
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞEBEKE ENTEGRASYONUNUN ÖZGÜN BİR DENGELEME STRATEJİSİ İLE SAĞLANMASI

Furkan ÜSTÜNSOY

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2023

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Furkan ÜSTÜNSOY

23/10/2023

ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞEBEKE ENTEGRASYONUNUN ÖZGÜN BİR DENGELEME STRATEJİSİ İLE SAĞLANMASI

(Doktora Tezi)

Furkan ÜSTÜNSOY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2023

ÖZET

Bu tez çalışmasında, bir konut elektrikli araç şarj istasyonunun puant saat dilimindeki yükünü en aza indiren ve kullanıcıların memnuniyetini en üst düzeye çıkaran stratejiyi optimize etmek için metasezgisel tabanlı gerçek zamanlı kontrol algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma sürücülerin taleplerini iletmesi gerekmediğinden çevrimiçi ve kullanıcı alışkanlıklarından bağımsız olduğu için davranış anlamında modelsizdir. Strateji modeline göre elektrikli araç toplayıcı koordinasyonunda araçtan-araca şarj topolojisine izin verilir. Bu sayede optimal sonuç için modele esneklik verilir. Puant saat dilimindeki toplam şarj yükünü minimize etmek için toplam istasyon yükü doğrusal programlama ile formülüze edilmiştir. Kullanıcı memnuniyetinin maksimize edilmesi için ise sürücü talebi en kısa şarj süresi olarak karma tamsayılı doğrusal programlama yöntemiyle formülize edilmiştir. Önerilen algoritmada kullanıcı memnuniyetini artırmak ve sürücüleri teşvik etmek için gerçek zamanlı ücretlendirme modeli tasarlanmıştır. Kullanıcı memnuniyeti ise şarj süresi ve toplam enerji maliyeti olarak modellenmiştir. Önerilen algoritmanın performansının test edilebilmesi için tüm üretici-tüketici varyasyonlarını içeren senaryolar geliştirilmiştir. Önerilen algoritma literatürde konu ile ilgili en yaygın kullanılan popülasyon temelli 8 farklı metasezgisel optimizasyon yöntemine göre modellenerek tüm varyasyonlarda analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar gerçek zamanlı önerilen algoritmanın uygulanabilirliğini ve etkinliğini ortaya koymuştur. Ayrıca önerilen algoritmanın teknik olarak uygulanabilirliğini gösterebilmek için küçük güçlü 4 şarj modülüne sahip doğru akım tabanlı bir şarj istasyonu modeli tasarlanmıştır. Gerçek uygulama sonucunda çift taraflı enerji akışı ile yük dengelemesinin yapılabildiği anlaşılmış ve böylece önerilen algoritmasının uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Bilim Kodu	:	90513
Anahtar Kelimeler	:	Akıllı şebeke, V2G, G2V, V2V, Şarj stratejisi, Metasezgisel Algoritmalar
Sayfa Adedi	:	166
Danışman	:	Prof. Dr. Hasan Hüseyin SAYAN

REALIZATION OF GRID INTEGRATION OF ELECTRIC VEHICLES WITH A UNIQUE BALANCING STRATEGY

(Ph. D. Thesis)

Furkan ÜSTÜNSOY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2023

ABSTRACT

In this thesis, a metaheuristic-based real-time control algorithm is proposed to optimize the strategy that minimizes the peak-hour load of a residential electric vehicle charging station and maximizes users' satisfaction. The proposed algorithm is online since drivers do not need to communicate their requests and it is model-free in terms of behavior since it is independent of user habits. According to the strategy model, vehicle-to-vehicle charging topology is allowed in the electric vehicle collector coordination. This gives flexibility to the model for the optimal outcome. In order to minimize the total charging load during the peak hour, the total station load is formulated by linear programming. In order to maximize user satisfaction, the driver demand is formulated as the shortest charging time using complex integer linear programming. In the proposed algorithm, a real-time charging model is designed to increase user satisfaction and incentivize drivers. User satisfaction is modeled as charging time and total energy cost. To test the performance of the proposed algorithm, scenarios including all producer-consumer variations are developed. The proposed algorithm is modeled according to 8 different population-based metaheuristic optimization methods, which are the most widely used in the literature on the subject, and analyzed in all variations. The experimental results demonstrate the feasibility and efficiency of the proposed algorithm in real time. In addition, a direct current based charging station model with 4 small power charging modules is designed to demonstrate the technical feasibility of the proposed algorithm. As a result of the real application, it is realized that load balancing with bilateral energy flow can be achieved, thus demonstrating the feasibility of the proposed algorithm.

Science Code	:	90513
Key Words	:	Smart grid, V2G, G2V, V2V, Charging strategy, Metaheuristic Algorithm
Page Number	:	166
Supervisor	:	Prof. Dr. Hasan Hüseyin SAYAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca destek olan, zamanını ayıran, bilgi ve deneyimlerini paylaşan danışman hocam Prof. Dr. Hasan Hüseyin SAYAN' a, değerli arkadaşım Sadık YILDIZ' a ve her zaman her konuda bana destek olan kıymetli eşim Mübeccel ÜSTÜNSOY' a çok teşekkür ediyorum. Bu tez çalışması Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP Proje Numarası: FDK-2021-7261) tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞEBEKE ENTEGRASYONU 5

2.1. Günümüzde Elektrikli Araç Teknolojileri 5

2.1.1. Elektrikli araç ve altyapı teknolojilerinin eksiklikleri ve oluşan kaygılar 5

2.1.2. Elektrikli araç alt sistemleri 8

2.2. Batarya Teknolojileri 12

2.2.1. Lityum iyon batarya teknolojisi 13

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ-ŞEBEKE ENTEGRASYONUNDA KARŞILAŞILACAK MUHTEMEL ZORLUKLAR VE ALINMASI GEREKEN ÖNLEMLER 19

3.1. Entegrasyon ile Meydana Gelecek Güç Kalitesi Problemleri 19

3.2. Güç Kalitesi Problemleri 20

3.2.1. Geçici olaylar 21

3.2.2. Kısa süreli değişimler 22

3.2.3. Uzun süreli değişimler 24

3.2.4. Voltaj dengesizliği 25

Sayfa

3.2.5. Dalga biçim bozulmaları 26

3.2.6. Gerilim dalgalanmaları 35

3.2.7. Güç frekansı değişimleri 36

3.2.8. Reaktif güç 38

3.3. Elektrikli Araç-Şebeke Entegrasyonu ile Oluşan Güç Kalitesi Problemlerine Karşı Alınabilecek Önlemler 44

3.3.1. Şarja başlama-bitiş periyodu 44

3.3.2. Şarj süreci periyodu 47

4. ELEKTRİKLİ ARAÇ-ŞEBEKE ENTEGRASYONUNDA ÖNE SÜRÜLEN FİZİKSEL ALTYAPI VE İŞLETİM TOPOLOJİLERİ 65

4.1. Elektrikli Araç Şarj Seviyeleri ve Standartlar 66

4.2. Öngörülen Şarj Yapıları 69

4.2.1. Fiziksel altyapı mimarisi-1: Mevcut şebeke altyapısı ile AA mikroşebeke 70

4.2.2. Fiziksel altyapı mimarisi-2: Yeni altyapı tesisi ile AA mikroşebeke 71

4.2.3. Fiziksel altyapı mimarisi-3: Mevcut şebeke altyapısı ile DA mikroşebeke 72

4.2.4. Fiziksel altyapı mimarisi-4: Yeni altyapı tesisi ile DA mikroşebeke 73

4.2.5. Fiziksel altyapı mimarisi-5: Hibrit mikroşebeke 74

4.3. Elektrikli Araç Şarjı için Hiyerarşik Kontrol Yöntemleri 76

4.4. Elektrikli Araç Şarjı için İşletim Topolojileri 78

4.5. Şarj Modülleri ve Alt Sistem Topolojileri 80

4.5.1. AA bus için kullanılan şarj modülleri 81

4.5.2. DA bus için kullanılan şarj modülleri 85

5. METASEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI 87

5.1. SOS Optimizasyon Yöntemi 87

Sayfa

5.2. ABC Optimizasyon Yöntemi 87
5.3. BBO Optimizasyon Yöntemi 88
5.4. DE Optimizasyon Yöntemi 88
5.5. GA Optimizasyon Yöntemi 88
5.6. PSO Optimizasyon Yöntemi 89
5.7. RSA Optimizasyon Yöntemi 89
5.8. RUN Optimizasyon Yöntemi 90
6. SİSTEM MODELİ VE TASARIMI 91
6.1. Sistem Modeli 91
6.2. Problemin Matematiksel Modeli 95
6.3. Şebeke ve Şarj Kısıtları 98
6.4. Gerçek Zamanlı Ücretlendirme Modeli 101
6.5. EA Sürücüleri için Memnuniyet Kriterleri 103
6.5.1. Şarj süresine göre memnuniyet kriteri 103
6.5.2. Enerji maliyetlerine göre memnuniyet kriteri 104
7. NÜMERİK HESAPLAMALAR VE DENEYSEL SONUÇLAR 107
7.1. MRTC Algoritmasının Çözümü için En İyi Yöntemin Belirlenmesi 107
7.2. MRTC Algoritmasının Performansı ve Memnuniyet Çıktıları 125
7.3. Deneysel Çalışma ve Sonuçları 141
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 153
KAYNAKLAR 155
ÖZGEÇMİŞ 165

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Marka/modellere göre elektrikli araç verileri 7

Çizelge 2.2. Elektrikli araç platformları 10

Çizelge 4.1. Uluslararası standartlara göre şarj seviyeleri..... 68

Çizelge 7.1. Durumu-Penetrasyon Varyasyonları 107

Çizelge 7.2. Tüm vaka çalışmaları için minimum ve ortalama değerler 115

Çizelge 7.3. Tüm vaka çalışmaları için standart sapma değerleri..... 116

Çizelge 7.4. Tüm vaka çalışmaları için maksimum ve medyan değerleri 116

Çizelge 7.5. Metasezgisel algoritmalar için Friedman skorları 117

Çizelge 7.6. Metasezgisel algoritmalar için Wilcoxon skorları..... 117

Çizelge 7.7. MRTC Algoritmasının EA Yükünü Azaltma Oranı..... 125

Çizelge 7.8. MRTC Algoritmasının Literatürle Karşılaştırılması 141

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Hibrit araçların konfigürasyonları 9

Şekil 2.2. Elektrikli araç alt sistem topolojisi 9

Şekil 2.3. Volkswagen Group MEB platformu..... 11

Şekil 2.4. Bataryaların hacimsel-gravimetrik enerji yoğunluklarının karşılaştırılması .. 12

Şekil 2.5. Lityum iyon batarya çalışma prensibi..... 14

Şekil 2.6. Batarya teknolojilerinin özgül enerji yoğunlukları..... 17

Şekil 3.1. Güç kalitesi problemlerinin IEEE standardına göre sınıflandırılması..... 20

Şekil 3.2. Darbeli ve salınımlı geçici durumlar 22

Şekil 3.3. Kısa süreli değişimler 24

Şekil 3.4. Voltaj dengesizliği..... 26

Şekil 3.5. DA bileşenin zamana göre temsili değişimi 27

Şekil 3.6. Dalga şekli bozulmuş işaretin analizi 29

Şekil 3.7. Gerilim çentiği olayının dalga sekli..... 33

Şekil 3.8. Gerilim işareti üzerine binmiş bir gürültü 35

Şekil 3.9. Sinüzoidal gerilim dalgalanması..... 36

Şekil 3.10. Büyük Britanya güç sistemi frekans limitleri 36

Şekil 3.11. Görünür-aktif-reaktif güç bileşenleri..... 39

Şekil 3.12. Endüktif karakterli bir yükün akım-gerilim dalga formu 39

Şekil 3.13. Güç bileşenlerinin 3 boyutlu vektörel gösterimi 41

Şekil 3.14.Tek faz yarım dalga kontrollü çevirici ile akım-gerilim dalga şekilleri 43

Şekil 3.15.AA/DADA modülünde nominal yükün %5' den %80' e çıkması durumu 45

Şekil 3.16. Mikroişlemci kontrollü servo regülatör iç yapısı..... 47

Şekil 3.17. Statik regülatör devre mimarisi 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.18. Seri pasif filtre devre modeli 48

Şekil 3.19. Paralel pasif filtre devre modelleri 49

Şekil 3.20. Aktif filtre temel topolojisi 50

Şekil 3.21. Aktif filtrelerin sınıflandırılması 51

Şekil 3.22. Paralel aktif güç filtresi prensip şeması 51

Şekil 3.23. Seri aktif güç filtresi prensip şeması 52

Şekil 3.24. Hibrit aktif güç filtresi prensip şemaları 53

Şekil 3.25. Aktif filtre için doğrudan ve dolaylı kontrol metotları 54

Şekil 3.26. Hızlı şarj istasyonu için örnek bir reaktif güç kompanzasyon ve harmonik filtre tertibatı 57

Şekil 3.27. Buck-boost tipi güç faktör düzeltmeli devre için çift katmanlı kontrol diyagramı ve temel devre topolojisi 58

Şekil 3.28. Yük değişimine göre hız-yük referans regülasyonu 59

Şekil 3.29. Danimarka güç sisteminin frekans kontrolü 61

Şekil 4.1. Dahili ve harici şarj bağlantıları 66

Şekil 4.2. Elektrikli araç şarj metotları 67

Şekil 4.3. Mevcut şebeke altyapısı ile AA mikroşebeke 70

Şekil 4.4. Yeni altyapısı tesisi ile AA mikroşebeke 71

Şekil 4.5. Mevcut şebeke altyapısı ile DA mikroşebeke 72

Şekil 4.6. Yeni altyapısı tesisi ile DA mikroşebeke 73

Şekil 4.7. Hibrit Mikroşebeke 74

Şekil 4.8. Şarj istasyonu için hiyerarşik kontrol seviyeleri 75

Şekil 4.9. Merkezi ve merkezi olmayan yönetim stratejilerinin topolojisi 77

Şekil 4.10. Elektrikli araç şarjının işletim topolojileri için sembolik mimariler 79

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.11. Farklı şarj mimarisindeki istasyonlar için şarj modüllerinin topolojileri 80

Şekil 4.12. AA bus için ideal şarj modülünün genel mimarisi 81

Şekil 4.13. Şarj modüllerinde kullanılan AA/DA çevirici devre topolojileri 82

Şekil 4.14. DA/DA dönüştürücülerin sınıflandırılması 83

Şekil 4.15. İzolasyonsun çift taraflı DA/DA çevirici devre topolojileri 84

Şekil 4.16. İzolasyonlu çift taraflı DA/DA çevirici blok topolojisi 84

Şekil 4.17. Çift yönlü DA/DA çevirici için başlıca inverter ve rectifier topolojileri..... 85

Şekil 6.1. Toplam şarj zaman aralığı 91

Şekil 6.2. Önerilen algoritmanın 33 node test fideri üzerindeki altyapı konfigürasyonu..... 92

Şekil 6.3. MRTC algoritması akış diyagramı 94

Şekil 7.1. Durum-1, Durum-2 ve Durum-3 için yakınsama hızları 111

Şekil 7.2. Durum-4, Durum-5 ve Durum-6 için yakınsama hızları 112

Şekil 7.3. Durum-7, Durum-8 ve Durum-9 için yakınsama hızları 113

Şekil 7.4. Durum-10, Durum-11 ve Durum-12 için yakınsama hızları 114

Şekil 7.5. Durum-1 için kutu grafiği 118

Şekil 7.6. Durum-2 için kutu grafiği 119

Şekil 7.7. Durum-3 için kutu grafiği 119

Şekil 7.8. Durum-4 için kutu grafiği 120

Şekil 7.9. Durum-5 için kutu grafiği 120

Şekil 7.10. Durum-6 için Kutu Grafiği 121

Şekil 7.11. Durum-7 için kutu grafiği 121

Şekil 7.12. Durum-8 için kutu grafiği 122

Şekil 7.13. Durum-9 için kutu grafiği 122

Şekil 7.14. Durum-10 için kutu grafiği 123

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.15. Durum-11 için kutu grafiği 123

Şekil 7.16. Durum-12 için kutu grafiği 124

Şekil 7.17. Durum-1 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 126

Şekil 7.18. Durum-2 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 127

Şekil 7.19. Durum-3 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 127

Şekil 7.20. Durum-4 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 128

Şekil 7.21. Durum-5 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 128

Şekil 7.22. Durum-6 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 129

Şekil 7.23. Durum-7 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 129

Şekil 7.24. Durum-8 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 130

Şekil 7.25. Durum-9 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 130

Şekil 7.26. Durum-10 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 131

Şekil 7.27. Durum-11 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 131

Şekil 7.28. Durum-12 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi 132

Şekil 7.29. Durum-1 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 133

Şekil 7.30. Durum-2 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 133

Şekil 7.31. Durum-3 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 134

Şekil 7.32. Durum-4 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 134

Şekil 7.33. Durum-5 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 135

Şekil 7.34. Durum-6 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 135

Şekil 7.35. Durum-7 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 136

Şekil 7.36. Durum-8 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 136

Şekil 7.37. Durum-9 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 137

Şekil 7.38. Durum-10 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 137

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.39. Durum-11 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 138

Şekil 7.40. Durum-12 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri 138

Şekil 7.41. EA' ların memnuniyet oranları 140

Şekil 7.42. İzolesiz yarım köprü senkron DA/DA çevirici topolojisi 142

Şekil 7.43. İzolesiz yarım köprü senkron DA/DA çevirici baskı devresi 143

Şekil 7.44. İzolesiz yarım köprü senkron DA/DA çevirici dizgilenmiş hali 144

Şekil 7.45. Çevirici için osiloskop görüntüleri 140

Şekil 7.46. Deneysel çalışma temel topolojisi 146

Şekil 7.47. StmStudio programı ile ölçülen çevirici çıkış gerilim değişimi 147

Şekil 7.48. Tasarlanan prototip DA şarj istasyonu 148

Şekil 7.49. Kontrolsüz çalışmadaki akım değişimleri 148

Şekil 7.50. Kontrollü çalışmadaki akım değişimleri 149

Şekil 7.51. Kontrollü çalışmadaki %SOC değişimleri 149

Şekil 7.52. Anlık güç değişimleri 150

Şekil 7.53. Kaydırılan yükün değişimi 151

Şekil 7.54. Z-Skor frekans değişimi 151

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
A	Amper
Dk	Dakika
Hz	Hertz
Km	Kilometre
Pu	Birim değer
VA	Görünür güç birimi
VAr	Reaktif güç birimi
V	Volt
W	Aktif güç birimi

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AA	Alternatif akım
DA	Doğru akım
DSO	Disributed system operator: Dağıtım sistem operatörü
DVR	Dynamic voltage restorers: Dinamik gerilim regülatör
EA	Elektrikli araç
EVA	Electric vehicles aggregator: Elektrikli araç toplayıcı
FACT	Flexible alternating current transmission: Esnek alternatif akım iletimi
G2V	Grid-to-vehicle: Şebekeden araca enerji akışı
IPFC	Interline power flow controller: Hat arası güç akış Denetleyicisi
PWM	Pulse width modulation: Darbe genişlik modülasyonu
MRTC	Metaheuristic-based real-time control: Metasezgisel tabanlı gerçek zamanlı kontrol

Kısaltmalar	Açıklamalar
SOC	State of charge: Şarj seviyesi
SSSC	Static synchronous series compensator: Statik senkron seri kompanzatör
STATCOM	Static synchronous compensator: Statik senkron kompanzatör
SVC	Static Var compensator: Statik Var kompanzatör
TCSC	Thyristor controlled series capacitor: Tristör kontrollü seri kapasitör
THB	Toplam harmonik bozulma
TTB	Toplam talep bozulma
UPFC	Unified power factor controller: Birleştirilmiş güç kontrolörü
V2G	Vehicle-to-Grid: Araçtan şebekeye enerji akışı
V2V	Vehicle-to-Vehicle: Araçtan araca enerji akışı
YEK	Yenilenebilir enerji kaynağı

1. GİRİŞ

Sera gazı emisyonu, fosil kaynakların azalması gibi pek çok sebepten dolayı ulaşım sektörü EA (Elektrikli Araç) kullanımına geçiş için büyük bir baskı altındadır. Pil teknolojisindeki gelişmelerle son yıllarda EA kullanımı hızla artmaktadır. Fakat şarj süreleri kaygısı ile geliştirilen hızlı şarj üniteleri şebeke üzerine büyük ek yük getirecektir. Bu nedenle EA' larin yüksek penetrasyonunun, dağıtım ağlarındaki güç yükü profilini önemli ölçüde değiştirmesi ve elektrik şebekesi için potansiyel tehditler oluşturması beklenmektedir [1]. Ekonomik olarak, bu ek talebi karşılamak için üretim-iletim-dağıtım kapasitesini hızlı ve sınırsız olarak artırmak akıllıca değildir. Kapasite artışının ertelenebilmesi veya azaltılabilmesi için EA şarjının koordineli şekilde yapılması efektif olacaktır. Elektrik şebekesi açısından bakıldığında, birçok EA' nın koordine olmayan şarjı, gerilim sapması, şebeke kararlılığı (elektrik kesintileri), enerji verimliliği (iletim kayıpları) ve faz yükü dengesizliği üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabilir [2,3]. Bununla beraber EA sürücülerinin stokastik davranışa sahip olması sorunun kontrol edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Ayrıca bu durum, sürücü davranışı ile ilgili yapılan saha araştırmalarına göre ana trafo merkezinin farklı penetrasyon seviyeleri için özellikle puant dönemlerde aşırı yükleneceğini göstermektedir [4]. Bu açıdan her ne kadar sürücü davranışı rasgele davranış sergilese de EA yükünün, mevcut şebeke yükünün puant döneminde maksimum seviyelere ulaşacağı söylenebilir. Bu nedenle konut alanlarının şarj istasyonlarının (IEC Standard Level-1-2) şebeke üzerindeki etkileri kestirilebilir. Bu açıdan değerlendirildiğinde söz konusu kaygılar, EA şarjının puant dönemde daha yaratıcı yaklaşımlarla gerçekleştirilmesi ile hafifletilebilir.

Literatürde konu ile ilgili çalışmalar araçtan istasyona taleplerin iletilmesi, offline veya gün öncesi şarj programlaması ve gerçek zamanlı şarj çizelgeleme üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmalarda amaç fonksiyonu, istasyon sahibi, elektrikli araç kullanıcısı veya yardımcı programın bakış açısından şarj maliyetleri, tepe güç ve benzeri teknik ve ekonomik yönleri temsil eden birkaç öğe içerebilir [5].

Tepe yükü dengeleme, enerji kayıpları, kullanıcı memnuniyeti gibi farklı hedefleri göz önünde bulunduran gün öncesi veya çevrimdışı [6-12] çizelgeleme problemi için farklı yöntemler önerilen kapsamlı literatür vardır. Tipik olarak, bu yaklaşımlar EA şarjını çok

önceden planlar ve programların pratik uygulanabilirliğini hesaba katmaz [13]. Örneğin bu problem [6,7]'de PSO algoritması, [8]' de model örgülü kontrol algoritması [9]'da su doldurma tabanlı algoritma, [10]' de hiyerarşik otonom talep tarafı yönetimi algoritması olarak modellenir. Problemin çözümü için [11]' de dinamik fiyatlandırma modeli ve [12]' de koordineli şarj planlama optimizasyon modeli kullanılır.

Şarj maliyeti, enerji kayıpları, kullanıcı memnuniyeti gibi farklı hedefleri göz önünde bulunduran gün öncesi veya çevrimdışı [14-30] çizelgeleme problemi için önerilen yöntemler, literatürde konu ile ilgili en yaygın araştırma alanıdır. [14-25] çalışmalarında problem talep tarafı yönetimine dayalı optimizasyon problemi olarak ele alınmaktadır. [26,27]' de problemin çözümü için derin pekiştirmeli öğrenme metoduna dayalı bir strateji geliştirilmiştir. [28]' de problem dijital ikizler tabanlı bir çizelgeleme problemi, [29]' da hiyerarşik dağıtılmış EA şarj çizelgeleme problemi, [30]' da ise simülasyona dayalı politika iyileştirme yöntemi olarak modellenmiştir.

İstasyon sahibinin karının maksimize edilmesi veya altyapı maliyetinin minimize edilmesi gibi hedefleri dikkate alan gün öncesi veya çevrimdışı [31-36] çizelgeleme problemleri de son yıllarda literatürde geniş yer bulmaktadır. [31-33]' de problem optimizasyon algoritması olarak modellenmiştir. Problem [34]' de oyun teorisi tabanlı strateji, [35]' de çok takipcili stackelberg oyun tabanlı strateji, [36]' da ise fiyata dayalı transfer stratejisi olarak modellenmiştir.

Gerçek zamanlı çizelgeleme yaklaşımları şarj işlemi içerisinde gerçekleşebilecek farklı durum veya koşullara karşı yeni kontrol şemaları oluşturabilmektedir. Örneğin [13] çalışmasında tepe yükü dengeleme, şarj maliyeti, adil enerji paylaşımı hedeflerini dikkate alarak gerçek zamanlı ve gün öncesi çizelgelemeyi birleştirmek için yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Şarj maliyeti ve tepe yükün dengelenmesi hedefi ile [37]' de fuzzy logic tabanlı gerçek zamanlı bir strateji sunulmuştur. Yine aynı hedef doğrultusunda [38]' de Heronian Fonksiyon Tabanlı Çok Kriterli Karar Verme Modeli önerilmiştir. [39]' da istasyon sahibinin karını dikkate alan gerçek zamanlı yeni bir yaklaşım sunulmuştur. [40]' da gökkuşağı tabanlı derin pekiştirmeli öğrenme modeli geliştirilmiştir. [41]' de ise optimal şarj çizelgelemesi için pekiştirmeli öğrenme tabanlı gerçek zamanlı bir strateji önerilmiştir. [42]' de duyarlı fiyatlandırma stratejisi dikkate alınarak, araba paylaşım işinde bir EA filosu planlamak için iki seviyeli bir optimizasyon modeli önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında, yukarıdaki çalışmalardan ilham alarak uygulanabilir gerçek zamanlı bir algoritma önerilmiş ve bu algoritmanın gerçek hayattaki uygulanabilirliğini test etmek için 4 şarj modüllü bir şarj istasyonu tasarlanmıştır. Önerilen algoritma ile kullanıcı memnuniyetini dikkate alarak ve V2V topolojisini kullanarak doğrudan puant saat dilimindeki yükün minimize edilmesine odaklanılmıştır. V2V topolojisinin uygulanabilmesi için MRTC (metasezgisel tabanlı gerçek zamanlı kontrol) algoritması DA (doğru akım) mikroşebeke mimarisine sahip şarj istasyonu modeline göre tasarlanmıştır. Nitekim küçük güçlü şarj istasyonu da DA mikroşebeke mimarisinde tasarlandı. Bu sebeple algoritmanın kısıtları ve kabulleri bu istasyon mimarisine göre tasarlanmıştır.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞEBEKE ENTEGRASYONU

Karayolu taşımacılığı ve ulaşım günümüzde şehir hayatının adeta can damarı haline gelmiştir. Ülkelerin ekonomik, sosyal, kültürel, psikolojik, stratejik, askeri vb. dinamikleri doğrudan taşımacılık ve ulaşım faktörüne bağlıdır. Bireysel araçlar, toplu taşıma araçları, karayolu lojistik araçları gibi pek çok türde taşıt bu faktörün bileşenidir. Fakat bireysel araç ile ulaşım tüm dünyada en büyük paya sahiptir. Örneğin ülkemizde 2022 yılında trafiğe kayıtlı araç sayısı 25 milyon 321 bin 937'dir ve bu sayının %54,3'ü bireysel araçlardan oluşmaktadır [43].

Kullanımı hızla artan bireysel araçların büyük bir çoğunluğu fosil kaynaklı yakıtlar (dizel, benzin, LPG vb.) ile çalışmaktadır. Fakat devletler özellikle fosil kaynaklı yakıların tükenecek olması ve CO_2 emisyonu sebepleriyle üretimi hibrit elektrikli veya tam elektrikli araçlara kaydırmaktadır. Nitekim dünya genelinde elektrikli araçların araç satışlarındaki payı da giderek artmaktadır. Bu durum yakın gelecekte elektrikli araçların hızla artacağı ve nihayetinde tamamen içten yanmalı araçların yerini alacağını göstermektedir. Bu bağlamda elektrikli araçların kullanıma başlanması pek çok avantaj ve dezavantajı beraberinde getirecektir.

2.1. Günümüzde Elektrikli Araç Teknolojileri

2.1.1. Elektrikli araç ve altyapı teknolojilerinin eksiklikleri ve oluşan kaygılar

Dünyada yaşanan pandemi, çip krizi ve küresel ekonomik krizinden kaynaklı araç üretimleri ciddi oranda düştü. Fakat mevcut satış rakamları değerlendirildiğinde ülkemizde ve dünyada elektrikli araç satış oranları içten yanmalı araçlara göre giderek artmaktadır.

Elektrikli araç teknolojisi bu durgun üretim dönemine rağmen gelişimine hızla devam etmektedir. Tüm teknolojik gelişmelere rağmen elektrikli araçların hayatımıza daha hızlı bir şekilde girmesini engelleyen bazı kaygılar vardır. Örneğin;

Ülkelerin elektrifikasyon alt yapılarının yetersiz veya bu kadar çok sayıda elektrikli araç yükünü karşılayacak seviyede olmaması,

Elektrik şebekesindeki arz-talep dengesinin elektrikli araçların entegrasyonuyla bozulacak olması, bu sebeple yeni enerji kaynaklarının mevcut şebekeye entegre edilmesinin gerekliliği,

Elektrikli araçların şarj edilmesi sebebiyle birçok güç kalitesi probleminin ortaya çıkacak olması,

Şarj istasyonlarının yeterince yaygın olmaması,

Elektrikli araçların şarj sürelerinin, hızlı şarj bile olsa, insanların alıştığı benzin alma sürelerinden çok daha fazla olması,

Elektrikli araç bakım-onarımı konusunda yetişmiş elemanın çok az olması,

Günümüz teknolojisinde batarya kapasitelerinin ağırlık-hacim/güç yoğunluğu açısından hala yeterli seviyeye ulaşmaması,

Araç bataryalarının çevrim ömrünün (cycle life) sınırlı olması,

Elektrikli araçlarda halihazırda en çok kullanılan lityum-iyon bataryaların dengesiz/aşırı şarj/deşarj akımları veya ısıl sürüklenme sebebiyle patlayabilmesi vb.

gibi unsurları elektrikli araçların çok hızlı şekilde kullanımının önüne geçen faktörler olarak sıralayabiliriz. Bu faktörlerin üstesinden gelebilmek için araç üretici firmalar ve ülkeler hem alt yapı hem de bazı teknolojik yetersizliklerin üstesinden gelmek için çalışmalar yürütmektedir.

Araçların kullanıcılar tarafından tercih edilmesinde en kritik husus altyapı, batarya teknolojisi ve menzil konusundaki kaygılardır. Üretici firmaların geliştirdiği ve satışa sunduğu modellerin kullanımı ve karşılaşılan problemlerin geri dönüşüne göre çözüm sağlanması konsepti günümüzde hala devam etmektedir. Bu bağlamda dünyada en çok araç üreten ve en çok bilinen firmaların ar-ge çalışmalarıyla ulaştıkları bugünkü noktayı ortaya koymak için bazı elektrikli araçların en son verileri Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Dünyaca ünlü araç firmalarının üretmeye başladığı ve piyasaya sürdüğü modellerinin bugün itibariyle alt sistemlerinin teknik verileri incelendiğinde özellikle menzil konusunda batarya teknolojisindeki gelişmeler dikkate alındığında ciddi gelişim sağladığı aşikardır. Altyapı kısıtları sebebiyle üretici firmalar 2 farklı modda şarj seçeneği ile tasarıma

yöneltmiştir. Standart şebeke üzerinden şarj modunda batarya kapasiteleri dikkate alındığında araçlar birbirine yakın şarj sürelerine sahiptir.

