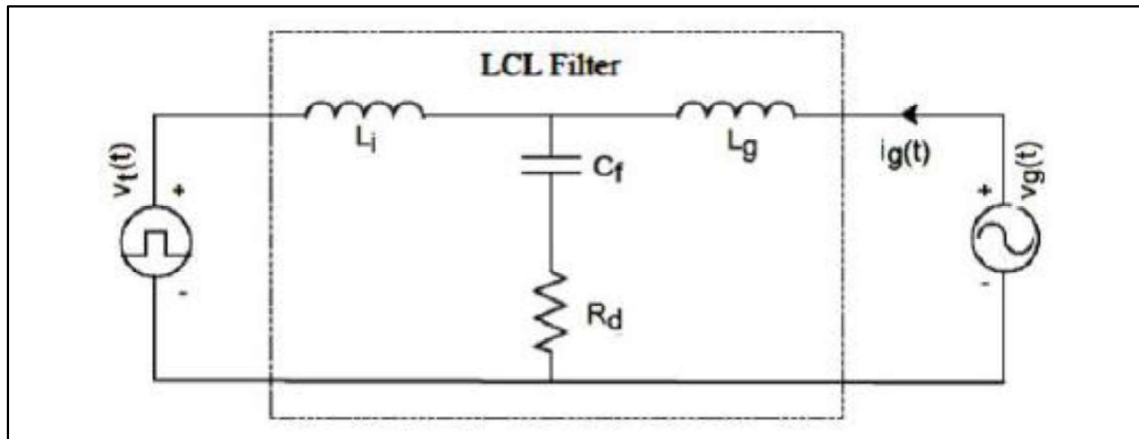
Resim 5.2. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM) tasarımı



Resim 5.3. Benzetim çalışmasının sonucunda eviricinin çıkış gerilimi

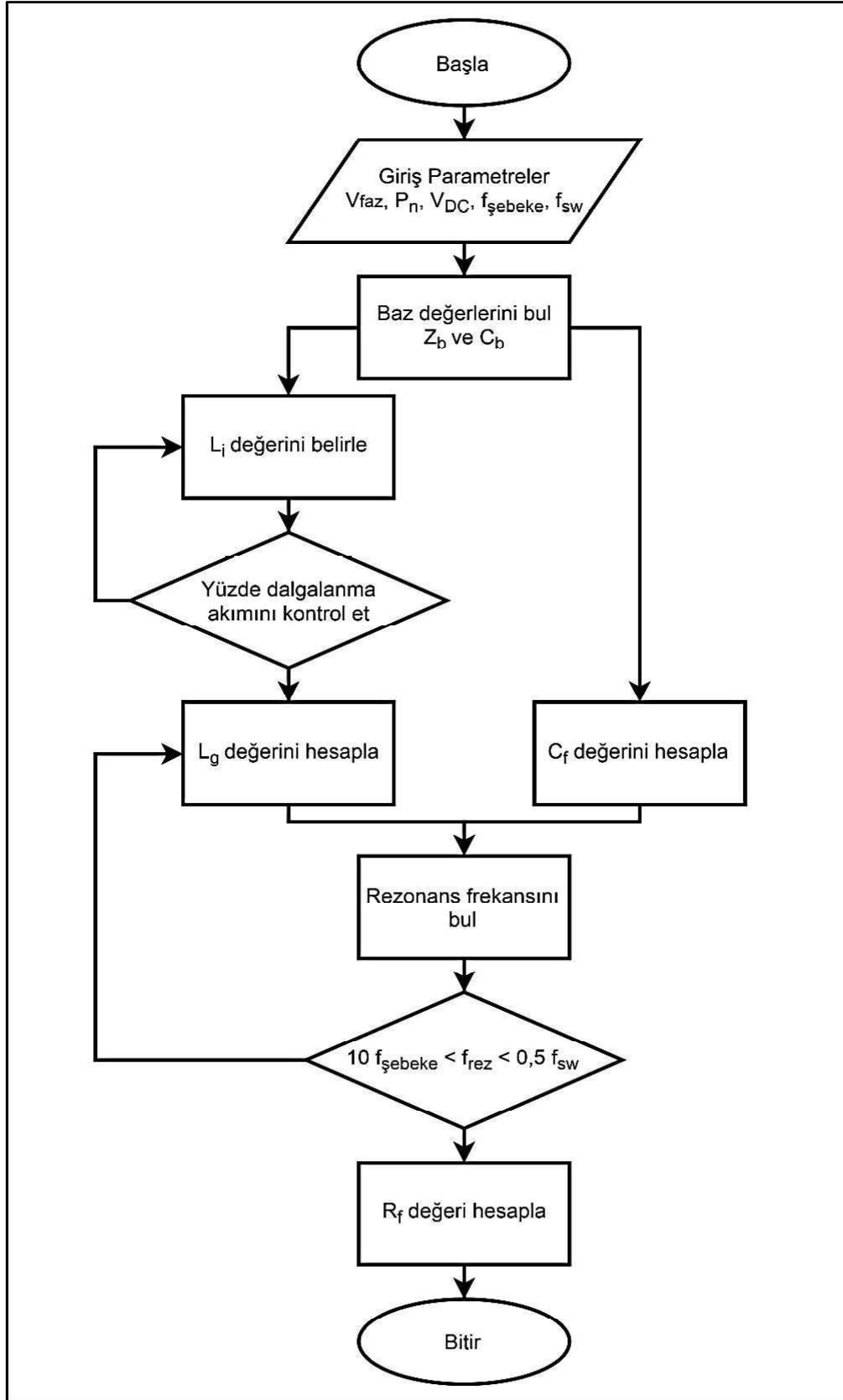
### 5.1.2. LCL çıkış filtresi

Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, şebekeyle bağlantılı eviricilerde kullanılan çıkış filtrelerin farklı modelleri mevcuttur. Her filtre modeli farklı avantaj ve dezavantajlara sahip olmaktadır. L filtresi, IEEE STD 519 akım harmonik limitlerine uygun olarak tasarlanmak için yüksek anahtarlama frekansına sahip olmalıdır. Fakat bu ise daha fazla anahtarlama kaybına yol açmaktadır. LC filtresinin, transformatör ve şebekenin kendi endüktansından dolayı şebekeye bağlı sistemlerde uygulanması uygun değildir. LCL filtresi, şebekeyle bağlantılı eviricilerde en yaygın olarak kullanılan filtrelerden biridir. Bu çalışmada, LCL filtresi tasarlanmaktadır. Resim 5.4'te faz başına LCL filtresinin eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Resim 5.4. LCL fitresi topolojisi ve oluşturan elemanları

LCL filtre tasarım aşamaları aşağıdaki akış diyagram şeklinde gösterilmektedir.



Şekil 5.2. LCL filtresi tasarım aşamalarının akış diyagramı

LCL filtresi tasarlanmadan önce, eviricinin çıkış gerilimi, güç değeri, DC gerilim ve frekans gibi esas parametrelerin bilinmesi gerekmektedir.

Çizelge 5.1. LCL filtre tasarımı için gerekli parametreler

| Parametre                        |                       | Değer                                   |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|
| Evirici faz arası çıkış gerilimi | $V_{\text{hat(rms)}}$ | 400 V <sub>AC</sub>                     |
| Evirici faz-nötr çıkış gerilimi  | $V_{\text{faz(rms)}}$ | $400/\sqrt{3} = 230,94$ V <sub>AC</sub> |
| Anma gücü                        | $P_n$                 | 160 kVA                                 |
| DC gerilim kaynağı               | $V_{\text{DC}}$       | 700 V <sub>DC</sub>                     |
| Şebeke frekansı                  | $f_{\text{şebeke}}$   | 50 Hz                                   |
| Anahtarlama frekansı             | $f_{\text{sw}}$       | 15 kHz                                  |
| Anma akımı                       | $I_{\text{(rms)}}$    | 230,94 A                                |
| Modülasyon genlik oranı          | $m_a$                 | 0 – 1                                   |

Empedansın ve kapasitansın baz değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$Z_b = \frac{(V_{\text{hat(rms)}})^2}{P_n} = \frac{(400)^2}{160 \times 10^3} = 1 \Omega \quad (5.3)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_n Z_b} = \frac{1}{(2\pi 50) \times 1} = 3,183 \times 10^{-3} F \quad (5.4)$$

IEEE STD 519 harmonik standardına göre, nominal akımın dalgalanması %10'un altında olmasına izin verilmektedir. Evirici tarafındaki endüktans, baz empedansının %8'i olması belirlendiğinde dalgalanma akımı IEEE STD 519 akım harmonik limitine uygun bulunmaktadır.

$$X_{L(p.u)} = \frac{X_L}{Z_b} = \frac{\omega_n L}{Z_b} \quad (5.5)$$

$$\hookrightarrow L_i = \frac{X_{L(p.u)} Z_b}{\omega_n} = \frac{0,08 \cdot 1}{(2\pi 50)} = 254,65 \mu H \quad (5.6)$$

Evirici tarafındaki endüktans, baz empedansının %8'i olması durumunda dalgalanma akımı anma akımının yaklaşık olarak %10'u olarak bulunmaktadır.



$$\Delta I_{L(maks)} = \frac{V_{DC}}{8 f_{sw} L_i} = \frac{700}{8 (15 \times 10^3) (254,65 \times 10^{-6})} = 22,91 A \quad (5.7)$$

$$\therefore \frac{\Delta I_{L(maks)}}{I_{(rms)}} = \frac{22,91}{230,94} = 0,0992 \cong \%9,92 < \%10 \text{ (limit)} \quad (5.8)$$

Per-unit empedansı 0.09 olması kabul olduğunda LCL filtresindeki toplam endüktans aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$X_{L\ top(p.u)} = \frac{X_{L\ top}}{Z_b} = \frac{\omega_n L_{top}}{Z_b} \quad (5.9)$$

$$\hookrightarrow L_{top} = \frac{X_{L\ top(p.u)} Z_b}{\omega_n} = \frac{0,09 \cdot 1}{(2\pi 50)} = 286,48 \mu H \quad (5.10)$$

$$\therefore L_g = L_{top} - L_i = 286,48 \mu H - 254,65 \mu H = 31,83 \mu H \quad (5.11)$$

Yukarıdaki hesaplanan  $L_g$  şebeke tarafındaki endüktans, dalgalanma akımını ek olarak %2 kadar azaltmaktadır [30].

Filtrenin kondansatörü, yüksek frekansların süzülmesinde önemli role sahiptir. Güç düzeltme faktörünün maksimum değeri %5 olması durumunda filtre kondansatörü ( $C_f$ ) kapasitansın baz değerinin %5'inden fazla olmamalıdır [47].

$$C_f = \beta C_b = 0,05 \cdot (3,183 \times 10^{-3}) = 1,5915 \times 10^{-4} = 0,16 mF \quad (5.12)$$

Rezonanstan kurtulmak için filtre kondansatörüne seri olarak bir direnç bağlanmaktadır. Bu direnç, sönümleme direnci olarak tanımlanmaktadır. Sönümleme frekansı, filtre kondansatörünün rezonans frekansındaki empedans değerinin üçte biri olmalıdır [47]. Bu nedenle, sönümleme direncinin hesaplanması için önce rezonans frekansının bulunması gerekmektedir.

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C_f}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(254,65 + 31,83) \times 10^{-6}}{254,65 \mu \times 31,83 \mu \times 0,16 m}} = 2365,47 Hz \quad (5.13)$$

Yukarıda hesaplanan rezonans frekansı, anahtarlama frekansının %50'sinin altında olmalıdır [48]. Rezonans frekansı eşitlikte gösterilen aralıklarda yer almaktadır.

$$\begin{array}{ccccc} 10 f_{\text{sebeke}} & < & f_{rez} & < & 0,5 f_{sw} \\ 50 & < & 2365,47 & < & 7500 \end{array} \quad (5.14)$$

Sönümlenme direnci ne kadar büyük olursa sönümlenme etkisi o kadar iyi olmaktadır. Sönümlenme direnci, salınımın çok kısa sürede sona ermesine neden olmaktadır. Fakat filtre kondansatörüne seri olarak bağlanan direnç çok büyük olursa verimi düşmektedir [30]. Sönümlenme direnci aşağıdaki gibi bulunmaktadır;

$$R_f = \frac{1}{3} \times X_{C_f@rezonans} = \frac{1}{3 \omega_{rez} C_f} \quad (5.15)$$

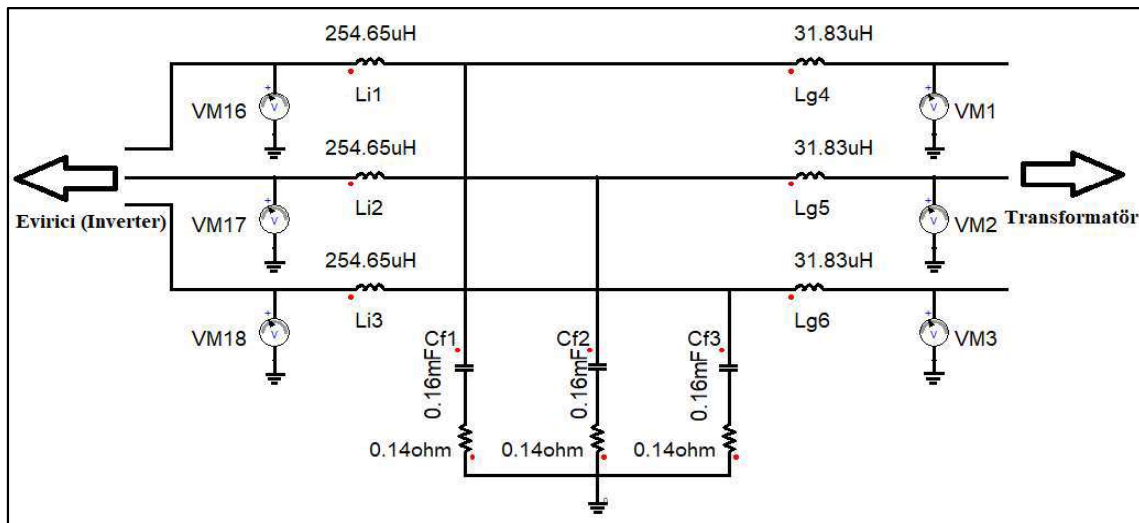
$$R_f = \frac{1}{3 (2\pi f_{rez}) C_f} = \frac{1}{3 \times 2\pi \times 2365,47 \times (0,16 \times 10^{-3})} = 0,14 \, \Omega \quad (5.16)$$

LCL filtresi için hesaplanan parametreler aşağıdaki tabloda özetlenmektedir.

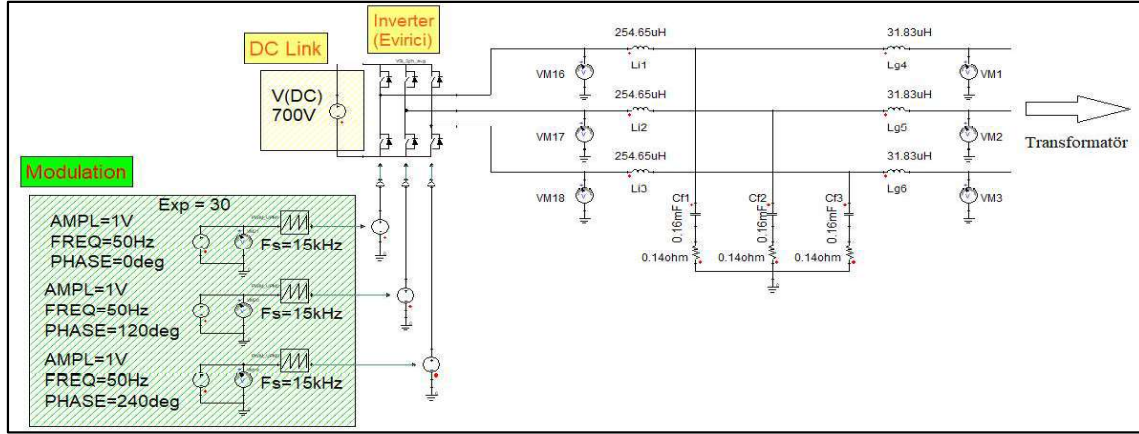
Çizelge 5.2. LCL filtresi için hesaplanan parametreler

| Parametre                        |           | Değer           |
|----------------------------------|-----------|-----------------|
| Evirici tarafındaki endüktans    | $L_i$     | 254,65 $\mu$ H  |
| Şebeke tarafındaki endüktans     | $L_g$     | 31,83 $\mu$ H   |
| Filtrenin kondansatörü           | $C_f$     | 0,16 mF         |
| Seri bağlanan sönümlenme direnci | $R_f$     | 0,14 m $\Omega$ |
| Rezonans frekansı                | $f_{rez}$ | 2365,47 Hz      |

Benzetim çalışmasında LCL filtresi aşağıdaki gibi tasarlanmaktadır. Bu devre eviricinin çıkışına bağlanır. Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