Çizelge 2.1. Marka/modellere göre elektrikli araç verileri

Marka Model	Motor Gücü	Hızlı Şarj	Standart Şarj (Şebekeden)	Enerji Kapasitesi	Batarya Teknolojisi	Menzil	Araç Tipi
Volkswagen e-Golf	100 kW	45 dk	10 Saat	24,2 kWh	$LiNiMnCoO_2$ (NMC)	232 km	Elektrik
BMW iX3	210 kW	34 dk	7,5 Saat	27,2 kWh	$LiNiMnCoO_2$ (NMC)	460 km	Elektrik
Hyundai IONIQ	225 kW	18 dk (80% doluluk) (350 kW İstasyon)	6 Saat	72,6 kWh	$LiNiMnCoO_2$ (NMC)	430 km	Elektrik
Jaguar I-PACE	294 kW	-	8,58 Saat	90 kWh	$LiNiMnCoO_2$ (NMC)	470 km	Elektrik
Mercedes EQC	300 kW	40 dk (%80 dolum) (120 kW İstasyon)	-	80 kWh	$LiNiMnCoO_2$ (NMC)	403 km	Elektrik
Renault Zoe	80 kW	30 dk (120 kW İstasyon)	9,5 saat	52 kWh	$LiNiMnCoO_2$ (NMC)	395 km	Elektrik
Smart EQ	60 kW	45 dk	6 Saat	17,6 kWh	Lityum iyon	160 km	Elektrik
Tesla Model 3	211 kW	40-60 dk (50 kW İstasyon) (%20-%80 dolum)	8-12 saat (%20-%80)	75 kWh	$LiFePO_4$ (LFP)	576 km	Elektrik
Tesla Model S	499 kW	60-80 dk (50 kW İstasyon) (%20-%80 dolum)	11-15 saat (%20-%80)	103 kWh	LiNiCoAl (NCA)	651 km	Elektrik
Toyota C-HR	90 kW	-	-	54,3 kWh	NiMH	-	Hibrit
Toyota Yaris	86 kW	-	-	0,8 kWh	NiMH	-	Hibrit
Volvo S90	340 kW	-	-	11,6 kWh	Lityum iyon	-	Hibrit

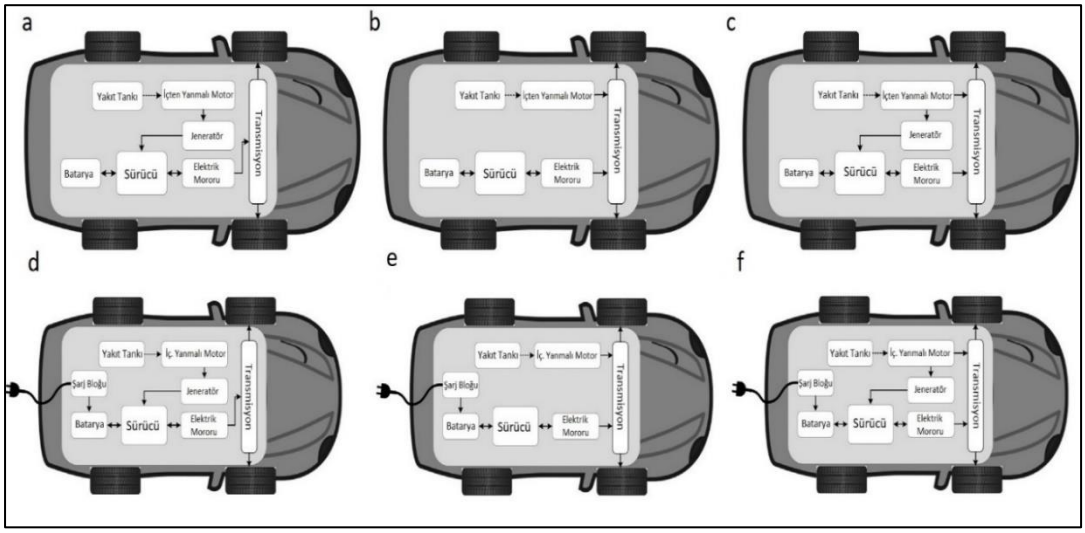
Bununla beraber güç elektroniği teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak hızlı şarj modundaki şarj süreleri gün geçtikçe azalmaktadır. Hızlı şarj modlarının güç seviyeleri her aracın batarya ve alt sistemlerinin tasarımsal verilerine göre değişmektedir. Fakat tüm gelişmelere rağmen hala günümüzde benzin alma sürelerine yakın şarj süreleri elde

edilememektedir. Burada en önemli kısıtlayıcı faktörler altyapı ve ekonomik şarj istasyonu tasarımlarıdır. Şarj sürelerinin kısaltılabilmesi için şarj istasyonlarının güç seviyelerinin yükseltilmesi ve araçların batarya mimarilerinin bu güç seviyelerine göre tasarlanması gerekmektedir. Bu durum da ekonomik altyapı tesisi konusunda ve araç maliyetlerinde olumsuz faktör olarak öne çıkıyor. Ek olarak her ne kadar menzil verileri çok yüksek seviyede olsa da bataryaların verimleri ve şarj istasyonlarının da mevcut benzin istasyon ağı kadar yeterli olmaması olumsuz faktörlerdir. Bu gerekçeler araç alacaklar için en önemli kaygı unsurlarıdır.

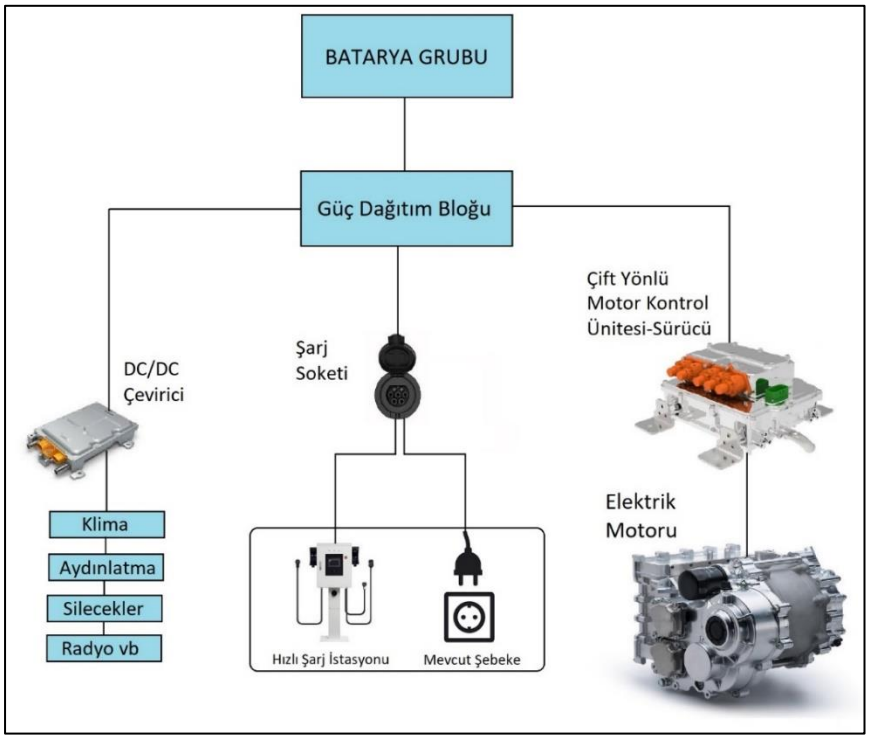
2.1.2. Elektrikli araç alt sistemleri

Elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar (HEA) ve tam elektrikli araçlar (TEA) olarak sınıflandırılabilirler. HEA' lar ise şebekeden şarj edilemeyen hibrit elektrikli araçlar ve şebekeden şarj edilebilen hibrit elektrikli araçlar (PHEA) olarak sınıflandırılır. Güç aktarım yapısı bakımından hibrit araçlar, seri HEA, paralel HEA, seri/paralel HEA, seri PHEA, paralel PHEA, seri/paralel PHEA şeklinde gruplandırılabilir [44]. Şekil 2.1' de hibrit araçların şebekeden şarj edilip edilmediği ve güç aktarım yapısına göre mimarileri verilmiştir.

Tam elektrikli araçların HEA ve PHEA gibi iki tahrik kaynağı yoktur. Tek tahrik kaynağı bataryadır. Bu sebeple TEA' larda batarya grubu hibrit araçlara göre daha büyük kapasitede tasarlanmaktadır. Şekil 2.2' de tam elektrikli aracın genel hatlarıyla iç yapısı verilmiştir.



Şekil 2.1. Hibrit araçların konfigürasyonları [42]



Şekil 2.2. Elektrikli araç alt sistem topolojisi

Elektrikli araçlar şebekeden gelen elektrik enerjisinin %77'sinden fazlasını tekerleklerdeki güce dönüştürürken geleneksel benzinli araçlar, benzinde depolanan enerjinin yalnızca yaklaşık %12-30'unu tekerleklerdeki güce dönüştürür [45]. Bunun temel nedeni hem elektrikli araçta çok az sistem bileşeninin bulunması hem de şarj, batarya, güç sürücüleri, motor, iletim gibi alt sistemlerin veriminin çok yüksek olmasıdır. Bunun aksine geleneksel benzinli araçların motor ve aktarma organları çok karmaşık ve çok bileşenlidir. Özellikle

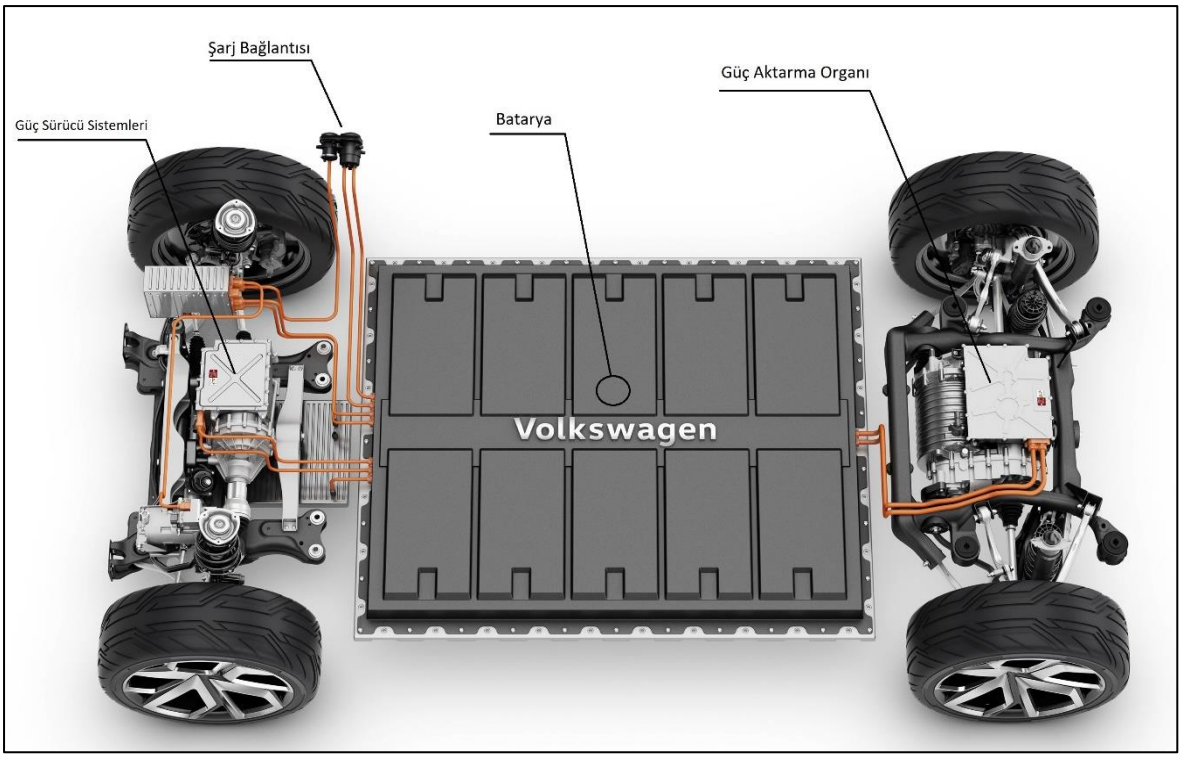
motor termal kayıpları %60 civarında, aktarma organındaki kayıplarda %10 civarındadır. Bu veriler ışığında elektrikli araçlar içten yanmalı araçlara göre enerji verimliliği açısından çok üstündür sonucuna varılabilir.

Dünya otomobil sektöründe üretici firmalar aracın eni, uzunluğu, motor konumu, çekiş düzeni gibi modüler tasarım yapısı için bazı platformlar tasarlarlar. Aynı durum gelişen elektrikli araç sektörü içinde geçerlidir. Platform en basit tarifiyle bir aracın oluşturduğu temel dizaynı ifade eder. Geleneksel içten yanmalı araçlarda platformun temel görevi motor, şanzıman, aks gibi otomobilin tüm parçalarını bir arada tutarak taşımaktır. Aynı durum elektrikli araçlar için de geçerlidir. Hatta platform, EA' larda daha kritik bir öneme sahiptir. Çünkü tam elektrikli araçlarda batarya çok fazla hacim ve ağırlığa sahiptir. Bu sebeple bataryanın platform üzerinde nasıl konumlanacağı aracın aerodinamiğini ciddi oranda etkileyecektir. Bununla birlikte motor, güç sürücüsü ve diğer sistemlerin de platform içi tasarımı verim açısından çok kritik öneme sahiptir. Tüm bunların yanında firmaların ortak platformları kullanması hem ar-ge tasarım maliyeti hem de üretim maliyeti açısından çok daha uygun olmaktadır. Tüm bu sebeplerle araç platformları firmaların stratejisidir. Çizelge 2.2' de kullanılan bazı platformlar ve kullanan firmalar verilmiştir.

Çizelge 2.2. Elektrikli araç platformları [46]

Platform İsmi	Kullanan Markalar
Renault–Nissan Common Module Family EV	Nissan ve Renault EA Modelleri
Electric Toyota New Global Architecture	Toyota, Subaru ve Lexus EA Modelleri
Ford GE1 Platform	Ford EA Modelleri
General Motors BEV2 Platform	Chevrolet EA Modelleri
General Motors BEV3 Platform	Cadillac EA Modelleri
Hyundai Electric Global Modular Platform	Hyundai, Kia ve Genesis EA Modelleri
STLA Platforms	Peugeot, Fiat ve Chrysler EA Modelleri
Sustainable Experience Architecture Platform	Volvo ve Lotus EA Modelleri
Ultium	Cadillac ve Hummer EA Modelleri
Volkswagen Group MEB platform	Volkswagen, Audi ve Scoda EA Modelleri
Volkswagen Group Premium Platform Electric	Audi EA Modelleri
Volkswagen Group Scalable Systems Platform	Yeni kuruldu. MEB' in yerini alması bekleniyor

Elektrikli araç üretimine hız veren Volkswagen firmasının kullandığı MEB Platformunun bir modeli Şekil 2.3’ de verilmiştir.

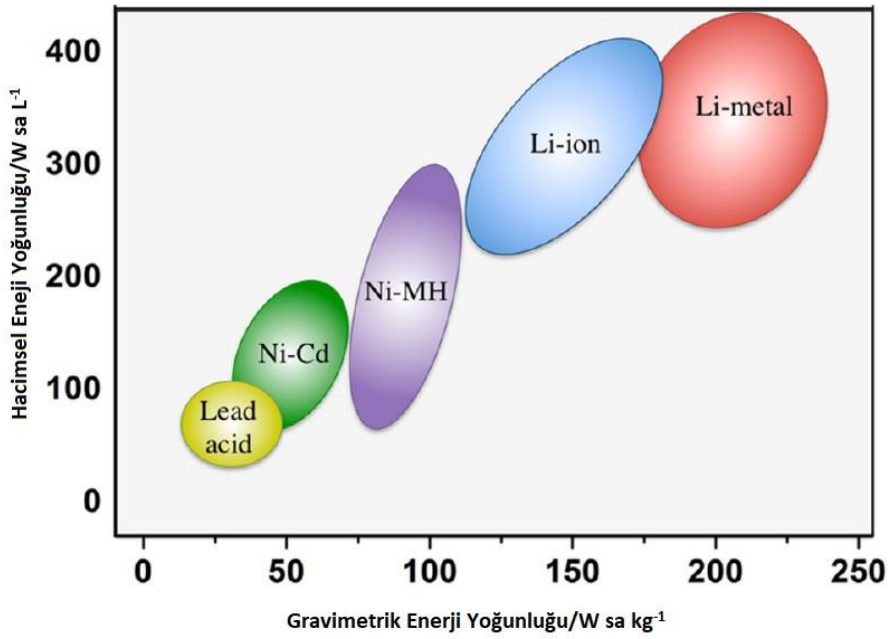


Şekil 2.3. Volkswagen Group MEB platformu [47]

Platform incelendiğinde şarj bloğu, araç kontrol sistemleri ve motor sürücüsü arka blokta, batarya ünitesi orta blokta ve motor kısmı aracın ön bloğunda konumlandırılmıştır. Bu dizayn firmanın ar-ge çalışmaları ile tasarlanmış ve gün geçtikçe de geliştirilmektedir. Diğer platformlardaki modeller dikkate alındığında bazı tasarımsal farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin Tesla firmasının bazı modellerinde Hub motor kullanılmaktadır. Bu motor doğrudan tekere monte olduğu için transmisyon tamamen ortadan kalkmakta ve verim daha da artırılmaktadır. Bu tasarımda da sık arızalanma veya özel bir motor kullanıldığı için iktisadi üretim konusunda zafiyet oluşabilir. Ek olarak batarya kapasitesi, konumu veya diğer alt sistemlerin kapasite veya konumunda farklılıklar olabilir. Bu açıdan her tasarımın avantaj ve dezavantajları vardır. Firmalar platformları araçların segmentlerine göre tasarladıkları için aynı firmanın pek çok alt platformu bulunmaktadır.

2.2. Batarya Teknolojileri

Günümüzde pek çok enerji depolama sistemi arasından elektrokimyasal depolama en yaygın olan ve en çok araştırılan teknolojidir. Bu sebeple en çok tercih edilen sistem batarya teknolojileri olmaktadır. Bataryalar, anot, katot ve iki elektrot arasında kimyasal reaksiyonu sağlayan bir elektrolitten oluşmaktadır [48]. Bataryalar depolanan kimyasal enerjiyi, meydana gelen tersinir reaksiyonlarıyla elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal hücrelerdir. Batarya teknolojisinin keşfinden günümüze kadar bilimin de ilerlemesiyle elektrokimyasal depolama sistemleri çok yol kat etmiştir. Nikel-kadmiyum, çinko-asit, lityum-iyon gibi pek çok batarya teknolojisinin keşfi gerçekleştirildi. Bu batarya gruplarının tercih sebepleri arasında en önemli faktörler hacimsel-gravimetrik enerji yoğunlukları ve yaşam döngüsüdür. Şekil 2.4' te kimyasına göre bataryaların hacimsel-gravimetrik enerji yoğunlukları görülmektedir.



Şekil 2.4. Bataryaların hacimsel-gravimetrik enerji yoğunluklarının karşılaştırılması [49]

Yoğunluk grafiğinde olmayan ve her ne kadar depolama sistemi olarak bilinse de tek başına bir depolama sistemi olarak kullanılmayan bir diğer sistem süperkapasitörlerdir. Güç yoğunluğu diğer depolama sistemlerinden çok daha fazla olan fakat enerji yoğunluğu olarak en düşük olan süperkapasitörler birçok alanda kullanılmaktadır [50]. Fakat düşük enerji yoğunluğu sebebiyle tam olarak bir depolama sistemi olarak değil kısa süreli pik güç kaynağı gibi kullanılmaktadır. Araçların anlık yüksek tork dolayısıyla yüksek güç (örneğin

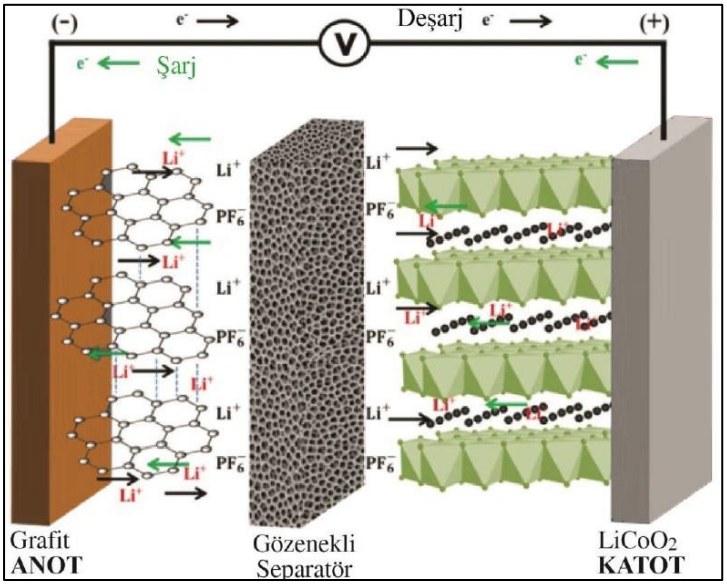
bir rampa çıkarken) ihtiyaçlarında kullanılmak üzere araç üreticilerinin tasarımlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte süperkapasitör enerji depolama teknolojisinin hızlı olgunlaşması ve büyük ölçekli uygulamaları ile bağımsız veya yardımcı bir enerji depolama sistemi olarak süperkapasitörlerin operasyonel kullanımı artan bir ilgi görmüştür [51,52]. Son dönemde araştırmacılar süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu arttırmak ve gerek depolama sistemi gerek şarj istasyonu niteliğinde kullanılabilmesi için pek çok çalışma yapmaktadır.

Halihazırda hacimsel ve gravimetrik enerji yoğunluğu, yüksek çalışma potansiyeli, kendi kendine deşarj oranının düşük olması, geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesi gibi pek çok üstünlükten dolayı lityum piller enerji depolama sistemi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Sadece elektrikli araçlarda değil ev aletleri, cep telefonları, mikroşebeke depolama sistemleri vb birçok kullanım alanına sahiptir. Fakat özellikle büyük ölçekli uygulamalarda kullanım için hala birçok teknolojik gelişime ihtiyaç vardır. Bu bağlamda son yıllarda katot ve anot aktif maddeleri üzerine pek çok ar-ge çalışması yapılmaktadır.

2.2.1. Lityum iyon batarya teknolojisi

Yüksek kapasiteleri, yüksek şarj oranları, uzun ömürleri, nispeten iyileştirilmiş güvenli çalışma durumları, hafıza etkisinin olmaması, düşük atom ağırlığı ve yüksek iyonlaşma potansiyeli gibi sebeplerle lityum iyon piller son yıllarda ilgi görmektedir. Günümüzde firmalar hızla anot ve katot aktif maddeler üzerine ar-ge çalışması yürüterek kapasite, ömür, şarj ömrü, güvenli çalışma gibi özelliklerde iyileştirme yapmaya çalışmaktadır.

Lityum iyon piller anot, katot, elektrolit ve seperatörden oluşmaktadır. Anot negatif lityum interkalasyon materyali, katot daha fazla pozitif redoks potansiyeline sahip olan bir diğer lityum interkalasyon materyalidir [53]. Lityum iyonları (Li^+) şarj esnasında dış devredeki elektronların akışıyla katottan ayrılarak elektrolit yoluyla separatörden geçer ve anot ile bileşik oluştururlar. Deşarj esnasında ise lityum iyonları anottan katoda doğru aynı şekilde elektrolit ve separatörden geçerek göç ederler. Bu deşarj işlemi sırasında elektrolitten geçen lityum iyonlarını karşılayacak miktarda dış devreden akım geçer. Böylece elektrik akışı sağlanmış olur [54]. Elektrolit elektron geçişi için yalıtkan, iyon geçişi için iletken muhteviyattadır. Lityum iyon pillerin çalışma prensibi Şekil 2.5’ te verilmiştir.



Şekil 2.5. Lityum iyon batarya çalışma prensibi [54]

Şekilden de anlaşılacağı üzere tersinir kimyasal-elektrik enerji dönüşümünü sağlayabilen, hacimsel-gravimetrik enerji yoğunluğu yüksek bir batarya teknolojisidir. Anot aktif maddesinin elektron alarak (şarj işlemi) reaksyona uğraması sonucu katottan kopan lityum iyonları ile bileşik oluşturması ve bu sayede elektrik enerjisinin kimyasal enerji olarak depolanması sağlanır. Deşarj işleminde de tam tersi reaksiyonlar gerçekleşerek kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüşür. Temel dönüşüm prensibi bu şekilde tarif edilebilir.

Anot aktif maddesi

Lityum iyon pil teknolojisinin ilk keşfiyle yüksek kapasite ve düşük elektrot potansiyeli sebebiyle anot aktif maddesi olarak metalik lityum kullanıldı. Fakat çok sayıda doldur/boşalt işleminden sonra lityum metalinin dentritik büyümesi sonucu kısa devreler oluşmuş bu sebeple yanma ve patlamalar meydana gelmiştir. Bu durumun üstesinden gelebilmek için lityum metalinden daha güvenilir karbon içerikli grafit anotlar kullanılmaya başlamıştır. Grafit, lityum ile konak-konuk tepkimesi vererek LiC_6 bileşiğini oluşturur. Karbonlu anodun yüzeyinde elektrolit bozunarak katı-elektrolit ara yüzey (SEI) tabakası olarak adlandırılan bir tabakası oluşmaktadır. SEI tabakası elektrolitin daha fazla bozulmasına ve lityum iyonunun başka türlerle birlikte karbonun örgü boşluğuna girmesine engel olmaktadır. Ancak pilin fazla şarj edilmesi sonucu karbon anotta biriken metalik lityum çözücü ile tepkime vererek yanıcı gaz karışımının oluşmasına neden olabilir. Bazı durumlarda aşırı lityum birikmiş olan karbonlu anot yanıcı patlamaya neden

olabilir. Bu yüzden büyük kazaların önlenmesi için şarj işleminin kontrol edilmesi gerekmektedir [55]. Bu endişelerin üstesinden gelebilmek için tasarlanan elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi muhakkak bulunmaktadır. Bununla birlikte bu endişelerin üstesinden gelmek için grafitin yerini alabilecek yüksek güvenilirliğe, düşük potansiyel ve yüksek kapasiteye sahip anot aktif maddesi araştırılmaktadır. Örneğin Li-Ti-O (Lityum-titanyum-oksijen) bileşik varyasyonları (LTO bataryalar), kalay oksitler ve metal alaşımları çalışılmaktadır. Üzerinde çalışılan anot aktif maddeleri Li_2TiO_3, $Li_4Ti_5O_{12}$, Al, Sn, SnO, Sn_2Fe, SnO_2, Si olarak sıralanabilir. Fakat mevcut anot aktif maddeler arasında en yaygın kullanım grafit anot aktif maddesidir.

Katot aktif maddesi

Lityum iyon pillerin performansını büyük oranda katot aktif maddenin özellikleri belirlemektedir. Örneğin katodun kimyasal potansiyeli bataryanın potansiyelini, lityum iyon miktarı bataryanın şarj kapasitesini, kimyasal ve mekanik kararlılığı döngü sayısını belirler. Bununla birlikte maliyet faktörü de büyük oranda katot aktif maddesinin tasarımına bağlıdır.

Bilim dünyası ve araç sektöründe bataryaların isimlendirmesi çoğunlukla katot aktif maddesinin niteliğine göre şekillenir. Aşağıda günümüzde elektrikli araçlarda kullanılan veya ar-ge çalışmaları devam eden bazı pil teknolojileri verilmiştir.

Lityum Kobalt Oksit ($LiCoO_2$) – LCO Batarya: Bu batarya tipinde grafit anot ve $LiCoO_2$ katot kullanılmaktadır. Yüksek özgül enerjisi ve kolay sentezlenebilir olması bu bataryayı ticari hale getirmiştir. Dizüstü bilgisayarlar, fotoğraf makinaları, cep telefonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat nispeten kısa ömürlü olması, düşük termal kararlılığa sahip olması ve sınırlı yük yetenekleri gibi dezavantajları vardır. Bu nitelikteki bataryaları yüksek hızlı şarja zorlamak aşırı ısınmaya veya strese sebebiyet verecektir.

Lityum Manganez Oksit ($LiMn_2O_4$) – LMO Batarya: Bu batarya tipinde grafit anot ve $LiMn_2O_4$ katot kullanılmaktadır. Bu katot tipi iyon akışını kolaylaştıran üç boyutlu bir spinel yapıya sahiptir. Bu sayede daha düşük iç direnç ve daha iyi akım yönetimi sağlanabilmektedir. Yine düşük iç direnci sayesinde yüksek hızlı şarj/deşarj imkanı vardır.

Ayrıca 4.1 V civarında tersinir gerilime sahip olması ve dünya üzerinde manganın bol olması avantajları arasındadır. $LiMn_2O_4$ katot kullanılan pillerin özellikle yüksek sıcaklıklarda şarj-deşarj döngüsü veya depolanma kapasitede keskin bir düşüş olmaktadır. Bu sebeple yüksek akımlarda sürekli yük beslenemez veya şarj edilemez. Buna ek olarak çevrim ve çalışma ömrü de kısadır. Elektrikli ev aletlerinde ve tıbbi cihazlarda kullanılmaktadır.

Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit ($LiNiMnCoO_2$) – NMC Batarya: Bu batarya tipinde grafit anot ve $LiNiMnCoO_2$ katot kullanılmaktadır. Lityum iyon batarya teknolojileri arasında en başarılılarından bir tanesidir. Yüksek hızlı şarj/deşarj için uygundur. Çevrim ve yaşam ömürleri yüksektir. Özgül enerji yoğunluğu çok yüksek ve tüm katot tozlarının arasında en düşük kendi kendine ısınma oranını sunar [56]. Bu sebeple günümüzde elektrikli araçlarda çok yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bkz. Çizelge 2.1).

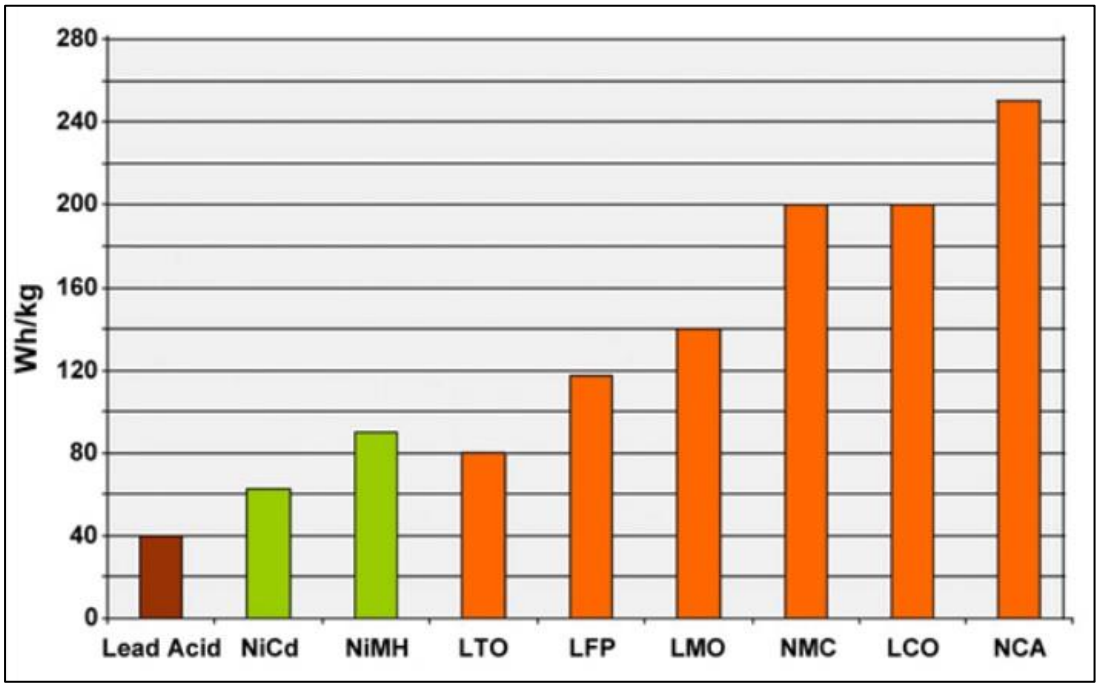
Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$) – LFP Batarya: Bu batarya tipinde grafit anot ve $LiFePO_4$ katot kullanılmaktadır. Yüksek hızlı şarj/deşarj için uygundur. Çevrim ve yaşam ömürleri yüksektir. Termal kararlılıkları çok yüksektir bu sebeple zorlu kullanım şartlarına uygundur. Özgül enerji yoğunlukları NiCd ve NiMH batarya tiplerinden daha yüksektir fakat NMC, NCA, LMO ve LCO batarya tiplerinden daha düşüktür. Kendi kendine deşarj eğilimi çok yüksektir. Bu durum çevrim ömrünü azaltmakta ve verimi düşürmektedir.

Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit ($LiNiCoAlO_2$) – NCA Batarya: Bu batarya tipinde grafit anot ve $LiNiCoAlO_2$ katot kullanılmaktadır. Özgül enerji yoğunluğu en yüksek batarya teknolojisine sahiptir. Yüksek hızlı şarj/deşarj için uygundur. İçeriğindeki nikel elementi sayesinde yüksek enerji kapasitesi ve tek şarjla daha uzun mesafe kabiliyeti sağlamaktadır. Çevrim ve yaşam ömürleri yüksektir. Burada nikel element oranının artması özgün yoğunluğu arttırır fakat termal kararlılığı ve çevrim ömrünü azaltmaktadır. Ayrıca nikel elementinin pahalı olması da kısıtlayıcı faktördür. Bu sebeple bu tip batarya teknolojileri üzerine hala ar-ge çalışmaları devam etmektedir. Çoğunlukla uzun menzil araçlar için tercih edilir (Bkz. Çizelge 2.1).

Lityum Titanat (Li_2TiO_3) – LTO Batarya: Bu batarya tipinde Li_2TiO_3 anot ve NMC veya LMO katot kullanılmaktadır. Çevrim ömrü en yüksek aynı zamanda en pahalı batarya teknolojisidir. Yüksek hızlı şarj/deşarj için uygundur. Özgül enerji yoğunluğu düşüktür.

Termal kararlılığı ve güvenilir çalışma seviyesi diğer lityum bataryalara göre çok yüksektir. Grafit anotlara göre SEI film oluşumu çok düşük olduğu için yanma/patlama riski çok düşüktür. UPS, solar enerji sistemleri ve elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.6' da özgül enerji yoğunlukları verilmiştir.

Gelecek Batarya Teknolojileri: Katı hal lityum iyon, lityum-kükürt ve lityum-hava batarya teknolojileri gelecek için çalışılmaya devam etmektedir. Günümüz şartlarında hala çevrim süreleri, termal kararlılıkları, güvenilir çalışmaları veya özgül enerji yoğunlukları konusunda kısıtları vardır.



Şekil 2.6. Batarya teknolojilerinin özgül enerji yoğunlukları [57]

Şekil 2.6 incelendiğinde özgül enerji yoğunluğu en yüksek teknoloji NCA tipindeki bataryalardır. Nitekim Tesla Model S serisi araç tek şarjla en uzun menzile sahip araç olup NCA tipi batarya kullanılmaktadır. Fakat çevrim süresi ve güvenilir çalışma gibi faktörleri de göz önüne aldığımızda en yaygın kullanım günümüz itibariyle NMC tipi bataryalardır.

Elektrolit

Elektrolitler, bataryaların hayati bileşenlerinden biridir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri, kapasite, güç yoğunluğu, hız performansı, çevrim ömürleri ve güvenli çalışma dahil olmak

üzere bu cihazların performansında önemli bir rol oynamaktadır. Elektrolitler, tuz ve çözücüler içeren, iyon geçirgenliği yüksek renksiz sıvılar olarak bilinir. Lityum iyon bataryalar için elektrolit kimyasal ve termal kararlılık açısından çok önemlidir. Bununla beraber güvenilir çalışma, ekosisteme zarar vermeme ve maliyet faktörleri de tasarımda çok kritik rol oynamaktadır. Lityum iyon bataryalarda sıvı elektrolitler, iyonik sıvılar, polimer elektrolitler, inorganik katı elektrolitler ve hibrit elektrolitler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu elektrolitlerden organik sıvı elektrolitler en yaygın kullanılan ve en kolay temin edilebilen elektrolit grubudur. İyonik sıvılar ise karbonat bazlı elektrolitlere göre, yüksek oksidasyon potansiyeli ve daha iyi termal stabilite sundukları için son zamanlarda alternatif elektrolitler olarak kabul edilmiştir [58].

Seperatör

Seperatör, anot ile katot arasına bulunan, elektrotların birbiriyle temas etmesini önleyen, serbest iyonik hareketi mümkün kılan fakat elektron akışını izole eden kritik bir bileşendir. Yaygın olarak polimerik membrandan veya dokuma olmayan bir kumaş mattan oluşan mikro gözenekli bir tabakadır. Mikro gözenekli poliolefin membranlar, performans, maliyet ve güvenlik avantajları nedeniyle sıvı elektrolitin kullanıldığı pillerde en yaygın kullanılan seperatördür [58]. Temel olarak yüksek gerilime dayanıklı olmalı ayrıca kimyasal ve termal kararlılığı yüksek olmalıdır.

Şarj verimliliği, şarj işlemi sırasında tüketilen enerji ile pil tarafından depolanan enerji arasındaki orandır. Yani bir akünün tam şarjlı bir aküden tam deşarj olana kadar çekilen enerji miktarının, aynı akünün yeniden tam şarj edilmesi için aküye verilen enerjiye oranı olarak ifade edilebilir. Bu anlamda batarya teknolojilerinin geliştirilmesi veya şarj algoritmalarının tasarlanmasında bu husus dikkate alınmalıdır.

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ-ŞEBEKE ENTEGRASYONUNDA KARŞILAŞILACAK MUHTEMEL ZORLUKLAR VE ALINMASI GEREKEN ÖNLEMLER

3.1. Entegrasyon ile Meydana Gelecek Güç Kalitesi Problemleri

Elektrik enerjisinin güç kalitesi tanım olarak enerjinin üretiminden tüketimine kadar her noktada belirlenen standartlara uygun olmasıdır. Tüketiciye temin edilen enerjinin kaliteli, güvenilir ve kesintisiz olması kritik önem arz etmektedir. Bunu sağlamak ise yükün tamamen dengeli olması, dalga şeklinin saf sinüs formunda olması, güç faktörünün 1' e yakın olması ve frekansın anma değerleri içinde olması ile mümkündür.

Günümüzde güç kalitesi ciddi bir sorun haline gelmiş olup limitleri ulusal ve uluslararası standartlara bağlanmıştır. Geçmişten günümüze özellikle yarıiletken teknolojinin hızla gelişmesi ile ticarileşen güç sistem dönüştürücü içeren tüm cihazlar, reaktif güç tüketimine sahip cihazlar güç kalitesini büyük oranda bozmaktadır. Her geçen gün tüketimi artan elektrik ve elektronik ürünler bu durumu daha da zor hale getirmektedir. Kullanılan her yeni elektrikli cihaz mevcut şebekeye yeni bir yük anlamına gelmektedir. Bu bağlamda şebekedeki aşırı yüklenmelerle birlikte gerilim düşmeleri, frekans kararsızlıkları gibi diğer güç kalitesi problemleri de hızla artmaktadır. Güç kalitesi çoğunlukla yükün karakteristiğinden veya dış etkenlerden dolayı bozulur. Gerilimin genliğinin bozulması, darbeler içermesi veya kesintiye uğraması, dalga şeklinin sinüs formundan uzaklaşması ve frekans kararsızlıkları sebebiyle enerji kalitesi bozulabilir. Her ne kadar çoğunlukla yük karakteristiğine bağlı olsa da elektrik enerjinin kalite problemi üretim-iletim-dağıtım-tüketici süreçlerinin her birinde alınacak önlemlerle çözülebilir.

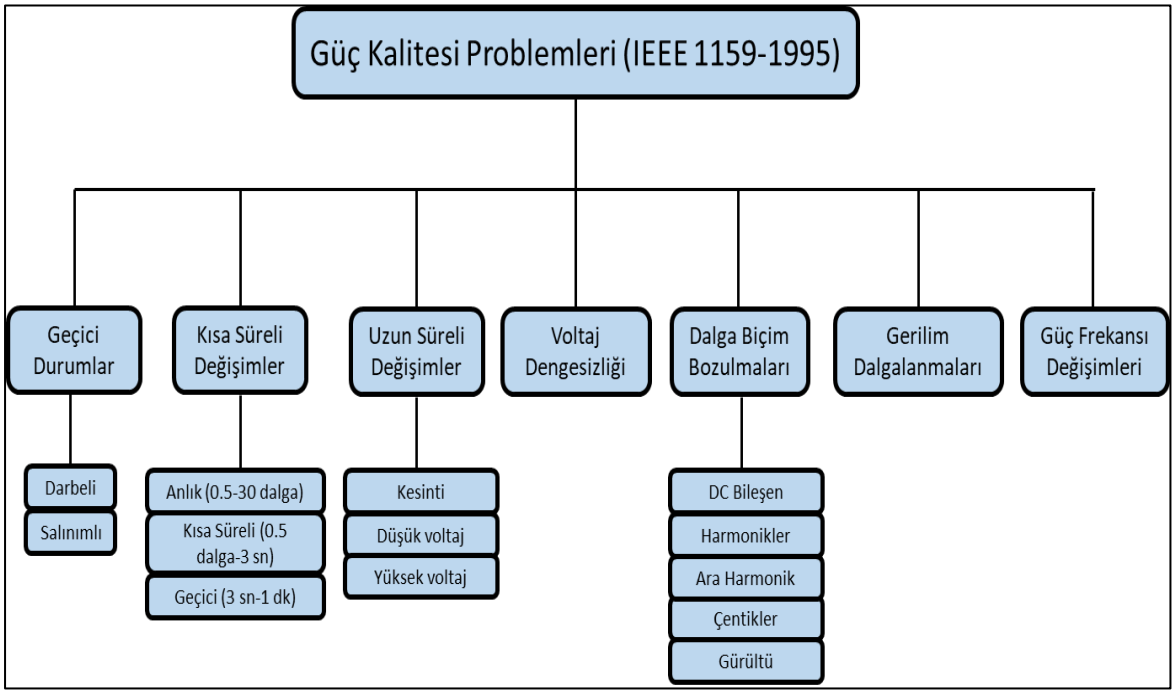
Hal böyle iken elektrikli araçların şebekeye entegre olması güç kalitesi sorununu kontrol edilemeyecek boyutlara getirecektir. Dünyadaki araç sayısı düşünüldüğünde bu kadar büyük bir yükün mevcut şebekeye dahil olması hali hazırda var olan ulusal ve uluslararası standartların yeniden düzenlenmesine ve hatta bu standartların sağlanmasını zorunlu tutacak düzenlemeleri mecbur kılacaktır. Bir elektrikli aracın şebekeden veya şebeke entegreli bir hızlı şarj istasyonundan şarj edilmesi çok yüksek oranlarda harmonik kaynağı ve reaktif güç tüketimi anlamına gelir. Bununla birlikte elektrikli araç yükünün (özellikle

hızlı şarjda) çok yüksek olduğu düşünülürse şebekede gerilim düşmesi ve dalgalanmaları, frekans kararsızlıkları, dengesiz yüklenmeler gibi güç kalitesi problemleri ile karşı karşıya kalınacağı aşikardır. Yani kısaca elektrikli araç-şebeke entegrasyonu ile hali hazırda karşı karşıya kaldığımız güç kalitesi problemlerinin hemen hepsi katlanarak artacak. Bu sebeple bu bölümde güç kalitesi problemleri ve bu problemlerin elektrikli araç-şebeke entegrasyonu ile ne boyutlara geleceği incelenecek.

3.2. Güç Kalitesi Problemleri

Elektrik kaynağının güvenliğinin bilinmesi ve enerji kalitesinde meydana gelebilecek değişikliklerin uygulanmakta olan süreç ve süreçler üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılması son derece önemlidir [59]. Bu bağlamda son kullanıcıya kaliteli ve güvenilir enerjiyi standart limitler içerisinde sunmak için standartları limitlerin dışına taşıyan ve kalite sorunu yaratan kaynakları uzaklaştırmak çok kritiktir.

IEEE 1159-1995 standardına göre güç kalitesi problemleri Şekil 3.1' deki başlık altında kategorize edilebilir [60].



Şekil 3.1. Güç kalitesi problemlerinin IEEE standardına göre sınıflandırılması

3.2.1. Geçici olaylar

Geçici olaylar, birkaç periyot içerisinde gerçekleşip sonlanan ani değişimleri ifade eder. Geçici olaylar, darbeli geçici olaylar ve salınımlı olaylar olarak ikiye ayrılır. Yıldırım düşmesi veya ekipman arızası darbeli geçici durumlara sebep olurken, ani yük anahtarlamaları, kapasitör gruplarının devreye alınması veya kademe değiştiren trafolar salınımlı geçici durumlara sebep olmaktadır [61].

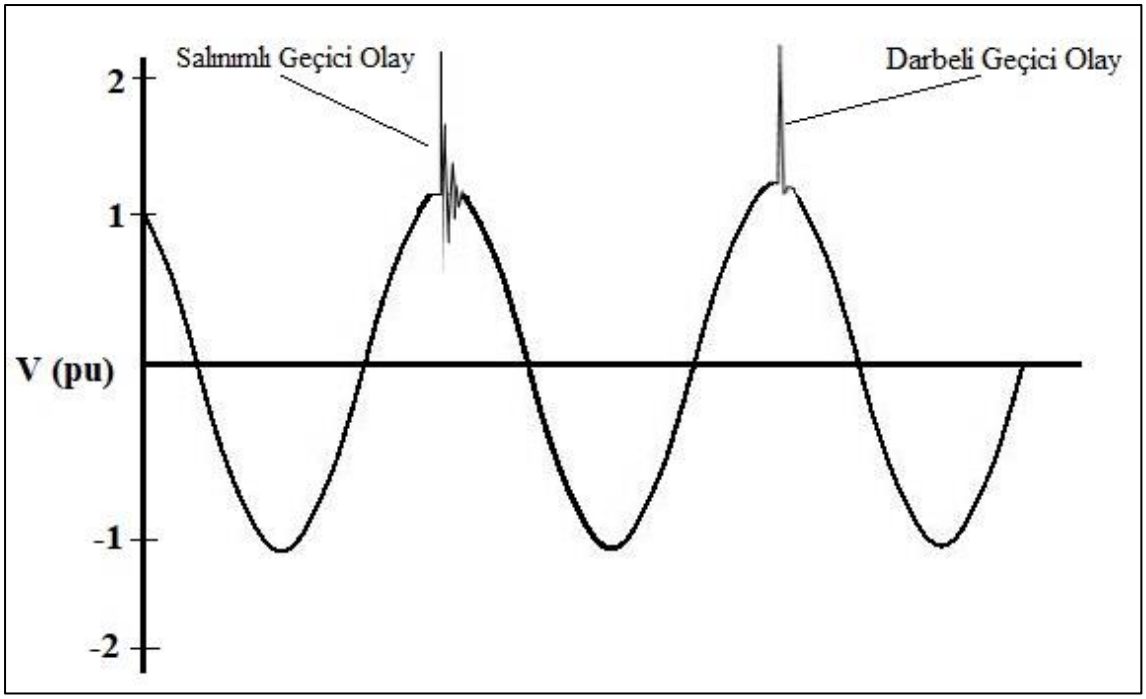
Darbeli geçici olay

Darbeli geçici olaylar, pozitif veya negatif yönlü olabilen, akım veya gerilimin her ikisinde de oluşabilen bir periyot içerisinde oluşup sonlanan ani değişimlerdir. Darbeli geçici durumlar genellikle yükselme veya alçalma zamanları ile temsil edilirler. Örneğin, 1,2 x 50 μs, 2000 V olarak ifade edilen bir darbeli geçici durum, gerilimin 1,2 μs'de 2000 V tepe değere çıktığını ve 50 μs'de tepe değerinin yarısına düştüğünü göstermektedir [62]. Bu bozulmaların en temel sebepleri yıldırım düşmeleridir.

Salınımlı geçici olay

Salınımlı geçici durum ise yine birkaç periyot içerisinde olup sonlanan fakat hem negatif hem de pozitif yönde hızlı bir şekilde değişen salınımlı bozulmalardır. 1 kHz ile 1000 kHz arasında değişim gösterebilirler. Bu tarz bozulmalar salınımın frekansına göre düşük veya yüksek seviyede oluşabilir. Salınımlı geçici bozulmaların en temel sebebi kademeli trafolar veya kapasitör gruplarının devreye alınmasıdır.

Geçici güç kalitesi sorunlarının içeriği incelendiğinde elektrikli araçların şarj işleminin başlama anlarında salınımlı geçici bozulmalarının olması muhtemeldir. Özellikle milyonlarca araç olduğu ve bu kadar çok aracın yine çok sayıda şarj bağlantısı gerçekleştireceği düşünüldüğünde salınımlı olayların bir sorun teşkil edeceği aşikardır. Bu sebeple oluşabilecek bu tarz güç kalitesi problemlerine önlemler alınması gerekmektedir. Şekil 3.2' de darbeli ve salınımlı güç kalitesi bozulması gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Darbeli ve salınımlı geçici durumlar

Bu sorunlar için özel çözümlerin üretilmesi gerekmektedir. Örneğin frekans cevabı yüksek alçak geçiren pasif filtre veya aktif filtre tasarımları ile koruma gerçekleştirilebilir. Çözüm noktalarının ise muhtemel kaynak noktalarına yakın olması gerekmektedir. Yıldırım kaynaklı bozulmalar için ise özellikle kritik cihazlar için koruma tertipleri ile önlem alınması gerekmektedir.

3.2.2. Kısa süreli değişimler

Kısa süreli gerilim değişimleri gerçekleşme sürelerine göre ani, kısa süreli ve geçici değişimler olarak tanımlanır [63]. Bu zaman süreçlerinde olayın yeri ve tipine göre gerilim çökmesi, gerilim sıçraması veya gerilim kesintisi gerçekleşebilir. Bu tarz bozulmalar genellikle yükün karakteristiğine göre değişiklik göstermektedir.

Gerilim çökmesi

Gerilim çökmesi, güç hattında gerilimin veya akımın etkin değerinin IEEE 1159 standardında tanımlanan aralıkta (0.5 periyot-1 dakika) nominal çalışma değerinin 0.1 pu ile 0.9 pu arasında azalması olarak tanımlanır. Gerilim çökmesi, güç talebi bir hat üzerinden aktarılabilecek maksimum gücü aştığında meydana gelen, kesintiye neden olan

bir dinamik kararsızlık türüdür. Gerilim çökmesini önlemeye yönelik geleneksel yaklaşım, hattın asla maksimum kapasitesine ulaşmamasını sağlamaya dayanır [64]. Fakat pratikte bunun kontrolü zordur. Bu tarz bozulmaların üstesinden gelmek için sorunun kaynağına en yakın noktada gerekli önlemleri almak gerekir. Gerilim çökmeleri çoğunlukla simetrik-asimetrik hat arızaları, şebeke yetersizliği, aşırı yüklenme veya büyük motorlara yol verme sırasında meydana gelir.

Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu perspektifinden bakıldığında karşılaşılacak en önemli problemlerden bir tanesi kısa ve uzun süreli gerilim düşmesidir. Bu tez çalışmasındaki strateji bu tarz bozulmaları azaltacak niteliktedir.

Gerilim yükselmesi

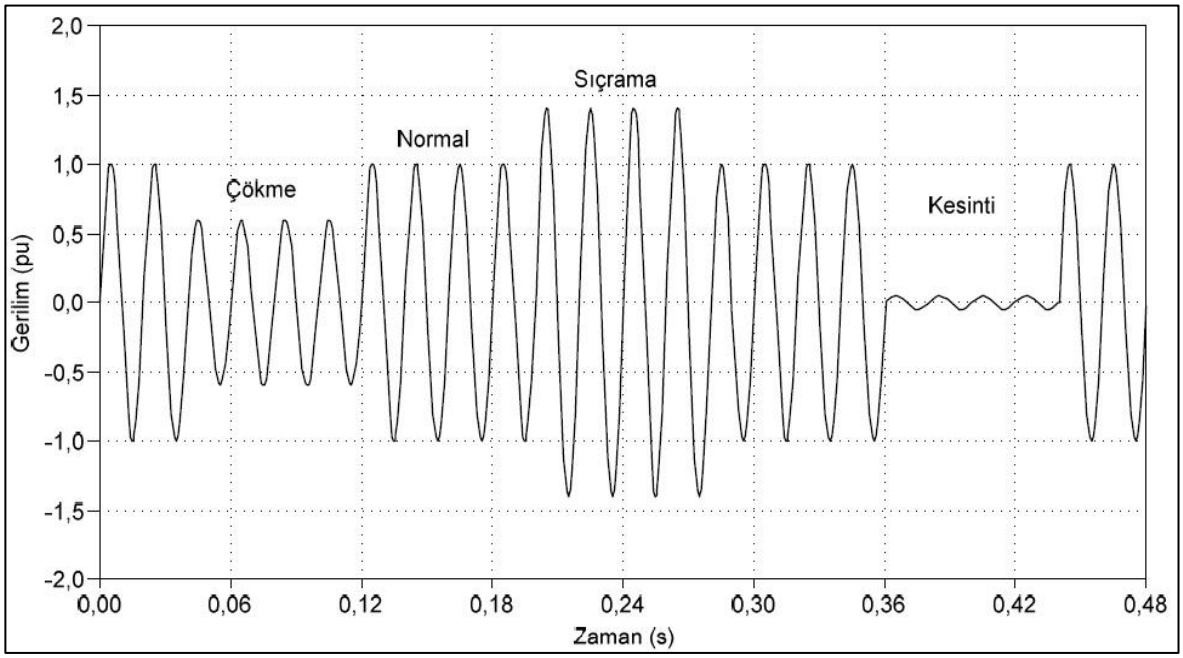
Gerilim yükselmesi, güç hattında gerilimin veya akımın etkin değerinin IEEE 1159 standardında tanımlanan aralıkta (0.5 periyot-1 dakika) nominal çalışma değerinin 1.1 pu ile 1.8 pu arasında artması olarak tanımlanır. Gerilim yükselmeleri gerilim düşmesi problemlerine göre çok yaygın gerçekleşmez. Şebekedeki yüksek güçteki yüklerin aniden devreden çıkarılması, şebekedeki düzensizliklerden oluşan regülasyon zayıflıkları, simetrik-asimetrik hat arızaları, büyük yüklerin anahtarlamasında veya büyük kondansatörün devreye alınması gibi durumlarda gerilim yükselmesi gerçekleşebilir [59].

Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu perspektifinden bakıldığında özellikle şebeke bağlantılı yüksek hızlı şarj istasyonlarında elektrikli araçların bataryalarının dolumu sonrası çok sık karşılaşacağımız güç kalitesi problemlerinden olacaktır. Bununla birlikte elektrikli araç bataryalarının kapasitif karakterli olması da bu sorunu tetikleyebilir. Özellikle yüksek hızlı şarj istasyonlarında gerilim regülatörleri kullanmak bu tarz bozulmalar için önleyici tedbir olabilir.

Kesinti

Kesinti, güç hattında geriliminin ya da yük akımının etkin değerinin IEEE 1159 standardında tanımlanan aralıkta (0.5 periyot-1 dakika) nominal etkin değerinin 0.1 pu' nun altına düşmesi olayıdır. Bu tarz sorunlar genellikle simetrik-asimetrik hat arızaları veya sistem arızları sebebiyle gerçekleşir. Bu bozulmaların üstesinden gelmek için

genellikle arıza koruma ekipmanları kullanılır. Kesintiler genellikle koruma elemanı devreye girinceye kadar gerçekleşir. Şekil 3.3’ de kısa süreli çökme, yükselme ve kesinti problemleri gösterilmektedir [65].



Şekil 3.3. Kısa süreli değişimler

3.2.3. Uzun süreli değişimler

Kısa süreli değişimlerde tanımlanan tüm bozulma tipleri uzun süreli değişimler için geçerlidir. Burada önemli farklılık, olayın gerçekleşme süresidir. IEEE 1159 standardına göre uzun süreli kesinti 1 dakikanın üzerinde gerçekleşen gerilim düşmesi, yükselmesi veya kesintisi olarak tanımlanabilir.

Gerilim düşmesi

Gerilim düşmesi, güç hattında gerilimin veya akımın etkin değerinin IEEE 1159 standardına göre 1 dakikanın üstünde gerçekleşen nominal çalışma değerinin %90’ nın altına düşmesi olarak tanımlanır.

Gerilim yükselmesi

Gerilim yükselmesi, güç hattında gerilimin veya akımın etkin değerinin IEEE 1159 standardına göre 1 dakikanın üstünde gerçekleşen nominal çalışma değerinin %110' nun üstüne çıkması olarak tanımlanır.

Kalıcı gerilim kesinti

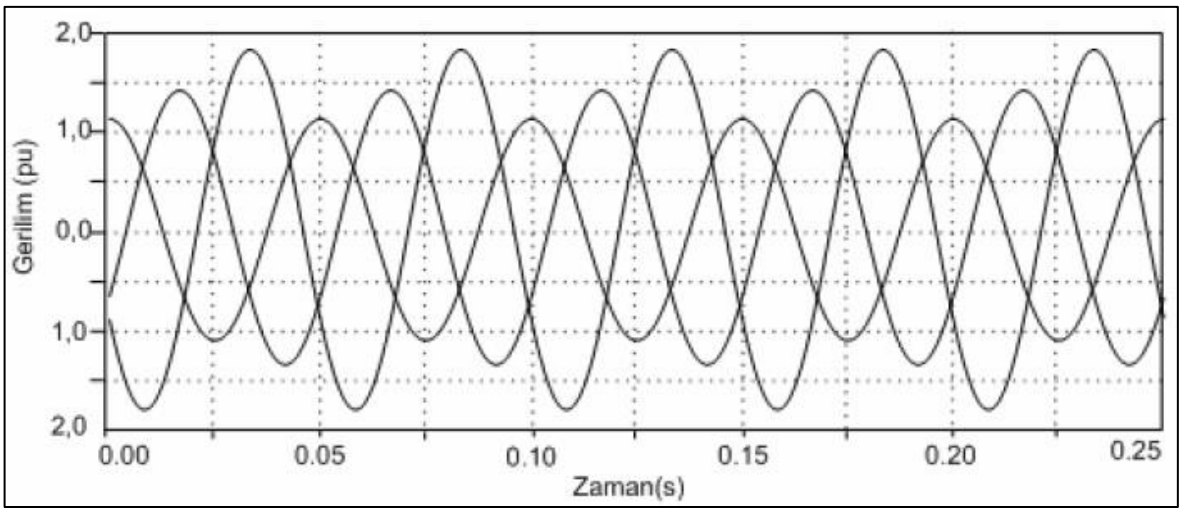
Kalıcı gerilim kesintisi, gerilimin bir dakikadan daha uzun süre sıfır olarak kalması durumudur. Kalıcı gerilim kesintileri bir dakikadan daha uzun sürdüğü için, sistemi onarıp eski durumuna getirebilmek için insan müdahalesi gerekir [66]. Kısa süreli kesintiler çalışmakta olan cihazların çalışmasını etkilemeyebilir fakat uzun süreli kesintide çalışmakta olan cihazlar enerjisiz kalır. Planlı kesintiler hariç diğer kalıcı kesintilerin en büyük sebebi yine simetrik-asimetrik arızlardır. Koruma elemanları sorunu önleyemediği için arıza kalıcı hale gelmektedir.

Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu çerçevesinden değerlendirildiğinde kısa süreli değişimler için yapılan tüm değerlendirmeler uzun süreli değişimlerde de geçerlidir.

3.2.4. Voltaj dengesizliği

Üç fazlı enerji sistemlerinde paralel bağlanma şartları içerisinde yer alan fazlar arası 120˚ faz farkı olması, aynı tepe değerine sahip olması ve aynı frekansta olması durumları sağlanırsa fazlar simetrik ve dengeli olarak nitelendirilir. Bu şartlardan herhangi birinde bozulma olursa sistem dengesiz olarak tanımlanır. Gerilim dengesizliği üç fazlı gerilim veya akımın ortalamasından elde edilen sapmalar olarak tanımlanır. IEEE-1159 standardına göre hattın gerilim değerinde %0,5-2 arasında bir değişim varsa voltaj dengesizliği olarak tanımlanıyor.

Yüzde ikiden düşük gerilim dengesizlikleri, çoğunlukla üç fazlı sistemler üzerindeki tek fazlı yüklerdir. Gerçekten büyük problem oluşturan gerilim dengesizlikleri (%5'den büyük), üç fazlı bir yükün veya üç fazlı bir kapasitör grubunun, tek faza kaldığı durumda meydana gelmektedir [65]. Şekil 3.4' te voltaj dengesizliği dalga şekli verilmiştir [62].



Şekil 3.4. Voltaj dengesizliği

3.2.5. Dalga biçim bozulmaları

Dalga şekil bozulmaları, şebeke akım veya gerilim dalga şeklinin ideal sinüs formundan sapması olarak tanımlanabilir. IEEE-1159 standardına göre dalga şekli bozuklukları; doğru akım bileşeni, harmonikler, ara harmonikler, çentik ve gürültü olmak üzere beş başlıkta tanımlanır. Elektrikli araçların şarj üniteleri yüksek frekansta anahtarlanan yarı iletken malzemelerden oluştuğu için şarj üniteleri şebeke dalga biçim bozulmalarına sebep veren en büyük tehditlerdendir.

DA bileşen

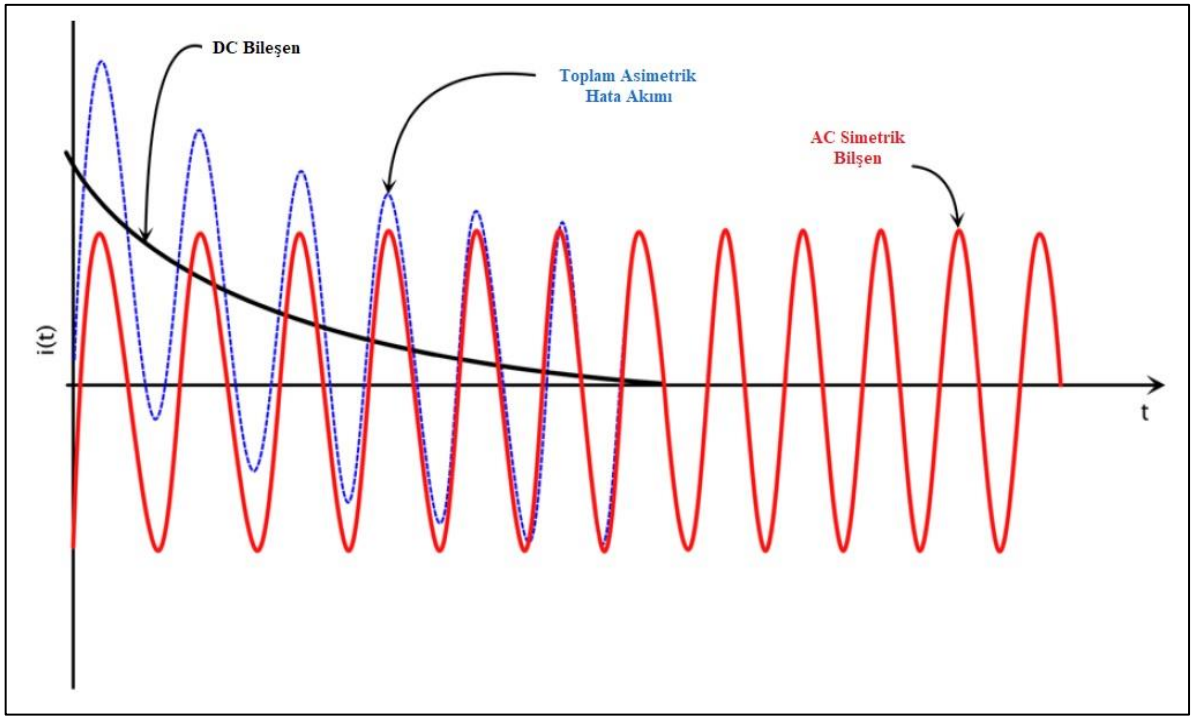
Şebeke AA akım veya gerilim dalga şeklinde meydana gelen DA bileşen olarak tanımlanabilir. Şebekede meydana gelebilecek simetrik-asimetrik kısa devre arızaları sebebiyle veya güç kaynaklarında, eviricilerde meydana gelebilecek hatalardan dolayı oluşabilen dalga biçim bozulmasıdır. DA bileşen, arızanın algılanarak devre dışı bırakılma süresi ve sistemin L/R zaman sabitine bağlı olarak devam eder [67]. Çoğunlukla koruma elemanının hatayı kesmesi sayesinde kısa süreli gerçekleşir.

Bu dalga biçim bozukluğu, oluşan arızanın süresine de bağlı olarak özellikle akım trafolarında doyuma, toprak arıza akımlarına sebep olabilmektedir. Çözüm ise arızanın oluşma sebebini ortadan kaldırmaktır.

Toplam asimetrik arıza akımı Eş. 3.1' de gösterildiği gibi AA akımı ve DA ofset akımını içerir.

$$I_{asnk} = I_{aa} + I_{da} = \frac{V_S}{R} + (I_o - \frac{V_S}{R})e^{-(\frac{t}{\tau})} \quad (3.1)$$

DA bileşenin hem DA hem de AA işaret içeren zamana karşı akımın temsili yanıtı Şekil 3.5' de verilmiştir [68].



Şekil 3.5. DA bileşenin zamana göre temsili değişimi

Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu çerçevesinden bakıldığında, şarj istasyonlarında oluşabilecek asimetrik sistem hataları bu tarz dalga şekil bozulmalarına sebep olabilir. Bu anlamda gerekli koruma tertibatının tasarım aşamasında sistem içerisinde yer alması alınabilecek en kritik önlemdir.

Harmonikler

Harmonikler, gelişen güç elektroniği teknolojileri ile yaygınlaşan yüksek frekansta tetiklenen yarı iletken malzemelerin çalışma karakteristiğinden dolayı çok hızlı bir artış göstermiştir. Tanım olarak harmonik, şebeke ana frekansının tam katlarına sahip gerilim veya akım dalgalarının varlığı olarak ifade edilir. Sinüs formundan uzaklaşmış dalga şekilleri harmonikli ve bozulmuş formdadır

Harmonikler, güç elektroniği kullanılan tüm sistemler (doğrultucular, eviriciler, kesintisiz güç kaynakları, kaynak makinaları, bilgisayarlar, yazıcılar vb.), kompakt floresan ve led lambalar, doyuma giden transformatörler, ark ocakları gibi doğrusal olmayan tüm yüklerden dolayı oluşmaktadır. Bu çerçevede elektrikli araçların şarj cihazları da bir harmonik kaynaktır. Hatta şebekeye entegre olacak elektrikli araç yükünün büyüklüğü düşünüldüğünde harmonikler çok daha büyük sorun haline gelecektir.

Bir güç sisteminde harmonik analizi için sinyal işleme ve analizi önemli bir husustur. Bozulmuş bir dalga şekli analiz edildiğinde bu sinyalin saf sinüslerden oluştuğu bilinmektedir. Sinüs formundan uzak bir dalga şeklinin analizi Fourier serisi ile mümkündür. Nitekim Fourier dönüşümü ile saf sinüs olmayan ve periyodik olan bir işaretin genlik ve frekansları farklı (ana frekansın tam katları) sonsuz sayıda sinüs işaretinden oluştuğu görülmüştür. Şebekedeki akım ve gerilimin Fourier serisi ile analizi Eş. 3.2 ve Eş 3.3 ile verilmiştir.