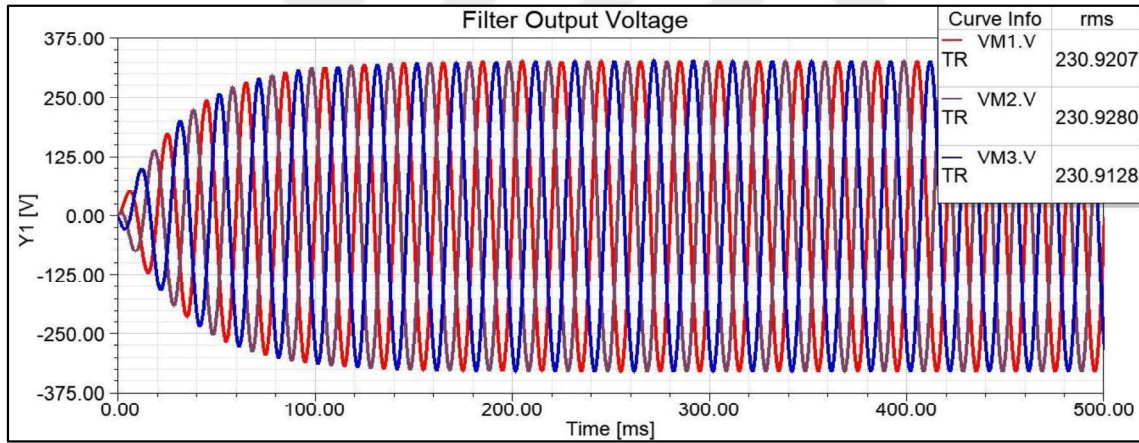


Resim 5.5. Tasarlanan LCL filtresi

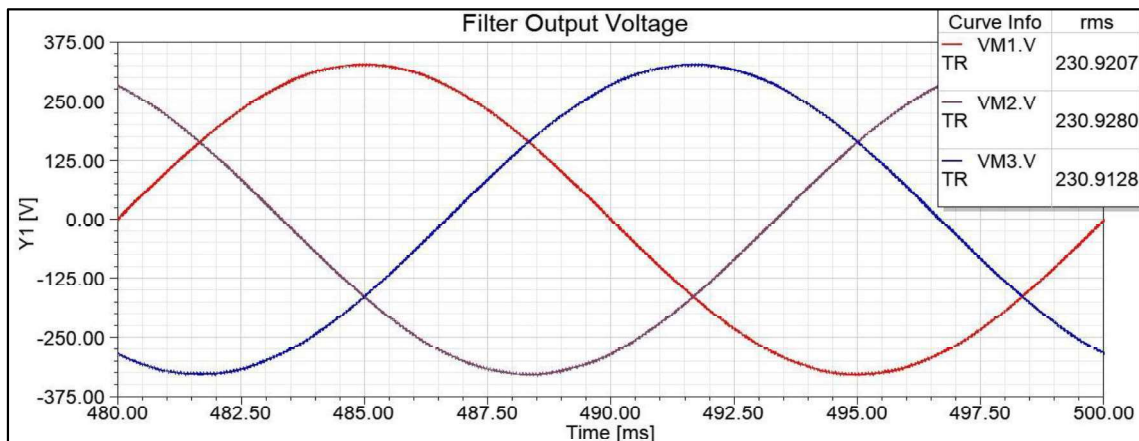


Resim 5.6. Eviricinin ve filtrenin tasarımı

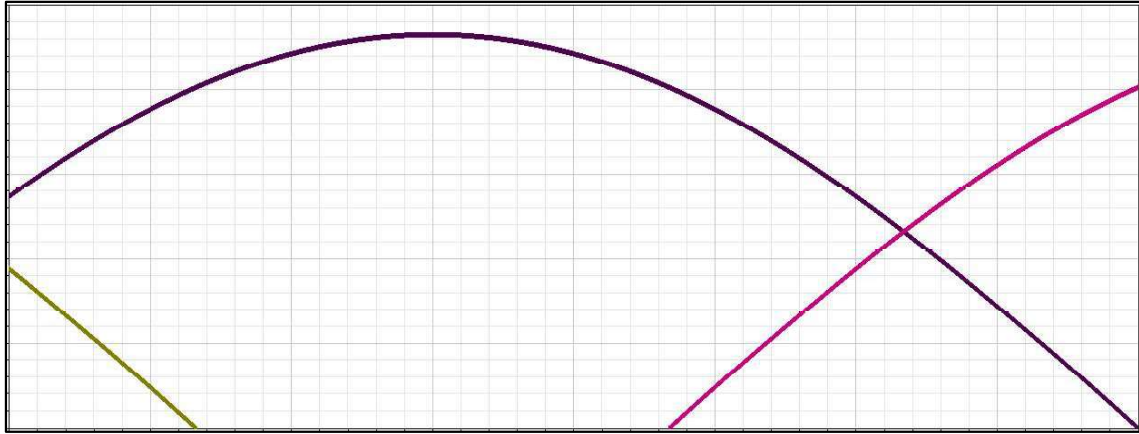
VM1, VM2 ve VM3 isimli voltmetreler filtrenin çıkış gerilimini göstermektedir. Benzetim çalışmasının sonucunda filtrenin çıkış geriliminin etkin değeri 230.92 volt olup dalga formu Resim 5.7 ve 5.8’de verilmektedir.



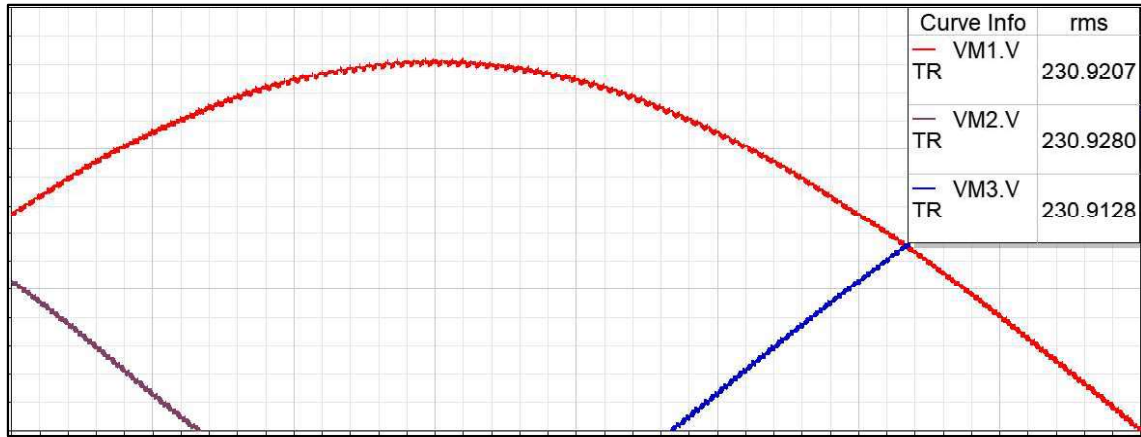
Resim 5.7. Filtrenin çıkış gerilimi



Resim 5.8. Filtrenin çıkış gerilimi (yakından gösterim)



Resim 5.9. AC gerilimin dalga formu



Resim 5.10. Filtrenin çıkışında gerilimin dalga formu

## 5.2. Fotovoltaik Sisteme Bağlanan Transformatörün Modellenmesi ve Analizi

Fotovoltaik sisteme bağlanan transformatörün parametreleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir. 160 kVA kuru- tip dağıtım transformatörüne *ANSYS Elektronik Desktop 19.2* versiyonunda *Transient* analizi yapılmaktadır.

Çizelge 5.3. Fotovoltaik sisteme bağlanan transformatörün parametreleri

| Transformatörün Parametreleri |          |
|-------------------------------|----------|
| Anma gücü                     | 160 kVA  |
| Anma giriş gerilimi           | 33 kV    |
| Anma çıkış gerilimi           | 0,4 kV   |
| Primer anma akımı             | 2,8 A    |
| Sekonder anma akımı           | 230,94 A |

Çizelge 5.3. (devam) Fotovoltaik sisteme bağlanan transformatörün parametreleri

|                                      |                        |            |
|--------------------------------------|------------------------|------------|
| Anma frekans / Faz sayısı            | 50 Hz / 3              |            |
| Boşta akımın yüzdesi (% $I_0$ + %30) | %2,73                  |            |
| Bağlantı grubu                       | Dy <sub>n</sub> 11     |            |
| Boşta kayıp                          | 850 W                  |            |
| Yükte kayıp                          | DC kaybı               | AC kaybı   |
|                                      | 2 320 W                | 163 W      |
| Manyetik akı                         | 1,61 T                 |            |
| Nüve kesit alanı                     | 184.46 cm <sup>2</sup> |            |
| Sarım sayısı                         | AG sargısı             | YG sargısı |
|                                      | 35                     | 5002       |
| Isınma (sıcaklık)                    | AG sargısı             | YG sargısı |
|                                      | 49°C                   | 64.2°C     |
| Soğutma tipi                         | AN                     |            |

Fotovoltaik sisteme bağlı durumda yapılan analizler önceki bölümde yapılan analizler ile aynıdır. Fakat fotovoltaik sistem, daha fazla elemana sahip olduğu için analiz süreci de daha uzun olmaktadır. Analiz sürecini azaltmak amacıyla fotovoltaik sisteme bağlı durumda yapılan tüm analizler iki boyutlu şeklinde yapılmaktadır. *Maxwell 2D* programında transformatör modeli oluşturulduktan sonra malzeme bilgisi ve diğer gereken parametreler belirlenmektedir. Transformatörü beslemek için *Maxwell* ile *Twin Builder* arasında *Co-Simulation* (Eş Zamanlı Çalıştırılması) yapılmaktadır. *Twin Builder* yazılımında uyartım devresi kurulup benzetim süreci başlamaktadır.

DC gerilim kaynaklı fotovoltaik sisteme bağlanmadan önce bu transformatör AC gerilim kaynağına bağlanacak ve analiz edilecektir. Bu bölümde, yapılan iki farklı sisteme bağlı transformatörün analiz sonuçları karşılaştırılacaktır.

### 5.2.1. AC girişli analiz sonuçları

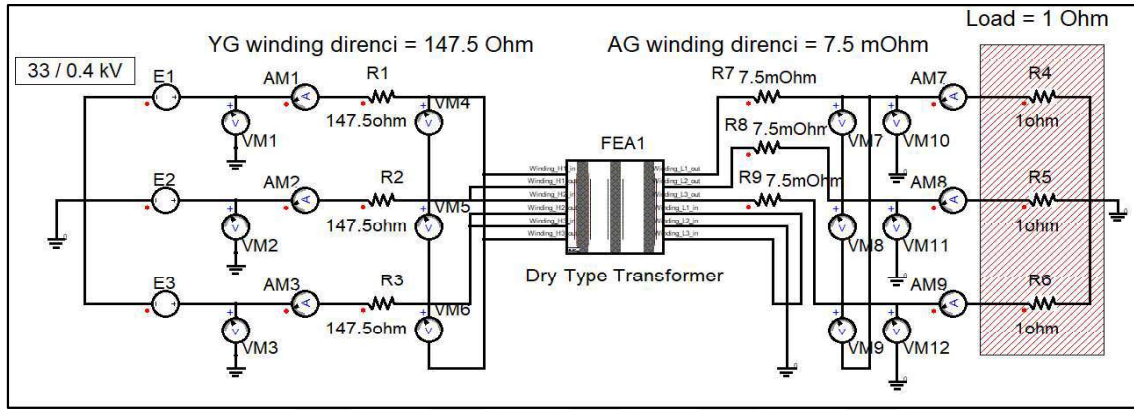
AC girişli analizinde incelenen transformatör delta-yıldız olarak bağlanır. Harici uyartım devresi Resim 5.11’de gösterilmektedir. Bu analizde, çözüm süreci ve örnekleme zamanı sırayla 500 ms ve 0,2 ms olarak belirlenmektedir. Fotovoltaik sisteme bağlanacak transformatöre sadece tam yükte (*full-load*) çalışma durumunda iken analiz yapılmaktadır.

Resim 5.11’de gösterildiği gibi yük yıldız şeklinde bağlanır ve değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Z_{Load(Y)} = \frac{(V_{faz(sek)})^2}{S/3} = \frac{(230,94)^2}{160\,000/3} = 0,9999 \cong 1\,\Omega \quad (5.17)$$

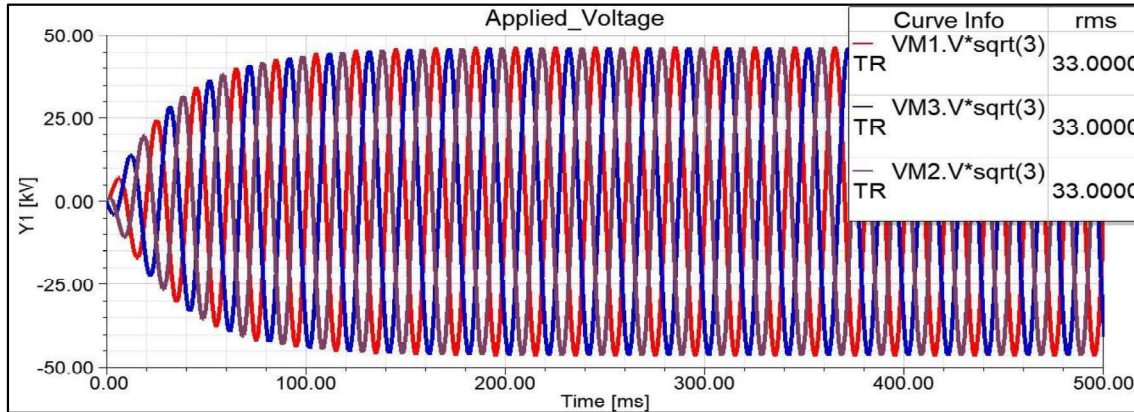
veya

$$Z_{Load(Y)} = \frac{V_{faz(sek)}}{I_{faz(sek)}} = \frac{230,94}{230,94} = 1\,\Omega \quad (5.18)$$



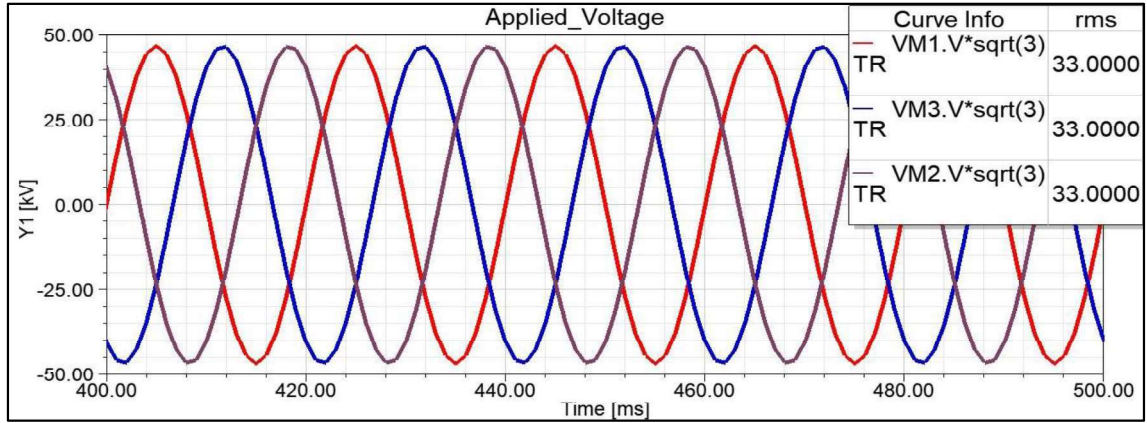
Resim 5.11. AC girişli analizinde transformatörün bağlantı şekli

Benzetim çalışmasında gerilim kaynağına eksponansiyel uygulanmaktadır. Bu nedenle, gerilimler ve akımlar sıfırdan başlanıp yavaş yavaş kararlı duruma (*steady-state*) ulaşmaktadır. Dalga formunda gösterildiği gibi 100 ms’den sonra giriş gerilimi ancak kararlı duruma ulaşmaktadır. Bu analizde, etkin değeri hesaplamak için 400 ms’den sonraki veriler dikkate alınmaktadır. Uygulanan giriş geriliminin etkin (rms) değeri 33 kV’tur.



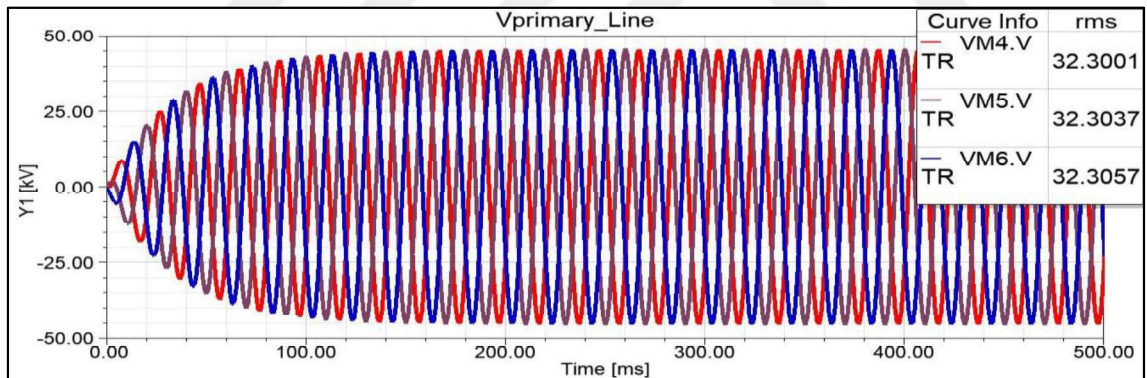
Resim 5.12. AC girişli analizinde transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu



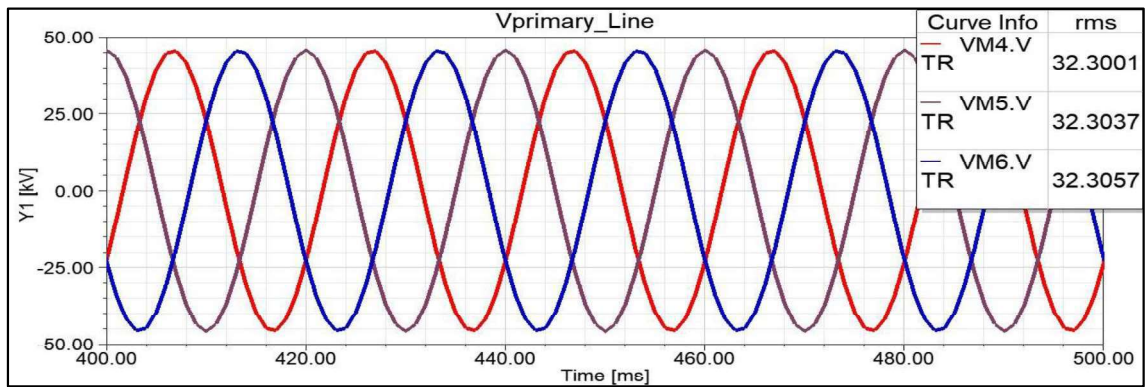


Resim 5.13. AC girişli analizinde transformatörün primer tarafına uygulanan gerilimin dalga formu (yakından gösterim)

Primer sargısına indüklenen hat gerilimi aşağıdaki Resim 5.14 ve Resim 5.15'te verilmektedir. Primer tarafı delta bağı olduğu için faz ve hat geriliminin değeri aynı olmaktadır. Analiz sonucuna göre primer sargısına indüklenen gerilimin etkin değeri yaklaşık olarak 32.3 kV bulunmaktadır.