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n^I \cos\frac{n\pi t}{L} + b_n^I \sin\frac{n\pi t}{L} \right) \tag{3.2}$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n^V \cos\frac{n\pi t}{L} + b_n^V \sin\frac{n\pi t}{L} \right) \tag{3.3}$$

Eşitlikler incelendiğinde a_0 DA bileşeni, a_n çift fonksiyon genliğini, b_n tek fonksiyon genliğini ifade etmektedir. Sinyalin çift ve tek kısmını yeniden düzenleyecek olursak Eş. 3.4 elde edilir.

$$f(k) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(c_n \cos\left(\frac{n\pi t}{L} - \theta_n\right)\right) \tag{3.4}$$

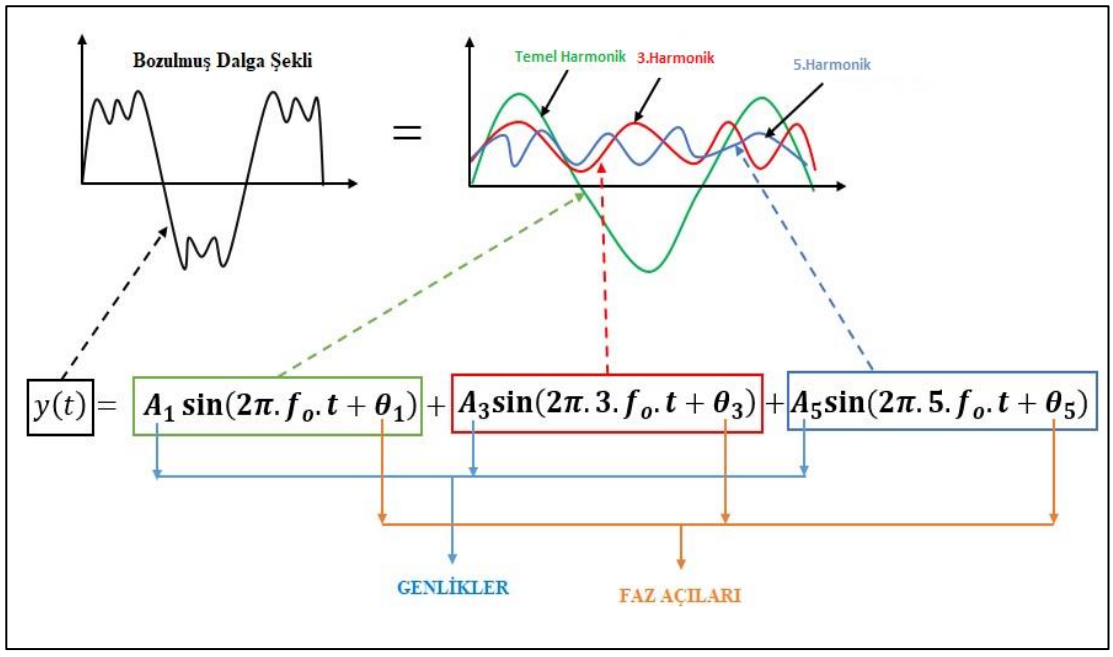
Burada harmoniklerin genliği c_n, DA bileşen c_0, faz açısı ise θ_n olarak ifade edilmektedir. Bu katsayılar Eş. 3.5, Eş. 3.6, Eş. 3.7' de verilmiştir.

$$c_0 = a_0 \tag{3.5}$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{3.6}$$

$$\theta_n = tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \tag{3.7}$$

Şekil 3.6' da dalga şekli bozulmuş bir işaretin harmonikleri ve Fourier analizi detaylı bir şekilde verilmiştir [69]. Bu analizler neticesinde bir sinyalin harmonik spektrumu gösterilebilmektedir. Günümüzde pek çok harmonik analizörü bulunmakta olup hepsi aynı prensiple çalışmaktadır.



Şekil 3.6. Dalga şekli bozulmuş işaretin analizi

Harmonik bozulma seviyeleri, yapılan Fourier analizi sonucu her bir harmonik bilesenin genligini belirten harmonik spektrumu ile açıklanabilir. Sinyaldeki toplam bozulma oranını

belirtmek için ise Toplam Harmonik Bozulma (THB) hesabı yapılır. Bu hesap tüm harmonikleri etkin değerleri üzerinden yapılır. Eş. 3.8 ve Eş. 3.9' de akım ve gerilim için THB' nin hesabı verilmiştir.

$$THBv = \left[\sum_{i=2}^{n} \frac{U_n^2}{U_1^2}\right]^{1/2} = \sqrt{(\frac{V_2}{V_1})^2 + (\frac{V_3}{V_1})^2 + (\frac{V_4}{V_1})^2 + \cdots + (\frac{V_n}{V_1})^2} \quad (3.8)$$

$$THBı = \left[\sum_{i=2}^{n} \frac{I_n^2}{I_1^2}\right]^{1/2} = \sqrt{(\frac{I_2}{I_1})^2 + (\frac{I_3}{I_1})^2 + (\frac{I_4}{I_1})^2 + \cdots + (\frac{I_n}{I_1})^2} \quad (3.9)$$

$THBı$, tüm harmoniklerin etkin değerlerinin ana harmonik etkin değerine göre yüzdesel oranını göstertmektedir. Fakat düşük yüklenme durumlarında temel akım genliği düşük olduğundan THB yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Ancak, böyle bir durumda THB' nin yüksek olması analiz açısından anlamını yitirir. Bu tarz yüklenmelerde harmonikleri daha anlamlı analiz edebilmek için IEEE 519-1992 standardında Toplam Talep Bozulma (TTB) tanımlanmıştır. TTB, sistemin temel frekanstaki tam yük talebine (15-30 dk talep) karşı harmonik akım bozulma oranı olarak tanımlanmaktadır [70]. Yani aslında TTB, akımdaki harmonik bozulmanın sistem üzerindeki etkisini analiz etmek için tanımlanmıştır. Eş. 3.10' da TTB hesabı verilmiştir.

$$TTBı = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} I_n}}{I_L} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \cdots + I_n^2}}{I_L} \quad (3.10)$$

Burada I_L, temel frekanstaki maksimum yük akımını ifade etmektedir. Eş. 3.9 ve Eş. 3.10 incelendiğinde, ancak tam yükte mevcut harmoniklerin THB değerinin TTB değerine eşit olacağı anlaşılmaktadır.

Bununla beraber harmonik analizi için bilinmesi ve hesaplanması gereken bazı değerler vardır. Tepe faktörü (*TF*), K faktörü (*K*), harmonik faktörü (*HF*), şekil faktörü (K_f) ve harmonik bileşenlerin etkin değerleri (V_{nRMS}, I_{nRMS}) bunlardan bazılarıdır. Eş. 3.11, Eş. 3.12, Eş. 3.13, Eş. 3.14 ve Eş. 3.15' da belirtilen parametrelerin hesapları verilmiştir.

$$TF = \frac{V_{max}}{V_{1RMS}} \tag{3.11}$$

Tepe faktörü sinüzoidal olmayan dalgalar için doğrusal olmayan işaretlerin maksimum değeri ile temel bileşenin etkin değerine oranı olarak tanımlanır [71].

$$K = \sum_{n=1}^{n=n_{max}} I_n^2(pu).n^2 \tag{3.12}$$

Burada n, harmonik derecesi, $I_n$ise n. harmonikteki toplam akım etkin değerini ifade etmektedir. Şebekedeki harmonik oluşturan yüklerden dolayı transformatör üzerinden akan yük akımı, harmonik bileşenler içerir. K faktörü, harmoniklerden kaynaklanan transformatördeki ek kayıp ile girdap akımı kaybı arasındaki oran olarak tanımlanır [72]. Özellikle doğrusal olmayan yükleri besleyen ve kapasitesi 500 kVA değerinin altındaki transformatörlerde K-faktörü önemli bir parametredir.

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1}, HF_n = \frac{I_n}{I_1} \tag{3.13}$$

Harmonik faktör, gerilim veya akım dalga şeklindeki n. derecen harmoniğin temel bileşene göre oranını belirlemek için hesaplanan bir parametredir.

$$K_f = \frac{RMS_{tot}}{AVG_{tot}} = \frac{RMS_1 + RMS_2 + \cdots + RMS_n}{AVG_1 + AVG_1 + \cdots + AVG_n} \tag{3.14}$$

Şekil faktörü, n sayıda harmoniğin etkin değerleri toplamının ortalama değerler toplamına oranı olarak hesaplanan bir parametredir.

$$V_{nRMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V_n^2(t)dt},\ I_{nRMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_n^2(t)dt} \tag{3.15}$$

Harmonik bileşenlerin etkin değerleri (V_{nRMS}, I_{nRMS}), birçok ölçüm ve analiz için hesaplanması ve bilinmesi gereken önemli parametrelerdir. Özellikle gerçek güç faktörü hesabında sıklıkla kullanılmaktadır. Reaktif Güç başlıklı bölümde değinilmiştir.

Şebekedeki harmoniklerin varlığı pek çok arızaya sebebiyet verebilmektedir. Örneğin;

- Elektromekanik cihazlarda ve kablolarda ısınmalara,
- Cihazlarda mekanik titreşimlere,
- Elektronik kart arızalarına,
- Elektrik koruma ekipmanlarının (sigorta, röle, ayırıcı, kesici vb) açma-kapamalara,
- Nakil hatlarında gerilim düşümleri ve enerji kayıplarına,
- Transformatörlerin aşırı ısınmasına,
- Elektrik makinalarında vuruntulu çalışma ve ısınmaya,
- Reaktif güç talebi oluşturması sebebiyle enerji hatlarının taşıma kapasitesinin düşmesi (güç faktörünü değiştirmesi),
- Kontrol sistemlerinde arızalara,
- İşlemcilerin çalışma karalılıklarında bozulmalara,
- Şebekede rezonanslara ve bu sebeple büyük arızalara sebep olabilmektedir.

Harmonikler için öneri hükmünde ulusal ve uluslararası bazı standartlar vardır. Bunlardan bazıları, IEEE 519-2014 (Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Kontrol Önerileri ve Uygulama Örnekleri), IEEE 1159-1995 (Elektrik Güç Kalitesinin İzlenmesi için Önerilen Uygulama) ve IEC 61000 Standart serileri başlıklı normlardır.

Elektrikli araç-şebeke perspektifinden değerlendirildiğinde harmonikler çok dikkat edilmesi gereken bir sorundur. Elektrikli araçların şebeke entegrasyonu arttıkça harmonik düzeyleri yükün büyüklüğü dikkate alındığında ciddi oranda zarar verici seviyelere ulaşacaktır. Bu sebeple harmoniklerle ilgili öneri niteliğinde değil yaptırım uygulayacak normların oluşturulması gerekmektedir. Harmonikler için alınabilecek önlemler Güç Kalitesi için Alınacak Önlemler başlıklı bölümde daha detaylı anlatılmıştır.

Ara harmonikler

Temel şebeke frekansının tam katında olmayan harmonik (50 Hz temel frekans için: 153, 186, 204 Hz gibi) bileşenler içeren kararlı durumdaki akım ve gerilim sinyalleri ara harmonikli olarak nitelendirilir. Frekansın tam katları olan harmoniklerin oluşma sebepleri ile neredeyse aynıdır. Ara harmonikte en önemli tehlike değişken frekansta olduğundan şebeke frekansı ile rezonansa girmesi durumunda oluşabilecek hasarlardır.

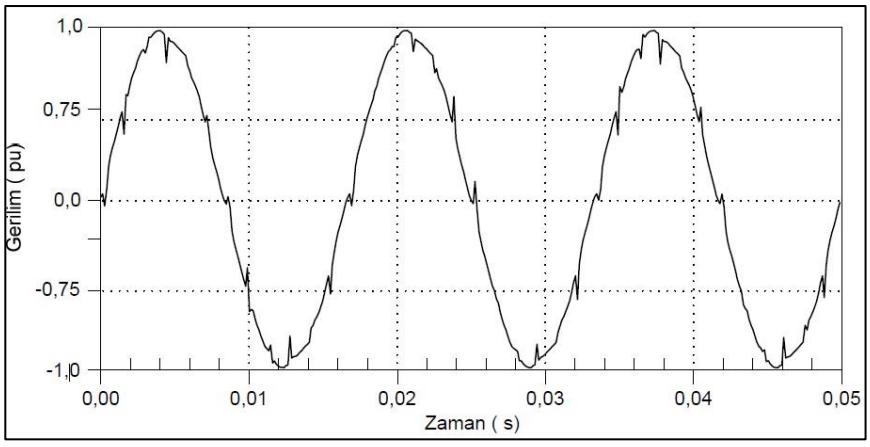
Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu perspektifinden bakıldığında yine tam katlı harmonikler ile aynı tehdide sahip olacaktır. Tam katlı harmonikler için alınacak önlemler ile aynı koruma tertibatı kullanılarak tedbir alınabilir. Ara harmonikler için en kesin çözüm kullanılacak aktif filtreler olacaktır.

Çentikler

Gerilim ve akımdaki çentik etkileri, dalga şeklindeki kararlı ve ani değişimler olup güç kalitesi problemlerinde önemli yer tutmaktadır. Çentikler her ne kadar harmonik olarak algılansa da çok ani ve yüksek frekanslı değişimler olduğu için güç kalitesi problemlerinde özel bir sorun olarak ele alınır.

Güç elektroniğinde üç fazlı kontrollü doğrultucularda tetiklemeler komutasyon noktaları referans alınarak yapılır. Bu bağlamda tetikleme komutasyon noktasına çok yakın ise ani sürekli çökmeler meydana gelmektedir. Bununla beraber üç fazlı kontrolsüz doğrultucularda da komutasyon geçişlerinde bu tarz ani ve kısa süreli çöküntüler meydana gelebilmektedir. Çentikler genellikle bu sebeplerle meydana gelmektedir.

Çentikler, şebeke geriliminde bozulmalara, şebekeye bağlı cihazlarda ısınma ve gürültülü çalışmalara, ömürlerinin kısalmalarına, kontrol sistemlerinde, yük kontrolü vb. yerlerde çalışma bozukluklarına, koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hatalarına, sesli, görüntülü iletişim araçlarında ve mikroişlemcilerde parazit ve anormal çalışmalara sebebiyet vermektedir [73]. Şekil 3.7' de çentik oluşmuş bir dalga şekli verilmiştir [65].



Şekil 3.7. Gerilim çentiği olayının dalga sekli

Harmonikler için uygulanan analiz yöntemleri çentiklerin analizinde yetersiz kalabilmektedir. Farklı frekans bantlarında oluşabilen çentikler özellikle yüksek frekanslarda olduğunda Fourier dönüşümü yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple çentiklerin analizinde çoğunlukla dalgacık dönüşümü kullanılmaktadır. Bu dönüşümün en önemli özelliği, sinyalin yerel olarak analizinin yapılabilmesidir. Tekniğin bu özelliği ile büyük bir sinyal küçük bir alanda analiz edilebilmektedir. Bu analiz metodu sinyalin, zaman ölçek alanında analiz edilmesine olanak tanır ve böylece hem uzun zaman aralığında alçak frekans bilgisi, hem de kısa zaman aralığında yüksek frekans bilgisi tanımlanır [74]. Eş. 3.16' de sürekli dalgacık dönüşümünün formülü verilmiştir.

$$W(a,b) = -\frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{3.16}$$

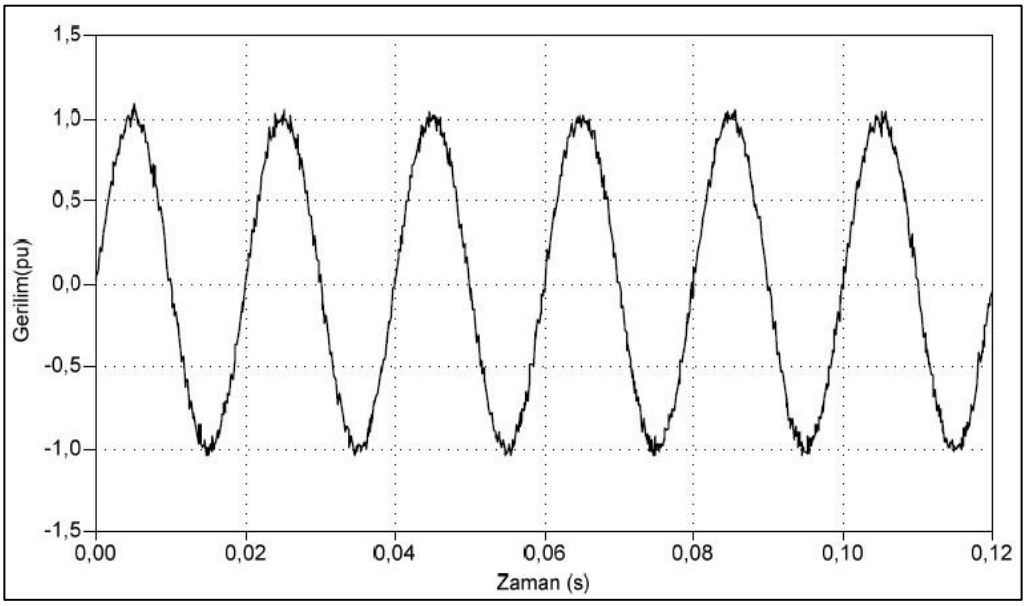
Burada x(t) işaretin kendisi, ψ(t) dalgacık fonksiyonu, b öteleme parametresidir. Öteleme (b) parametresi farklı frekans seviyelerinde ayrışım filtreleri sağlarken a ise ölçekleme (frekans) parametresidir ve her seviye için bu filtreleri ölçeklendirir.

Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu açısından değerlendirdiğinde çentik kalite problemi de çok sık karşılaşılacak problemlerden biridir ve özel karşı donanımsal önlemler alınması gerekmektedir.

Gürültü

Gürültü, geniş bant spektrumuna sahip ve 200 kHz den düşük dalgalı işaretlerin gerilim veya akım dalga şekline binmiş sinyallerdir. Güç hattı içerisinde gerilimden, faz akımlarından, nötr iletkenlerin veya sinyal kablolarından kaynaklı oluşabilirler.

Enerji hatlarında gürültü; güç elektroniği cihazları, kontrol devreleri, ark cihazları, doğrusal olmayan yükler ve güç kaynaklarının anahtarlaması sebebiyle oluşurlar. Gürültü problemleri genelde yanlış topraklama yüzünden çoğalır. Gürültü; mikro elektronik cihazları ve otomasyon cihazları gibi elektronik cihazları etkiler [75]. Şekil 3.8' de gürültülü bir sinyalin görüntüsü verilmiştir [65].



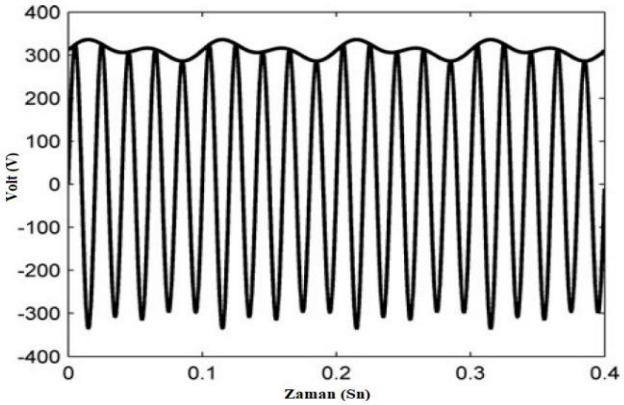
Şekil 3.8. Gerilim işareti üzerine binmiş bir gürültü

3.2.6. Gerilim dalgalanmaları

Yük değişimi çok hızlı olan sistemler veya cihazların şebekede oluşturduğu dalgalanma sebebiyle ortaya çıkan ve temel frekansın altında salınımlar olduğundan aydınlatma sistemlerinde ışık şiddeti değişimlerine sebep olduğu için kırpışma olarak da adlandırılan güç kalitesi problemidir.

Kırpışma olayında voltajın genlik modülasyon frekansı 0.5-35 Hz arasında değişmektedir [76]. Bununla birlikte lamba-göz-beyin zinciri, yaklaşık 2-15 Hz arasında değişen frekanslara sahip voltaj dalgalanmalarına karşı hassastır [77]. Gerilim nominal genliğinin ±%10 seviyesi aşıldığında kırpışma rahatsız edici seviyelere ulaşmaktadır [78]. Oluşan kırpışmanın dalga biçimine göre (sinüzoidal, dikdörtgen vb) sınıflandırılan pek çok çeşidi vardır. Şekil 3.9’ de sinüzoidal bir kırpışma dalga şekli verilmiştir [78]. Dalga şekli incelendiğinde kırpışmanın temel frekanstan daha düşük olduğu görülmektedir.

Gerilim dalgalanmaları, trafo kademe değiştiricilerinin çalışması, ark ocakları, kaynak makinaları gibi hızlı yük değişimine sebep olan cihaz veya sistemlerden kaynaklanır. Aydınlatma sistemlerinde, manyetik nüve içeriğine sahip tüm elektrik makinalarında kararsız çalışmalara veya arızalara sebep olabilir.

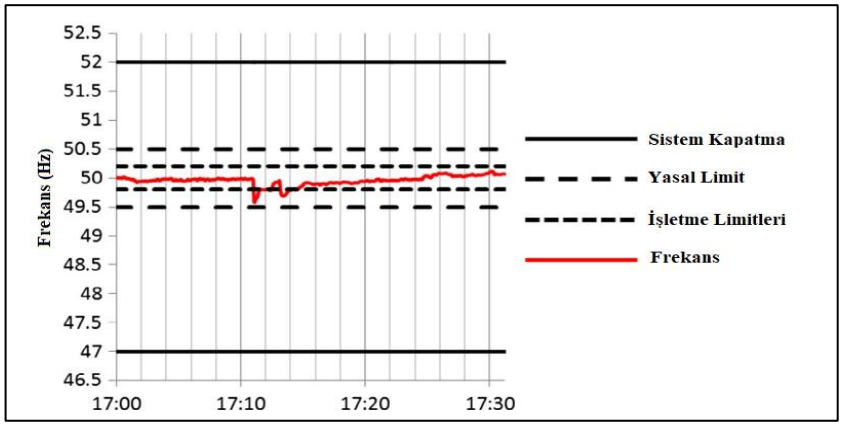


Şekil 3.9. Sinüzoidal gerilim dalgalanması

Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu perspektifinden bakıldığında özellikle yüksek hızlı şarj istasyonlarında şarj başlama ve bitiminde bu tarz güç kalitesi problemleri ortaya çıkabilir. Kırpışmalar için regülatör veya özel filtre tasarımları ile önlem alınabilir.

3.2.7. Güç frekansı değişimleri

Elektrik şebekesinde güç akışı, arz-talep dengesi içerisinde gerçekleşmektedir. Bu bağlamda şebekede meydana gelebilecek büyük ölçekli güç talebi veya arzı durumunda şebeke frekansında sapmalar meydana gelmektedir. Gerçekleşen bu tarz sapmalar bir güç kalitesi problemidir. Ulusal ve uluslararası normlara göre enerji arz güvenliğinin sağlanabilmesi için yasal limitler konulmuştur. Örneğin Büyük Britanya' da güç sistemi için yasal ve operasyonel sınırlar Şekil 3.10' da gösterilmiştir [79].



Şekil 3.10. Büyük Britanya güç sistemi frekans limitleri

Bu bağlamda ülkemizde elektrik şebekesindeki frekans limitleri Elektrik Şebeke Yönetmeliğinin 63. Maddesinde

- Hedeflenen işletme koşulları: 49,8 Hz -50,2 Hz
- Kabul edilebilir işletme koşulları: 49,5 Hz - 50,5 Hz
- Kritik işletme koşulları: 47,5Hz - 52,5Hz
- Kararsız işletme koşulları: $f < 47,5$ Hz ve $52,5$ Hz $< f$ şeklinde düzenlenmiştir [80].

Ülkemizde 31 Mart 2015 tarihinde meydana gelen sistem çökmesi de benzer bir dalgalanma sebebiyle gerçekleşmiş ve yaklaşık 9 saat boyunca elektrik kesintisi yaşanmıştı. Doğu-batı hattındaki faz açısı uyumsuzluğu sebebiyle doğu hattında arz fazlalığı sebebiyle frekans yükselmesi, batı hattında ise talep fazlası sebebiyle frekans çökmesi gerçekleşmiştir. Dolayısıyla elektrik şebekesinde büyük yüklenme veya yük kayıplarında frekans kararsızlığı meydana gelebilmektedir.

Güç frekansı değişimi durumlarına karşı yeterli kapasiteye sahip altyapının (üretim-iletim-dağıtım) olması, akıllı şebeke kontrol sisteminin tam otonom olması, talep edilen yük miktarına göre yeterince enerji kaynağının var olması kritik önem arz etmektedir. Bu çerçevede ülkemizde ve dünyada hızla yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) enerji arzı konusunda pay sahibi olmaya başlamıştır. Fakat YEK' lerin enerji üretim kapasiteleri hava durumu, güneşin durumu gibi dış faktörlerden kaynaklı tahmin edilebilir olmadığından yine arz-talep dengesinde kararsızlıklara yol açma ihtimali bulunmaktadır.

Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu perspektifinden bakıldığında elektrikli araç yükünün ne denli büyük olduğu göz önüne alınırsa frekans değişimleri büyük problem oluşturacaktır. Bu sorun üretim-iletim-dağıtım olarak ayrı ayrı değerlendirilmelidir. TÜİK verilerine göre hali hazırda yaklaşık 26 milyon araç olduğu ve tamamının elektrikli olması durumu düşünüldüğünde yeni enerji kaynaklarının şebekeye entegre edilmesi gereklilik arz etmektedir. Tüm dünya ülkelerinin ulaşımda hızla elektrikli araçlara geçişi ile her ülkenin enerji arzında sorunlar yaşayacağı dikkate alınırsa ülkemiz adına ek enerji ithal edilebilmesi de pek mümkün görünmemektedir. İletim ve dağıtım altyapılarının da bu yeni ek yükü karşılayabilecek nitelikte revize edilmesi veya desteklenmesi gerekmektedir. Bununla beraber tüm bu tedbirlerin alınması durumunda dahi ani yüklenme veya yükten alma durumları özellikle yüksek hızlı şarj istasyonlarında gerçekleşecektir. Bu durumda

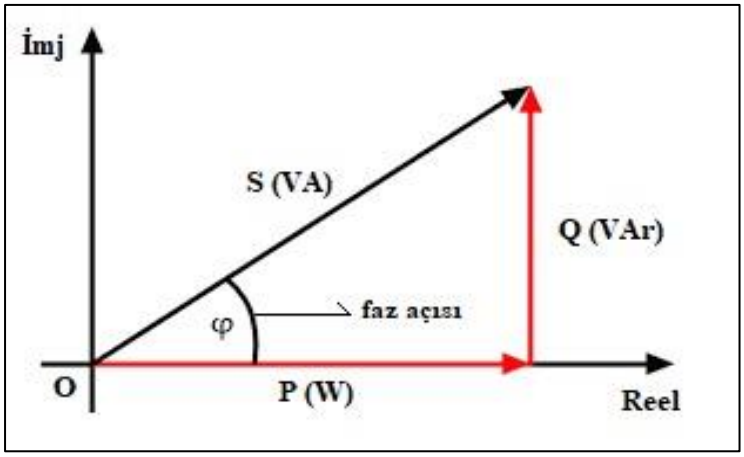
büyük ölçekli olmasa da şebekede frekans değişimlerine sebebiyet verecektir. Araştırmacıların son yıllardaki çalışmaları incelendiğinde kısmi şebeke bağlantılı yeni şarj istasyonu mimarileri önerilmektedir. Örneğin enerji yoğunluğu yüksek süperkapasitörlerden oluşan depolama ünitelerinin yer aldığı ve şebekeye büyük yüklenmeleri yumuşatacak ayrıca daha hızlı şarjı destekleyecek altyapılar alternatif olarak önerilmektedir.

3.2.8. Reaktif güç

IEEE-1159 standardına göre doğrudan bir güç kalitesi problemi olarak tanımlanmasa da şebekedeki varlığı sebebiyle dolaylı olarak kalite problemlerine sebep olduğu için reaktif güç önemli bir sorun olarak öne çıkıyor. Reaktif güç, iletim hatlarında kayıpların artmasına, iletim kapasitesinin azalmasına ve gerilim genliğinde yüksek oranlarda değişimlere sebep olur. Anlaşılacağı üzere reaktif güç varlığı gerilim genliğinde değişimlere sebep olduğu için gerilim dalgalanması veya voltaj dengesizliği gibi kalite problemlerine sebep olmaktadır. Bu durum diğer cihaz veya sistemlere sorun oluşturabilir. İletim kapasitesinin azalması ve kayıpların artması kullanıcılar açısından bir kalite problemi olmasa da iletim-dağıtım hatları için büyük kalite problemi olarak ortaya çıkmaktadır.

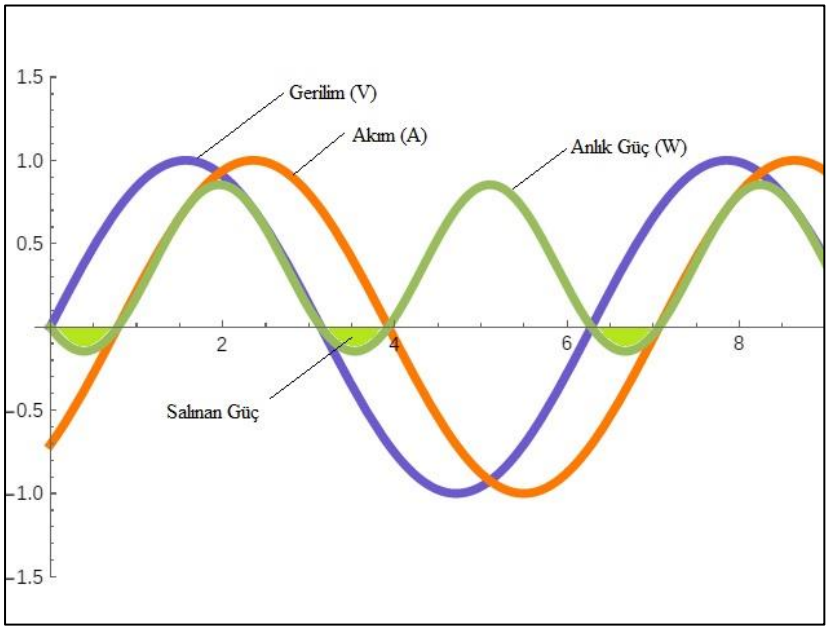
Reaktif güç, AA şebekede kullanılan cihazların içerisinde yer alan endüktif veya kapasitif karakteristikteki yüklerin varlığından kaynaklı meydana gelir. Bu güç aktif olarak harcanmaz ve şebekede ileri geri salınımlar yapar. Bu sebeple aktif olarak tüketilmeyen ve hattın kapasitesini düşüren, kayıpları arttıran, gerilim değişimlerine sebep olan salınan bir güç olarak tanımlayabiliriz.

Yükün karakteristiğine göre şebekeden aktif ve reaktif bileşenli iki güç talep edilir. Bu iki vektörün bileşkesi ise görünür güç olarak tanımlanır. Aktif ve reaktif güç bileşenleri birbirine dik 90^{o} faz farkına sahiptir. Şekil 3.11’ de görünür güç, reaktif güç ve aktif güç bileşenlerinin vektörel gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.11. Görünür-aktif-reaktif güç bileşenleri

Reaktif güç kapasitif veya endüktif karakterli yüklerin akımı, gerilim dalga şekline göre ileri veya geri çekmesi ile meydana gelir. Akım ve gerilim arasında oluşan fark faz açısını (φ) ifade eder. Faz açısının kosinüs değeri ise güç faktörü olarak adlandırılır. Reaktif güç bileşeni olmayan sistemde akımla gerilim arasında faz farkı yoktur. Endüktif karakterli bir sistemde akım gerilimden 90^o geridedir, kapasitif bir sistemde ise akım gerilimden 90^o ileridedir. Şekil 3.12' de endüktif karakterli bir yükün akım gerilim ve anlık güç için dalga şekilleri verilmiştir. Anlık güç dalga formu incelendiğinde yeşil taralı alan salınan gücün değişimini ifade eder.



Şekil 3.12. Endüktif karakterli bir yükün akım-gerilim dalga formu

Şebekedeki akım ve gerilimin temel harmonik için etkin değerleri Eş.3.17 ve Eş.3.18 formülleriyle verilmiştir.

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V^2(t)dt} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707.V_{max} \quad (3.17)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707.I_{max} \quad (3.18)$$

Harmoniksiz gerilim ve akımın etkin değerleri ile aktif güç, reaktif güç ve görünür güç değerleri Eş.3.19, Eş.3.20 ve Eş.3.21 denklemleriyle elde edilir.

$$P = S.Cos\,\varphi = V_e.I_e.Cos\,\varphi \quad (Watt) \quad (3.19)$$

$$Q = S.Sin\,\varphi = V_e.I_e.Sin\,\varphi \quad (VAr) \quad (3.20)$$

$$S = V_e.I_e = P + jQ \quad (VA) \quad (3.21)$$

Yukarıda verilen eşitlikler harmoniksiz saf sinüzoidal karakterdeki akım ve gerilim için geçerlidir. Fakat gerçek hayatta böyle bir durum çok mümkün değildir. Bazı durumlarda şebeke geriliminden veya bazı durumlarda lineer olmayan yüklerde akımından kaynaklı harmonik bileşenler mevcuttur. Bu durumda aktif ve reaktif gücün yanında distorsiyon gücü ortaya çıkmaktadır. Harmonikli durumlar için aktif, reaktif ve görünür gücün formülleri Eş.3.22, Eş.3.23 ve Eş.3.24' da verilişitir.

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} V_k I_k cos\varphi_k \quad [W] \quad (3.22)$$

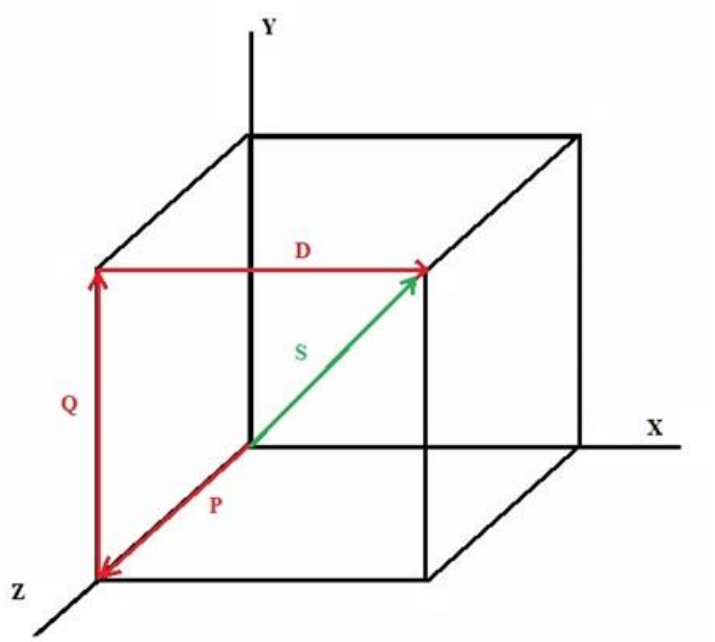
$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} V_k I_k sin\varphi_k \quad [VAr] \quad (3.23)$$

$$S = V.I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} V_k} \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k} \quad [VA] \tag{3.24}$$

Söz konusu eşitlikler incelendiğinde sinüzoidal olmayan sinyaller için $S^2 > P^2 + Q^2$ eşitsizliği ortaya çıkmaktadır. Burada farklı harmoniklerdeki akım ve gerilim işaretlerinden kaynaklanan güç distorsiyon gücü olarak tanımlanır. Eş.3.25' da distorsiyon gücünün eşitliği verilmiştir [81].

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{\sum_{J \neq k}^{\infty} [V_k^2 I_j^2 + V_j^2 I_k^2 - 2V_k I_k V_j I_j \cos(\varphi_k - \varphi_j)]} \quad [VA] \tag{3.25}$$

Yeni eşitliklere göre distorsiyon gücü ile reaktif gücün geometrik toplamları aktif olmayan gücü ($P_f = \sqrt{D^2 + Q^2}$) verir [81]. Söz konusu güç bileşenlerinin 3 boyutlu grafik gösterimi Şekil 3.13' de verilmiştir.



Şekil 3.13. Güç bileşenlerinin 3 boyutlu vektörel gösterimi

Bu durumda yeni güç faktörü eşitliği Eş.3.26 verilmiştir.

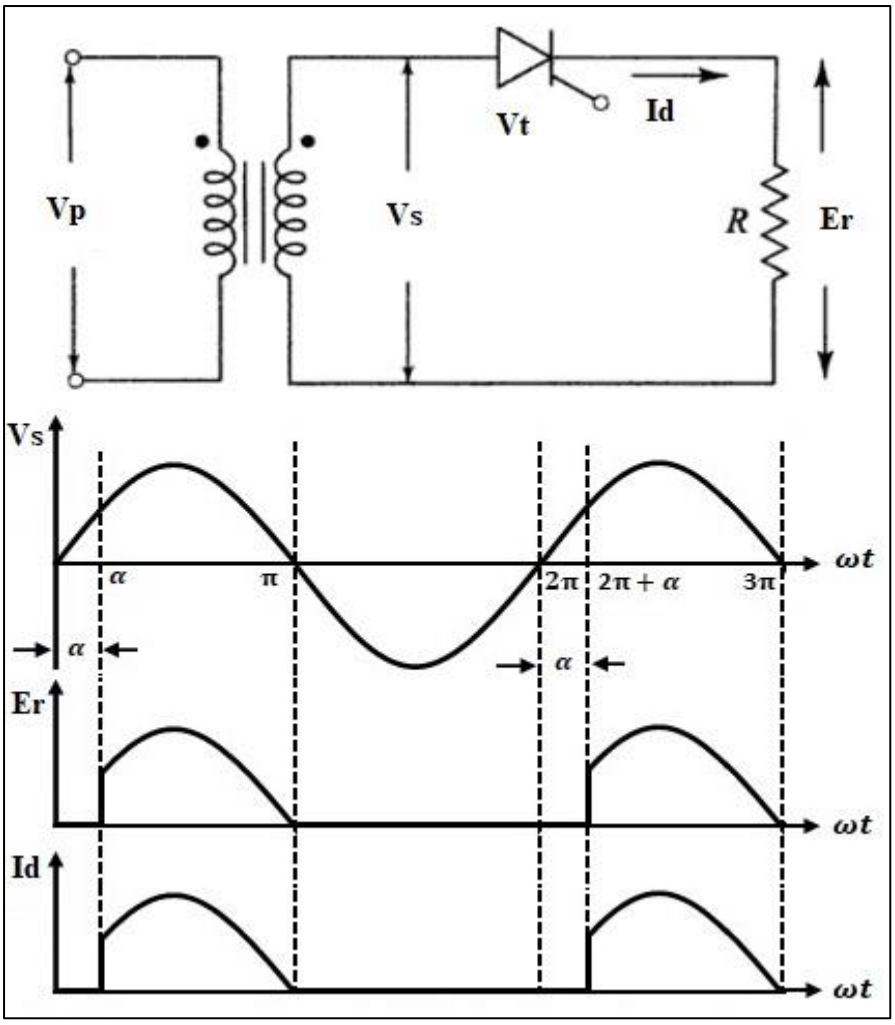
$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} V_k I_k cos\varphi_k}{\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty}(V_k)^2}\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty}(I_k)^2}} \tag{3.26}$$

Toplam harmonik distorsiyonu ile harmonikli devrelerde güç faktörü ifadesini Eş.3.27 ile tanımlayabiliriz [82].

$$PF = \frac{P}{V.I} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (\frac{THD_V}{100})^2}\sqrt{1 + (\frac{THD_I}{100})^2}} \tag{3.27}$$

Elektrikli araç-şebeke entegrasyonu perspektifinden bakıldığında şarj istasyonlarındaki çevirici sistemlerinden kaynaklı çok büyük bir reaktif güç oluşacağı aşikardır. Meydana gelecek bu reaktif güç, yükün karakterinden bağımsız olarak tamamen yük gerilim ve akımının sinüzoidal yapısının bozulmasından kaynaklanacaktır.

Bu durumu en basit haliyle tek faz yarım dalga kontrollü bir çevirici devresinin rezistif bir yükü beslerken akım ve gerilimin dalga şeklinin inceleyerek tanımlayalım. Çevirici devresinin şebeke tarafında gerilim dalga şekli sinüzoidal yapısını koruyacaktır. Bu çevirici devresinde yükün üzerindeki gerilimin ortalama değerini değiştirmek için tetikleme açısını ($t = \alpha$) kontrol etmek gerekmektedir. Bu tetikleme ile yük üzerindeki akım ve gerilim dalga şekli sinüzoidal yapısını kaybeder. Dolayısıyla şebeke tarafında gerilim dalga şekli sinüs formunu korurken akım dalga şekli sinüs formundan uzaklaşmıştır. Yani bu sistem şebekeden harmonikli akım çekmektedir. Bu durumda harmonikli olan akım dalga şekli analiz edilirse oluşan harmoniklerin faz açılarının değiştiği anlaşılacaktır. Nitekim Eş.2.28 incelendiğinde harmonikli bir yük varsa reaktif güç varlığı söz konusudur. Şekil 3.14’ de tek faz yarım dalga kontrollü bir çevirici devresi ile akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.14.Tek faz yarım dalga kontrollü çevirici ile akım-gerilim dalga şekilleri

Dalga şekilleri incelendiğinde yük akımının (Id) harmonikli olduğu ve temel bileşen ile diğer harmoniklerin gerilim sinyalinden geride olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla yükün rezistif karakterli olmasına rağmen şebekeden endüktüf reaktif güç çekilmiş oldu. Bu bağlamda yükü çevirici ile birlikte beslenen sistemin tamamı olarak değerlendirmek gerekir. Bu durumda güç faktörü Eş.3.28' de verildiği şekilde hesaplanır.

$$PF = \frac{Er_{rms}.Id_{rms}}{Vs_{rsm}.Id_{rms}} = \frac{Er_{rms}}{Vs_{rsm}} \tag{3.28}$$

Er_{rms} ise yük gerilim dalga şeklinin efektif değeridir. Bu değerin hesabı ise Eş.3.29' da verilmiştir.

$$Er_{rms} = \frac{Vs_{rsm}\sqrt{2}}{2}\sqrt{\frac{1}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{1}{2}sin2\alpha)} \quad (3.29)$$

Eş.3.28 ve Eş.3.29 denklemlerinden yola çıkarak tek faz yarım dalga kontrollü çevirici için güç faktörü Eş.3.30' de olduğu gibi hesaplanır.

$$PF = \sqrt{\frac{1}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{1}{2}sin2\alpha)} \quad (3.30)$$

Elektrikli araç istasyonu alt sistemlerinde çoğunlukla hızlı şarj için 3 faz tam dalga kontrollü, şebeke şarjı için tek faz tam dalga kontrollü çevirici kullanılmaktadır. Yani harmonik değeri daha çok ve reaktif bileşeni daha yüksek olacaktır. Sonuç olarak elektrikli araçların şarjı esnasında şebekeden reaktif güç talebi oluşacak ve bu durum içinde gerekli önlemler alınmalıdır. Reaktif güç için alınabilecek donanımsal ve yazılımsal önlemler Elektrikli Araç Şebeke Entegrasyonu ile Oluşan Güç Kalitesi Problemlerine Karşı Alınabilecek Önlemler bölümünde detaylı şekilde anlatılmıştır.

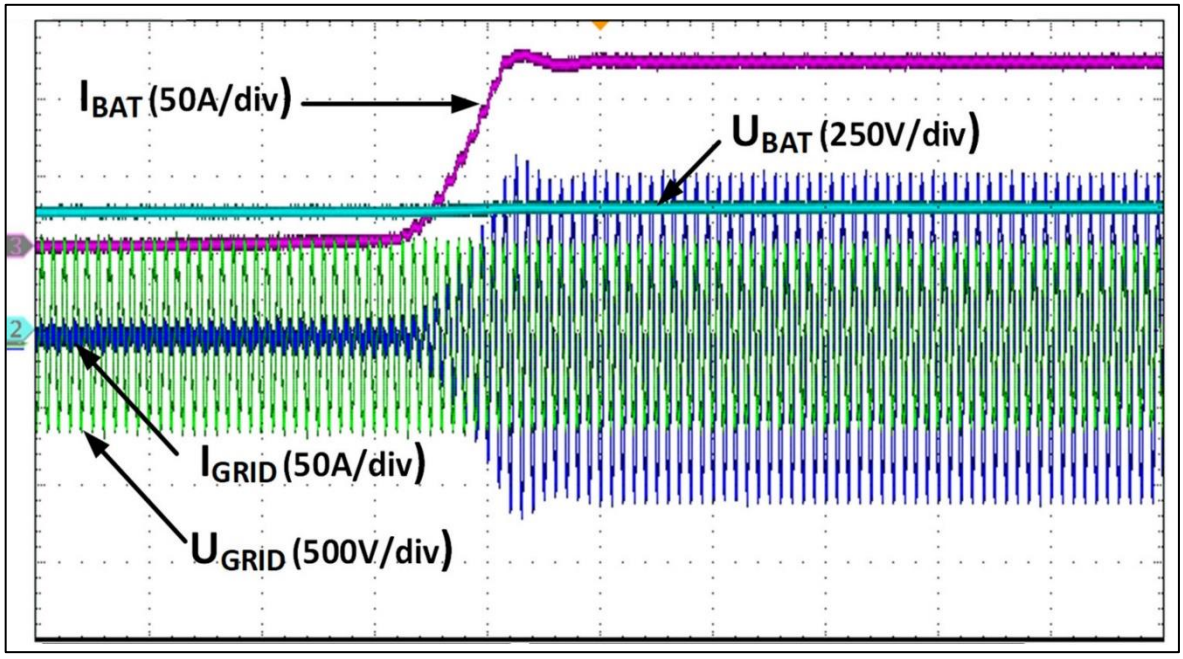
3.3. Elektrikli Araç-Şebeke Entegrasyonu ile Oluşan Güç Kalitesi Problemlerine Karşı Alınabilecek Önlemler

Elektrikli araçların şebekeye entegre olma anları şarj edildiği durumlardır. Bu bağlamda araçların şarja başlaması, şarj süreci veya sonlanması anlarında şebekede meydana getirebileceği zararlar çerçevesinde güç kalitesi problemleri ve alınabilecek önlemler değerlendirilmelidir. Nitekim bu bölümde karşılaşılması muhtemel problemlere karşı alınabilecek önlemler başlama-bitiş ve şarj süreci periyodu şeklinde kategorize edilmiştir.

3.3.1. Şarja başlama-bitiş periyodu

Elektrikli araçların gerek şebekeden gerekse hızlı şarj istasyonundan şarja başlama veya bitiş anında gücün aniden artması veya azalması durumlarında şebeke tarafı akım ve gerilim dalga şekillerinde bazı değişimler meydana gelir. Başlama ve bitiş anlarında yukarıda tarif edilen güç kalitesi problemlerinden kısa süreli gerilim düşümü-yükselmesi

veya gerilim dalgalanması meydana gelebilir. Özellikle yüksek hızlı şarj istasyonlarında bu durumlar daha belirgin yaşanabilir. [83]' de yapılan çalışmada elektrikli araç için tasarlanmış AA/DA/DA modülünde yumuşak modülasyon tekniği kullanılsa da akımda kısa süreli dalgalanma meydana gelmiş buna bağlı gerilimde de küçük dalgalanmalar oluşmuştur. Şekil 3.15' de [83]' de yapılan çalışmada nominal gücün %5' den %80' e çıkması durumunda dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.15. AA/DA/DA modülünde nominal yükün %5' den %80' e çıkması durumu [83]

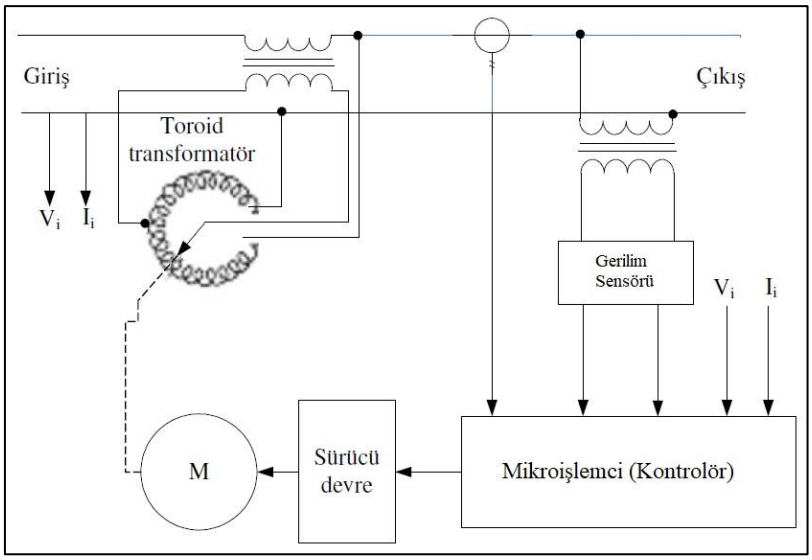
Çalışma sonucu incelendiğinde tasarlanan şarj modülünde gerekli tasarımsal önlemler alınsa da kısa süreli dalgalanma meydana gelmiştir. Tasarlanan modülün 50 kW gücünde olduğu, yeni nesil şarj ünitelerinin 350 kW değerlere ulaştığı ve şarj istasyonunda bu modüllerden çok sayıda olacağı dikkate alındığında çok daha büyük boyutlarda olacaktır.

Şarja başlama-bitiş periyodunda meydana gelebilecek diğer güç kalitesi problemi olan salınımlı geçici durumlar için alınabilecek en kesin çözüm yüksek frekans cevabına sahip aktif filtrelerdir. Bununla beraber oluşması muhtemel salınım frekansı için özel filtre tasarımları da çözüm olabilir. Aktif filtreler şarj süreci periyodu bölümünde detaylı anlatılacaktır.

Başlama-bitiş anlarında meydana gelebilecek gerilim düşümü-yükselmesi ve gerilim dalgalanması sorunlarına karşı alınabilecek önlemleri 3 farklı perspektiften değerlendirmek daha doğru olacaktır. Bunları şarj modülleri, OG/AG trafo noktaları ve YG/OG şebekesi olarak sınıflandırabiliriz.

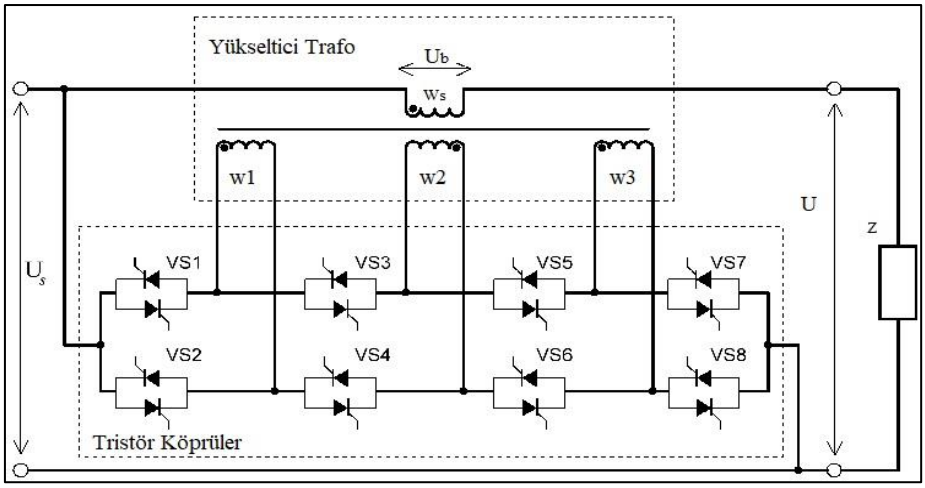
İlk olarak şarj istasyonlarındaki modüllerin dalgalanmaları azaltıcı nitelikte tasarlanması (örneğin yumuşak modülasyon vb.) gerekmektedir. Nitekim bu konuda araç şarj modüllerine özel olarak ulusal ve uluslararası kısıtlayıcı standartların getirilmesi önemlilik arz etmektedir.

Şebekede meydana gelebilecek gerilim dalgalanmalarına karşı diğer yükleri koruma için OG/AG trafo noktalarında regülatörler kullanılabilir. Trafo regülatörlerin en bilinen 2 tipi bulunmakta olup bunlar mikroişlemci kontrollü servo regülatör ve statik regülatörlerdir. Mikroişlemci kontrollü servo regülatör gerilim algılama ünitesi, işlemci (kontrolör), sürücü devre, motor ve varyaktan oluşmaktadır. Şekil 3.16' da mikroişlemci kontrollü servo regülatör iç yapısı verilmiştir [84].



Şekil 3.16. Mikroişlemci kontrollü servo regülatör iç yapısı [84]

Statik regülatörler ise hiçbir hareketli mekanik parça içermeyen ve tamamen yarıiletken teknolojisi kullanılarak tasarlanan sistemlerdir. Yarıiletken olarak çoğunlukla tristör veya IGBT malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 3.17' de Statik regülatör devre mimarisi verilmiştir [85].



Şekil 3.17. Statik regülatör devre mimarisi [85]

Son olarak kısa süreli gerilim dalgalanma-düşme-yükselme problemlerine karşı YG/OG şebekelerinde alınabilecek önlemler ise çoğunlukla Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) cihazlardır. FACTS cihazlarını, geleneksel tristör tabanlı ve senkron gerilim kaynağı prensibindeki çevirici tabanlı sistemler olarak ayırmak mümkündür. Tristör tabanlı kontrolörlerin anahtarlama ve kontrol düzenleri tristörler kullanılarak dizayn edilirken, senkron gerilim kaynağı prensibine göre çalışan anahtarlamalı çeviriciler GTO, IGBT gibi yarı iletken malzemeler kullanılır. FACTS cihazları kısa süreli gerilim düşümü-yükselmesi ve gerilim dalgalanması gibi problemlere karşı çözüm olmanın yanında reaktif güç kompanzasyonu, güç akışı gibi diğer parametreleri de kontrol edebildiği için bu sistemler şarj süreci periyodu bölümünde detaylı şekilde anlatılmıştır.

3.3.2. Şarj süreci periyodu

Elektrikli araçların şarj süreci boyunca şebekede birçok güç kalitesi problemi meydana gelmektedir. Şarj sürecinde, yükün büyüklüğüne de bağlı olarak uzun süreli gerilim düşmeleri, tek fazlı şarj durumunda voltaj dengesizliği ve gerilim dalgalanmaları meydana gelecektir. Bu tarz sorunlara karşı alınabilecek önlemleri şarja başlama-bitiş periyodu bölümünde anlatılmıştır. Problem içerikleri aynı olduğu için yine aynı önlemler ile çözüm sağlanabilmektedir. Burada karşılaşılacak en ciddi sorunlar dalga biçim bozulmaları, frekans kararsızlıkları ve reaktif güçtür. Bu bölümde bu güç kalitesi problemine karşı alınabilecek donanımsal, yazılımsal veya tasarımsal olarak alınabilecek önlemler tarif edilecektir.

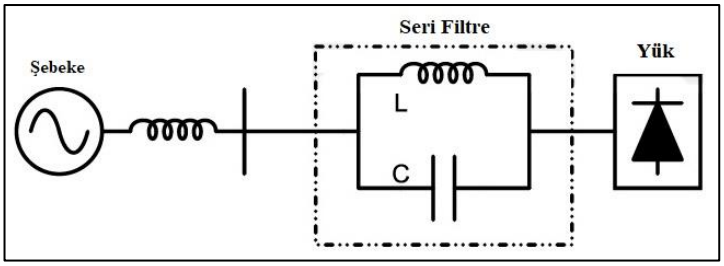
Dalga biçim bozulmalarına karşı alınabilecek önlemler

DA bileşen olarak karşımıza çıkan güç kalitesi problemi şarj esnasında asimetrik arızaların meydana gelmesiyle oluşabilecek bir arıza türüdür. Bu bağlamda DA bileşen sorununa karşı şarj modüllerinde veya istasyon için de alınacak işletme tedbirleri ve koruma önlemleri bu soruna karşı alınabilecek en kritik önlemdir. Çentikler, gürültü ve harmonik sorunlarına karşı alınabilecek önlemler bu bölümde anlatılmıştır.

Şarj istasyonlarının içeriğinde güç elektroniği sistemleri olması ve dalganın sinüs formunu bozarak çalışması sebebiyle özellikle filtre sistemleri üzerinde durulmuştur. Yükün karakteristiğine göre oluşan harmonikli akımların veya gerilimlerin bastırılması için tasarlanan devreler harmonik filtreler olarak tanımlanır. Harmonik filtreler, aktif ve pasif filtre olarak sınıflandırılır.

Pasif filtre: Yok edilmek istenen harmonik frekansına göre endüktans, direnç ve kondansatörler kullanılarak farklı tasarım modelleri ile dizayn edilen geleneksel düzeneklerdir. Elimine edilmek istenen harmonikli akıma rezonans oluşturmak için harmonik frekansa göre tasarlanmış hat üzerinde düşük empedans oluşturularak yok etme prensibi ile çalışır. Genellikle yok edilmek istenen her harmonik için ayrı bir kol tasarımı yapılmalıdır. Seri ve paralel pasif filtre olarak iki çeşidi bulunmaktadır.

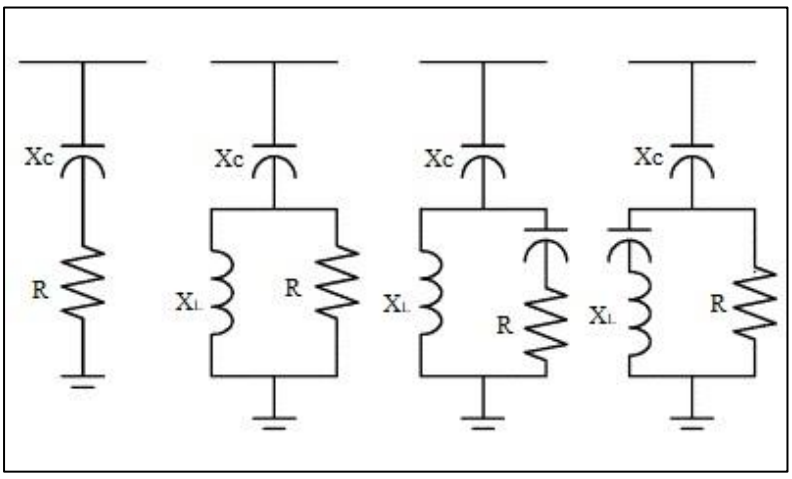
Seri pasif filtre: Yüke seri olarak bağlanan ve istenmeyen harmonik için yüksek temel frekans için ise düşük empedans oluşturacak şekilde tasarlanırlar. Bu filtreler aynı zamanda yük akımına dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu durum paralel filtrelere göre dezavantaj oluşturmaktadır. Genellikle en büyük genlikteki harmonik bileşene göre hesaplamalar yapılır. Şekil 3.18’ de seri pasif filtre devre modeli verilmiştir [84].



Şekil 3.18. Seri pasif filtre devre modeli [86]

Paralel pasif filtre: Yüke paralel olarak bağlanan ve istenmeyen her hamonik için ayrı ayrı tasarlanabilen fitre tipidir. Daha önce tarif edildiği gibi rezonans ile düşük empedans oluşturarak harmonikli akımları elimine etme prensibi ile çalışırlar. Paralel pasif filtreler ayarlı, ayarsız veya kısmi ayarlı fitreler olarak sınıflandırılabilir.

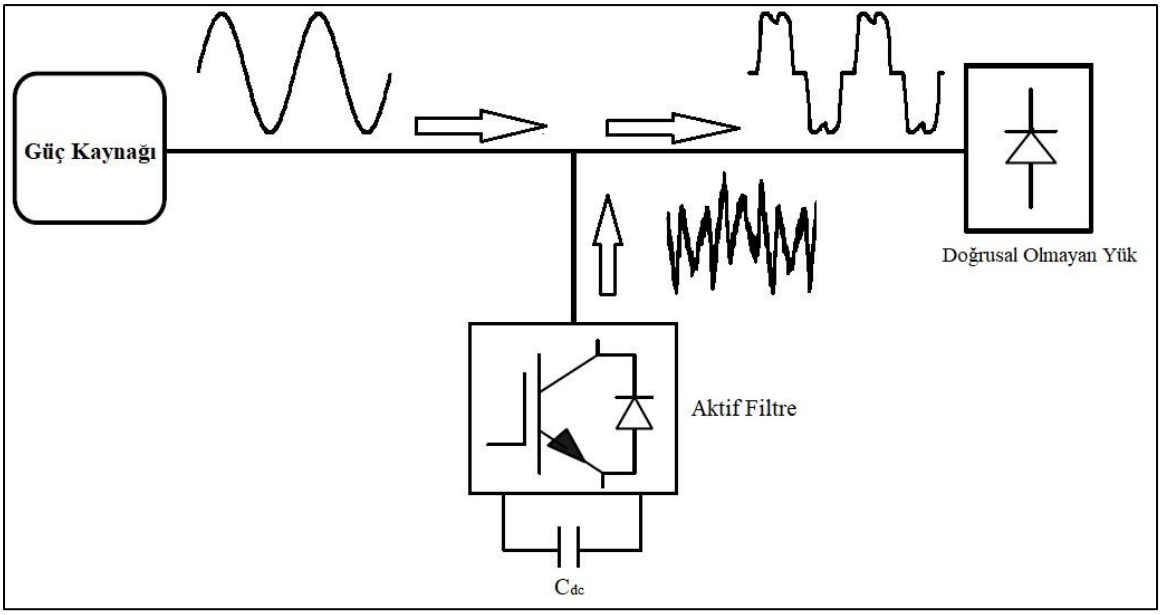
Ayarlı paralel filtreler sadece hedef harmonik frekansta filtreleme yapmak için kullanılır ve akım kapasitesi harmonik akımın genliğine göre ayarlanır. Güç faktörü düzeltme kaygısı olmadığı için reaktör-kapasitör ve tertibatları buna göre seçilir. Ayarsız filtreler ise sadece reaktif gücü kompanze etmek için tasarlanır. Frekans değeri temel bileşen ile rezonansa girmeyecek şekilde uzak tutulur. Bu sayede oluşabilecek herhangi bir tehlikeli durumdan uzak durulmuş olur. Kısmi ayarlı filtreler ise günümüzde sıklıkla kullanılan kompanzasyon sistemleridir. Hem reaktif güç kompanzasyonu hem de hedef harmonik frekans filtreleme için kullanılır. Bu tarz filtreler genellikle filtrelenmek istenen harmonik frekansının altında bir değere ayarlanır. Böylelikle seri rezonans (trafo ile filtre arasında oluşabilecek) frekansının yükselmesine neden olabilecek sistem parametrelerindeki değişiklikler için bir güvenlik payı bırakılmış olur. Eğer filtreler tam olarak istenen frekansa ayarlanırlarsa, sıcaklık veya herhangi bir arıza nedeniyle kondansatör ve endüktanslardaki değişiklikler paralel rezonans noktasının bu değere kaymasına neden olabilirler. Bu da filtre yerleştirilmeden oluşabilecek duruma göre çok daha kötü bir olaya neden olur [87]. Şekil 3.19’ de paralel filtre devre modelleri verilmiştir.



Şekil 3.19. Paralel pasif filtre devre modelleri

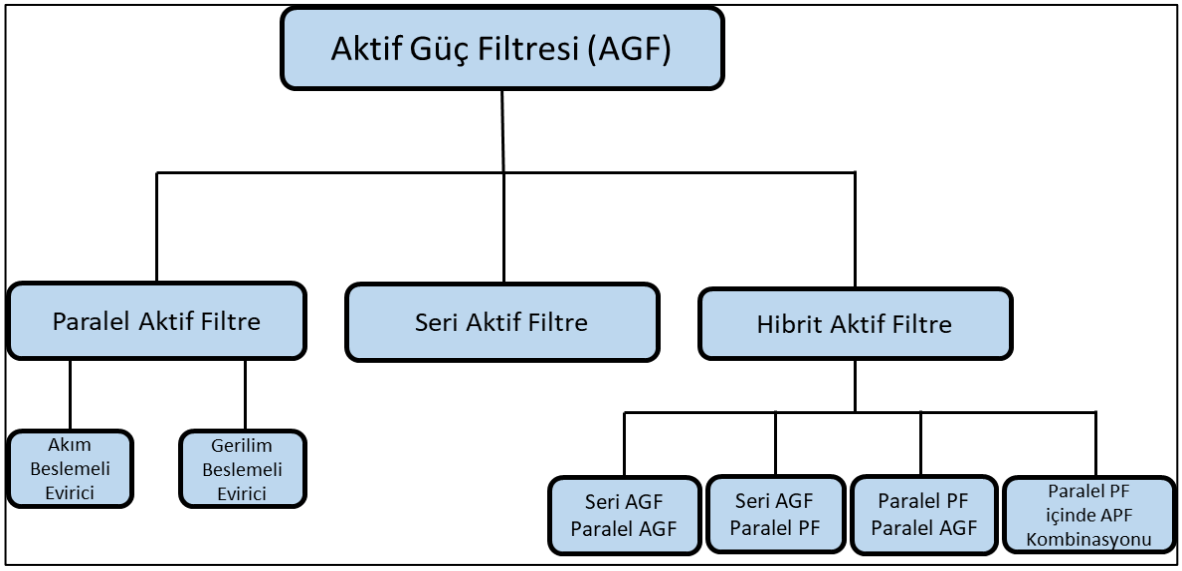
Aktif filtre: Günümüzde geleneksel yöntemlerle tasarlanan pasif filtrelerin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için harmoniklerin elimine edilmesinde aktif filtrelerin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Aktif filtre, temel olarak akım ve gerilim sinyalindeki harmonikli kısımları kompanze etmek için harmonikli sinyal ile aynı genlikte fakat ters fazda harmonik verme prensibine göre çalışır. Yani şebekeye farklı topolojilerde bağlanan akım ve gerilim kaynağı olarak düşünülebilir.

Rezonansların bastırılması, gerilim regülasyonu ve sistem empedansından bağımsız çalışabilmesi gibi pek çok avantajından dolayı pasif filtrelere göre tercih edilmektedirler. Bununla beraber reaktif güç kompanzasyonunu da desteklemektedir. Fakat aktif filtreler pasif filtrelere göre çok daha pahalı sistemlerdir. Şekil 3.20' da aktif filtrenin temel topolojisi verilmiştir.



Şekil 3.20. Aktif filtre temel topolojisi

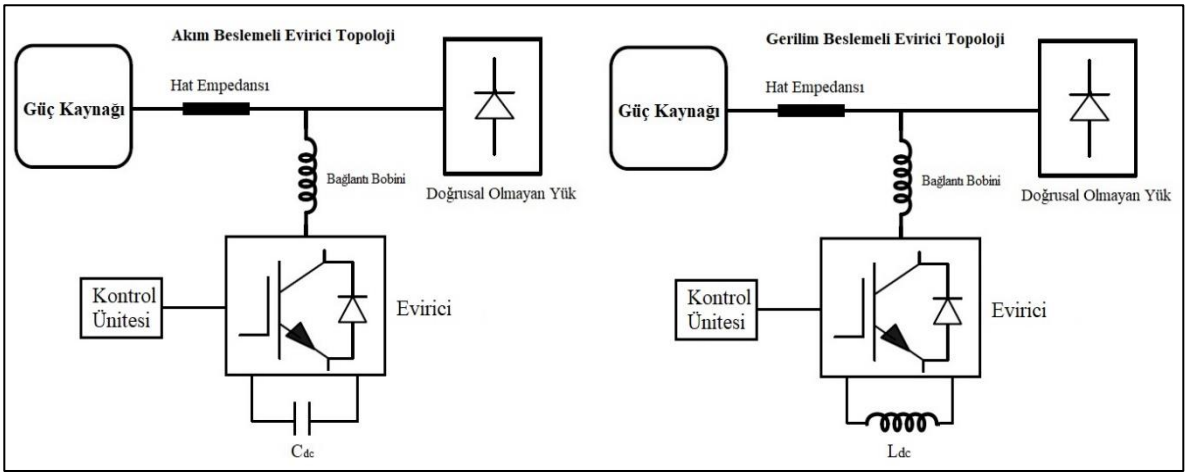
Aktif filtreler enerji sistemine bağlanma topolojilerine ve pasif filtrelerle hibrit kullanılma şekillerine göre 3 farklı başlık altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar seri aktif filtre, paralel aktif filtre ve hibrit aktif filtre topolojileridir. Yükün karakteristiği ve kullanılan güç sisteminin kapasitesine göre farklı tasarım topolojileri ile günümüzde kullanılmaktadır. Aktif güç filtrelerinin sınıflandırması Şekil 3.21' de verilmiştir [88].