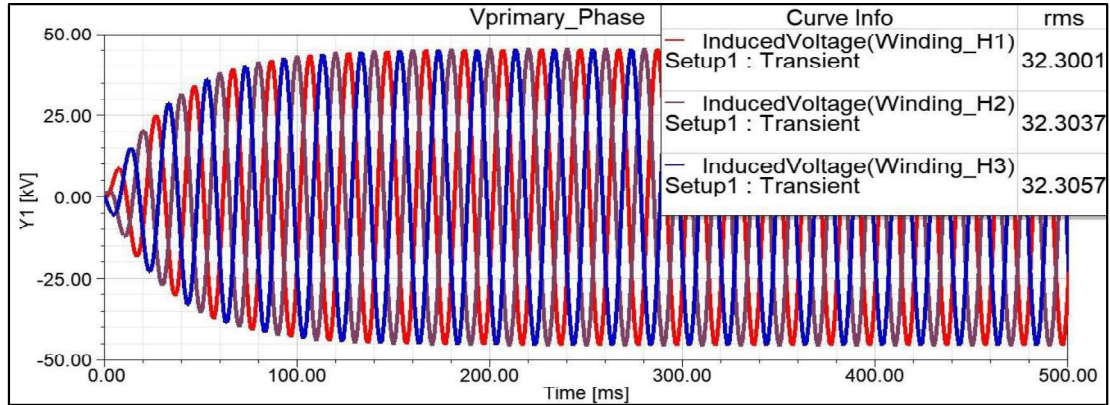
Resim 5.14. AC girişli analizinde primer sargının hat geriliminin dalga formu



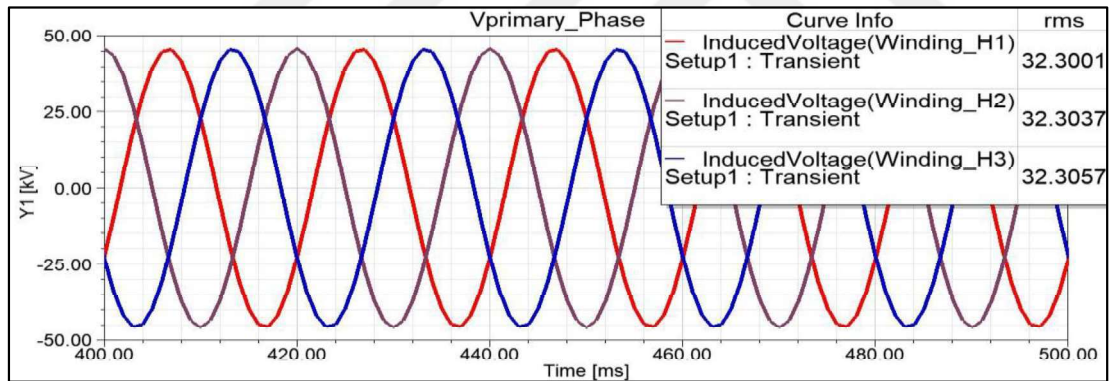
Resim 5.15. AC girişli analizinde primer sargının hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim)



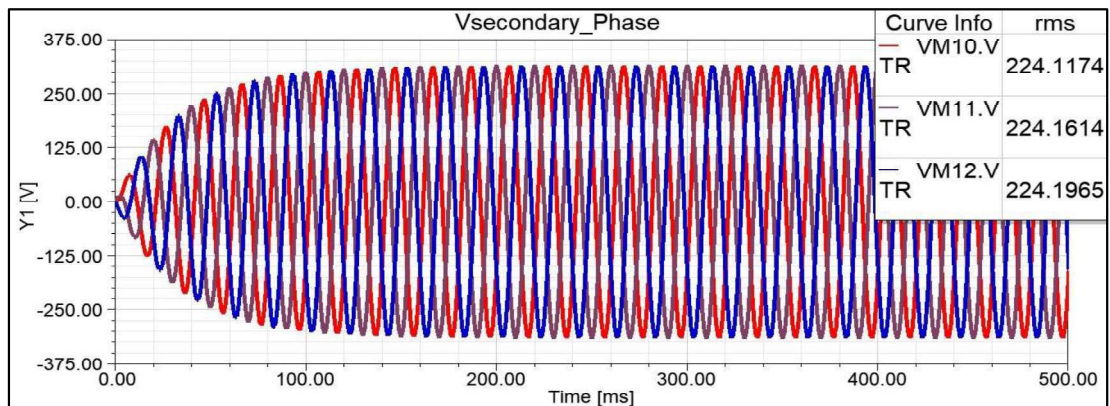
*Twin Builder* programındaki VM4, VM5 ve VM6 isimli voltmetreler primer sargının hat gerilimini okumaktadır. Primer sargının faz gerilimi, Maxwell programındaki geçici durum (Transient) sonuçlarından elde edilmektedir. Primer sargısına indüklenen faz gerilimi aşağıdaki Resim 5.16 ve Resim 5.17’de verilmektedir.



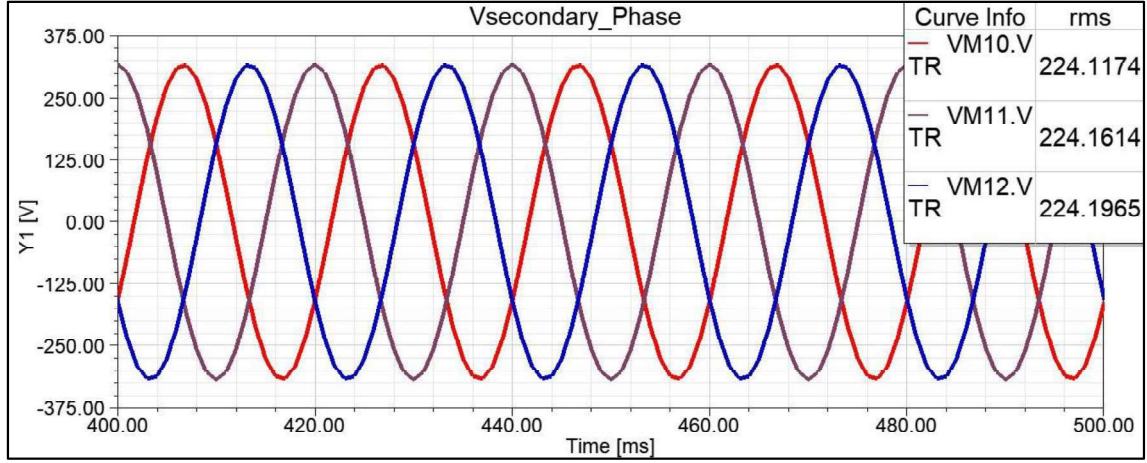
Resim 5.16. AC girişli analizinde primer sargının faz geriliminin dalga formu



Resim 5.17. AC girişli analizinde primer sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim)



Resim 5.18. AC girişli analizinde sekonder sargının faz geriliminin dalga formu



Resim 5.19. AC girişli analizinde sekonder sargının faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

İndüklenen primer ve sekonder gerilim aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

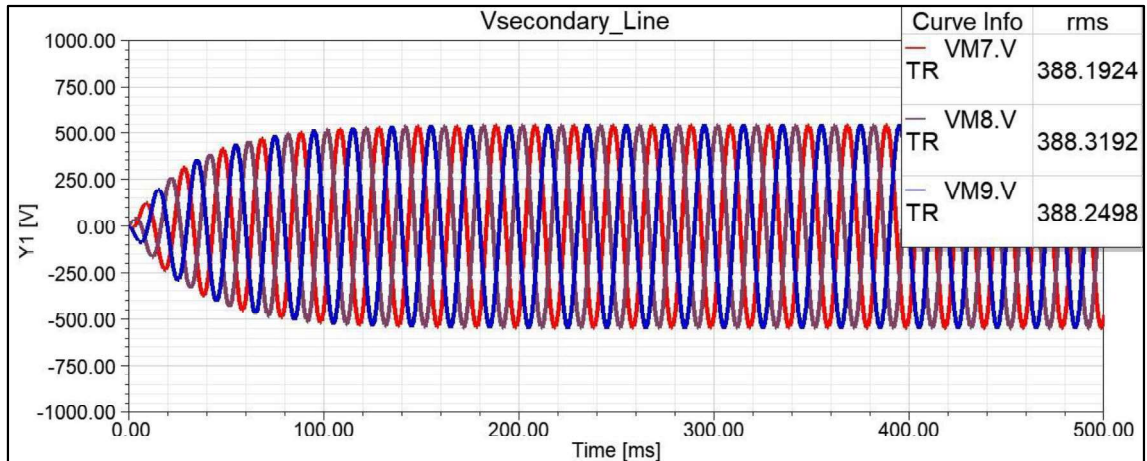
$$e_{rms (prim)} = \frac{N_{(prim)} B_{max} A 2\pi f}{\sqrt{2}} = \frac{5002 \times 1.61 \times 184.46 \times 10^{-4} \times 2\pi \times 50}{\sqrt{2}} \cong 33 \text{ kV} \quad (5.19)$$

$$e_{rms (sek)} = \frac{N_{(sek)} B_{max} A 2\pi f}{\sqrt{2}} = \frac{35 \times 1.61 \times 184.46 \times 10^{-4} \times 2\pi \times 50}{\sqrt{2}} = 230.9 \text{ V} \quad (5.20)$$

Transformatörün sekonder sargısı yıldız bağlı olduğu için faz ile hat gerilimi aynı değildir. Sekonder tarafının hat gerilimi aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

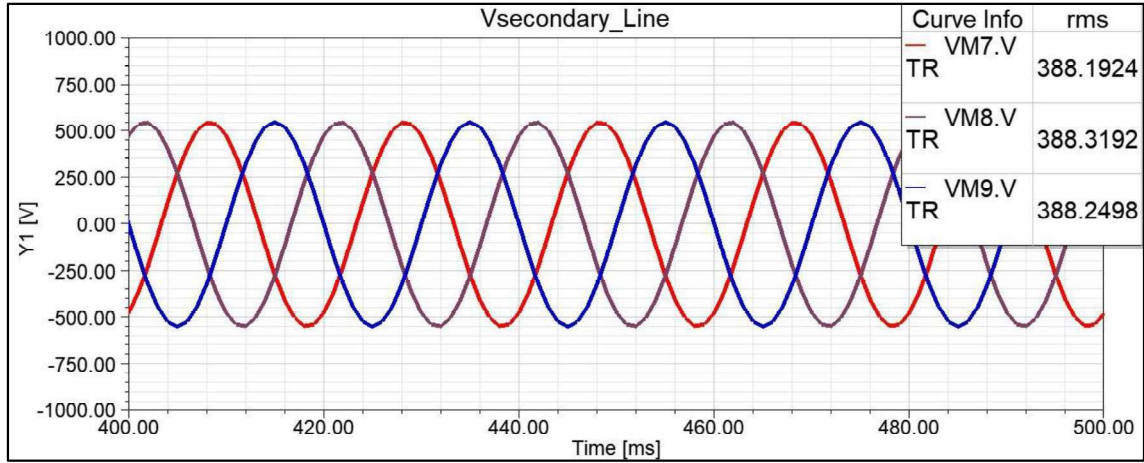
$$e_{hat (sek)} = e_{faz (sek)} = 230.09 \times \sqrt{3} = 399.9 \cong 400 \text{ V} \quad (5.21)$$

Analiz sonucunda elde edilen sekonder sargının hat gerilimi aşağıda gösterilmektedir.



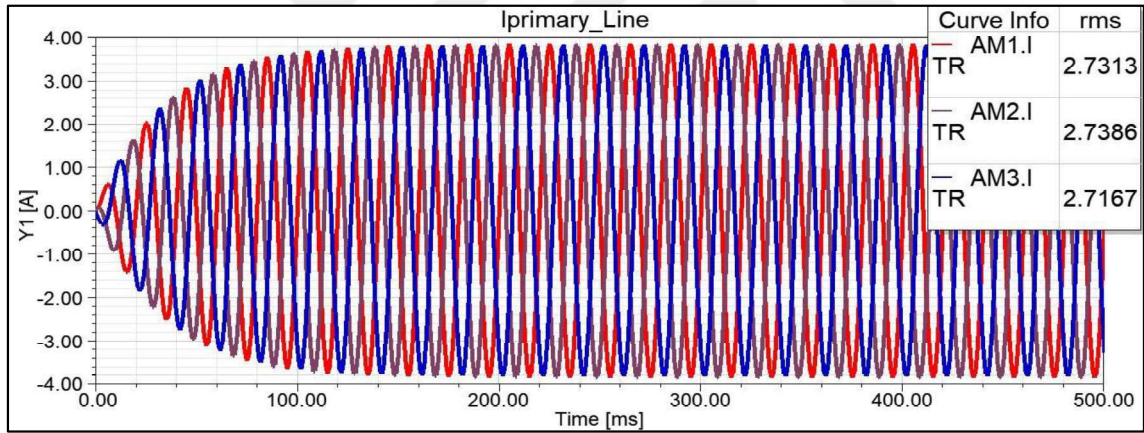
Resim 5.20. AC girişli analizinde sekonder sargının hat geriliminin dalga formu



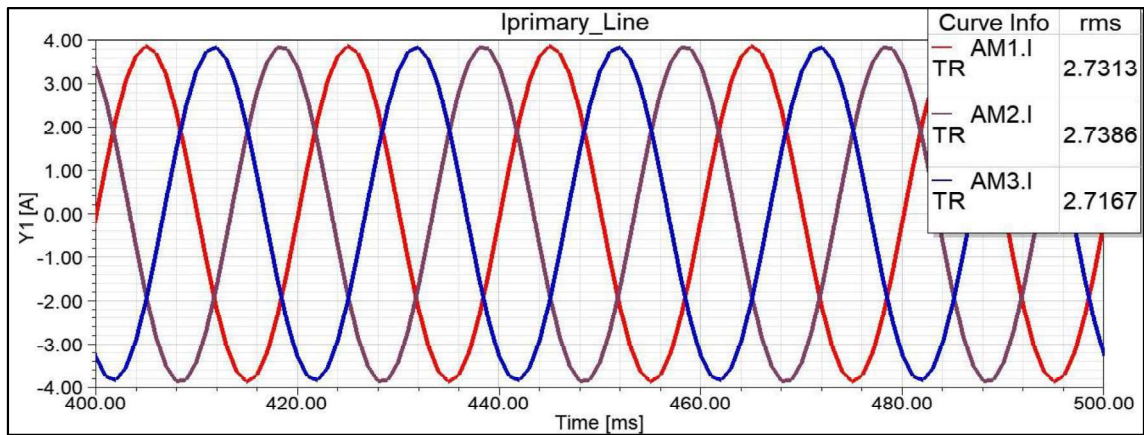


Resim 5.21. AC girişli analizinde sekonder sargının hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

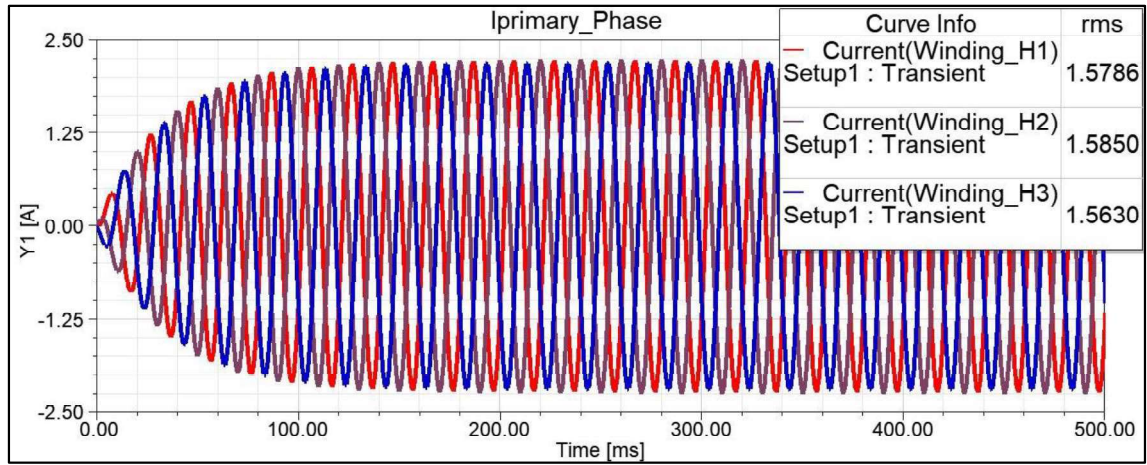
Benzetim çalışmasının sonucunda elde edilen tam yükte (*full-load*) akımların dalga formları aşağıda gösterilmektedir.



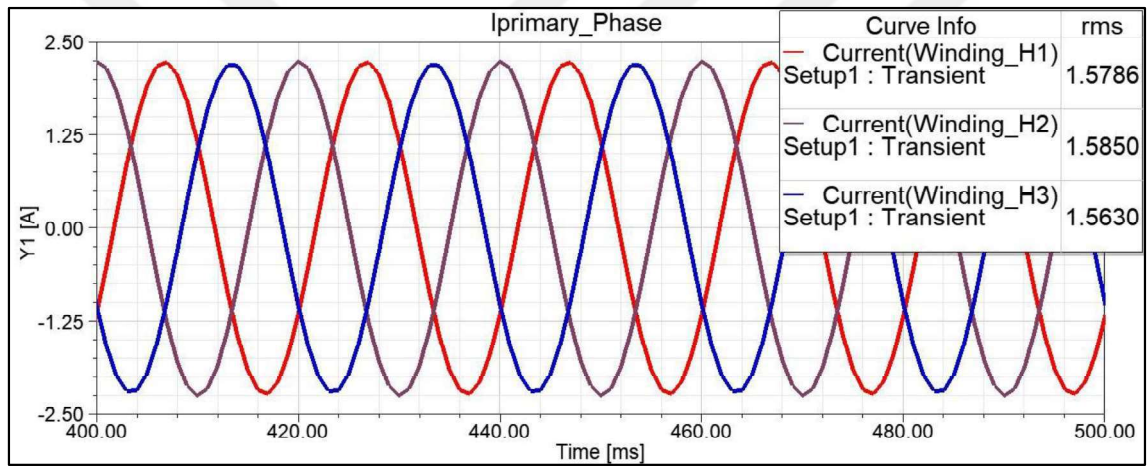
Resim 5.22. AC girişli analizinde primer hat akımının dalga formu



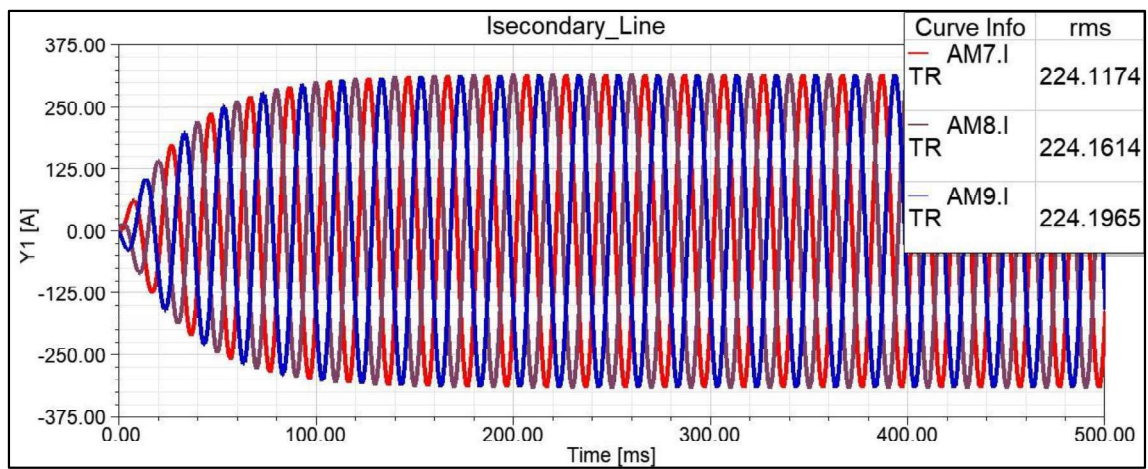
Resim 5.23. AC girişli analizinde primer hat akımının dalga formu (yakından gösterim)