Şekil 3.21. Aktif filtrelerin sınıflandırılması

Paralel aktif filtre, kontrol edilebilir akım veya gerilim kaynağı olarak tanımlanabilir. Kullanılan geleneksel pasif filtre topolojisine benzemesi, maliyetin diğer topolojilere göre daha düşük olması ve kontrolünün kolay olması gibi nedenlerle en yaygın kullanılan aktif filtre tipidir.

Paralel aktif filtre, DA link kondansatörü veya reaktörü, filtreyi güç sistemi ile birleştiren bobin, evirici ve kontrol ünitesinden oluşur. Şekil 3.22' de paralel aktif filtre prensip topolojisi verilmiştir.

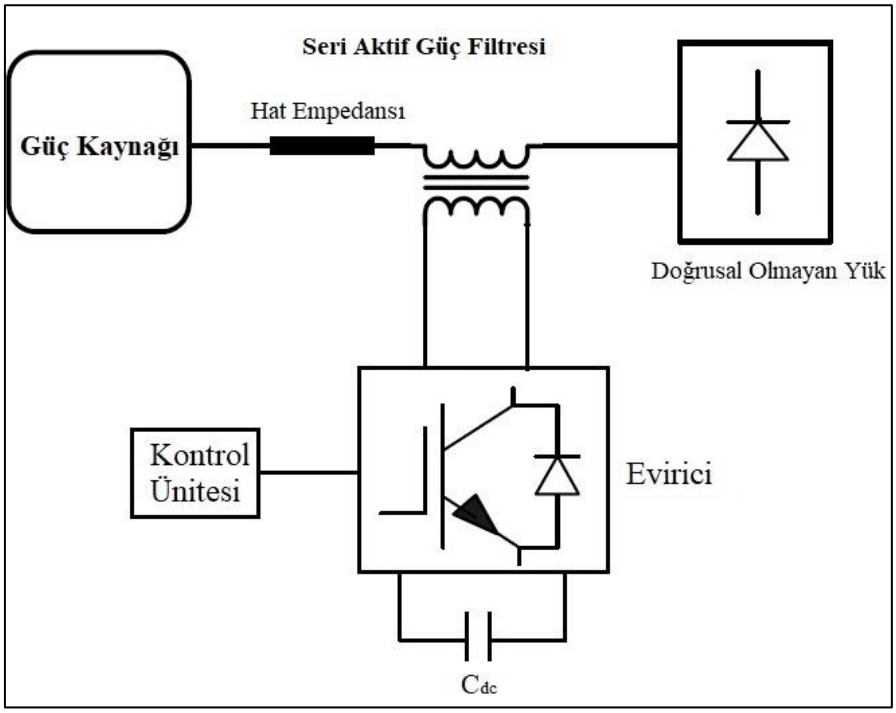


Şekil 3.22. Paralel aktif güç filtresi prensip şeması

Seri aktif filtre ise şebekeye kaynak ile doğrusal olmayan yük arasında bir transformatör ile seri olarak bağlanırlar. AG/OG hatlarında harmonik gerilim regülasyonu, gerilim

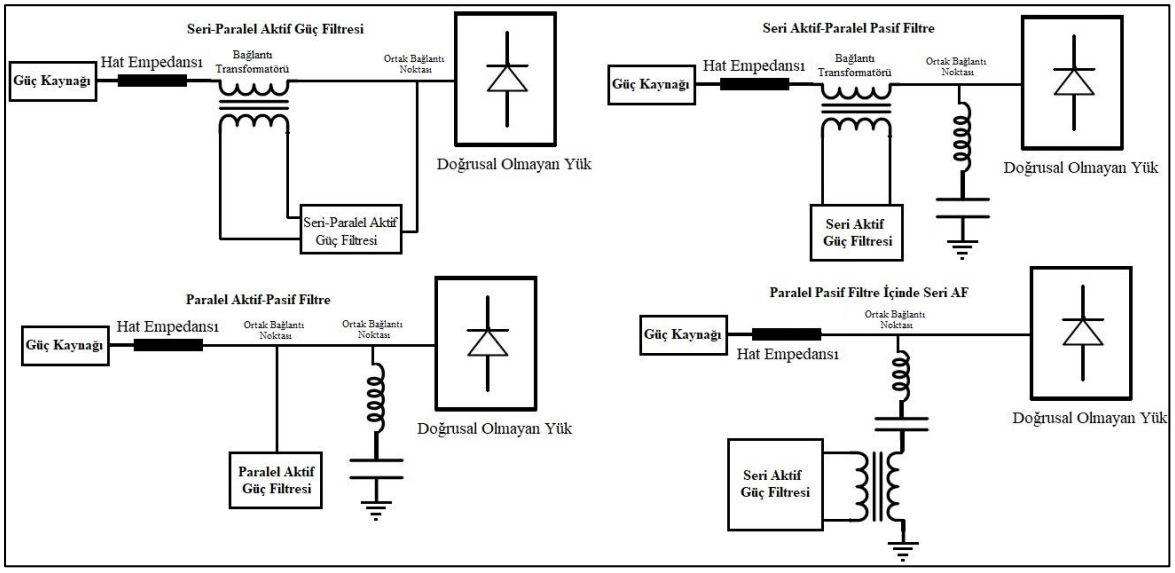
dengeleme, gerilim kırpışmasının azaltılması ve gerilim çentiklerinin yok edilmesi amaçları için kullanılırlar. Örneğin elektrik motorları ve dağıtım transformatörleri, aşırı derecede bozulmuş voltajlarla beslendiğinde düzgün çalışmayabilir. Seri aktif güç filtreleri, harmonik voltaj kompanzasyonu sağlama ve besleme voltajlarının bozulmasını en aza indirme yeteneğine sahip olduklarından bu sorunu azaltmak için uygun çözümdür [89].

Gerilim harmoniği 2 farklı sebeple meydana gelir. Birincisi güç sağlayıcılardan kaynaklı, ikincisi ise harmonik akımların şebeke empedansına sirkülasyonu ile meydana gelir. En yaygın karşılaşılan gerilim harmoniği ise harmonikli akımın şebekeye sirküle olması ile oluşan harmoniklerdir. Seri aktif güç filtresi de, meydana gelen bu harmonikli gerilim sinyalleri ile aynı genlikte ve ters fazda sinyal üreterek gerilim harmonik regülasyonunu sağlamış olur. Çalışma prensibi itibariyle gerilim dalgalanmaları ve çentikler gibi güç kalitesi problemlerini de iyileştirebilecek özelliktedir. Paralel aktif filtrelere göre çok yaygın kullanılmazlar. Çünkü fitrenin hattın akım taşıma kapasitesinde tasarlanması gerekliliği bir dezavantajdır. Şekil 3.23’ de seri aktif filtre prensip topolojisi verilmiştir.



Şekil 3.23. Seri aktif güç filtresi prensip şeması

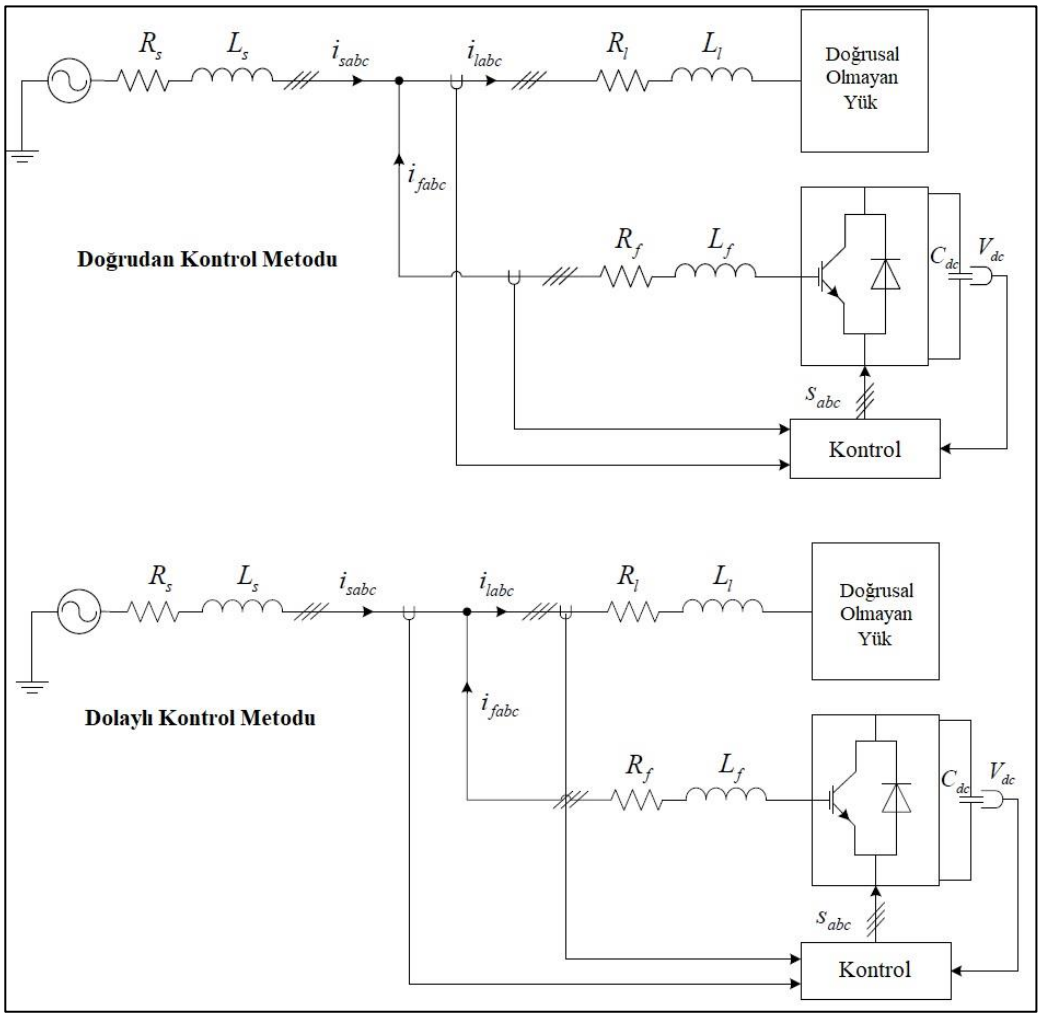
Aktif filtre sistemlerinde DSP veya mikro denetleyici gibi dijital denetleyiciler kullanılmaktadır. Dijital denetleyicilerin kullanıldığı bu filtreler yüksek mertebeden harmoniklerin filtrelenmesinde zafiyetlere sahiptir. Bunun en temel nedeni, her ne kadar günümüz teknolojisinde çok gelişme sağlansa da gerçek zamanlı uygulamada örnekleme hızının donanım sınırlamasıdır. Bununla birlikte aktif güç filtresinde kullanılan yüksek hızlı anahtarlanan yarı iletkenlerden dolayı düzeltilmiş akım veya gerilim üzerinde anahtarlama frekansı gürültüsü oluşturmaktadır. Bu gürültü yüksek frekansa sahip düşük genlikli bir harmoniktir fakat hassas cihazlar için tehdit oluşturmaktadır. Bahsi geçen bu problemler aktif filtrelerin, pasif filtreler ile hibrit şekilde kullanılması ile aşılmaktadır. Bununla birlikte hem gerilim hem de akım harmoniklerinin eliminasyonu için seri-paralel aktif filtre kombinasyonu da sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 3.24' de hibrit aktif filtre prensip topolojileri verilmiştir.



Şekil 3.24. Hibrit aktif güç filtresi prensip şemaları

Hızlı şarj istasyonları veya şebeke üzerinden şarj bölgeleri için en uygun aktif filtre topolojisi paralel aktif filtreler olacaktır. Harmoniklerin akım kaynaklı olması sebebiyle şebekede oluşabilecek harmonikler için akım beslemeli evirici topolojisi kullanılması uygundur. Anahtarlama kaynaklı oluşabilecek yüksek frekanslı harmonikler ise şarj modüllerindeki AA/DA çevirici içerisinde pasif filtre düzenekleri ile zaten minimize edilmektedir.

Aktif filtre kontrolünde doğrudan ve dolaylı kontrol metodu olmak üzere başlıca iki yöntem uygulanmaktadır. Doğrudan kontrol metodunda üretilen harmonikler ile yük akımı karşılaştırılarak kontrol gerçekleştirilir. Dolaylı kontrol metodunda ise şebeke akımı ile yük akımı karşılaştırılarak kontrol sağlanır. Şekil 3.25' de doğrudan ve dolaylı kontrol metodunun prensip şemaları verilmiştir [90].



Şekil 3.25. Aktif filtre için doğrudan ve dolaylı kontrol metotları

Bahsi geçen metotlar ile farklı kontrol teknik ve evirici varyasyonları kullanılarak günümüzde araştırmacılar tarafından pek çok topoloji çalışılmaktadır. Bazı çalışmalarda sadece akım harmoniklerinin kompanze edilmesi üzerine çalışma yapılmışken bazı çalışmalarda da hem akım harmoniği hem de reaktif güç kompanzasyonu yapacak şekilde çalışmalar yapılmıştır. Her çalışmada muhakkak kontrol diyagramı aktif filtre kondansatör geriliminin sabit tutacak şekilde tasarlanmıştır. Bu hem filtrenin performansı hem de yarıiletkenlerin gerilim çalışma sınırlarını aşmamak için çok önemlidir.

Aktif filtre tasarımında en popüler tasarım hem akım harmoniği eliminasyonunu hem de reaktif güç kompanzasyonunu aynı anda yapacak şekilde tasarlanan sistemlerdir. Fakat reaktif güç kompanzasyonu sistemin akım kapasitesine göre sınırlı kalmaktadır. Bu sebeple bu tarz hibrit sistemler küçük güçlü uygulamalar için uygundur.

Reaktif güce karşı alınabilecek önlemler

Harmonik filtreler kısmında anlatıldığı üzere reaktif güç kompanzasyonu için filtreler de kısmen kullanılmaktadır. Özellikle pasif filtre sistemleri tesisin tamamı için değerlendirildiğinde reaktif güç kompanzasyonu ile birlikte değerlendirilir. Aktif filtre uygulamalarında da filtre sisteminin kapasitesi ve yükün karakteristiğine göre reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirilir. Filtre-reaktif kompanzasyon kombinasyonundaki topolojiler tesis yükleri için yapılan tasarımlardır.

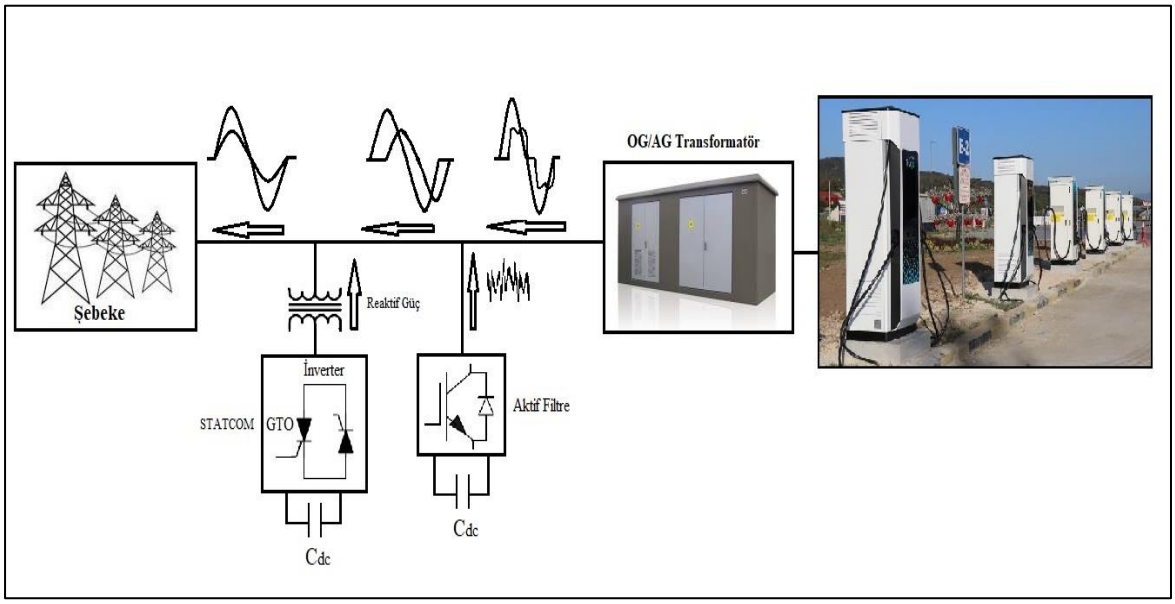
Reaktif güç telafisi için 2 yöntem mevcuttur. Bunlar yük ve hat kompanzasyonu olarak sınıflandırılabilir. Yük kompanzasyonu için yaygın uygulama paralel kondansatör ve reaktör uygulamasıdır. Ülkemizde reaktif güç için dağıtım yüklenicisi ile kullanıcı arasında imzalanan sözleşme kapsamında limitler konulmaktadır. Halihazırda sözleşme gücü 9 kW üzerinde olan tüketiciler için reaktif güç tüketim limitleri konulmakta ve gerekli tedbirler alınmaması durumunda cezai şartlar uygulanmaktadır. Bu bağlamda cezai limitlerin aşılmaması için kullanılan en yaygın yöntem paralel reaktör-kondansatör ile kademe kademe ve kontaktör kullanılarak yapılan kompanzasyon sistemleridir. Bununla birlikte büyük tesisler (ağır sanayi endüstrisi) için esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) cihazları da yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızlı şarj istasyonlarının da sözleşme gücü çok yüksek tüketici sınıfına gireceği için geleneksel kontaktörlü kompanzasyon veya FACTS cihazları ile gerekli tedbirlerin alınması gerekecektir.

FACTS cihazları: Geleneksel yöntemler ile kompanzasyon (kontaktörlü kompanzasyon sistemleri), şarj süreci periyodu bölümündeki pasif filtre kısmında anlatılmıştır. Bu bölümde FACTS cihazları anlatılmıştır. Bu sistemlerin hem hızlı şarj istasyonu tarafında hem de iletim hattında kullanılan tipleri bulunmaktadır. FACTS cihazlarının en yaygın kullanılanları aşağıda verilmiştir.

FACTS cihazları, kullanılan yarı iletken teknolojisine ve şebekeye bağlanma şekillerine göre sınıflandırılır. SVC, TCSC gibi cihazlarda yarıiletken olarak tristör kullanılırken, STATCOM, UPFC, DVR, SSSC, IPFC gibi sistemlerde IGBT, GTO gibi yarı iletkenler kullanılmaktadır. Tristörler güç kapasitesi olarak çok yüksek seviyede fakat kontrol edilebilirlik bakımından zor olan yarı iletkenlerdir. Yani yüksek frekanslarda PWM tekniği ile tetiklenip kesime götürülemezler. Bu sebeple yüksek güç uygulamalarında çoğunlukla tristörler kullanılmaktaydı. Fakat güç elektroniği teknolojilerinin gelişimiyle IGBT, GTO gibi yarı iletkenlerin de güç kapasitesi çok yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bundan dolayı STATCOM gibi cihazların kullanımı hızla artmıştır.

Yüksek hızlı şarj istasyonları için kullanılabilecek en uygun sistemler IGBT, GTO tabanlı FACTS cihazlarıdır. Çünkü bu sistemler frekans cevabı yüksek ve harmonik kompanzasyonu için hibrit çalışacak şekilde de tasarlanabilmektedir. Şarj istasyonlarının hem harmonik hem de reaktif bileşenler ürettiği düşünüldüğünde bu tarz sistemlerin veya türevlerinin kullanılması en doğru seçim olacaktır. Bu sistemlere en iyi örnek STATCOM cihazlarıdır.

FACTS cihazları şebekeye harmonikli akım enjekte etmektedir. Bu sebeple STATCOM cihazlarının kendi harmonik eliminasyonunu yapacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Buna rağmen yine de harmonik enjeksiyonu olacağından ve şarj istasyonunun da harmonik kaynağı olduğu düşünüldüğünde aktif filtre kullanımı da kaçınılmaz olacaktır. Şekil 3.26’ te yüksek hızlı şarj istasyonu için reaktif güç ve harmoniklere karşı tasarlanacak koruma düzeneği verilmiştir.



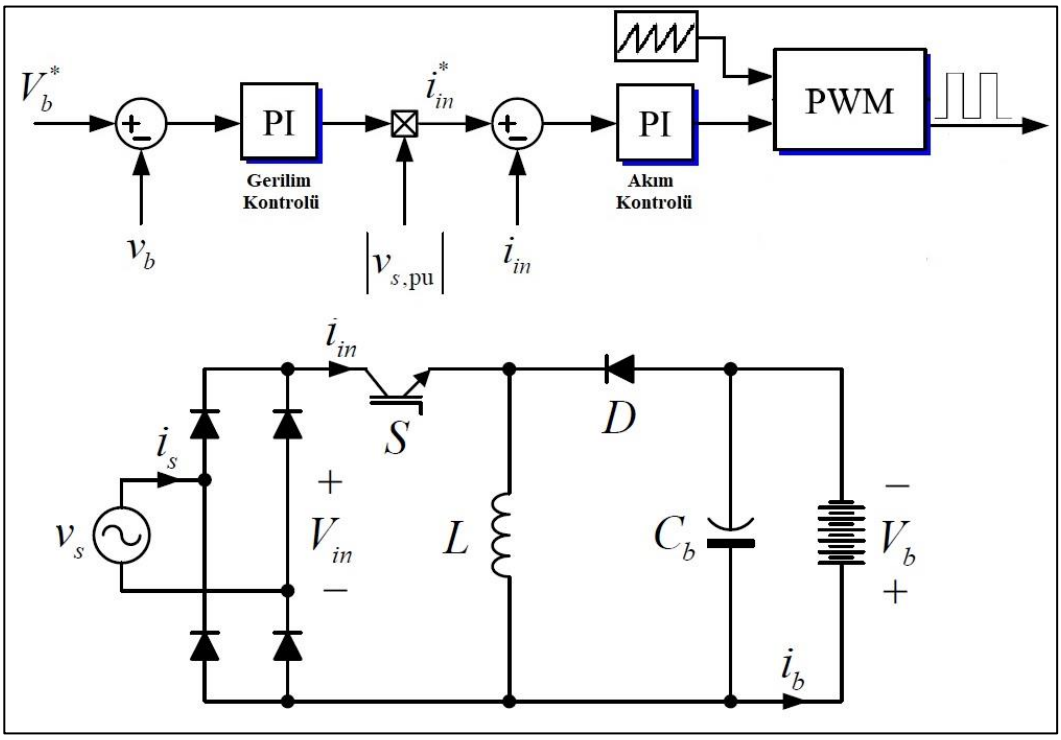
Şekil 3.26. Hızlı şarj istasyonu için örnek bir reaktif güç kompanzasyon ve harmonik filtre tertibatı

STATCOM gibi FACTS cihazları şebeke gerilimini kontrol etme prensibi üzerinden reaktif güç kontrolü yapar. Yani gerilimi düştüğünde şebekeye reaktif güç enjekte ederken, gerilim yükseldiğinde reaktif güç çeker. Bu bağlamda değerlendirildiğinde FACTS cihazları gerilim dalgalanmaları, voltaj dengesizlikleri ve kırpışma gibi güç kalitesi problemleri için de etkin bir çözümdür.

Güç faktörü düzeltmeli çevirici tasarımı: Hızlı şarj istasyonu besleme girişinde alınabilecek önlemlerin yanında reaktif güç için alınabilecek bir diğer önlem güç faktörü düzeltmeli çevirici tasarımıdır. Elektrikli araçların alt sistemlerinde anlatıldığı üzere şarj işlemi 2 farklı şekilde (hızlı şarj-şebekeden şarj) gerçekleştirilebiliyor. Hızlı şarj için şarj modülleri kullanılırken şebeke şarjı için ya on-board ya da off-board şarj modülü kullanılmaktadır. Bu şarj seçenekleri içinden DA hızlı şarj modülü hariç tasarlanan tüm şarj modüllerinde AA/DA/DA çevirici mimarisi kullanılmaktadır. Elektrikli araçlar için tasarlanan bu çevirici mimarisinde AA/DA bloğu reaktif gücü dengeleyecek nitelikte kontrol edilerek güç faktörü yükseltilmektedir.

Pek çok topolojide (boost, buck-boost, yeni topolojiler vb) tasarımı yapılan güç faktörü düzeltmeli çevirici devresinde tepe akım kontrolü, ortalama akım kontrolü, histerisiz kontrol gibi kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Kontrol tasarımında biri iç biri dış olmak üzere iki katmanlı kontrol katmanı kullanılmaktadır. Bazı çalışmalarda ise tek katmanlı

kontrol çevrimi kullanılmıştır. Şekil 3.27' da örnek olarak buck-boost tipi güç faktörü düzeltmeli devre için çift katmanlı kontrol diyagramı ve temel devre topolojisi verilmiştir [91].



Şekil 3.27. Buck-boost tipi güç faktör düzeltmeli devre için çift katmanlı kontrol diyagramı ve temel devre topolojisi

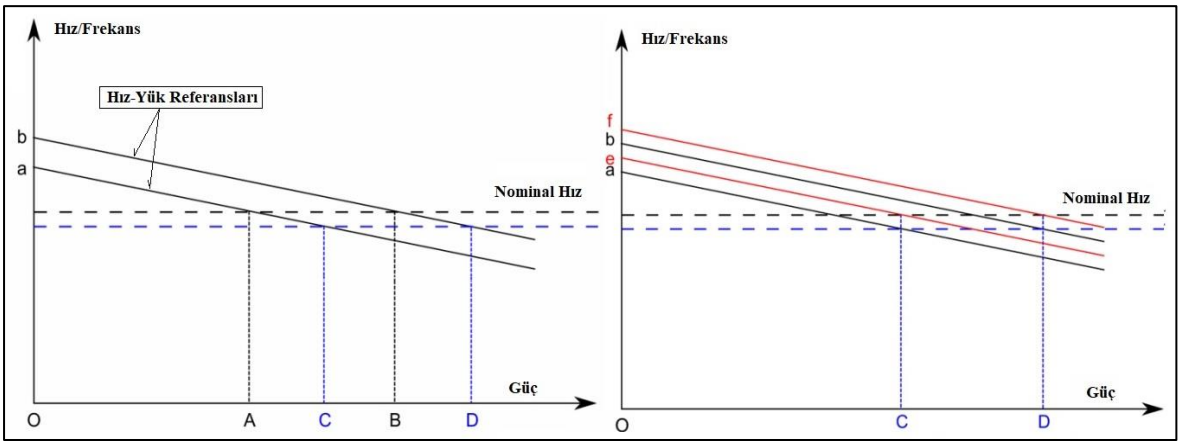
Burada batarya gerilimi (V_b) ve yarı iletken üzerinden akan akım (i_{in}) kontrolü çift katlı çevrimle kontrol edilmektedir. $|v_{S,pu}|$ şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olan referans işaretidir. Sonuç olarak hem V_b dolayısıyla hassas batarya akım (i_b) kontrolü sağlanmış hem de reaktif güç salınımı minimize edilmiş olmaktadır.

Frekans kararsızlıklarına karşı alınabilecek önlemler

Frekans kararsızlıkları herhangi bir arıza sebebiyle veya şebekeye yeni dahil olmuş aşırı yüklerden kaynaklı oluşan üretim-tüketim dengesizliğinden kaynaklanan dalgalanmalar olarak tarif edilmektedir. Üretim-tüketim arasında oluşan bu dengesizliğe pek çok durum sebep olabilmektedir.

Elektrik şebekesi, elektrik motoru ve miline bağlı yükün oluşturduğu bir sistem davranışı gibi değerlendirilebilir. Eğer motorun ürettiği güç milde tüketilen güce eşitse sistem

dengededir ve milin hızı sabit kalır. Aynı prensiple üretilen güç yükten fazla ise hız artar, az ise hız azalır. Enterkonnekte şebekede de toplam üretim kayıplar da dahil olmak üzere toplam tüketime eşit ise, şebekeye bağlı jeneratörlerin hızları değişmeyip sabit kalır [92]. Elektrik şebekesinde hız yerine frekans kullanılır. Frekans santraldeki jeneratörün hızıyla orantılı olup, hız düşmesi frekans düşmesi ile aynı anlama gelir. Şekil-3.28' da iki jeneratör tarafından beslenen enerji hattında yük artışı olması durumunda frekans değişimi ve yapılacak regülasyon ayarının grafik gösterimi verilmiştir [91].



Şekil 3.28. Yük değişimine göre hız-yük referans regülasyonu [93]

Şekil incelendiğinde, a ve b jeneratör hız-yük referanslarına göre yük artışı durumunda dengenin A-B çizgisinden C-D çizgisine kaydığı ve bunun sonucunda frekans denge noktasının aşağı kaydığı görülmektedir. Jeneratörlerin üretim gücünü arttırması ile yeni hız-yük referansı oluşturularak regülasyon sağlanmış olur.

Şebeke frekans kontrol yöntemleri: Şebeke frekansını kontrol etmek için primer frekans kontrolü, sekonder frekans kontrolü ve tersiyer frekans kontrolü yöntemlerinin kullanıldığı bir prosedür uygulanır. Sistem frekansının düşmesine veya yükselmesine karşı tepki olarak sistem aktif güç çıkışının hız regülatörü ile otomatik artırılması veya düşürülmesi yoluyla sistem frekansının yeni bir denge noktasına getirilmesi primer frekans kontrolü olarak tanımlanır. Primer kontrolün şebeke frekansındaki bozulmayı düzeltme oranı jeneratör düşüşüne (s_G) ve jeneratör primer kontrol rezervine bağlı olarak değişmektedir. Eş.3.31' de jeneratör düşüş (s_G) eşitliği verilmiştir.

$$s_G = \frac{-\Delta f / f_n}{\Delta P_G / P_{Gn}} \tag{3.31}$$

Burada $\Delta f = f - f_n$ olarak tanımlanır. Anlık frekans f, nominal frekans ise f_n, jeneratör gücündeki değişim ΔP_G, nominal jeneratör gücü ise P_{Gn} olarak tanımlanır. Bu eşitlik güç değişimine karşılık frekans değişimini hesaplayacak şekilde Eş.3.32' de tekrar düzenlenebilir.

$$\Delta P_G = -\lambda_i . \Delta f \tag{3.32}$$

Burada λ_i ise *i.* blok için güç frekans karakteristiği olup 1 Hz'lik bir frekans sapmasını telafi etmek için MW cinsinden güç kabiliyetini yansıtır. Eş.3.33' de λ_i için eşitlik verilmiştir.

$$\lambda_i = \frac{P_G}{s_G . f_n} \ (MW/Hz) \tag{3.33}$$

Merkezi kontrol biriminin kontrolü ile üretim tesislerinin aktif güç çıkışının artırılarak veya düşürülerek sistem frekansının nominal değerine ve ilişkili elektrik şebekeleriyle olan toplam elektrik enerjisi alış-verişinin planlanan değerine getirilmesi sekonder kontrol olarak tanımlanır. Sistemdeki dengesizliğin giderilmesi için senkron alan içindeki tüm kontrol bloklarının ikincil kontrolü için ağ karakteristik yönetimi uygulanmalıdır. Bu yönetime göre alan kontrol hatasını (G) en aza indirmek için her blok sekonder kontrolör ile donatılmıştır. Eş.3.34' de alan kontrol hatası (G) için eşitlik verilmiştir.

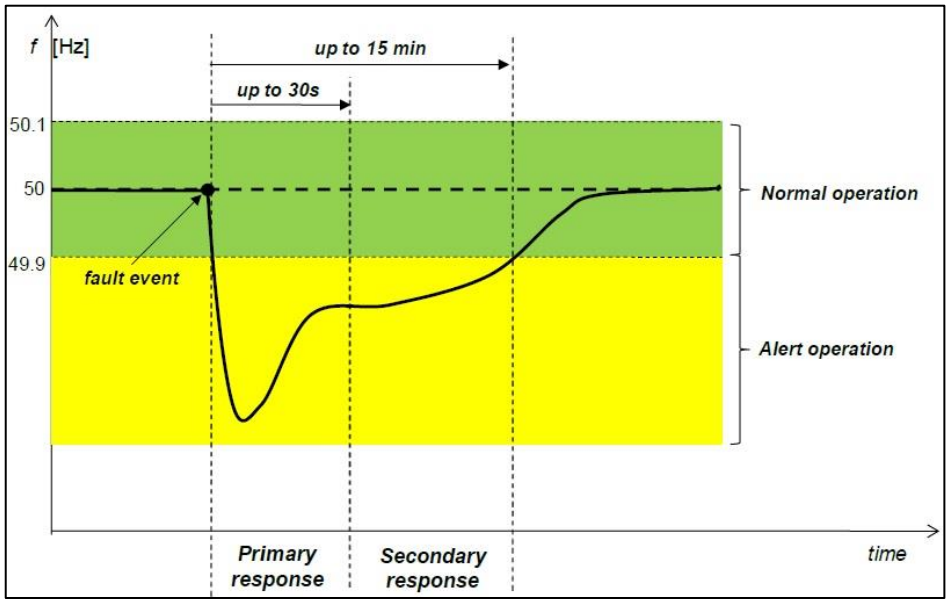
$$G = (P_G - P_{Prog}) + K_{ri} . \Delta f \tag{3.34}$$

Burada P_{Prog} tüm komşularla yapılacak değişim programı sonucunda hesaplanan güç değerini ifade eder. K_{ri} (MW/Hz) ise kontrol alanının güç frekans karakteristiğini ifade etmektedir. Sekonder frekans kontrolü aktif edilmiş alanda (*i.* alan) jeneratörlerinin düzeltme değişkenleri PI kontrolör ile sağlanır. Eş.3.35' de düzeltme değişkenlerinin eşitliği verilmiştir.

$$\Delta P_i = -K_i . G_i - \frac{1}{T_{ri}} \int G_i . dt \tag{3.35}$$

Burada K_i oransal kazanç, T_{ri} ise integral sabitidir. Sekonder frekans kontrolü ile donatılmış bir enerji santralinde muhakkak yeterli sekonder kontrol gücü bulunmalıdır. Ayrıca sekonder kontrol aktif olduğunda primer kontrol çalışacak şekilde sistem kontrolü sağlanır.

Dengeleme ünitelerinin 15 dakika içerisinde gerçekleştirebilecekleri çıkış gücü değişimini belirten yük alma, yük atma işlemleri ile dengeleme birimlerinin aktif güç çıkışlarını artırmaları ya da azaltmaları işlemi ise tersiyer frekans kontrolü olarak tanımlanır. Şekil 3.29' Danimarka güç sisteminin frekans kontrol davranışı verilmiştir [94].



Şekil 3.29. Danimarka güç sisteminin frekans kontrolü [94]

Enerji santrallerinde yedek olarak bulundurulan bu yedek primer ve sekonder güç kapasitesi arıza veya aşırı yüklenme durumlarında frekansın normal çalışma limitleri içerisinde kalması için kullanılmaktadır. Kararlılık sağlanamaz ise dengeleme amaçlı yedek üniteler devreye girerek frekans limitler içerisinde tutulmaya çalışılır (tersiyer kontrol). Fakat tüketim ile üretim arasında yedek güçlerin sağlayabileceği seviyenin üzerinde bir fark oluşursa frekans çökmesi gerçekleşebilir. Aşağıda frekans kararsızlığına yol açabilecek bazı durumlar sıralanmıştır.

- Enerji santrallerinde meydana gelebilecek lokal arızalar neticesinde santralin devre dışı kalması durumunda üretim-tüketim dengesizliğinin oluşması,
- Enerji hatlarında meydana gelebilecek simetrik-asmetrik arıza, aşırı yüklenme vb.

sebeplerle hattın açması ve bundan kaynaklı birbirini tetikleyebilecek açma-kapama prosedürleri neticesinde üretim-tüketim dengesizliğinin oluşması,
- Enerji hatlarında reaktif gücü dengeleyen FACTS sistemlerinde meydana gelebilecek arızalardan kaynaklı hattın aktif güç kapasitesinin düşmesi ve aşırı yüklenmesi neticesinde hatların açması ve nihayetinde üretim-tüketim dengesizliklerinin oluşması,
- İki farklı bölgeyi birbirine bağlayan yüksek gerilim hatlarında aşırı yüklenme neticesinde hattın açması sonucu iki ayrı bölgede üretim-tüketim dengesizliğinin oluşması,
- Şebekeye bağlanan ani büyük yüklerden kaynaklı meydana gelebilecek üretim-tüketim dengesizlikleri,
- Çalışma prensipleri gereği yenilenebilir enerji kaynaklarının (PV paneller, rüzgar santralleri vb.) üretim güçleri stokastik davranışlar sergiler. Şebekeye yüksek oranlarda penetre olmuş bu kaynaklarının ani üretim değişimleri sebebi ile meydana gelebilecek üretim-tüketim dengesizlikleri gibi sebeplerle frekans kararsızlıkları meydana gelebilmektedir.

Frekans kararsızlığına sebep olan durumlar incelendiğinde şarj istasyonlarının çok büyük bir tehdit oluşturacağı aşikardır. Türkiye'de resmi olmayan rakamlara göre 15.000 civarında akaryakıt istasyonu olduğu değerlendirilmektedir. Bu anlamda aynı oranda şarj istasyonu ağı olduğu ve her istasyonda en az 8 hızlı şarj modülü (her biri 350 kW gücünde) olacağı düşünülürse şebeke için yaklaşık 42.000 MW kurulu güce sahip bir yük anlamına gelir. Bunun yanında şebeke üzerinden şarj noktalarının da var olacağı dikkate alınırsa toplam elektrikli araç kurulu gücü bu rakamın daha da üstünde olacaktır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) Eylül 2022 kurulu güç raporunda [95] ülkemizin toplam kurulu santral gücü 102.280,9 MW olarak yayınlandı. Ülkemizde tam anlamıyla elektrikli araç kullanımına geçilirse ve üretim-iletim-dağıtım altyapısı aynı kapasitede kalırsa mevcut kurulu santral gücü ve iletim-dağıtım kapasitesi en az %42'nin üzerinde ek bir yükle karşı karşıya kalacaktır. Bu bağlamda frekans kararlılık problemi elektrikli araç entegrasyonunda ülkemizde ve dünyada karşılaşılacak en büyük problemlerden bir tanesi olacaktır. Bununla beraber şarj eğiliminin genellikle işten eve dönüş sonrasında olması ve mevcut şebeke yük eğrisinin puant anının da aynı sürece denk gelmesi durumu daha da zorlu hale getirecektir.
Enerji üretim-iletim-dağıtım kapasitesi yeterince attırılmazsa elektrikli araçların şebeke entegrasyonu sonucu oluşabilecek frekans kararsızlıklarına karşı geleneksek kontrol yöntemleri (primer-sekonder-tersiyer) yetersiz kalacaktır. Bu durumda üretimin yetersiz

kalması, iletim-dağıtım hatlarının aşırı yüklenmesi sonucu açılması veya arıza oluşması gibi durumlardan herhangi biri sebebiyle frekans çökmesi veya lokal alanlarda uzun süreli enerji kesintileri yaşanabilir. Bu bağlamda üretim-iletim-dağıtım kapasite artışı dışında elektrikli araç yükünün meydana getirebileceği frekans kararsızlıklarına karşı alınabilecek önlemlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının (özellikle solar enerji kaynakları) enerji depolama sistemleri ile birlikte (stokastik davranışı azaltmak için) dağıtık enerji üretim birimleri olarak şebekeye dahil edilmesi,
- V2G yani araçtan-şebekeye topolojisinin en uygun güç paylaşımı ile şebekenin desteklenmesi,
- Şebekeden şarj noktalarında, şarj programlaması prensibine dayalı enerji yönetim algoritmaları ile puant yükün dengelenmesi,
- V2V yani araçtan araca topolojisini en uygun algoritma ile kullanılarak puant yükün dengelenmesi,
- Şebekeden şarj noktalarında, akıllı sayaç uygulamasına benzer yöntemlerle puant yükün dengelenmesi,
- Blockchain benzeri platformlar aracılığıyla araçtan-araca, araçtan-evsel yüke gibi enerji ticaretini mümkün kılacak uygulamaların yaygınlaştırılması gibi yöntemlerle şebeke desteklenebilir.

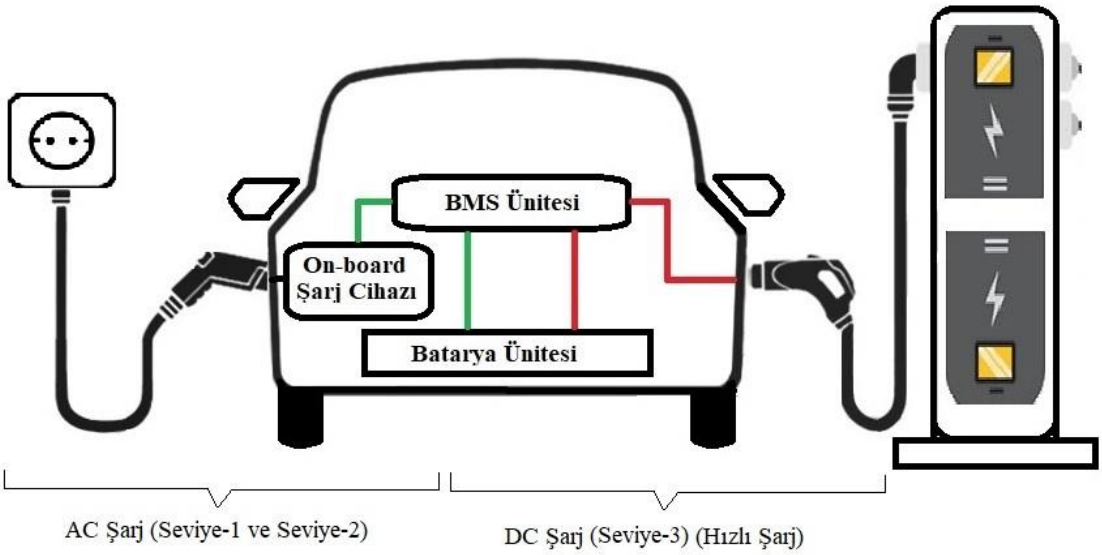
Son yıllarda bu konular araştırmacılar için önemli çalışma alanları olmuştur. Bu bağlamda bu tezde yapılan çalışmada V2V topolojinin kullanıldığı yeni bir enerji yönetim algoritması olan MRTC stratejisi geliştirilerek hem simülasyon hem de gerçek uygulaması yapılmıştır.

4. ELEKTRİKLİ ARAÇ-ŞEBEKE ENTEGRASYONUNDA ÖNE SÜRÜLEN FİZİKSEL ALTYAPI VE İŞLETİM TOPOLOJİLERİ

Elektrikli araç şarj altyapılarının araştırılmasının amacı, elektrikli araçların artan güç talebini verimli bir şekilde karşılamak için akıllı şarj yönetiminin yapılabileceği ve elektrik şebekesinin geri beslenebileceği altyapıyı kurmaktır. Şarj istasyonlarının tasarımı yapılırken yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, enerji talep-arzı arasındaki fark ve sürücü davranış farklılıklarının analizi gibi kritik konular bütünüyle değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının stokastik davranışını düzenlemek için enerji depolama sistemlerinin de planlamaya dahil edilmesi elzemdir. Tüm bu parametreler dikkate alınarak altyapı tasarlanırsa akıllı şarj algoritmaları kolaylıkla uygulanabilir olacaktır.

Elektrikli araç şarj cihazları on-board (dahili) veya off-board (harici) olarak tasarlanabilirler. Günümüzde uluslararası standartlara uygun olarak üretilmekte olan dahili veya harici şarj edilebilen pek çok araç mevcut. Araçların hem maliyet hem de ağırlık-hacim açısından limitler taşıması sebebiyle dahili şarj cihazları düşük kapasitede üretilirler. Bunun yanında dahili şarj cihazları şebekeye doğrudan bağlandıkları için oluşabilecek aşırı yüklenme ve altyapı kapasite kısıtları gibi kaygılar da düşük kapasiteli tasarımları zorunlu kılmaktadır. Harici şarj cihazları ise genellikle hızlı şarj istasyonlarındaki şarj modülleridir. Bunun yanında şebekeden şarj noktalarında kullanılmak üzere Seviye-2 limitlerinde şarj için kullanılan harici DA şarj cihazları da çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu, aracın tasarım dinamikleri ile ilgili olarak değişiklik göstermektedir.

Şekil 4.1’ de dahili ve harici şarj durumunu gösteren bir görsel verilmiştir. Günümüzde üretilen araçlar şebekeden şarj için ya dahili şarj cihazı ile ya da harici bir DA şarj cihazı ile üretilirken hızlı şarj için ise doğrudan batarya ünitesini besleyecek alt sistemlerle donatılarak satışa sunulmaktadır.

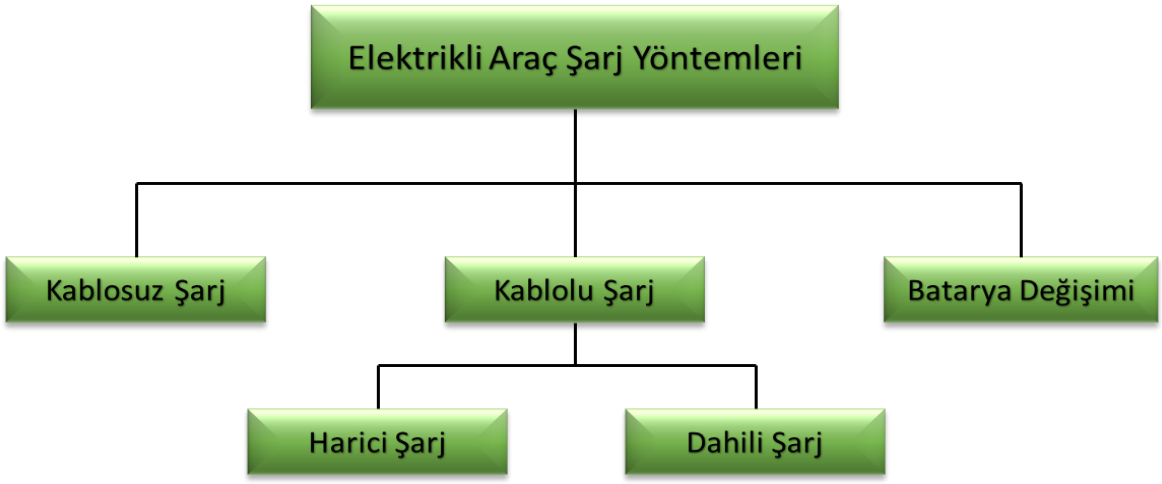


Şekil 4.1. Dahili ve harici şarj bağlantıları

Son yıllarda yapılan pek çok araştırmaya göre şebeke üzerinden şarj ve hızlı şarj olmak üzere iki farklı tipte istasyon tipi öne çıkmaktadır. Hızlı şarj istasyonları Seviye-3 limiti şarj gücünde modüllere sahip günümüz benzin istasyonlarına benzer topolojilere sahiptir. Şebeke üzerinden şarj noktaları ise Seviye 1-2 limitinde şarj etmeye müsaade edilen istasyonlar olup sitelerde, ticari alanlarda, alışveriş merkezlerinde, otoparklarda ve diğer toplu sosyal alanlarda olması muhtemel olan istasyon modelleridir. Hızlı şarj istasyonu ve altyapısı temel iki hedef çerçevesinde tasarlanır. Birincisi, araçları mümkün olan en hızlı şekilde şarj etmek, ikincisi ise şebeke üzerinde yaratacağı kalite problemleridir. Şebeke üzerinden şarj noktaları ise mevcut yüklerin bağlı olduğu trafo ve altyapısını kullanacağı ve sayıca hızlı şarj istasyonuna göre fazla olacağı öngörüldüğü için şarj limitleri daha düşük olacaktır. Bununla birlikte sayı olarak fazla olması sebebiyle şebekenin aşırı yüklenmesini önlemek ve gerektiğinde destekleyebilmek için akıllı şarj algoritmalarının işletimine uygun olarak tasarlanmalıdır.

4.1. Elektrikli Araç Şarj Seviyeleri ve Standartlar

Elektrikli araçların batarya ünitelerini doldurmak için öne sürülen pek çok metot bulunmaktadır. Bu metotlar bataryanın dolum süresi, dolum şekli ve şebeke tarafı kaygılar sebebiyle öne sürülmekte ve günümüzde hala tartışılmaktadır. Şekil 4.2’ öne sürülen metotlar sınıflandırılmıştır.



Şekil 4.2. Elektrikli araç şarj metotları

Kablosuz şarj, manyetik rezonans prensibi ile enerji akışını öngören bir metottur. Bu yöntemde alıcı ve verici bobin ile enerji hava üzerinden kablosuz şekilde aktarılmaktadır. Öne sürülen yöntem yollar üzerine yerleştirilmiş verici bobin düzeneği sayesinde her an şarj mümkün olabileceğinden batarya kapasitesinin de çok azalacağı öngörülmektedir. Fakat maliyetin çok fazla olması, araç üzerinde alıcı bobin ile düzeneğinin olması gerekliliği, verimin düşük olması ve canlılara zararı konusundaki tartışmalar sebebiyle günümüzde çok tercih edilmemektedir.

Batarya değişimi ise depozito prensibi ile bataryanın otomatik veya yarı otomatik olarak dolu olan ile değişimi prensibine dayanır. Bu yöntem özellikle şebeke kaygılarının önüne geçmek ve dolum için öngörülen süreyi azaltmak için öne sürülmüştür. Değişimin 3 dakika gibi çok kısa sürede gerçekleşiyor olması şarj süresinin neredeyse yakıt dolum seviyesine getirmektedir. Fakat bataryalardaki çevrim yaşam ömrünün kısıtlı olması, depolama gereksinimi ve diğer işletme giderlerinin yüksek olması gibi sebeplerle günümüzde hala kullanımı taşıtılmaktadır.

Günümüzde kullanılan en yaygın metot kablolu şarj yöntemidir. Özellikle hem şebekeden hem de hızlı şarj istasyonlarından dolum sağlanabilmesi ve verimin yüksek olması günümüzde tercih sebebidir. Şebeke kaygıları ve dolum süresi kablolu şarj için en büyük zorluk olarak gösterilebilir. Kablolu şarj dahili ve harici çeviriciler üzerinden uluslararası bazı standartlar baz alınarak sağlanmaktadır. Çizelge 4.1’ de uluslararası bazı standartlar verilmiştir.

Çizelge 4.1. Uluslararası standartlara göre şarj seviyeleri

Şarj Seviyesi		Şarj Cihazının Tipi		Güç Oranı (kW)	Gerilim (V)	Max. Akım Oranı (A)
		Dahili	Harici			
SAE Standardı						
AA	Seviye-1	X		1.4-1.9	120	12-16
	Seviye-2	X		19.2	208-240	80
	Seviye-3		X	> 48	480	> 100
DA	Seviye-1		X	36	200-400	80
	Seviye-2		X	90	200-400	200
	Seviye-3		X	240	200-600	400
IEC Standardı						
AA	Seviye-1	X		4-7.5	250-450 (1-3 Faz)	16
	Seviye-2	X		8-15	250-450 (1-3 Faz)	32
	Seviye-3	X		6-120	250-450 (1-3 Faz)	250
DA	Hızlı		X	100-200	400	400
CHAdeMO Standardı						
DA	Hızlı		X	60	500	125

Standartlara göre AA bağlantı için Seviye-1 ve Seviye-2 dahili çevirici ile şebeke üzerinden şarj desteklenmektedir. Seviye-3 için harici kaynağa ihtiyaç duyulmakla birlikte aracın dahili çevirici kapasitesine göre AA Seviye-3 limitlerinde şarj mümkündür.

DA bağlantı için tüm standartlar ve seviyelerde harici olarak bağlantı sağlanır. Seviye-1 ve 2 için araç üreticilerinin ürettiği ve satış ile kullanıcıya verdiği DA şarj cihazı ile şebekeden şarj yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tarz uygulamalarda araç üreticileri dahili şarj modülü kullanmayabilir. Dahili şarj ünitesi olsa bile farklı şarj limitlerinde şarjı mümkün kılmak için opsiyonel olarak sunulmaktadır. DA Seviye-3 limitlerine ise hızlı şarj istasyonlarındaki modüller ile ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu kadar büyük kapasiteli portatif harici şarj cihazı veya dahili şarj cihazı üretmek ekonomik ve uygulanabilir değildir. Ayrıca doğrudan şebeke altyapısı üzerinden şarj bağlantısı teknik olarak mümkün olamaz.

Standartlar içerisinde tarif edilen DA şarj seçeneği bazı avantajlarından dolayı daha çok tercih edilmektedir. Gerek hızlı şarj istasyonları gerekse şebekeden şarj noktaları olsun DA şarj altyapısı aşağıda belirtilen üstünlüklerden dolayı hem literatür çalışmalarında hem de

şarj altyapı uygulamalarında daha çok ön plana çıkmaktadır [96].

- PV panellerin ve batarya depolama ünitelerinin enerji akışı DA içeriklidir.
- Elektrikli araçların bataryalarına enerji akışı DA içeriklidir.
- Elektrikli araçların şarj zamanlamasında kullanılan akıllı şarj algoritmaları için daha uygun olması.
- DA şarj ile daha kolay V2G protokolü yapılabilmesi.

Yukarıda sıralanan avantajlardan da anlaşılacağı üzere hibrit kaynaklara dayalı DA şarj mimarisi gelecekte kurulacak şarj altyapısı için çok kritik olacaktır. Bununla beraber araştırmacıların yoğun olarak üzerinde çalıştığı akıllı şarj algoritmalarının uygulanabilmesi için de DA şarj altyapısı daha çok öne çıkmaktadır.

4.2. Öngörülen Şarj Yapıları

Şarj alanlarına YEK' lerin entegre edilebilmesi ve akıllı şarj algoritmalarının uygulanabilmesi için muhakkak mikroşebeke konfigürasyonlarının kullanılması gerekmektedir. Bir mikroşebeke, var olan enerji kaynakları, enerji depolama üniteleri ile hem ada modunda çalışabilen hem de şebeke yükünü hafifletebilen bir çalışma karakterine sahip sistemdir. Bu bağlamda elektrikli araç şarj noktalarının her birinin bu prensiple tasarlanması kontrol edilebilirlik ve tasarım esnekliği açısından çok anlamlıdır.

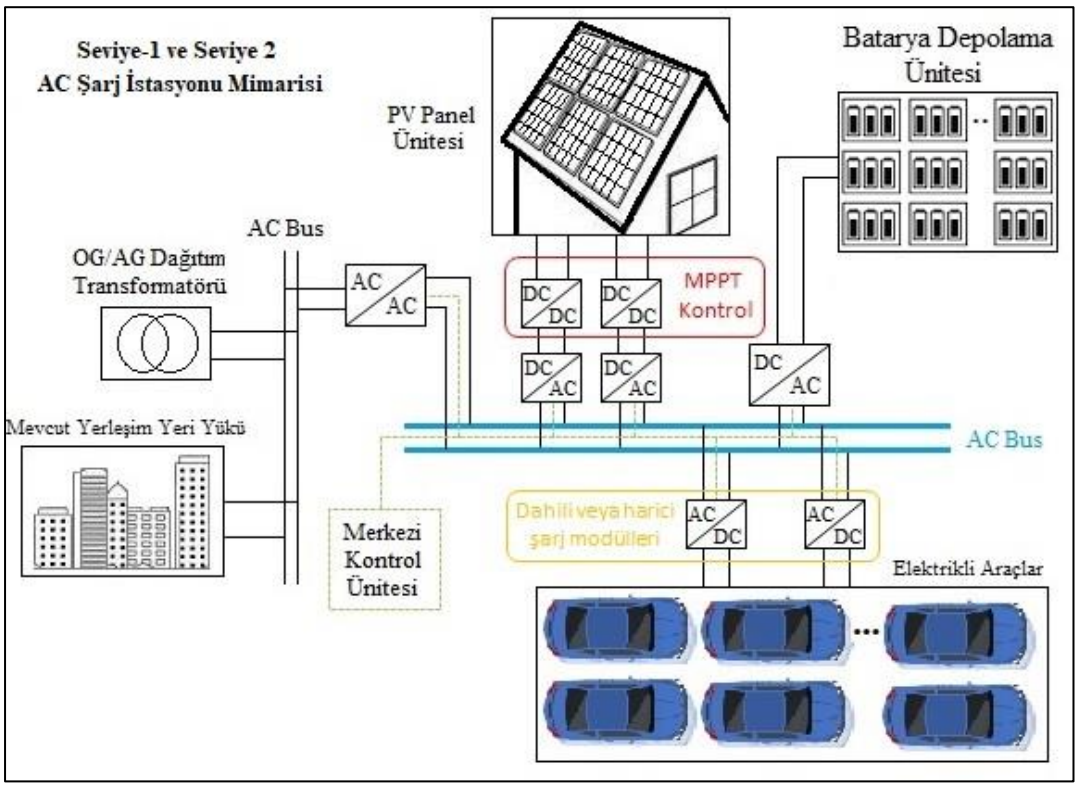
Mikroşebekeler ortak DA ve/veya AA baraya sahip olacak şekilde tasarlanırlar. DA karakterli olanlar DA mikroşebeke, AA karakterli olanlar, AA mikroşebeke, AA-DA karakterli olanlar ise hibrit AA-DA mikroşebeke olarak adlandırılırlar. Şarj noktalarının da bu topolojiler temel alınarak tasarlanması gerekmektedir. Nitekim literatürde yapılan çalışmalarda da bu konu sıklıkla vurgulanmaktadır [97-101]. Bu çerçevede elektrikli araçlar için tasarlanabilecek istasyon mimarileri altbölümler halinde sıralanmış ve tarif edilmiştir.

Öngörülen mimariler, mevcut şebeke altyapısının kullanımı veya yeni bir altyapı tesis edilerek işletilmesi durumuna göre kategorize edilmiştir. Mevcut şebeke altyapısının kullanımı kırsal yerleşim alanlarında, şehir içinde sitelerde, ticari alanlarda, alışveriş merkezlerinde, otoparklarda ve diğer toplu sosyal alanlarda mümkündür. Bununla beraber

aynı bölgelerde yeni altyapı kurulması da muhtemeldir. Yeni altyapının tesis edilmesi ise toplu sosyal alanlarla birlikte özellikle yüksek hızlı şarj istasyonları için öngörülmektedir.

4.2.1. Fiziksel altyapı mimarisi-1: Mevcut şebeke altyapısı ile AA mikroşebeke

Şekil 4.3' de PV ünite, batarya depolama ünitesi ve kontrol birimi ile donatılmış AA mikroşebeke tabanlı elektrikli araç şarj noktası mimarisi verilmiştir. Söz konusu mimari mevcut şebeke altyapısı için öngörülmekte olduğu için PV panel ünitelerinin ilgili yapının çatı kısmına entegre edilmesi uygun olacaktır. Ayrıca hem akıllı şarj algoritmaları hem de solar enerji kaynağının stokastik davranışını dengeleyebilmek için batarya depolama ünitesi bu mimaride öngörülmektedir.



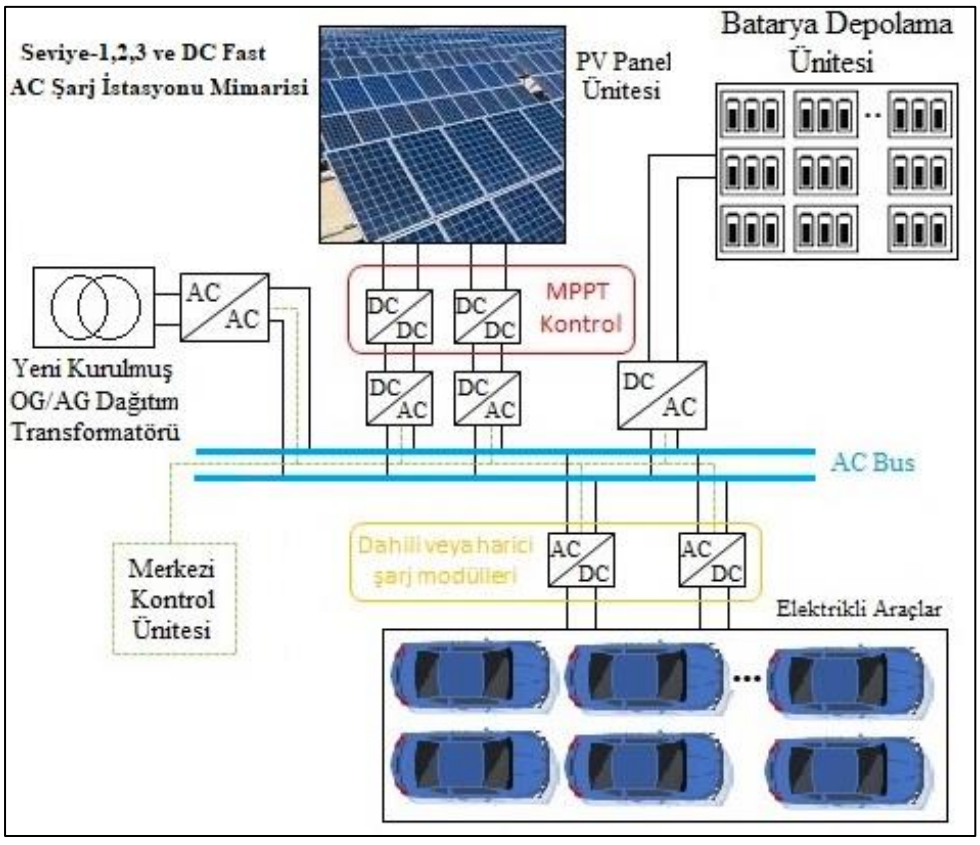
Şekil 4.3. Mevcut şebeke altyapısı ile AA mikroşebeke

Öngörülen mimaride tasarlanan mikroşebekede mevcut şebeke altyapısı kullanıldığı için şarj limitleri Seviye-1 ve Seviye-2 sınırları ile kısıtlanmaktadır. Şarj istasyonu mikroşebeke mimarisi ile tasarlandığı için ortak bağlantı noktası (PCC) anahtarı ile şebekeden ayrılarak ada modunda çalışabilir. Fakat bunun için yeterli enerji üretimi ve optimal akıllı şarj algoritmasının işletilmesi gerekir. Bununla birlikte V2G (araçtan-şebekeye), V2V (araçtan araca), V2H (araçtan-eve) gibi işletim topolojileri doğru enerji yönetimi ile uygulanabilir.

Yüksek hızlı şarj modülü gerektirmediği için maliyet olarak en uygun mimaridir. Fakat AA baralı mikroşebekelerin frekans kararlılığı, gerilim kararlılığı, mikroşebeke içi reaktif güç ve harmonik gibi bazı dezavantajları vardır. Bu sebeple akıllı şarj algoritmalarının yönetimi uygulamada zordur.

4.2.2. Fiziksel altyapı mimarisi-2: Yeni altyapı tesisi ile AA mikroşebeke

Mimari-1 için öngörülen altyapı topolojisinde var olan yeteneklerin tamamı bu mimari için de geçerlidir. Bu mimaride de batarya depolama ünitesi, PV panel ünitesi ve merkezi kontrol ünitesi öngörülmektedir. Kurulacak şarj noktası için tasarlanan mikroşebeke modeli yeni bir OG/AG transformatörü ve alt sistemleri ile besleneceği için kapasitesi daha yüksek olacaktır. Bu sayede standartlarda tarif edilen tüm şarj limitlerinde tasarım mümkündür. Tabii ki kurulacak transformatör, alt sistemler ve mikroşebekenin kapasitesi burada belirleyici olacaktır. Şekil 4.4' de öngörülen mimari topolojisi verilmiştir.



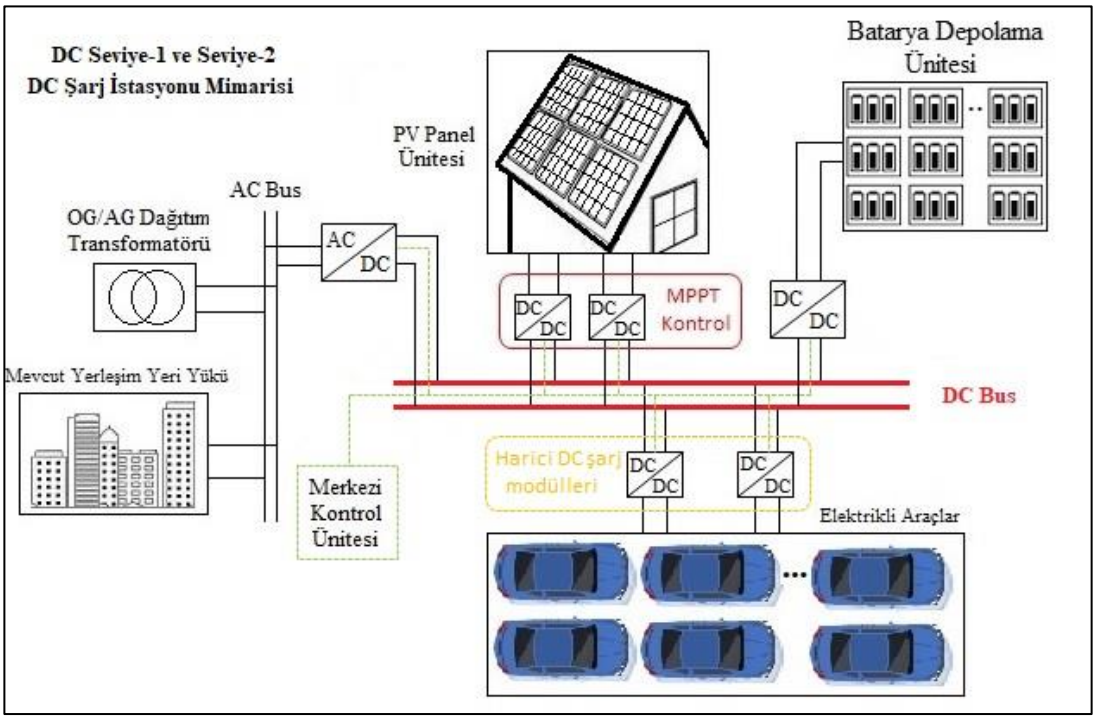
Şekil 4.4. Yeni altyapısı tesisi ile AA mikroşebeke

Günümüzde altyapı olarak kullanılmaya başlanan en yaygın topoloji öngörülen bu mimaridir. Fakat merkezi kontrol ünitesi ve diğer bileşenler bulunmadığı için bu yeni

kurulan şarj istasyonları bir mikroşebeke olarak değerlendirilemezler. Fiziki alanın ve altyapının yeterli olduğu toplu sosyal alanlarda (otopark alanları, AVM vb) kurulabilir. Bununla birlikte yüksek hızlı şarj istasyonları da aynı mimari ile tasarlanabilirler. Yerleşim yerlerinde (site, apartman, kırsal yerleşim vb), fiziki alan ve yeni altyapı kapasitesinin yeterli olması durumunda kurgulanabilir. Fakat sıkışık yerleşim mimarisinde şehirleşmiş bölgelerde bu pek mümkün değildir.

4.2.3. Fiziksel altyapı mimarisi-3: Mevcut şebeke altyapısı ile DA mikroşebeke

Şekil 4.5' de PV ünite, batarya depolama ünitesi ve kontrol birimi ile donatılmış DA mikroşebeke tabanlı elektrikli araç şarj noktası mimarisi verilmiştir. Mevcut altyapının kullanıldığı AA mikroşebeke modelinde olduğu gibi yine bu mimaride de PV paneller için en uygun yer, yerleşim yapısının çatısı olacaktır. Bu mimari modelde de depolama ünitesi ve merkezi kontrol ünitesi bulunmaktadır.