Resim 5.24. AC girişli analizinde primer faz akımının dalga formu

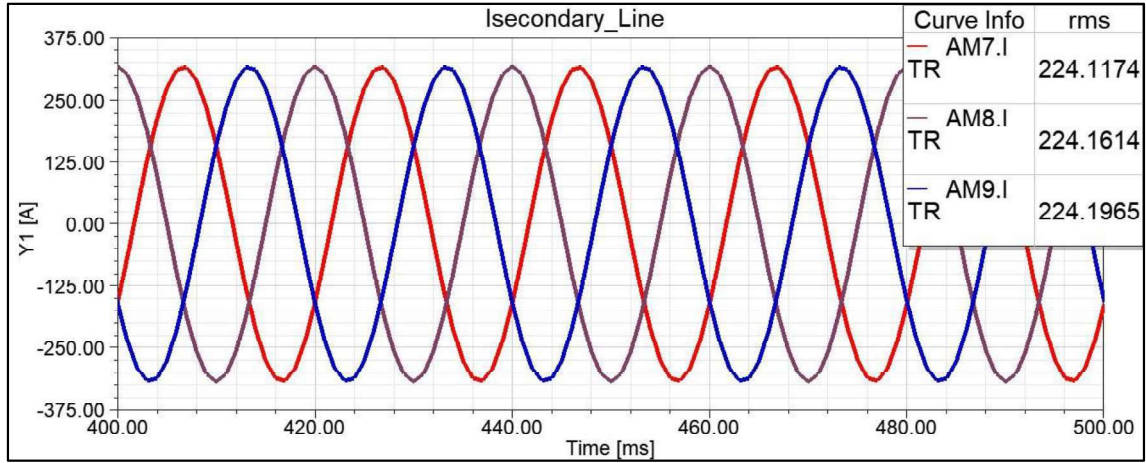


Resim 5.25. AC girişli analizinde primer faz akımının dalga formu (yakından gösterim)

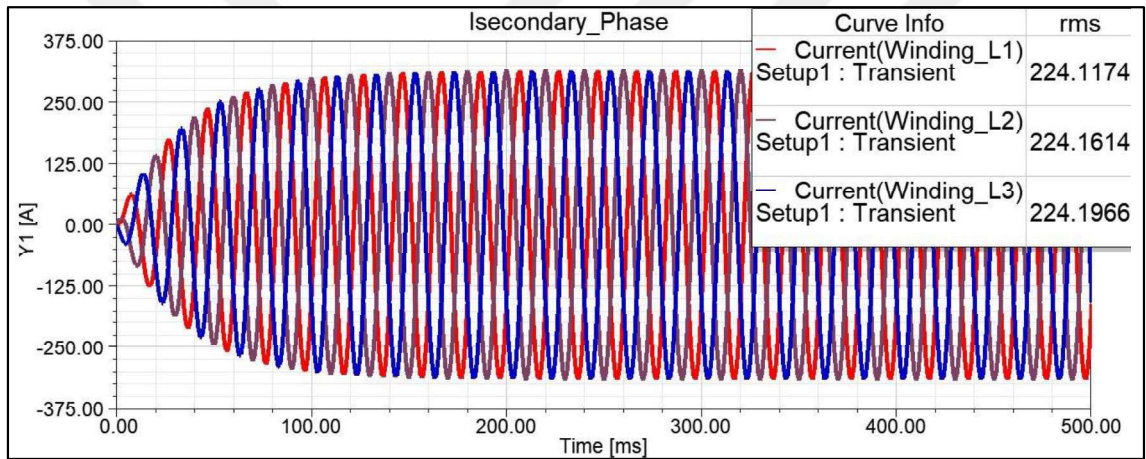


Resim 5.26. AC girişli analizinde sekonder hat akımının dalga formu

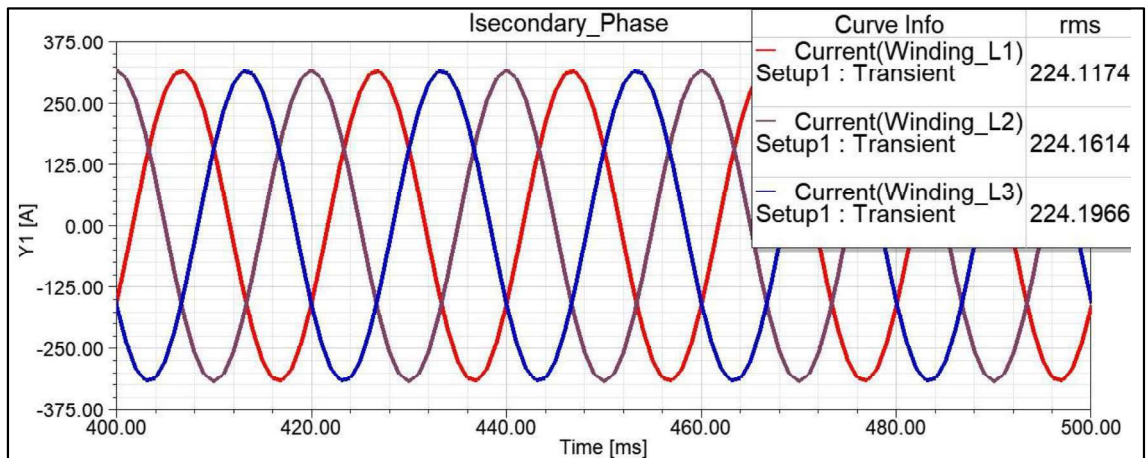




Resim 5.27. AC girişli analizinde sekonder hat akımının dalga formu (yakından gösterim)



Resim 5.28. AC girişli analizinde sekonder faz akımının dalga formu



Resim 5.29. AC girişli analizinde sekonder faz akımının dalga formu (yakından gösterim)

Fotovoltaik sisteme bağlı durumunda yapılan analizler 160 kVA'lık bir transformatör üzerinde yapılmaktadır. Bu transformatör 33 kV'u 400 V'a düşürmektedir. Bu bilgiler kullanılarak primer ve sekonder nominal akımlar hesaplanabilir.

$$S = \sqrt{3} I_{hat} V_{hat} \quad (5.22)$$

$$I_{hat}(prim) = \frac{S}{\sqrt{3} V_{hat}(prim)} = \frac{160\,000}{\sqrt{3} \times 33\,000} = 2.799 \cong 2.8 \text{ A} \quad (5.23)$$

$$\text{Delta bağı} \rightarrow I_{faz}(prim) = \frac{I_{hat}(prim)}{\sqrt{3}} = \frac{2.8}{\sqrt{3}} = 1.62 \text{ A} \quad (5.24)$$

$$I_{hat}(sek) = \frac{S}{\sqrt{3} V_{hat}(sek)} = \frac{160\,000}{\sqrt{3} \times 400} = 230.94 \text{ A} \quad (5.25)$$

$$\text{Yıldız bağı} \rightarrow I_{faz}(sek) = I_{hat}(sek) = 230.94 \text{ A} \quad (5.26)$$

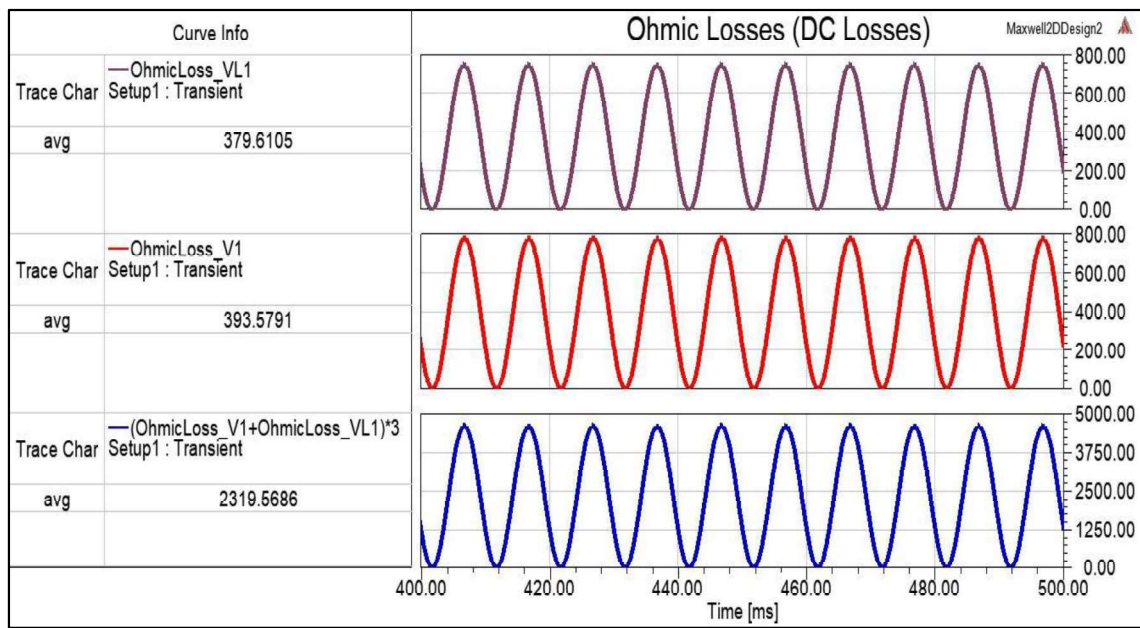
AC gerilim kaynağına bağlı durumdaki tam yükte analiz sonuçları ile transformatörün işaret plakasında verilen bilgiler aşağıdaki tabloda karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, analizin doğruluğu yüzde şeklinde raporlanmaktadır.

Çizelge 5.4. 160 kVA kuru-tip transformatörün analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları

|                       | İŞARET<br>PLAKASI | HESAPLAMA<br>SONUCU | ANALİZ<br>SONUCU | ANALİZİN<br>DOĞRULUĞU<br>(%) |
|-----------------------|-------------------|---------------------|------------------|------------------------------|
| Primer hat gerilimi   | 33 kV             | 33 004,66 V         | 32.3032 kV       | 97.89 %                      |
| Sekonder hat gerilimi | 400 V             | 400 V               | 388.2538 V       | 97.06 %                      |
| Sekonder faz gerilimi | 230.9 V           | 230.940 V           | 224.1584 V       | 97.08 %                      |
| Primer hat akımı      | 2.80 A            | 2.799 A             | 2.7289 A         | 97.46 %                      |
| Primer faz akımı      | 1.62 A            | 1.616 A             | 1.5755 A         | 97.25 %                      |
| Sekonder hat akımı    | 230,94 A          | 230.940 A           | 224.1584 A       | 97.06 %                      |

Fotovoltaik sisteme bağlı transformatöre sadece tam yükte (*full-load*) çalışma durumunda analiz yapılmaktadır. Bu nedenle AC girişli analizinde sadece primer ve sekonderin sargı kayıpları (Omik kaybı) elde edilmektedir.

250 kVA transformatöre yapılan kayıp analizi gibi bu analizde de kayıp sonuçları *Maxwell*'in hesap makinesi yardımıyla bulunmaktadır. Resim 5.30'da gösterildiği gibi alçak (sekonder) ve yüksek (primer) gerilimin her faz için Omik kayıp değeri sırayla 379.6105 W ve 393.5791 W olarak bulunmaktadır.



Resim 5.30. Alçak ve yüksek gerilimin her faz için Omik kaybı

Transformatördeki her faz için toplam Omik kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{CU} = I_{(prim)}^2 R_{(prim)} + I_{(sek)}^2 R_{(sek)} = 387.099 + 402.0153 = 789.11 \text{ W @faz} \quad (5.27)$$

$$\hookrightarrow P_{CU(toplam)} = 3 \times 789.11 = 2367.3429 \text{ W} \quad (5.28)$$

AC gerilim kaynağına bağlı tam yükte çalışma durumundaki kayıp sonuçları ile transformatörün hesaplama sonucunda elde edilen kayıp değerleri aşağıdaki tabloda karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, analizin doğruluğu yüzde şeklinde raporlanmaktadır.

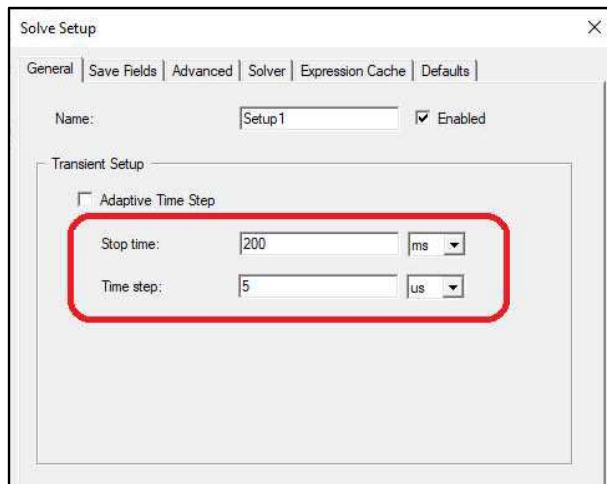


Çizelge 5.5. 160 kVA kuru- tip transformatörün tam yükte çalışma durumundaki kayıp sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları

|                                               | İŞARET<br>PLAKASI | HESAPLAMA<br>SONUCU                | ANALİZ<br>SONUCU                    | ANALİZİN<br>DOĞRULUĞU<br>(%) |
|-----------------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Tam Yükte Çalışma Durumundaki Kayıp Sonuçları |                   |                                    |                                     |                              |
| Bakır (sargı)<br>kaybı                        | 2320 W            | 2367.343 W                         | 2319.5686 W                         | 99.98 %                      |
| YG (omik)<br>kaybı                            | -                 | 1206.046 W<br>(402.0153 W<br>@faz) | 1180.7373 W<br>(393.5791 W<br>@faz) | -                            |
| AG (omik)<br>kaybı                            | -                 | 1161.297 W<br>(387.099 W<br>@faz)  | 1138.8315 W<br>(379.6105 W<br>@faz) | -                            |

### 5.2.2. DC girişli analiz sonuçları

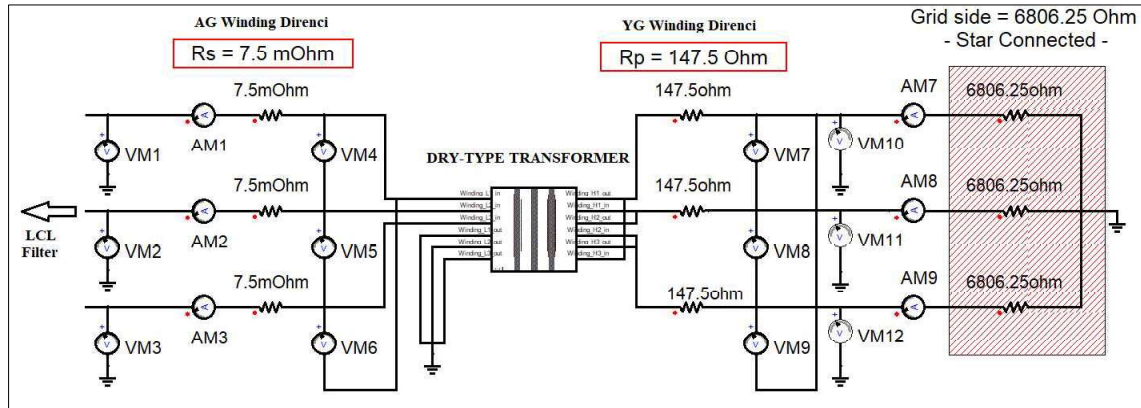
Filtrenin çıkış gerilimi ve akımının üzerinde dalgalanma görülmektedir. Bu dalgalanmaların dikkate alınabilmesi için örnekleme zamanı çok küçük seçilmelidir. Bu analizde, çözüm süreci ve örnekleme zamanı sırayla 200 ms ve 5  $\mu$ s olarak belirlenmektedir. Örnekleme zamanı çok küçük ise bir periyotta alınan örnekleme sayısı da çok fazladır. Bu nedenle, DC girişli analizi sadece 200 ms'ye kadar çalıştırılmaktadır.



Resim 5.31. DC girişli analizi için çözüm süreci ve örnekleme zamanı

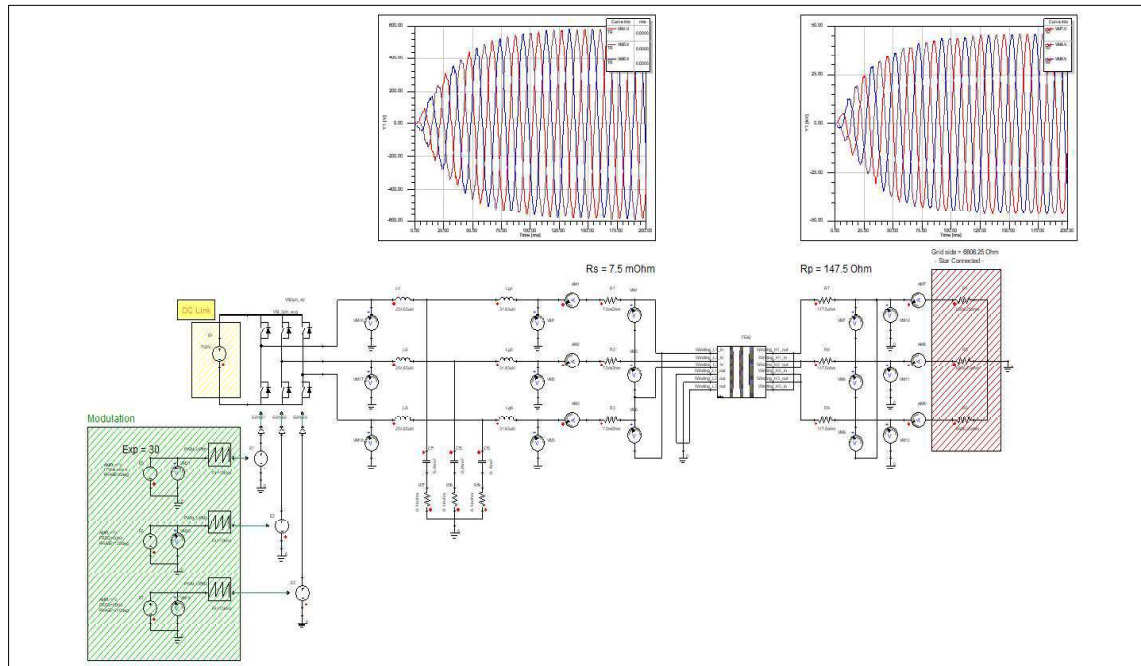
Fotovoltaik sisteme bağlanan transformatör yıldız- delta olarak bağlanır. Transformatörün harici uyartım devresi Resim 5.32’de gösterilmektedir. Şebeke tarafındaki yük yıldız şeklinde bağlanır ve değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Z_{Load(Y)} = \frac{\left(\frac{V(YG)}{\sqrt{3}}\right)^2}{S/3} = \frac{\left(\frac{33\,000/\sqrt{3}}{160\,000/3}\right)^2}{1} = 6806.25 \, \Omega \quad (5.29)$$



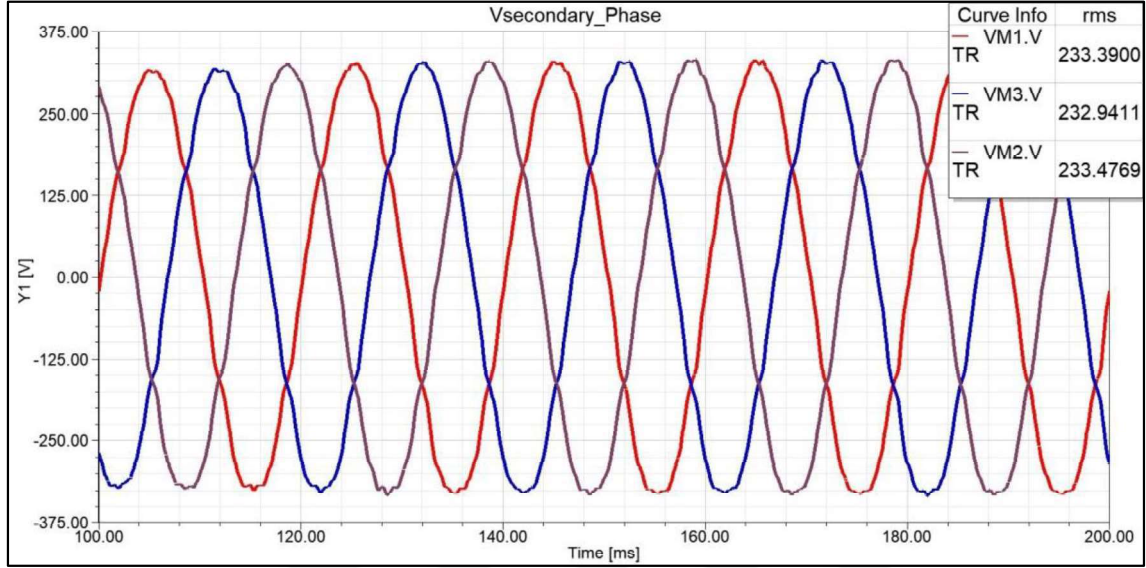
Resim 5.32. DC girişli analizinde transformatörün bağlantı şekli

Transformatörün harici uyartım devresi, önceki kısımda tasarlanan evirici ve LCL filtresine bağlandıktan sonra aşağıdaki gibi bir devre tasarımı elde edilmektedir.

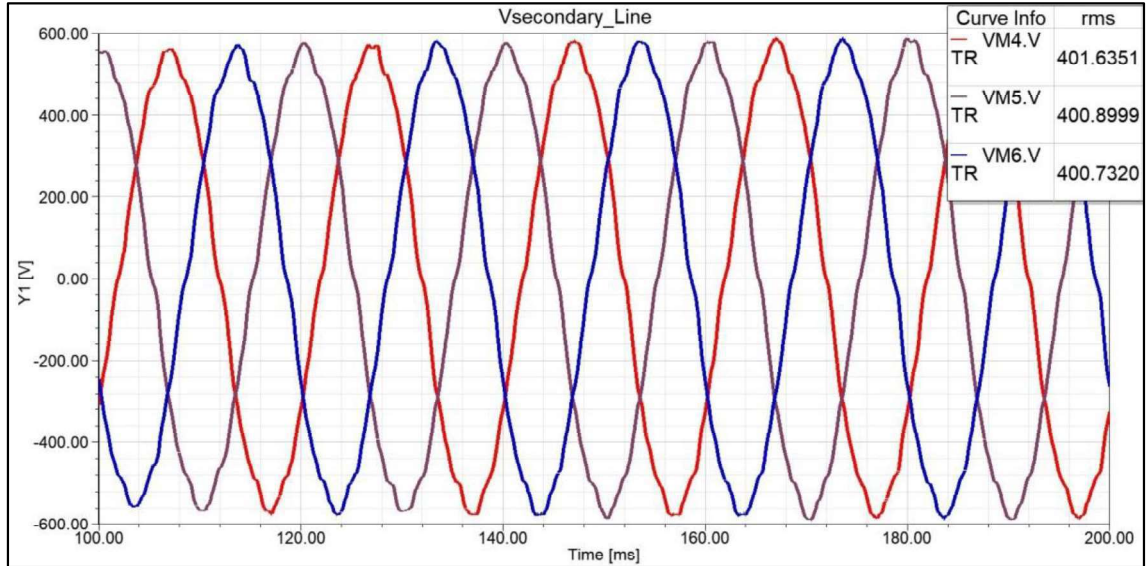


Resim 5.33. Fotovoltaik sistemin devre tasarımı

Benzetim çalışmasına göre alçak gerilimin etkin faz ve hat değeri sırayla 233.269 V ve 401.089 V olarak bulunmaktadır. Fotovoltaik sisteme bağlı durumda elde edilen dalga formlarında bozukluk görülmektedir.

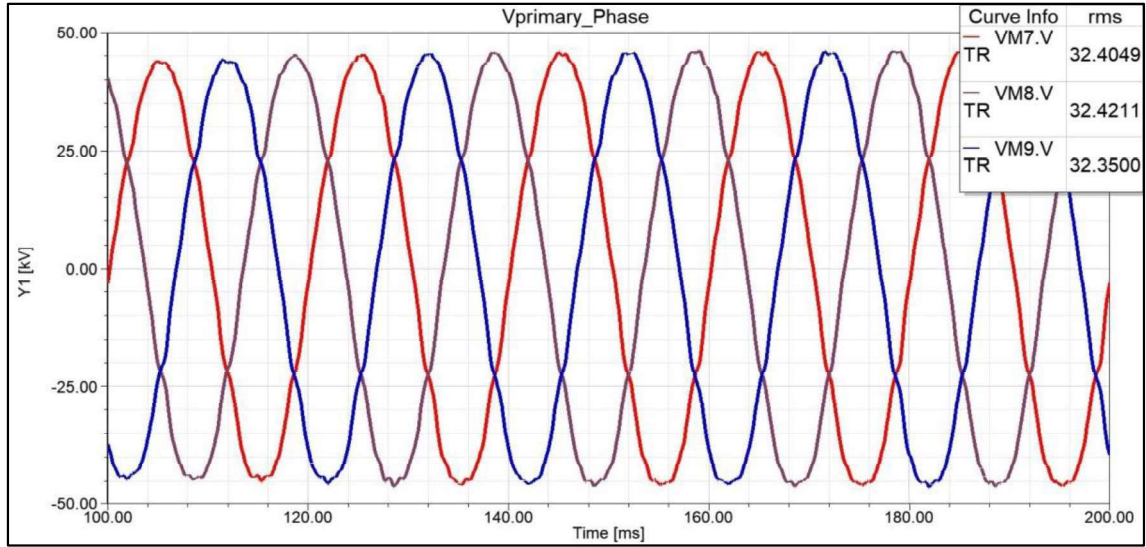


Resim 5.34. DC girişli analizinde alçak tarafı faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

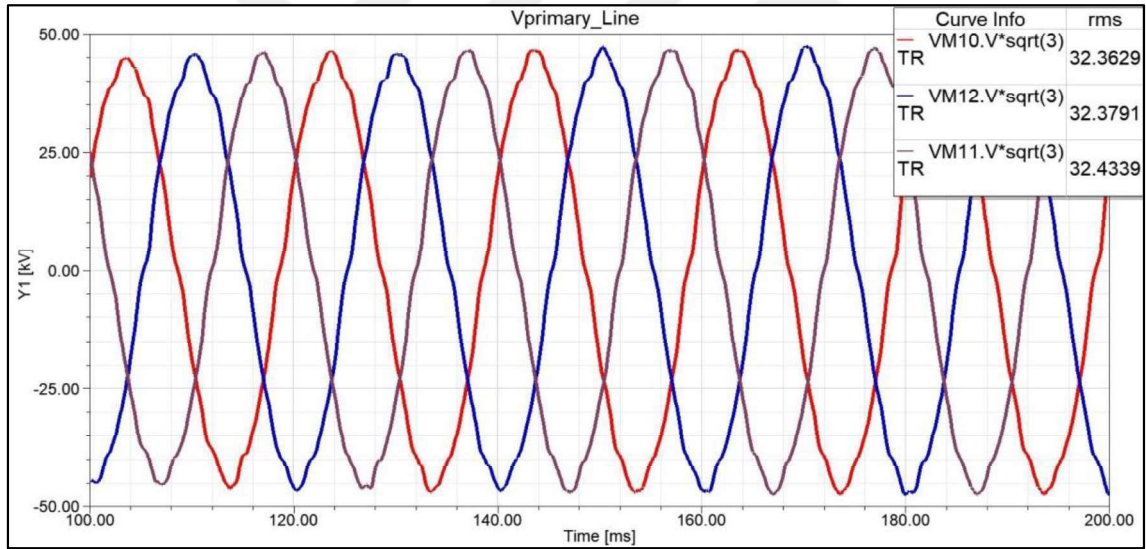


Resim 5.35. DC girişli analizinde alçak tarafı hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

YG tarafı delta bağlı olduğu için faz ve hat geriliminin değeri aynıdır. Fotovoltaik sisteme bağlı durumda YG tarafına indüklenen gerilimin etkin değerinin ortalaması 32.392 kV'tur.



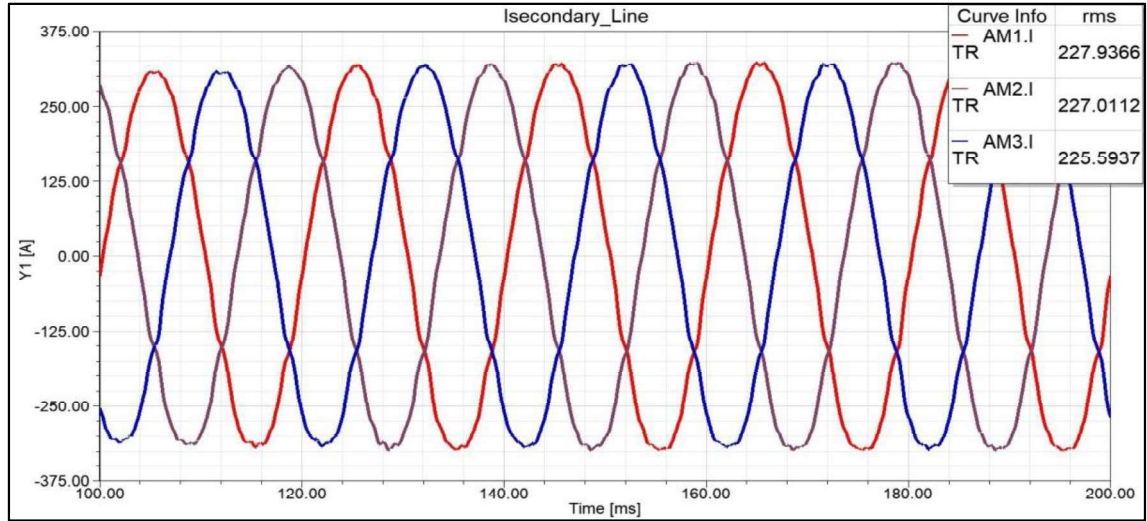
Resim 5.36. DC girişli analizinde yüksek tarafı faz geriliminin dalga formu (yakından gösterim)



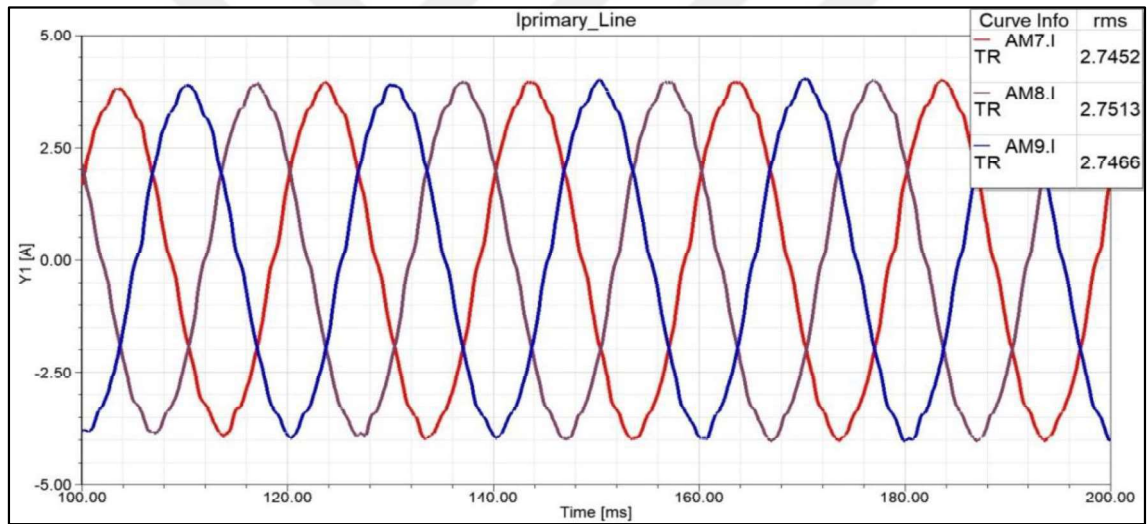
Resim 5.37. DC girişli analizinde yüksek tarafı hat geriliminin dalga formu (yakından gösterim)

DC girişli analiz sonucunda elde edilen akımların dalga formlarının yakından gösterimi aşağıdaki resimlerde incelenebilir. Gerilimlerdeki gibi akımların dalga formunda da bozukluk ve dalgalanmalar (*ripple*) görülmektedir. Akım üzerindeki bozukluk ve dalgalanmalar Resim 5.40'ta gösterilmektedir. AG ve YG tarafı hat akımının etkin değeri sırayla 226.847 A ve 2.748 A olarak okunmaktadır. Bu değerler, AC girişli analizine göre bir miktar daha yüksektir. Sargı dirençlerinden akan akım Omik kayba sebep olmaktadır. Akan akım daha yüksek ise oluşan Omik kaybın da daha yüksek olacağı beklenmektedir.

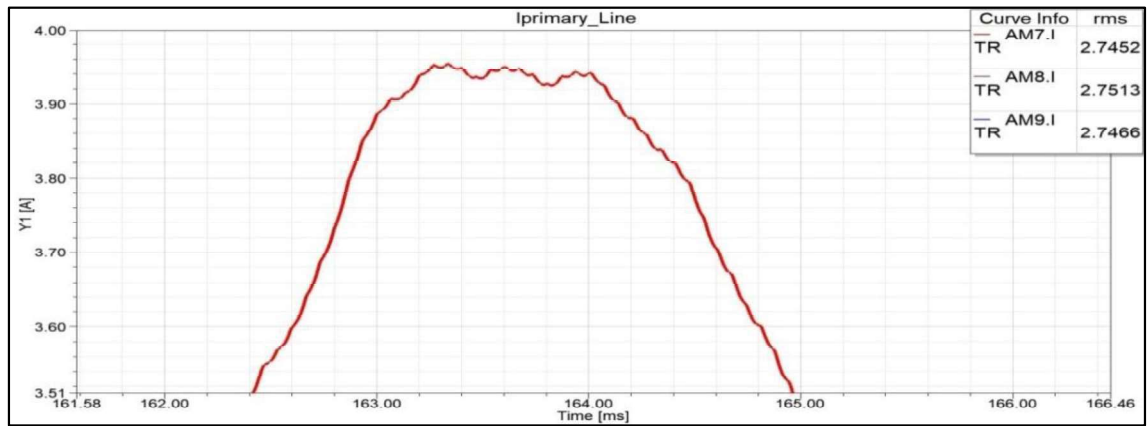




Resim 5.38. DC girişli analizinde AG tarafı hat akımının dalga formu (yakından gösterim)



Resim 5.39. DC girişli analizinde YG tarafı hat akımının dalga formu (yakından gösterim)



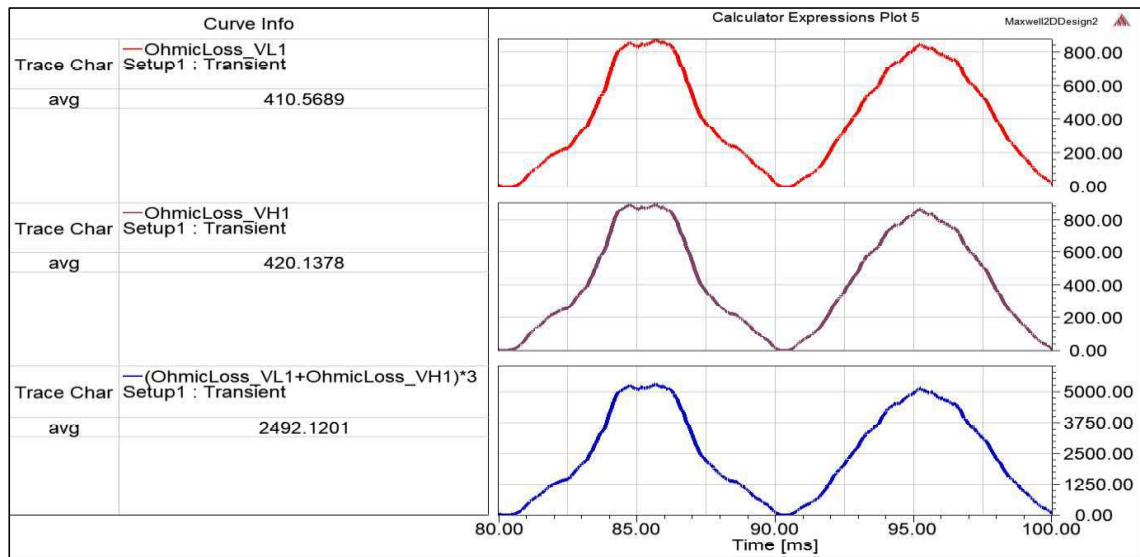
Resim 5.40. DC girişli analizinde YG tarafı hat akımının üzerindeki dalgalanma (yakından gösterim)

DC gerilim kaynağına bağlı durumdaki analiz sonuçları, AC girişli analiz sonuçları ile transformatörün işaret plakasında verilen bilgiler aşağıdaki tabloda karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 5.6. 160 kVA kuru- tip transformatörün DC girişli analiz sonuçlarının karşılaştırılması

|                       | İŞARET PLAKASI | ANALİZ SONUCU     |                    |
|-----------------------|----------------|-------------------|--------------------|
|                       |                | Normal AC girişli | Fotovoltaik Sistem |
| Primer hat gerilimi   | 33 kV          | 32.303 kV         | 32.392 kV          |
| Sekonder hat gerilimi | 400 V          | 388.254 V         | 401.089 V          |
| Sekonder faz gerilimi | 230.9 V        | 224.158 V         | 233.269 V          |
| Primer hat akımı      | 2.80 A         | 2.729 A           | 2.748 A            |
| Sekonder hat akımı    | 230,94 A       | 224.158 A         | 226.847 A          |

Beklendiği gibi fotovoltaik sistemde, Omik kaybı bir miktar daha yüksek bulunmaktadır. Resim 5.41’de gösterildiği gibi alçak (sekonder) ve yüksek (primer) gerilimin her faz için Omik kayıp değeri sırayla 410.5689 W ve 420.1378 W olarak elde edilmektedir. Transformatörün akımlarındaki gibi kayıplarda da bozukluk ve dalgalanmalar görülebilmektedir. AC ve DC gerilim kaynağına bağlı durumdaki kayıp sonuçları ile transformatörün işaret plakasında verilen bilgiler Çizelge 5.8’de karşılaştırılmaktadır.



Resim 5.41. Fotovoltaik sisteminde alçak ve yüksek gerilimin her faz için Omik kaybı

Çizelge 5.7. 160 kVA kuru- tip transformatörün DC girişli tam yükte çalışma durumundaki kayıp sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluk oranları

|                     | İŞARET PLAKASI                                | ANALİZ SONUCU                    |                                  |
|---------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                     |                                               | Normal AC girişli                | Fotovoltaik Sistem               |
|                     | Tam Yükte Çalışma Durumundaki Kayıp Sonuçları |                                  |                                  |
| Bakır (sargı) kaybı | 2320 W                                        | 2319.5686 W                      | 2492.1201 W                      |
| YG (omik) kaybı     | -                                             | 1180.7373 W<br>(393.5791 W @faz) | 1260.4134 W<br>(420.1378 W @faz) |
| AG (omik) kaybı     | -                                             | 1138.8315 W<br>(379.6105 W @faz) | 1231.7067 W<br>(410.5689 W @faz) |

### 5.3. Transformatörün Termal Analizi

Transformatörler, güç sisteminde kullanılan en önemli güç dönüştürme elemanlarından biridir. Son yıllarda yapılan çalışmalara göre, güç sistemindeki harmonik bileşenlerin artışı ile birlikte transformatörde ek sıcaklık artışları meydana gelmektedir [49].

Fotovoltaik sistemdeki harmonikli dalgaları transformatörde daha fazla kayba neden olmaktadır. Bu kayıp artışı, transformatörün tüm metal bölgelerinde sıcaklık artışına ve transformatörün faydalı ömrünün kısaltılmasına yol açmaktadır. Ayrıca, ekonomik kayıplara da sebep olmaktadır [5].

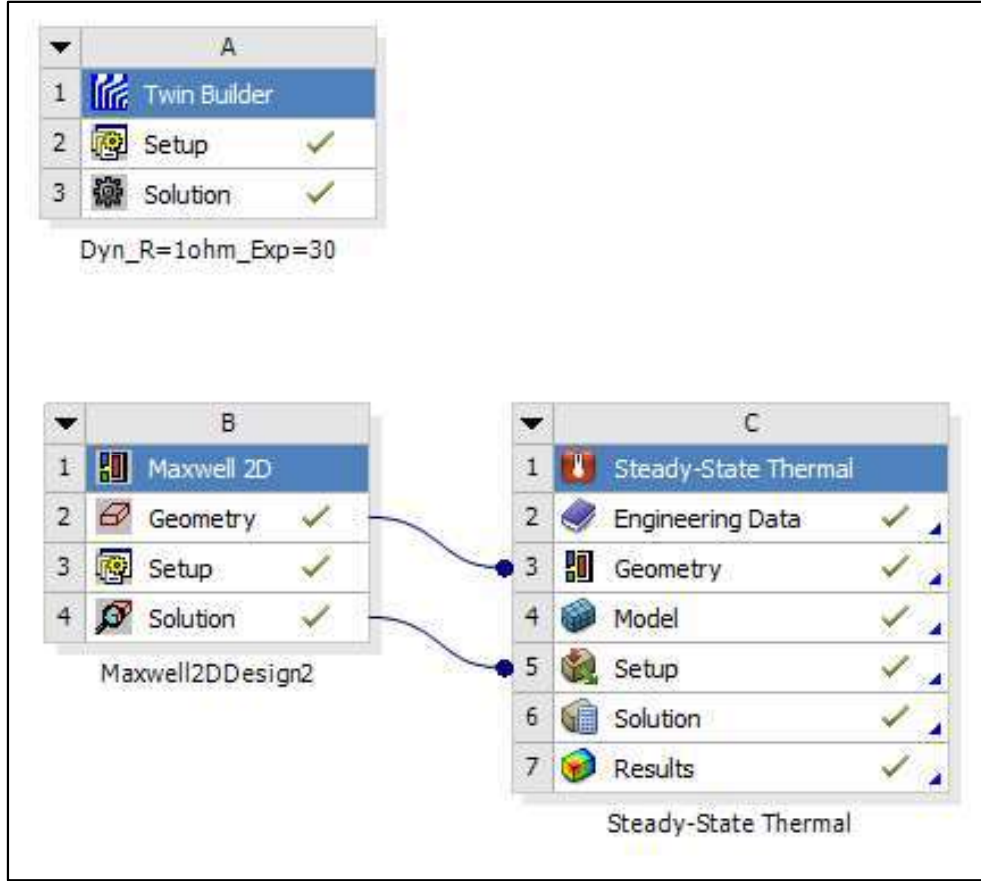
Transformatörün sıcaklığını ölçmek için genel olarak üç farklı yöntem ile yapılmaktadır [18]. Birinci yöntem, deneysel formüllere dayanarak yapılan ölçümlerdir. Bu yöntemde, IEEE ve IEC standardında belirlenen formüller kullanılarak transformatörün HST (Hottest-Spot Temperature / En Sıcak-Nokta Sıcaklığı) ve TOT (Top-Oil Temperature / Üst-Yağ Sıcaklığı) değerleri hesaplanmaktadır. Bu yöntem düşük maliyetli bir yöntemdir fakat formüllerin çözümü çok karmaşıktır. Diğer yöntem ise fiber optik sensörleri yerleştirilerek doğrudan ölçüm yöntemidir. Bu yöntemde, HST ve TOT değerleri sensörler üzerinde



direkt olarak kaydedilmektedir. Sıcaklığa hassas sensörler kullanıldığı için doğrudan ölçüm yöntemiyle elde edilen sonuçların doğruluğu oldukça yüksektir. Fakat bu sensörlerin elde edilmesi, test için yerleştirilmesi ve testten sonra sensörlerin çıkartılması bu yöntemin maliyetini de yükseltmektedir. Son yöntem ise bilgisayara dayalı matematiksel termal modelleme yöntemidir. Transformatörün sıcaklığını doğru bir şekilde ve düşük maliyet ile öğrenebilmesi için bu yöntem en uygun yöntemdir. Bu tez çalışmasında, transformatörün sıcaklığı benzetim çalışması yöntemi ile elde edilmektedir.

Sayısal yöntemeye dayalı benzetim çalışmasının yardımıyla modelin prototipi oluşturulmadan transformatörün tasarımı ve analizi yapılabilmektedir. Dijital bilgisayarın geliştirilmesi, karmaşık yapı ve sınır koşullara sahip elektromanyetik problemlerin çözümü daha hızlı, doğru ve düşük maliyetli hale getirilmektedir.

Önceki alt bölümde üç fazlı 160kVA 33/0.4 kV kuru- tip dağıtım transformatörü benzetim çalışmasına dayalı kayıp analizleri detaylı olarak incelenmektedir. Bu alt bölümde ise Geçici Durum (*Transient*) analizinde elde edilen kayıp sonuçlarından veriler alınarak termal analiz yapılmaktadır. Transformatörün sıcaklık değeri ve dağılımı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında, ANSYS isimli bilgisayar destekli benzetim uygulaması kullanılmaktadır. ANSYS, Sonlu Elemanlar Yöntemine dayanır ve gerçek sistemin fiziksel problemleri bilgisayar ortamında 2 veya 3 boyutlu modeller oluşturularak sistemin davranışları ile ilgili bilgi vermektedir. Analiz için ANSYS programının iki farklı modülü kullanılmaktadır; *Maxwell 2D* ve Kararlı-Rejim Isı İletimi (*Steady-State Thermal*)'dır. Bu iki modül ANSYS Workbench ara yüzü üzerinde bağlanarak eş zamanlı çalıştırılmaktadır. Resim 5.42'de gösterildiği gibi Maxwell 2D ile Kararlı- Durum Termal modülü ANSYS *Workbench* ara yüzünde birleştirilmektedir.



Resim 5.42. Termal analizi için modüllerin tasarımı

Termal analizi gerçekleştirmek için analize başlanmadan önce modelin geometrik ölçümleri, malzeme bilgileri ve sıcaklık koşullarının bilinmesi gerekmektedir. ANSYS *Workbench* ara yüzünde *Maxwell* analizine bağlı termal analizi yapmak için genel olarak aşağıdaki adımları takip etmektedir;

Adım 1: Kayıp sonuçları içeren Maxwell 2D dosyası *Workbench*'e yüklenir. Harici uyartım devresi için Maxwell 2D ile Twin Builder arasında Co-Simulaion (Eş Zamanlı Çalıştırılması) yapılmıştır. Bu nedenle, kayıp dosyası yüklendiğinde proje şemasında hem Maxwell 2D hem de Twin Builder modülü görülmektedir.

Adım 2: Kararlı- Rejim Isı İletimi (*Steady-State Thermal*) modülü Maxwell 2D modülünün sağ tarafına yerleştirilir. Maxwell 2D modülündeki Solution (B4) kutusu ile Kararlı- Rejim Isı İletimi modülündeki *Setup* (C5) kutusu arasında bağlantı yapılır. Sıcaklık analizi, kayıp analizinde kullanılan aynı transformatör modeli üzerinde yapılmaktadır. Bu nedenle, modelin çizimi (Geometry) için de bağlantı yapılmalıdır.

Adım 3: *Workbench* projesi güncellenmelidir.  butonuna basılarak Maxwell 2D modülündeki veriler termal modülüne aktarılır. Başarılı olarak aktarılan veriler yeşil renkli tik işareti ile gösterilmektedir.

Adım 4: Malzeme ve termal özellikleri *Engineering Data* sekmesinde tanımlanır. Analiz edilen transformatörde kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 5.9’da gösterilmektedir.

Çizelge 5.8. transformatörde kullanılan malzemelerin özellikleri

|                                                                           | Nüve<br>(M4 1.1W/Kg @1.7T) | Sargı<br>(Alüminyum)   |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Yoğunluk ( <i>Density</i> )                                               | 7650 Kg/m <sup>3</sup>     | 2705 Kg/m <sup>3</sup> |
| İzotropik Termal İletkenliği<br>( <i>Isotropic Thermal Conductivity</i> ) | 5 W/m°C                    | 237,5 W/m°C            |
| Özgül Isı ( <i>Specific Heat</i> )                                        | 450 J/Kg°C                 | 950 J/Kg°C             |

Adım 5: Termal modülünde değişiklik yapıldığı için  butonuna basılarak bilgiler güncellenmelidir. Çizim ve malzeme bilgileri modelleme penceresine aktarılmış olur ve termal modülündeki veriler analizde kullanılmaya hazır hale getirilmiş olur.

Adım 6: Proje şemasında *Model* sekmesine çift tıklayarak *Mechanical APDL Solver* penceresi açılır. Yapılacak tüm modelleme ve analizler bu pencere üzerinde yapılmaktadır.

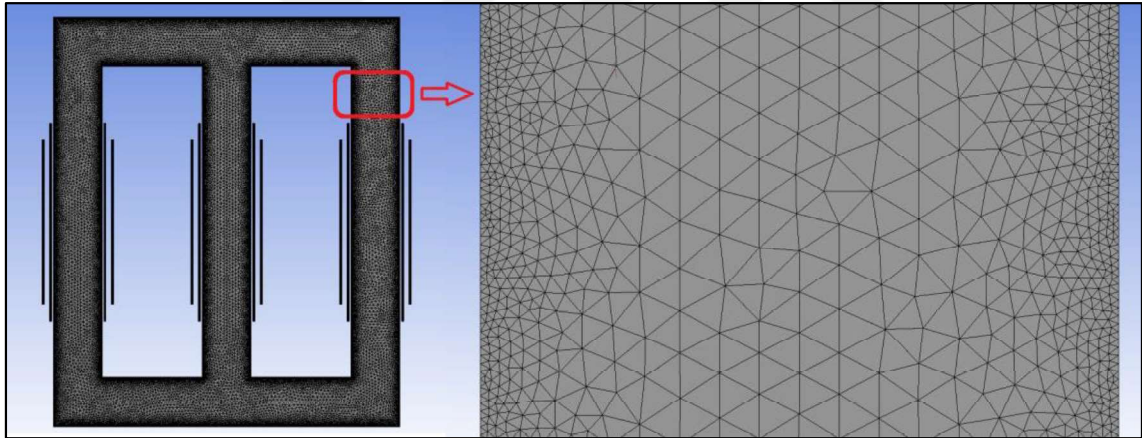
Adım 7: Özet (Outline) kısmından modelin parçalarına malzeme tanımlanır.

Adım 8: Mesh oluşturulur. Elektromanyetik analizinde mesh elemanları otomatik olarak üretilir fakat termal analizindeki diferansiyel eşitlikleri daha karmaşık olduğu için meshing işlemleri manuel olarak yapılmalıdır. Modele mesh üretirken analizin doğruluğunun yüksek olabilmesi için mesh dağılımının tekdüze (uniform) olmasına dikkat edilmelidir. Üretilen mesh ile ilgili bilgiler Çizelge 5.10’da verilmektedir.

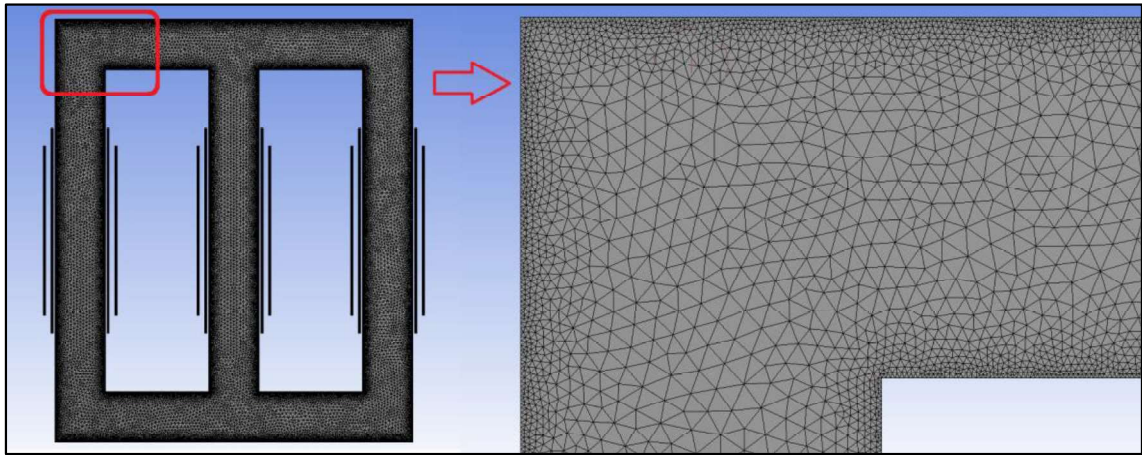
Çizelge 5.9. Üretilen mesh ile ilgili bilgiler

| Mesh tipi                 |               | Parçanın ismi                                                        |                      |                      |
|---------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
|                           |               | Nüve                                                                 | AG sargıları         | YG sargıları         |
| <i>Method</i>             |               | <i>All Triangles</i>                                                 | <i>All Triangles</i> | <i>All Triangles</i> |
| <i>Face Sizing (soft)</i> | Eleman boyutu | 0,01 m                                                               | 0,003 m              | 0,003 m              |
| <i>Edge Sizing (hard)</i> | Bölüm sayısı  | 670 (yan bacak)<br>567 (boyunduruk)<br>510 & 163 (pencere kenarları) | 467                  | 390                  |

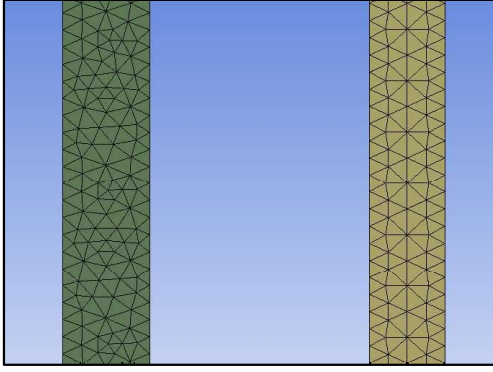
Proje güncellendikten sonra elde edilen Mesh yapısı aşağıdaki gibidir.



Resim 5.43. Yan bacadaki oluşturulan mesh dağılımı

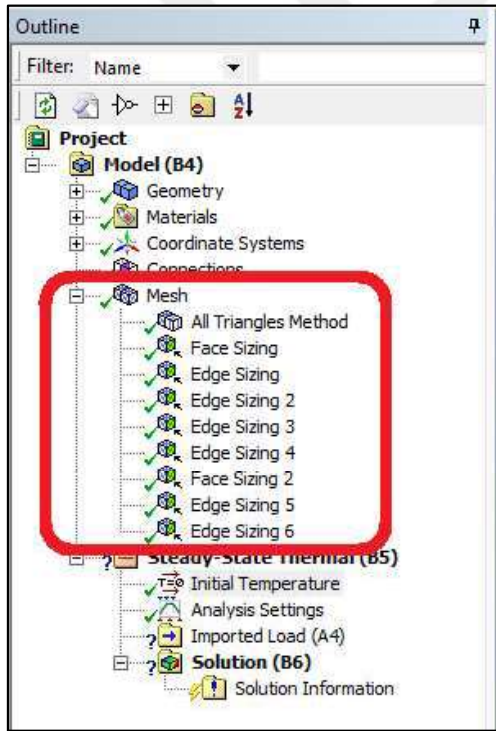


Resim 5.44. Nüvenin köşesindeki oluşturulan mesh dağılımı



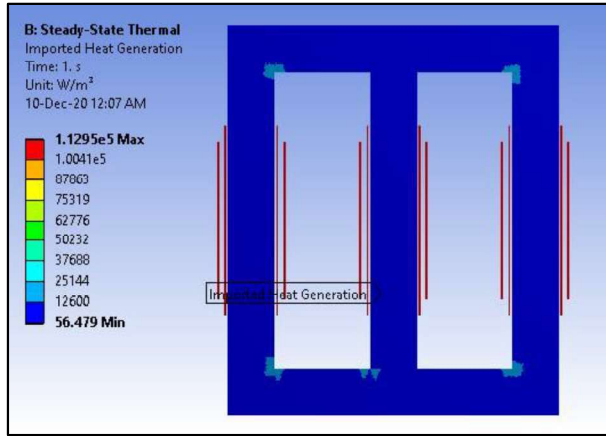
Resim 5.45. AG ve YG sargılarındaki oluşturulan mesh dağılımı

Modele uygulanan mesh işlemleri *Özet* (Outline) kısmında Resim 5.46'daki gibi gösterilmektedir.



Resim 5.46. Uygulanan meshin özeti

Adım 9: Problemin çözümü için sınır koşulları transformatörün modeline tanıtılır. *Özet* (Outline) kısmından *Imported Load* → *Insert* → *Heat Generation* seçilir. Bu şekilde, kayıp sonuçları analize dâhil (import) edilmektedir.



Resim 5.47. Maxwell'den aktarılan ısı üretimi

*Maxwell* 'deki kayıplar modele tanıtıldıktan sonra *Imported Heat Generation* sekmesinin altında Dâhil Edilmiş Yük Aktarma Özeti (*Imported Load Transfer Summary*) otomatik olarak oluşturulur. Ölçekleme faktörü (Scaling factor) 0 ile 1 arasında değişir ve aktarılan verilerin ne kadar doğru olduğunu göstermektedir.

| Comment                                       |            |                |
|-----------------------------------------------|------------|----------------|
| Verdana 2 (10 pt) B I U                       |            |                |
| Exporting Volume Loss Density With Scaling... |            |                |
| Object                                        | Total Loss | Scaling Factor |
| L1                                            | 410.572W   | 1              |
| H1                                            | 420.14W    | 1              |
| L3_Separate                                   | 400.842W   | 1              |
| L2_Separate                                   | 408.344W   | 1              |
| L2                                            | 408.344W   | 1              |
| L3                                            | 400.842W   | 1              |
| L1_Separate                                   | 410.572W   | 1              |
| H3_Separate                                   | 419.144W   | 1              |
| H2_Separate                                   | 431.103W   | 1              |
| H2                                            | 431.103W   | 1              |
| H3                                            | 419.144W   | 1              |
| H1_Separate                                   | 420.14W    | 1              |

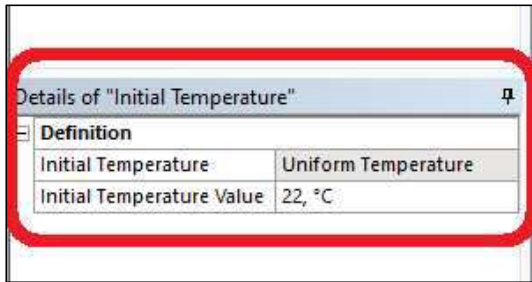
Resim 5.48. Aktarılan kayıpların özeti

Adım 10: Problemin diğer sınır koşulları ise ısı geçiş sınırlarıdır. Isı geçişleri sargılar ve nüve ile hava arasında bulunur [50]. Taşınım yoluyla ısı geçiş katsayısı tanımlanmalıdır. Özet (Outline) kısmından *Steady-State Thermal* → *Insert* → *Convection* seçilir. Taşınım yoluyla ısı geçiş katsayısı (convection heat transfer coefficient)  $W/m^2\text{°C}$  cinsinde ifade

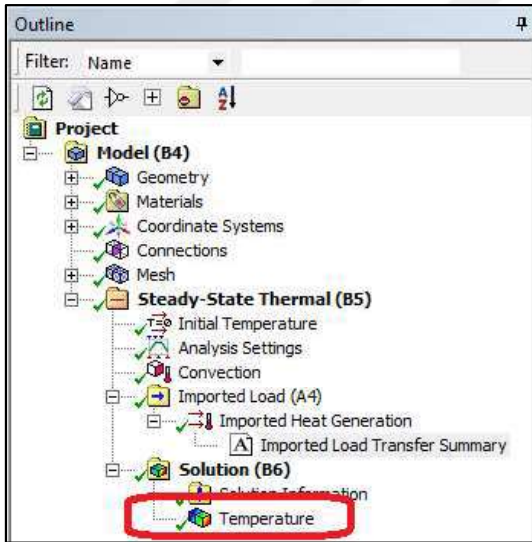


edilir ve gazın doğal taşınım için değeri 5 ile 30 arasında değişmektedir [50]. Havanın doğal taşınım katsayısı  $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$  olarak kabul edilmektedir.

Adım 11: Bu çalışmada sıcaklık analizi yapılacağı için Özet (Outline) kısmından *Solution* sağ tıklanır ve *Insert* → *Thermal* → *Temperature* seçilir. Modelin varsayılan başlangıç sıcaklığı  $22\text{°C}$  olarak tanımlanmaktadır. Analizi başlatmak için *Solution* sekmesinde *Solve* seçeneğine tıklanır. Üretilen sıcaklık dağılımı, Özet (Outline) kısmındaki *Temperature* seçerek görüntülenmektedir.



Resim 5.49 Varsayılan başlangıç sıcaklık



Resim 5.50 Sıcaklık dağılımı  $^{\circ}\text{C}$  (celcius) cinsinde görüntülenmesi

#### 5.4. Sıcaklık Sonuçları

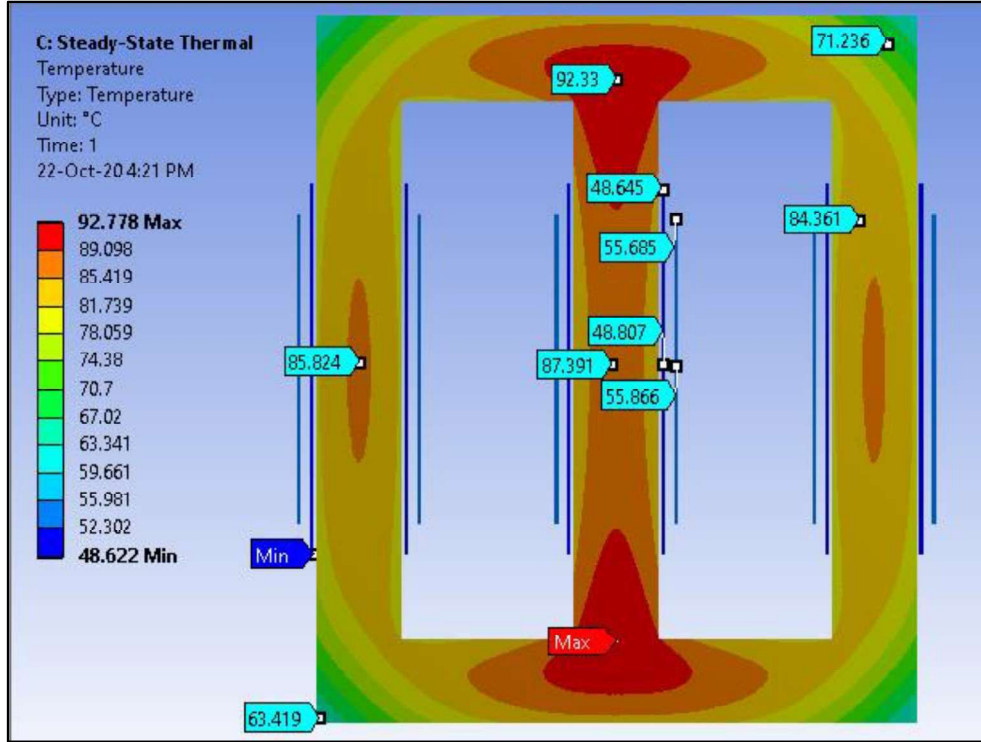
Bu çalışmada, soğutma sistemi hava olan bir kuru- tip transformatör ile termal analizi yapılmaktadır. Önceki bölümde detaylı olarak açıklanan analiz adımları iki farklı durum için uygulanmaktadır. Yapılan tüm termal analizleri kararlı- rejim (*steady-state*) ve iki

boyutlu şekilde yapılmaktadır. AC gerilim kaynağına bağlı durumda transformatör nüvesinin maksimum sıcaklığı 92,778°C'dir. Fotovoltaik sisteme bağlı durumda ise transformatör nüvesinin maksimum sıcaklığı ise 93,336°C'dir. Aynı transformatör fotovoltaik sisteme bağlandığı zaman nüvenin sıcaklığında az miktarda artış olmaktadır. Kararlı- rejim sıcaklık analizi ile elde edilen değerler IEC60076-2 ve IEC 60076-11 standardına göre uygun olarak tespit edilmektedir [51,52]. Çalışma sürecinde transformatördeki en sıcak nokta genellikle bilinmez ve bu noktanın belirlenmesi çok zordur. Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı bilgisayar destekli uygulamaların sayesinde transformatörün en sıcak noktası tahmin edilebilir. Benzetim çalışma sonuçlarına göre her iki durum için transformatörün en sıcak noktası boyunduruğun orta kısmında meydana gelmektedir. Fotovoltaik sisteme bağlı iken en sıcak nokta sıcaklığı çok yüksek olduğu için transformatörün orta bacağı diğer bacaklara göre daha fazla ısınmaktadır.

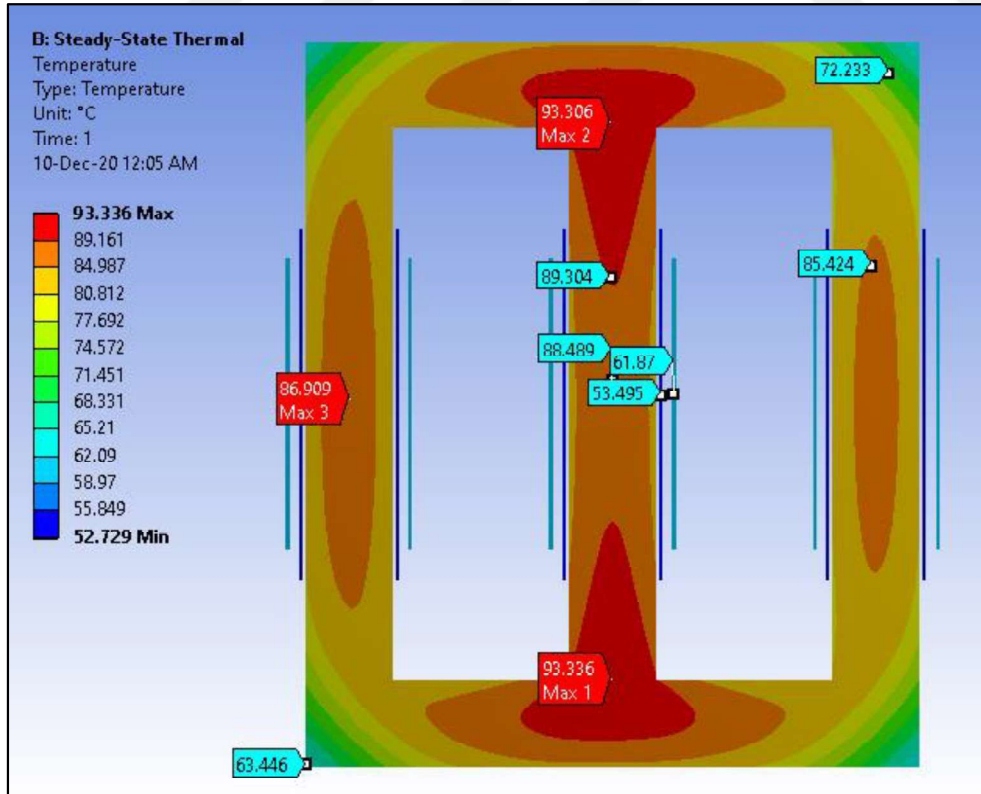
Transformatörün firma bilgilerine göre AG ve YG sargılarının ortalama sıcaklık artışı sırayla 49,0°C ve 64,2°C olarak tespit edilmektedir. Bu değerler, *Workbench* yardımıyla yapılan analizler ile karşılaştırıldığında AG ve YG için sırayla yaklaşık %99,61 ve %87,02 değerinde bir doğruluk oranı hesaplanmaktadır. Fotovoltaik sistemde AG ve YG sargıların sıcaklığı normal çalışma durumuna göre sırayla 4,7°C ve 6°C kadar daha yüksek sonuçlar elde edilmektedir.

Çizelge 5.10. AC ve DC girişli termal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

|                          | AC Girişli Analiz Sonucu | DC Girişli Analiz Sonucu |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Nüve maksimum sıcaklığı  | 92,778 °C                | 93,336 °C                |
| Nüve minimum sıcaklığı   | 63,419 °C                | 63,446 °C                |
| Nüve köşesinin sıcaklığı | 71,236 °C                | 72,233 °C                |
| Yan bacağın sıcaklığı    | 85,824 °C                | 86,909 °C                |
| Orta bacağın sıcaklığı   | 87,391 °C                | 88,489 °C                |
| AG sargının sıcaklığı    | 48,807 °C                | 53,495 °C                |
| YG sargının sıcaklığı    | 55,866 °C                | 61,870 °C                |



Resim 5.51. AC gerilim kaynağına bağlanan transformatörün sıcaklık dağılımı



Resim 5.52. Fotovoltaik sistemine bağlanan transformatörün sıcaklık dağılımı

### 5.5. Fotovoltaik Sisteme Bağlanan Transformatörün Faydalı Ömür Tahmini

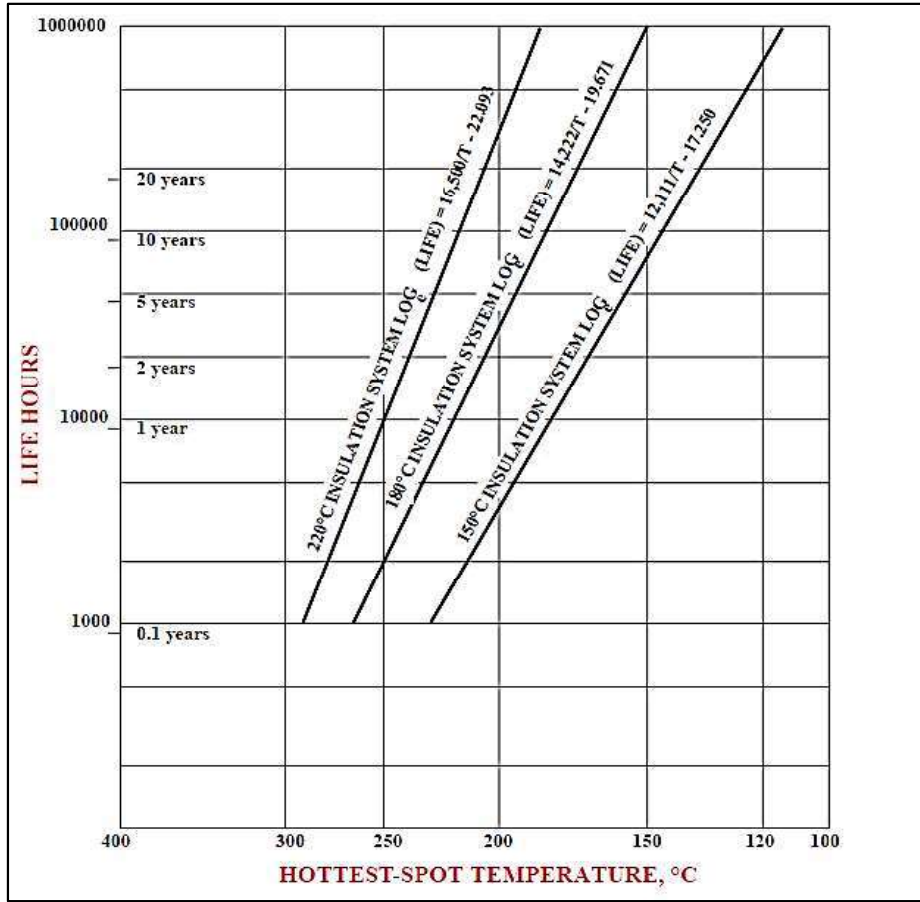
Sıcaklık artışı, tüm elektrik cihazlarının veya elemanlarının faydalı ömrünü belirlemek için en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle, güç ve dağıtım transformatörlerinin primer/sekonder gerilimi, görünür güç değeri, frekans ve sıcaklık artışı gibi fiziksel nitelikleri ile birlikte tanımlanmaktadır. Kuru- tip transformatörler için normal ve normal olmayan çalışma koşulları ANSI STDs C57.12.01-1989 standardında yer almaktadır. Genellikle, yağlı tip transformatörler için ortalama sıcaklık artışı 65°C'dir. Kuru- tip transformatörlerin ortalama sıcaklık artışı ise yalıtım türüne bağlı olarak 80°C ile 150°C arasında değişmektedir [53].

Yalıtım sistemi, transformatörün dayanabileceği iç (dâhili) sıcaklığını temsil etmektedir. Kendi yalıtım sisteminin sınır sıcaklığı içinde çalışan transformatörlerin faydalı ömür tahmini genel olarak 20 ile 25 arasındadır [54]. Yüksek sıcaklık, transformatörün faydalı ömrünü azaltmaktadır. Transformatörün normal tahminî faydalı ömrün içinde çalışabilmesi için kabul edilen maksimum çalışma sıcaklığı, yalıtım sisteminin derecesi olarak tanımlanır ve birimi °C (celcius) olarak bilinmektedir. Yalıtım sisteminin derecesi, 40°C olan maksimum ortam (*ambient*) sıcaklığına göre belirlenmektedir. Yalıtım sisteminin derecesi, sıcaklık artışının, ortam sıcaklığının ve hot- spot sınır değeri (30°C)'nin toplamından elde edilmektedir [55]. Kuru- transformatörün çoğu 220°C (H sınıfı) olarak derecelendirilmektedir. Fakat bu çalışmada analiz edilen transformatörün yalıtım sisteminin derecesi 180°C'dir (F sınıfıdır).

Yalıtım ile eskime arasındaki ilişki *Arrhenius* Tepki Hızı Teoreminde (Arrhenius Reaction Rate Theory) açıklanmaktadır. IEEE C.57.96-1999 standardına göre, yalıtım sınıfı F olan kuru- tip transformatörlerin faydalı ömür tahmini aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [3] [54];

$$\log_e \text{ömür}(t) = \frac{B_e}{T} + A_e \quad (5.30)$$

$A_e$  ve  $B_e$  katsayıları aşağıdaki grafikten elde edilmektedir. Şekil 5.53, her yalıtım sisteminin dereceleri için *Naperian* (doğal) tabana göre faydalı ömür tahmininin katsayılarını göstermektedir.



Resim 5.53 Naperian (doğal) tabana göre faydalı ömür tahmininin eğrisi [54]

Önerilen transformatör 180°C yalıtım sistemi (F sınıfı) grubuna ait olduğundan dolayı nominal yük ve gerilim altında en sıcak nokta sıcaklığı (*hottest-spot temperature*) 175°C olarak kabul edilebilir [3] [54]. 180°C yalıtım sistemi (F sınıfı) için Eş. 5.30'daki formül aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\log_e \text{ ömür}(t) = \frac{14\,222}{T} - 19.671 \quad (5.31)$$

$$\text{ömür} = e^{\left(\frac{14\,222}{448} - 19.671\right)} = 175\,349 \text{ saat} \cong 20 \text{ yıl} \quad (5.32)$$

Fotovoltaik sistemin altında transformatörün en sıcak nokta sıcaklığı (*hottest-spot temperature*) yaklaşık 5,3°C daha yüksek olduğu bulunmaktadır. Fotovoltaik sistem için faydalı ömür tahmini aynı formül ile hesaplandığında transformatörün faydalı ömrü 13 yıla düşmektedir. Fotovoltaik sistemde, tam yükte ve evirici ile çalışan transformatörlerin faydalı ömrünün %31 kadar azalması beklenmektedir.

$$\text{ömür} = e^{\left(\frac{14\,222}{451} - 19.671\right)} = 120\,978 \text{ saat} \cong 13,8 \text{ yıl} \quad (5.33)$$





## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, Sonlu Elemanlar Yöntemine dayanarak, solar invertörden üretilen harmonikli dalgaların dağıtım transformatörünün üzerindeki etkileri incelenmiştir. 250 kVA 11/0,4 kV Yağlı- tip dağıtım transformatörünün boşa ve tam yükte çalışma durumunda manyetik akı yoğunluğu, akı dağılımı ve kayıp hesaplamaları yapılmaktadır. Hem deneysel çalışmalardan hem de formüllerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan analizin doğruluğu ortalama olarak %98,65 bulunmuştur.

Fotovoltaik sisteme bağlı durumda transformatörün analizini yapmak için evirici sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan evirici ve filtre sistemi ile değeri 700 V<sub>DC</sub> olan güneş panelin çıkış gerilimi, değeri 400V<sub>AC</sub> olan transformatörün faz arası gerilimine başarılı olarak dönüştürülmüştür. Ayrıca, hesaplanan rezonans frekansı, anahtarlama frekansının %50'sinin altında bulunmuştur [48].

160 kVA 33/0,4 kV Kuru- tip transformatörün üzerinde fotovoltaik sisteme bağlı iken ve tam yük çalışma durumunda kayıp analizi yapılmıştır. Analiz sonucuna göre, fotovoltaik sistemde Omik kayıp bir miktar daha yüksek bulunmuştur. Fotovoltaik sistem gibi harmonik bileşenleri içeren güç sisteminde ek kayıp meydana gelmektedir. Fotovoltaik sisteme bağlı durumda toplam Omik kayıp ortalama olarak 172.55 W daha yüksek bulunmuştur. Bu ek kayıplar, transformatörün nüvesi ve sargılarında sıcaklık artışına neden olur.

Çalışmanın sonunda, Kararlı- Rejim Isı İletimi (*Steady-State Thermal*) Analizi ile transformatörün nüvesinde meydana gelen ısınma incelenmiştir ve transformatörün faydalı ömür tahmini gerçekleştirilmiştir. Yapılan sıcaklık analizinin ortalama süresi 72 saattir. Analiz sonucuna göre, fotovoltaik sistemin altında transformatörün en sıcak nokta sıcaklığının (*hottest-spot temperature*) yaklaşık 5,3°C daha yüksek olduğu bulunmuştur. IEEE C57.96-1999 standardında verilen faydalı ömür tahmini formülüne göre, fotovoltaik sistemde tam yükte ve evirici ile çalışan transformatörlerin ortalama faydalı ömrü 13,8 yıl olarak bulunmuştur. Fotovoltaik sisteme bağlanan transformatörün faydalı ömrü, normal çalışma durumuna göre %31 kadar azalması beklenmiştir.

Fotovoltaik sistemin dağıtım transformatörünü olumsuz olarak etkilediği ve fotovoltaik sistemde dağıtım transformatörün kaybının daha yüksek olduğu birçok bilimsel yazıda belirtilmektedir. Bu tez çalışması, sunulan hipotezlerin doğru olduğunu ispatlamaktadır.

Ayrıca, daha önce Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak fotovoltaik sistemde dağıtım transformatörü ile ilgili hiçbir çalışma yapılmadığı için, bu tez çalışması enerji dağıtımına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.



## KAYNAKLAR

1. T.C. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı. *Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü* (No. 15). Ankara: Strateji Geliştirme Bakanlığı, 11.
2. KPMG. (2019). *Enerji Sektörel Bakış*. URL: <https://home.kpmg/tr/tr/home/gorusler/2019/02/sektorel-bakis-2019-enerji.html>, Son Erişim Tarihi: 15 Ocak 2020.
3. Awadallah, M. A., Xu, T., Venkatesh, B., ve Singh, B. N. (2016). On the effects of solar panels on distribution transformers. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 31(3), 1176-1185.
4. Said, D. M., Nor, K. M., ve Shah, M. Md. (2009, 27-30 Eylül). *Distribution transformer losses evaluation under non-linear load*. Proc. Austral. Univ. Power Eng., Adelaide, Australia.
5. Emanuel, A. E., Wang, X. (1985). Estimation of loss of life of power transformers supplying nonlinear loads. *IEEE Trans. on Power Apparatus and System*, PAS-104(3), 628-636.
6. Said, D. M., Nor, K. M. (2008, 14-17 Aralık). *Effects of harmonics on distribution transformers*. Proc. Austral. Univ. Power Eng., Sydney, Australia, 1-5.
7. Taheri, S., Taheri, H., Fofana, I., Hemmatjou, H., ve Gholami, A. (2012, 29 Nisan-2 Mayıs). *Effect of power system harmonics on transformer loading capability and hot spot temperature*. IEEE Can. Conf. Elect. Comput. Eng., Montreal, QC, Canada.1-4.
8. Ram, B. S., Forrest, J. A. C., ve Swift, G. W. (1988). Effects of harmonics on converter transformer load losses. *IEEE Trans. Power Delivery*, 3(3), 1059-1066.
9. Han, Y., Liu, Y.F. (2008). A practical transformer core loss measurement scheme for high-frequency power converter. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 55(2), 941-948.
10. Shareghi, M., Phung, B. T., Naderi, M. S., Blackburn, T. R., ve Ambikairajah, E. (2012, 23-27 Eylül). *Effects of current and voltage harmonics on distribution transformer losses*. IEEE Int. Conf. Condition Monitor. Diag., Bali, Indonesia.
11. Separi, F., Samakush, M., ve Vahabzadeh, A. R. (2009, 18-22 Ekim). *Assessment of power distribution transformers electrical and thermal parameters in harmonic environments*. Int. Conf. Telecommun. Energy, Incheon, Korea. 1-4.
12. Choudhury, A. H., Grady, W. M., ve Fuchs, E. F. (1999). An investigation of the harmonics characteristics of transformer excitation current under nonsinusoidal supply voltage. *IEEE Trans. Power Delivery*, 14(2), 450-458.
13. Massey, G. W. (1994). Estimation methods for power system harmonic effects on power distribution transformer. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 30(2), 485-489.

14. Awadallah, M. A., Venkatesh, B., ve Singh, B. N. (2015). Impact of solar panels on power quality of distribution networks and transformers. *IEEE Can. J. Elect. Comput. Eng.*, 36(1), 45–51.
15. Ghaffarlou, A. (2014). *Sonlu Elemanlar Yöntemi Yardımıyla Transformatörün Manyetik Alan ve Kayıp Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
16. Salahlı, T. (2019). *Düzlemsel Dizim Nüveli Kuru Tip Dağıtım Transformatörü ile Üçgen Sarma Nüveli Kuru Tip Dağıtım Transformatörünün Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
17. Çeçen, M. (2018). *Güç Transformatörünün Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak 2 ve 3 Boyutlu Tasarımı ve Kayıp Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 83-87.
18. Najafi, A. (2016). *Dağıtım Transformatörlerindeki Dengesiz Gerilim Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Değerlendirilmesi ve Termal Modellemesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 16, 24-26, 34, 45, 109.
19. Coltman, J. W. (2002). The transformer. *IEEE Industry Applications Magazine*, 8-15.
20. Güzelbeyoğlu, N. (1998). *Elektrik makinaları I,II* (İkinci Baskı). İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi, 1-9.
21. Bal, G. (2012). *Transformatörler* (İkinci Baskı). Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 25-27.
22. Mergen, A. F., Zorlu, S. (2009). *Elektrik makineleri I: Transformatörler* (Birinci Baskı). Türkiye: Birsan Yayınevi.
23. Sabhan, M. (2008). *Yağlı Tip Dağıtım Transformatörlerinde Kayıpların Hesaplanması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 29-30, 33-34.
24. Bossche, A. D., Valchev, V. C. (2004). *Inductors and Transformers for Power Electronics*. New York, USA: McGraw-Hill, 6-16, 37-40, 42-58.
25. Çanakoğlu, A.İ., Ünsal, A. ve Tunaboğlu, N. S. (2012). *Elektrik Makinaları* (Birinci Baskı). Eskişehir, Türkiye: Anadolu Üniversitesi Yayını, 60-61, 70-76.
26. Zhang, H., Yang, B., Xu, W., Wang, S., Wang, G., Huangfu, Y. ve Zhang, J. (2014). Dynamic deformation analysis of power transformer windings in short-circuit fault by FEM. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(3), 1-4.
27. Kjaer, S. B., Pederson, J. K., ve Blaabjerg, F. (2005). A review of single phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 41(5), 1292-1306.

28. Bodur, H. (2019). *Güç Elektroniği* (Beşinci Baskı). İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 67-71.
29. İskender, İ. (2018). *Güç Elektroniği*. Prof. Dr. İres İskender'e ait ders notları. Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
30. Adekola, O. I. (2015). *Design and Development of a Smart Inverter System*, M.Sc. Thesis, Cape Peninsula University of Technology, Cape Town, South Africa, 57, 89-91, 94-98.
31. Rashid, M. H. (2011). *Power Electronics Handbook* (3rd. Ed.). Butterworth-Heinemann, 233.
32. Karanfil, A., Özbay, H., ve Öncü, S. (2018). Bir fazlı şebeke etkileşimli evirici tasarımı için LCL filtre. *International Conference on Data Science and Applications*, 560-574.
33. Özcan, M. O., Ağlar, E. Ü., ve Yıldız, A. B. (2015, 4-6 Haziran). *Doğrultucularda ve eviricilerde kullanılan pasif filtre türlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması*. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumunda sunulan bildiri, Sakarya, Türkiye.
34. Ahmed, K. H., Finney, S. J., ve Xilliams, B. W. (2007). Passive filter design for three-phase inverter interfacing in distributed generation. *Electrical Power Quality and Utilisation*, 13(2), 49-58.
35. Karabacak, M., Kılıç, F., Saraçoğlu, B., Boz, A. F., ve Ferikoğlu, A. (2016). Şebeke bağlantılı eviriciler için LLCL filtre tasarımı; Detaylı bir performans analizi. *Politeknik Dergisi*, 19(3), 251-260.
36. Wu, W., He, Y., ve Blaabjerg, F. (2012). An LLCL power filter for single-phase grid-tied inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2), 782-789.
37. Ertuğrul, Ö. L. (2019). *Sayısal Yöntemler*. Doç. Dr. Özgür Lütfi Ertuğrul'a ait ders notları. Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı, Mersin.
38. Georgilakis, P. S. (2009). *Spotlight on Modern Transformer Design*. Greece: Springer Science & Business Media, 125, 128-129.
39. Sadiku, M. N . O., Peterson, A. F. (1990). A comparison of numerical methods for computing electromagnetic fields. *IEEE Proceedings on Southeastcon*. 42-27.
40. Sadiku, M. N. O. (2001). *Numerical Techniques in Electromagnetics* (2nd. Ed.). CRC Press LLC, 390.
41. Meunier, G. (2010). *The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling* (33. Baskı). New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 17.
42. Chari, M. V. K., Salon, S. J. (2000). *Numerical Methods in Electromagnetism*. San Diego: Academic Press.

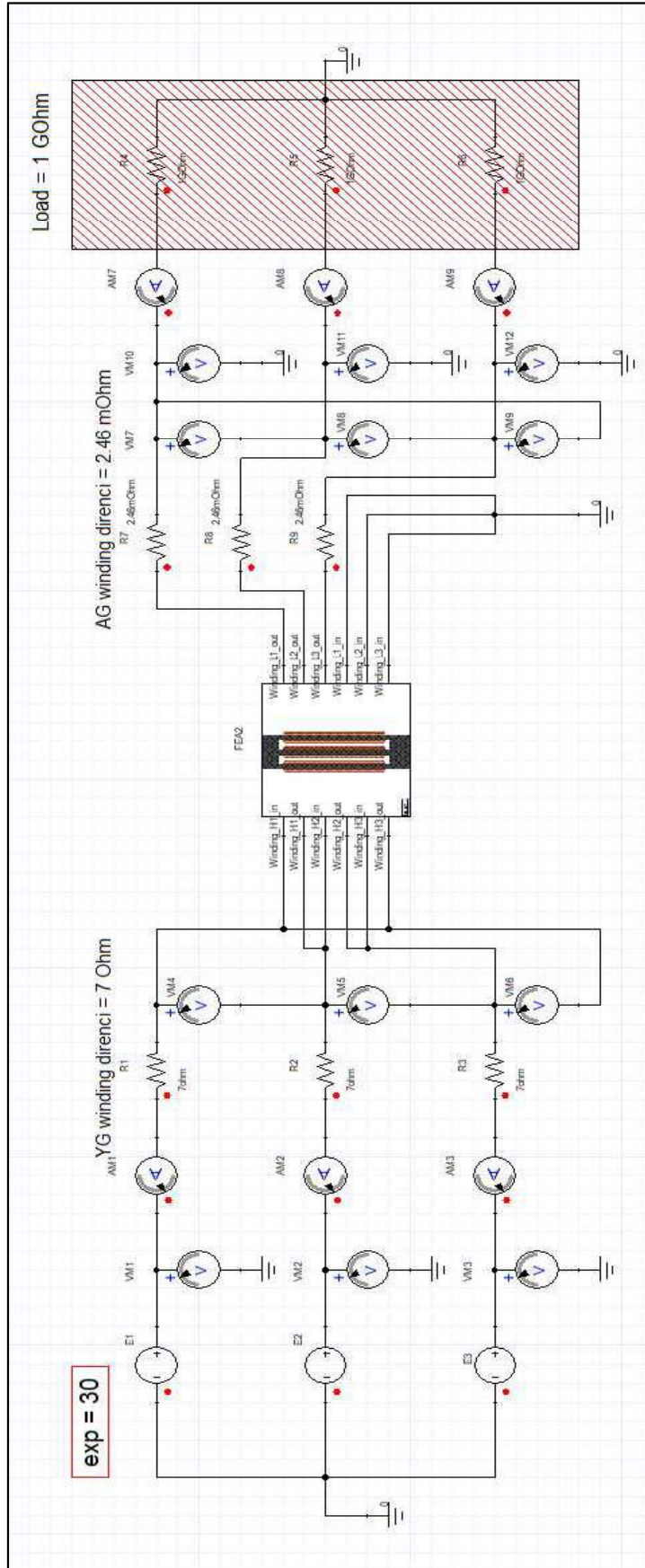
43. Sadiku, M. N. O. (1989). A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems. *IEEE Trans. Educ.*, 32(2), 85-93.
44. Çoramık, M. (2018). *Örnek bir analiz üzerinden ansys maxwell kullanımında karşılaşılan güçlüklerle detaylı çözüm önerileri*. Uluslararası Necatibey Eğitim ve Sosyal Bilimler Araştırmaları Kongresi, 78-91.
45. ANSYS Inc. (2012). *Maxwell 3D Field Simulator User's Guide* (Vol.15). Canonsburg, PA.
46. Yalçın, K., Basa Arsoy, A. (2012, 29 Kasım-01 Aralık). *Transformatör enerjilendirme akımının etkilerini azaltıcı yöntemlerin incelenmesi*. Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumunda sunulan bildiri, Bursa, Türkiye, 41-45.
47. Araujo, S. V., Engler, A., Sahan, B. ve Antunes, F. L. M. (2007, 22-26 Ekim). *LCL filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines*. The 7th International Conference on Power Electronics konferansında sunulan bildiri, 1133-1138.
48. Teodorescu, R., Liserre, M., ve Rodriguez, P. (2011). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, 290-291.
49. Yıldız, A., Ergül, E. U., Dirik, H., ve Gezegin, C. (2018). *Transformatör sargı en sıcak nokta sıcaklığının box-behnken ve taguchi deney tasarımı yöntemleriyle tahmini*. Üçüncü Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresinde sunulan bildiri, 56-64.
50. Karadağ, R. (2012). *Temperature Distribution in Power Transformers*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-18, 31.
51. IEC 60076-2. (2011). *Power Transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed trasnformers* (3rd. Ed.). International Electrotechnical Commission (IEC).
52. IEC 60076-11. (2018). *Power Transformers – Part 11: Dry-type transformers* (2nd. Ed.). International Electrotechnical Commission (IEC).
53. Gazdzinski, R., Toman, G. (1994). *Aging Management Guideline for Commercial Nuclear Power Plants – Power and Distribution Transformers*. Ogden Environmental and Energy Services, Blue Bell, PA. 3-11.
54. IEEE STD C57.96-1999. (2005). *IEEE Guide for Loading Dry-Type Distribution and Power Transformers* (2005 Ed.). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
55. Carpenter, D. R. (2016). *Fundamentals of Electrical Design - Understanding Transformers Power Distribution and Utilization* (1st. Ed.). Integrity Institute of Technology.



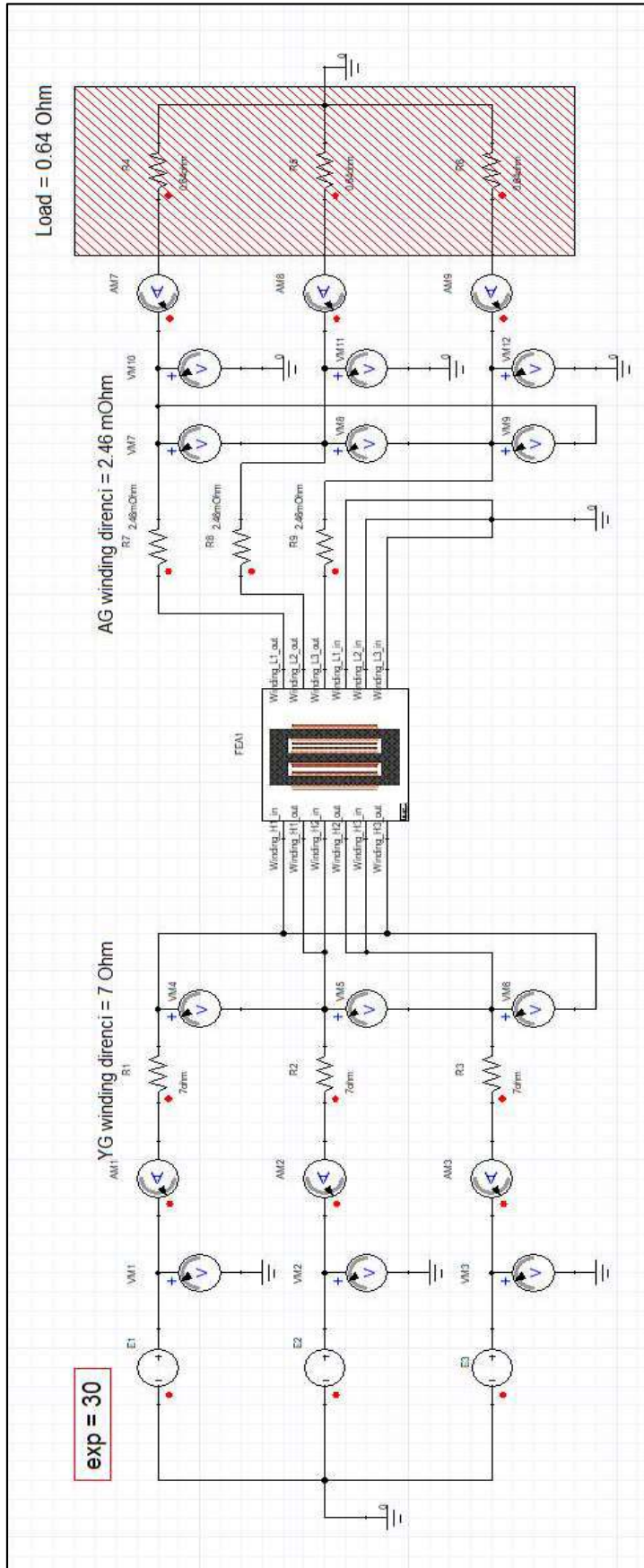


**EKLER**

EK-1. Boşta çalışma durumunda transformatörün bağlantı şekli



EK-2. Yükte çalışma durumunda transformatörün bağlantı şekli





*GAZİ GELECEKTİR..*