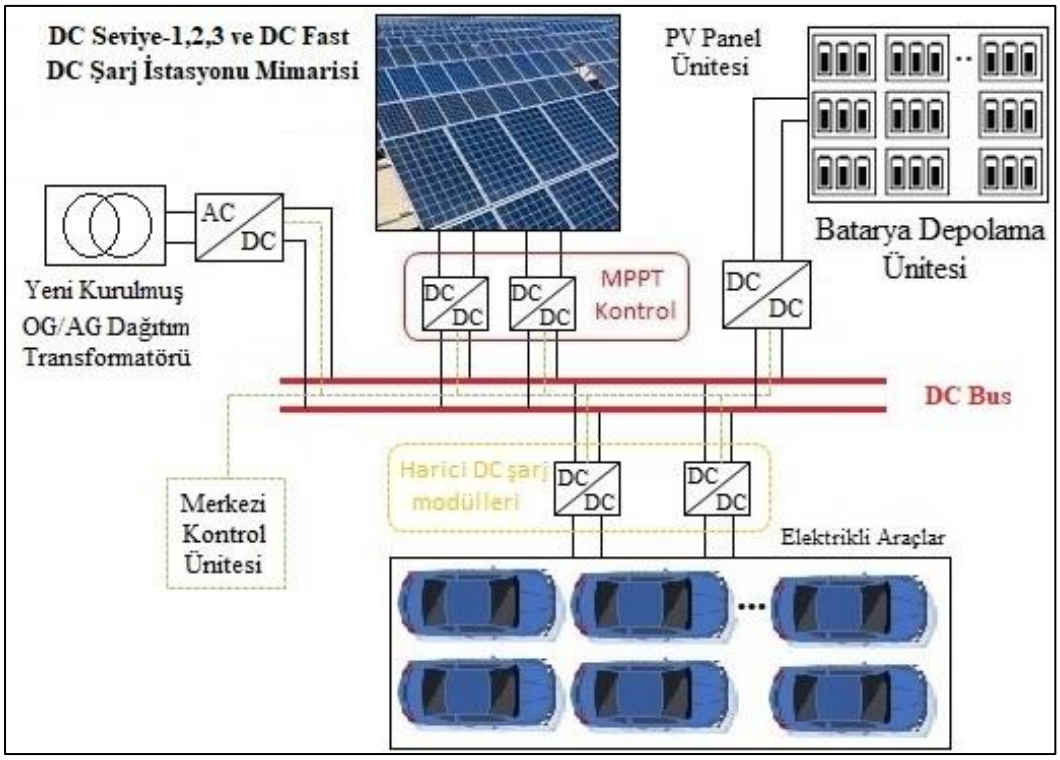
Şekil 4.5. Mevcut şebeke altyapısı ile DA mikroşebeke

Öngörülen mimaride, tasarlanan mikroşebekede yine mevcut şebeke altyapısı kullanıldığı için şarj limitleri SAE standardına göre belirlenen DA Seviye-1 ve Seviye-2 sınırları ile kısıtlanmaktadır. Bu mimaride inverter ihtiyacı olmadığı ve PV ünite çıkışının DA bileşenli olması sebepleriyle PV ünitenin istasyona entegrasyonu daha kolay ve verimlidir.

Bununla birlikte DA baralı mikroşebeke topolojileri AA olanlara göre daha kolay kontrol edilebilirler. AA barada frekans, faz açıları, reaktif güç ve tepe değeri gibi kontrol edilmesi zor ve karmaşık olan parametreler DA mikroşebekede yoktur. Güç akışı, sadece gerilim ve akımın kontrolü ile sağlanır. Ayrıca V2G, V2H, V2V gibi işletim topolojileri daha kolay ve verimli uygulanabilmektedir.

4.2.4. Fiziksel altyapı mimarisi-4: Yeni altyapı tesisi ile DA mikroşebeke

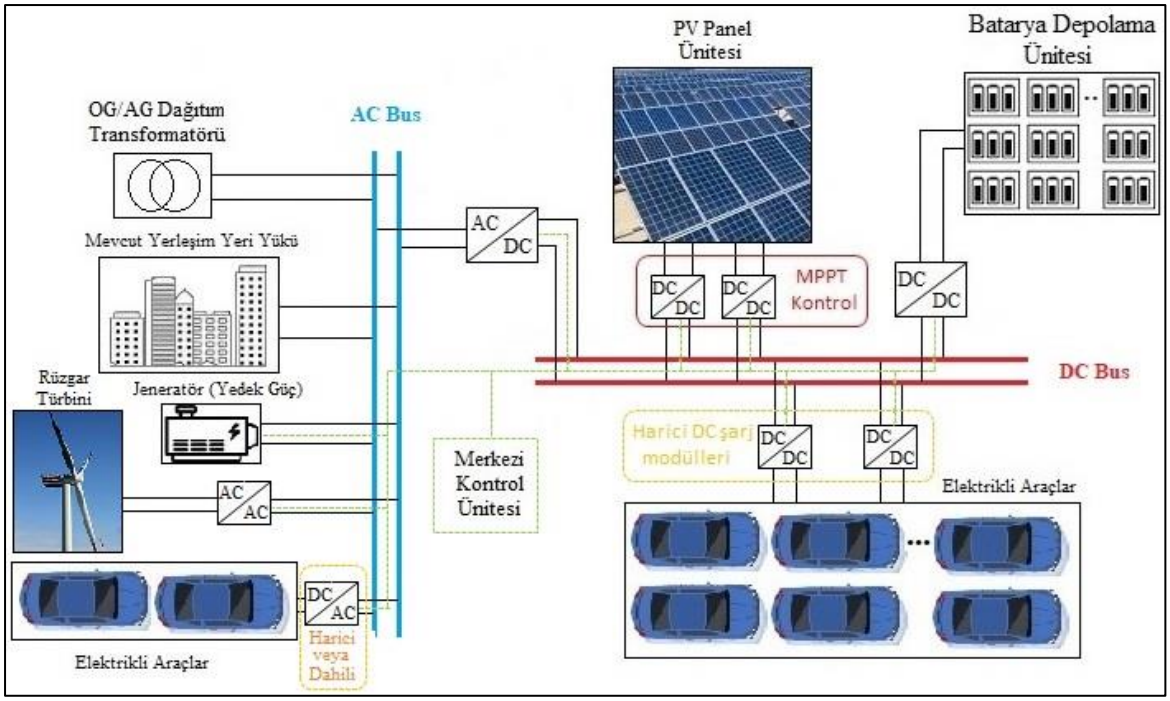
Mimari-3 için öngörülen altyapı topolojisinde var olan yeteneklerin tamamı bu mimari için de geçerlidir. Mikroşebeke alt sistemleri bu topolojide de yer almaktadır. Yeni bir OG/AG transformatörü ve alt sistemleri öngörüldüğü için şarj kapasitesi mevcut şebeke altyapısı kullanımına göre çok daha yüksektir. Bu sayede SAE standartlarına göre tüm DA seviye limitlerinde şarj mümkündür. Günümüzde henüz yaygın bir istasyon mimarisi değildir fakat kontrol edilebilirlik, YEK entegrasyonunun kolay olması ve aynı standartlarda AA mikroşebekeye göre maliyet olarak daha düşük olması gibi sebeplerle bu mimari gelecek için önemli bir model oluşturacaktır.



Şekil 4.6. Yeni altyapısı tesisi ile DA mikroşebeke

4.2.5. Fiziksel altyapı mimarisi-5: Hibrit mikroşebeke

Şekil 4.7' da hibrit mikroşebeke altyapısındaki şarj istasyonu mimarisi verilmiştir. Bu mimari hem DA hem de AA şarj topolojisinin avantajlarını barındırır. İçerisinde çok sayıda sistem ve ekipman barındırdığı için kurulum maliyeti yüksektir. Fakat ada modunda çalıştığında kendi kendine yetebilecek kaynaklara sahip olması hem hızlı hem de yavaş şarj seviyelerini desteklemesi, rüzgar türbini ve yedek güç jeneratörü entegrasyonun mümkün olması gibi pek çok avantaja sahiptir. Mevcut enerji altyapısının yeterli düzeyde olmaması sebebiyle öngörülen hibrit şebeke yeni şehirleşen bölgeler için uygun bir şarj noktası mimarisidir.

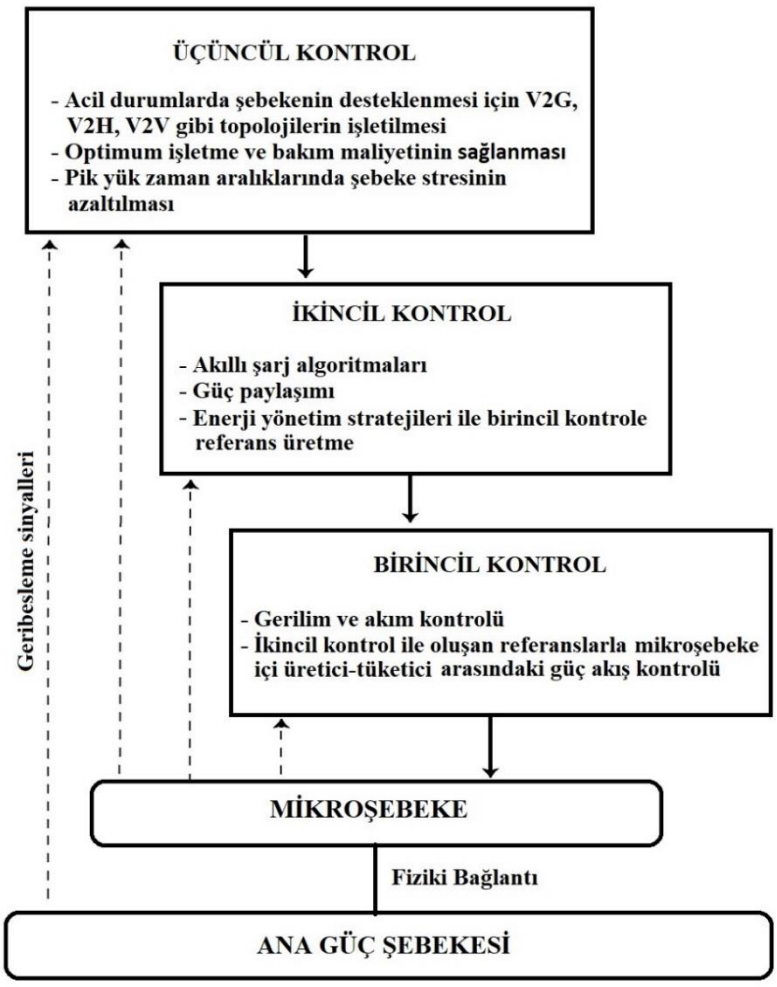


Şekil 4.7. Hibrit Mikroşebeke

4.3. Elektrikli Araç Şarjı için Hiyerarşik Kontrol Yöntemleri

Şarj noktaları, araç şarjı ile şebeke arasındaki fiziksel bağlantı alanlarıdır. Bu anlamda şarj noktalarını yukarıda öngörülen mikroşebeke mimarilerine göre dizayn etmek çok kritiktir. Yani araç şarjının en doğru şekilde kontrol edilebilmesi için mikroşebeke mimarisinin var olması şarttır. Bu sebeple elektrikli araç şarjının kontrolü için mikroşebeke kontrol yöntemleri üzerinden bir hiyerarşik sınıflandırma yapmak doğru olacaktır.

Mikroşebekenin hem ekonomik hem de istikralı bir şekilde çalışabilmesi için kontrol hiyerarşisinin; voltaj ve frekans regülasyonu, uygun yük paylaşımı ve dağıtık enerji kaynaklarının koordinasyonu, mikroşebeke ve ana şebeke arasındaki güç akışı kontrolü, mikroşebeke işletme maliyetini optimize etme gibi belli başlı temel görevleri yerine getirmesi gereklidir [102]. Söz konusu bu roller farklı önem ve zaman ölçeklerine sahiptir, dolayısıyla her gereksinimi farklı bir kontrol davranışı içerisinde ele almak gereklidir [103]. Mikroşebekelerin geleneksel hiyerarşik kontrol stratejisi, birincil, ikincil ve üçüncül kontroller olmak üzere üç seviyeden oluşur. Voltaj ve frekans kararlılığının sağlanması ve aktif-reaktif güç paylaşımının sağlanması birincil kontrol iken birincil kontrolden dolayı oluşan voltaj frekans sapmalarının giderilmesi ikincil kontroldür. Üçüncül kontrol ise, mikroşebeke ile ana şebeke arasındaki güç akışını yönetir ve ekonomik olarak en uygun işlemi sağlar. Elektrikli araç şarjının da bu çerçevede dikkate alınması durumunda Şekil 4.8' de verilmiş olan hiyerarşik kontrol stratejisinin kurulması uygun olacaktır.



Şekil 4.8. Şarj istasyonu için hiyerarşik kontrol seviyeleri

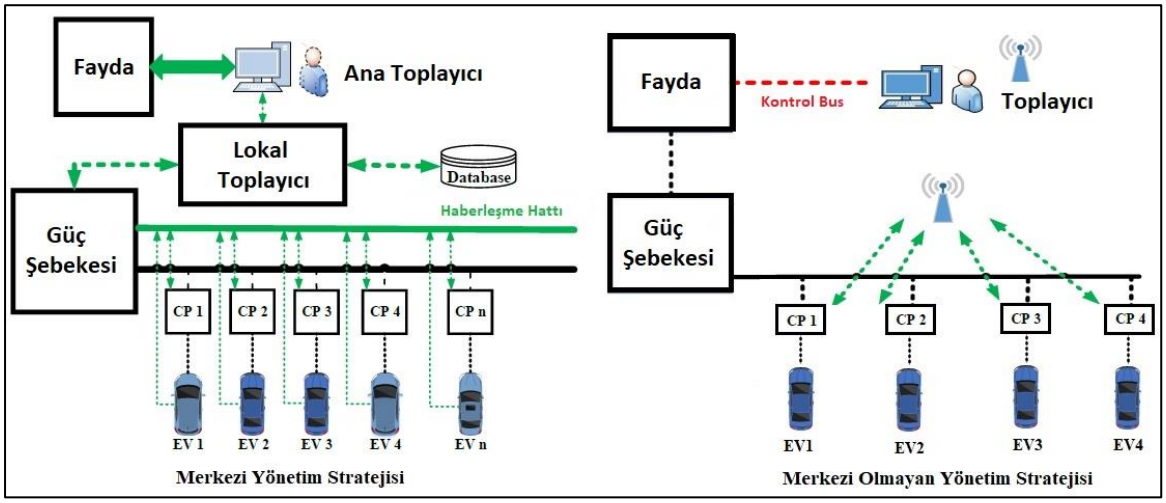
Birincil kontrol, gerilim ve akımı kontrol etmek suretiyle güç akışının kontrol edildiği seviyedir. Genellikle ikincil kontrol seviyesinde oluşturulan referans değerlerine göre kontrol sağlanır. Eğer ikincil kontrol seviyesi dizayn edilmemişse enerji yönetim algoritmasının ürettiği referanslara göre de kontrol edilebilir. Birincil kontrol, akım-gerilim düşüş kontrolörü, kayan kipli kontrolör veya PID gibi kontrolörleri içerir.

İkincil kontrol, akıllı şarj algoritmaları ve güç paylaşım stratejileri ile birincil kontrol seviyesine referans üretilen kontrol basamağıdır. Şarj istasyonu içeresinde güç dağılımı yapılırken eğer dizayn edilmişse üçüncül kontrol seviyesinden de referans alabilir. İkincil kontrolün temel hedefi, yenilenebilir enerjinin maksimum kullanımını gerçekleştirmek, batarya depolama ünitesini en optimum şekilde kullanmak, ana şebekeden kaynaklanan stresi azaltmak, işletme maliyetini azaltmak ve gerekli kısıtlamaları sağlamaktır.

Üçüncül kontrol ise ana şebeke ile iletişim sağlayarak acil durumlarda veya frekans-gerilim durumuna göre şebekenin desteklenip desteklenmeyeceğine (V2G topolojisi) karar verme, ana şebekenin anlık yük durumuna göre şebekeden talep edilecek gücün kısıtlanmasına veya zamana göre enerji birim fiyat değişimine göre en ekonomik işletme için optimum güç paylaşımının sağlanmasına karar veren kontrol seviyesidir. Üçüncül kontrol seviyesi şebekedeki çok sayıda mikroşebeke mimarisindeki şarj istasyonunun ikincil kontrolü için referans üreterek hiyerarşide yer alır. Bu kontrol seviyesinin temel hedefi, düşük işletme maliyetleri, ana şebeke frekansının gerektiğinde desteklenmesi, şebeke anlık yük eğrisinin dengelenmesi ve elektrikli araçların şebekenin mevcut dinamikleri dikkate alınarak şarj edilmesidir.

Bu açıdan üçüncül kontrol seviyesinde oluşturulan çıktılar, ikincil kontroldeki akıllı şarj algoritmaları için referans teşkil eder. Örneğin şebeke puant yük saatlerinde araçların şarj güç seviyeleri sınırlanabilir veya bir çizelgeleme yöntemi ile sıraya konularak şarj işlemi gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte şebekede meydana gelebilecek arz-talep dengesizliğinde frekansın dalgalanması durumunda V2G topolojisi ile şebeke desteklenebilir veya enerjiyi yükün düşük olduğu saatlere kaydırmak için batarya depolama ünitesi ile V2G ve V2H topolojileri işletilebilir. Örnek verilen bu senaryolar çoğaltılabilir. Tüm bu senaryolarda dinamik bir kontrol sağlayabilmek adına bu 3 kontrol seviyesinin de en doğru şekilde dizayn edilmesi gerekir.

Mikroşebeke mimarisine göre tasarlanmış bir şarj istasyonu 2 tip yönetim stratejisi ile kontrol edilmektedir. İlk olarak merkezi yönetim stratejisi diğeri ise merkezi olmayan yönetim stratejisidir. Merkezi yönetim stratejisinde lokal bir toplayıcı şarj istasyonundaki elektrikli araçların şarj parametrelerini (şarj kapasitesi, şarj oranı, SOC vb), YEK ve batarya depolama ünitesinin bilgilerini alarak bir database içerisinde tutar. Toplu enerji gereksinimlerine dayalı olarak, her yerel toplayıcı, şebeke operatörü ile bir sözleşme yapar [104]. Farklı yerel toplayıcılardan sözleşmeler alındıktan sonra şebeke operatörü, diğer yükleri, farklı kaynakların güç üretim kapasite seviyelerini ve diğer sistem kısıtlamalarını göz önünde bulundurarak, sözleşme kapsamındaki her bir toplayıcı için uygun enerji paylaşımına karar verir. Merkezi olmayan yönetim stratejisinde ise tüm bilgiler doğrudan şebeke operatörüne gönderilir. Şebeke operatörü toplanan veriler ışığında uygun enerji paylaşımını yapar. Şekil 4.9' de merkezi ve merkezi olmayan yönetim stratejilerinin topolojileri verilmiştir [96].



Şekil 4.9. Merkezi ve merkezi olmayan yönetim stratejilerinin topolojisi [94]

Bu tez çalışmasında ise tarif edilen 3 kontrol seviyesi kullanılarak özgün bir akıllı şarj stratejisi geliştirilmiştir. Çalışma merkezi yönetim strateji mimarisi ile tasarlanarak uygulanmıştır. Yapılan simülasyon ve uygulama çalışması ile sonuçlar analiz edilmiştir.

4.4. Elektrikli Araç Şarjı için İşletim Topolojileri

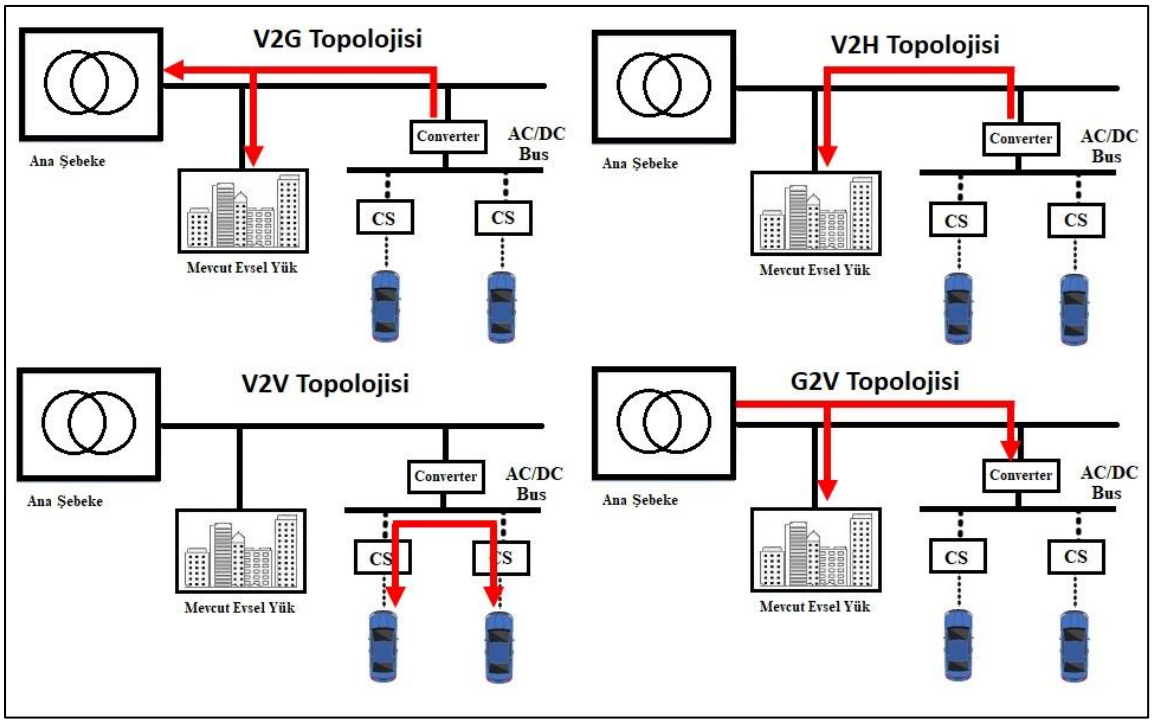
Günümüzde elektrikle çalışan aletlerin veya sistemlerin hızla artması ana şebeke üzerinde giderek artan bir yük anlamına geliyor. Özellikle elektrikli araçlar, şebeke üzerinde lokal veya genel puant yük oluşturabilecek nitelikte olduğu için bu artış yakın gelecekte çok daha hızlı yükselecektir. Bununla beraber özellikle elektrikli aracın şebeke üzerinde oluşturacağı bu yükü azaltacak topolojiler son dönemde araştırmacılar tarafından önerilmektedir. Araştırmacılar bu çözümü yine elektrikli araçların kendisinde görüyorlar. Bu bağlamda araçların bataryalarını kullanarak V2G (araçtan şebekeye), V2H (araçtan eve) veya V2V (araçtan araca) topolojilerinin işletilmesi bir fırsat olarak görülmeye başlamıştır.

V2G topolojisi araçların bağlı oldukları şarj noktasının hiyerarşik bir şekilde kontrol edilerek şebekeye elektrik enerjisi vermesidir. Bu bağlamda verilen güç, aktif veya reaktif nitelikte olabilir. Dolayısıyla elektrikli araçlar reaktif güç kompanzatörü olarak da kullanılabilir. Kısaca ana şebekeyi bir mikroşebeke gibi kabul edersek şarj istasyonları da dağıtık batarya depolama üniteleri gibi düşünülebilir. Bunun için çok sayıda şarj noktasının, şebeke operatörü tarafından mevcut durumdaki veriler incelenerek en uygun şekilde kontrol edilmesi gerekir. Yani bir önceki konuda anlatılan hiyerarşik kontrol seviyelerinin merkezi veya merkezi olmayan yönetim mimarisinde işletilmesi gerekir.

V2H topolojisi mevcut şebeke altyapısı üzerine kurulmuş şarj noktaları için önerilmiş bir yönetim prensibidir. Bu topoloji ile şebeke stresinin azaltılması için şarj noktasının bağlı olduğu mevcut evsel yükün araç bataryaları ile beslenmesi hedeflenir. Kontrol edilmesi ikincil kontrol seviyesinde sağlanır. V2G' e göre daha lokal bir çözüm olduğu için işletilmesi kolay ve verimlidir. Bu sebeple araştırmacılar akıllı şarj algoritmalarında bu topolojiyi sıklıkla öngörmüşlerdir.

V2V topolojisi ise tüm şarj istasyonu mimarileri için kullanılabilecek yeni bir yönetim prensibidir. Mikroşebeke prensibine göre tasarlanmış bir şarj istasyonunda, elektrikli araçlar arasında gerçekleştirilen enerji alışverişi ile şebeke stresinin azaltılması ve batarya depolama sistemlerinin yapabileceği fonksiyonların yerine getirilmesi temel hedeflerdir. Bu topolojinin işletilmesinde en kritik husus verilen enerji ile alınan enerjinin kayıplar da dikkate alınarak kontrol edilmesidir. Bu yapılmadığı takdirde ortak AA şarj alanı için

frekans ve gerilim kararsızlığı, ortak DA şarj alanı için gerilim kararsızlığı ortaya çıkacaktır. Bununla beraber V2V ve V2H topolojilerini sadece aynı istasyon içindeki enerji alışverişi olarak değerlendirmemek gerekir. Blockchain benzeri platformlar aracılığıyla bataryadan enerji satmak isteyen bir kullanıcı ile şebeke tarifesinden daha uygun fiyatlı enerji almak isteyen farklı istasyondaki bir başka kullanıcı arasında ticari bir akitle enerji alışverişi olabilir. Bunun aynısı konut kullanıcıları ile araçlar arasında da gerçekleştirilebilir. Son yıllarda araştırmacılar şebeke stresini azaltmak ve optimum maliyet hedefleriyle bu konuda çalışmalar yapmaktadır. Şekil 4.10' da bu topolojiler için enerji akışının gösterildiği sembolik mimariler verilmiştir.



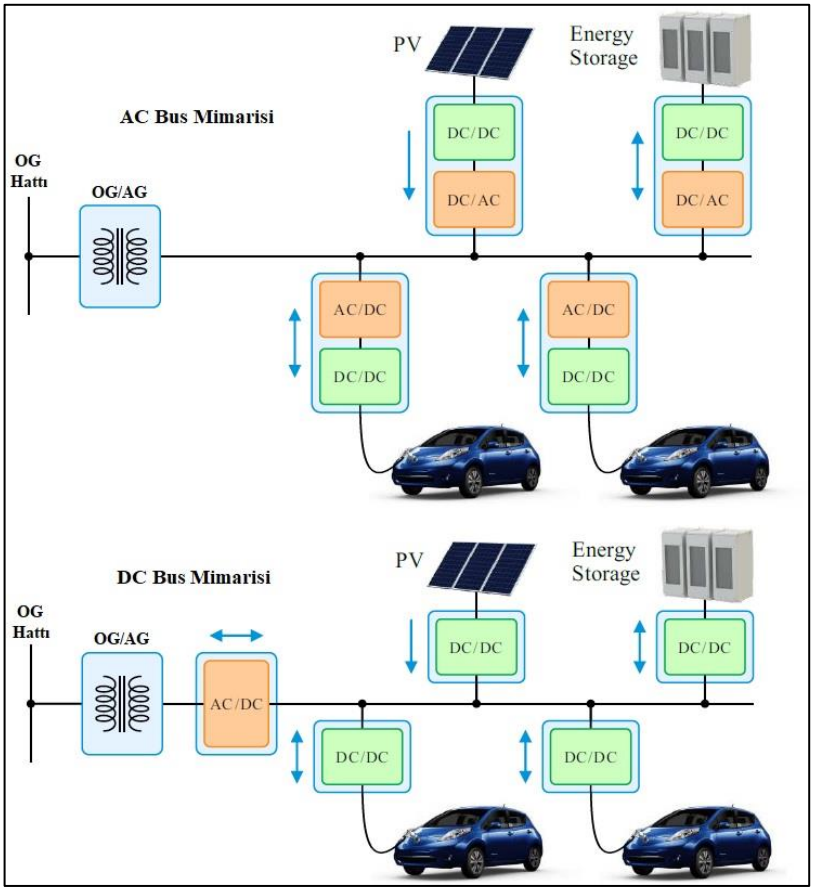
Şekil 4.10. Elektrikli araç şarjının işletim topolojileri için sembolik mimariler

Literatürde şarj istasyonu içindeki akıllı şarj algoritmasının geliştirilmesinde kullanılan temel iki yaklaşım vardır [105]. Birincisi kural tabanlı yaklaşımdır. Bu yaklaşımda deneyime dayalı kural veya formüllerle algoritma geliştirilir. Bu sayede değişken girişlere göre her an dinamik sonuçlar verecek bir algoritma geliştirilebilir. İkincisi ise optimizasyon tabanlı algoritmalardır. Bu tip yaklaşımlarda en iyi sonucu bulmak için bir optimizasyon yapılarak sonucunda şarj istasyonu yönetilir. En iyi sonuç bulunur fakat şarj istasyonları elektrikli araçların sürekli olarak istasyona giriş-çıkış yapması sebebiyle stokastik bir davranış sergiler. Dolayısıyla ilk durum koşulları için yapılan optimizasyon sürekli değişiklik gösterecektir. Bu sebeple örneğin elektrikli araçlar için bir ötelemeli

çalışma öngörülüyorsa ilk durum koşullarına göre optimizasyon yapılır ve şarj işlemi bitene kadar herhangi bir aracın istasyondan çıkmadığı veya girmediği kabullenilerek şarj işlemi gerçekleştirilir. Fakat gerçekte bu durum mümkün değildir. Bu sebeple sezgisel kural tabanlı yaklaşımların uygulanabilirlik açısından daha uygun olduğu değerlendirilmektedir.

4.5. Şarj Modülleri ve Alt Sistem Topolojileri

Şarj modülleri incelenirken şarj alanının hangi mimaride tasarlandığı çok önemlidir. Çünkü şarj modüllerinin devre topolojileri buna göre şekillenmektedir. Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere temelde AA bus ve DA bus olmak üzere 2 tip şarj mimarisi öngörülmektedir. Eğer şarj alanı AA bus mimarisinde ise dahili (on-board) ve harici (off-board) kaskat bağlı AA/DA çevirici ve DA/DA çevirici devre topolojileri kullanılır. DA bus mimarisinde ise harici DA/DA çevirici devre topolojileri kullanılır. Şekil 4.11'da farklı şarj istasyonu mimarilerine göre kullanılan devre topolojileri verilmiştir [106].

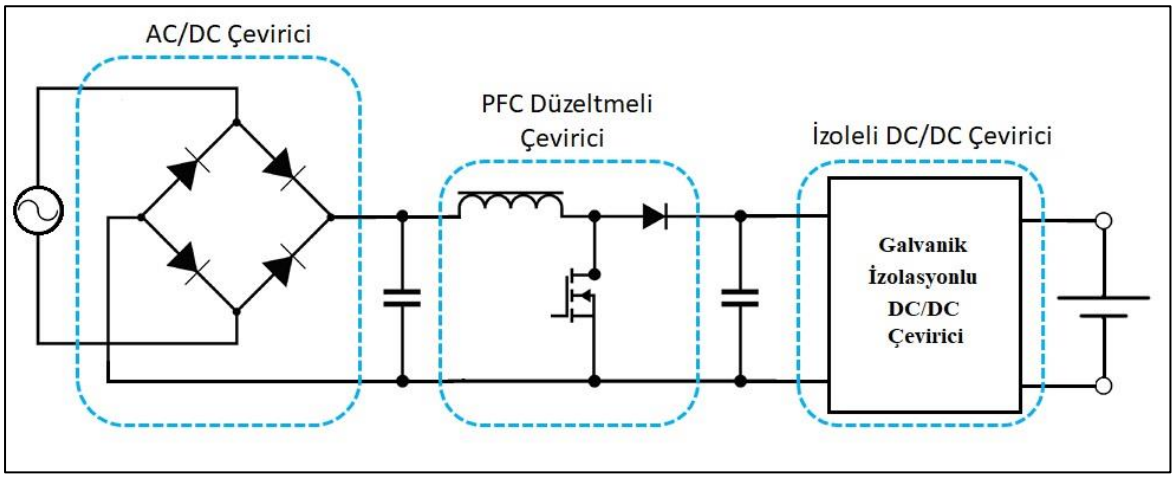


Şekil 4.11. Farklı şarj mimarisindeki istasyonlar için şarj modüllerinin topolojileri [106]

4.5.1. AA bus için kullanılan şarj modülleri

Bu mimaride kullanılan devre topolojileri izolasyonlu veya izolasyonsun tipte tasarlanmaktadırlar. İzolasyonsuz devre topolojileri güvenlik kaygılarından dolayı endüstriyel alanlarda kullanılmazlar. Genellikle deneme veya test maksadıyla tasarlanır ve kullanılırlar [107].

İster dahili ister harici olsun AA bus için tasarlanan izolasyonlu devre topolojisi izoleli AA/DA veya izoleli DA/DA olmak üzere 2 farklı şekilde tasarlanabilir. AA/DA dönüştürücü tarafında kullanılan galvanik izolasyon trafosu şebeke frekansında çalışmaktadır. Bu durum ağırlık ve hacim açısından büyük bir dezavantaj oluşturur. DA/DA dönüştürücü tarafında kullanılan izolasyon trafosu ise yüksek frekansta çalışabildiği için hacim ve ağırlık bakımından avantaj sağlar. Bu anlamda tasarlanan şarj modüllerinde izolasyon genellikle DA/DA çevirici kısmında kullanılır. Şekil 4.12' de ideal bir şarj modülünün genel mimarisi verilmiştir.



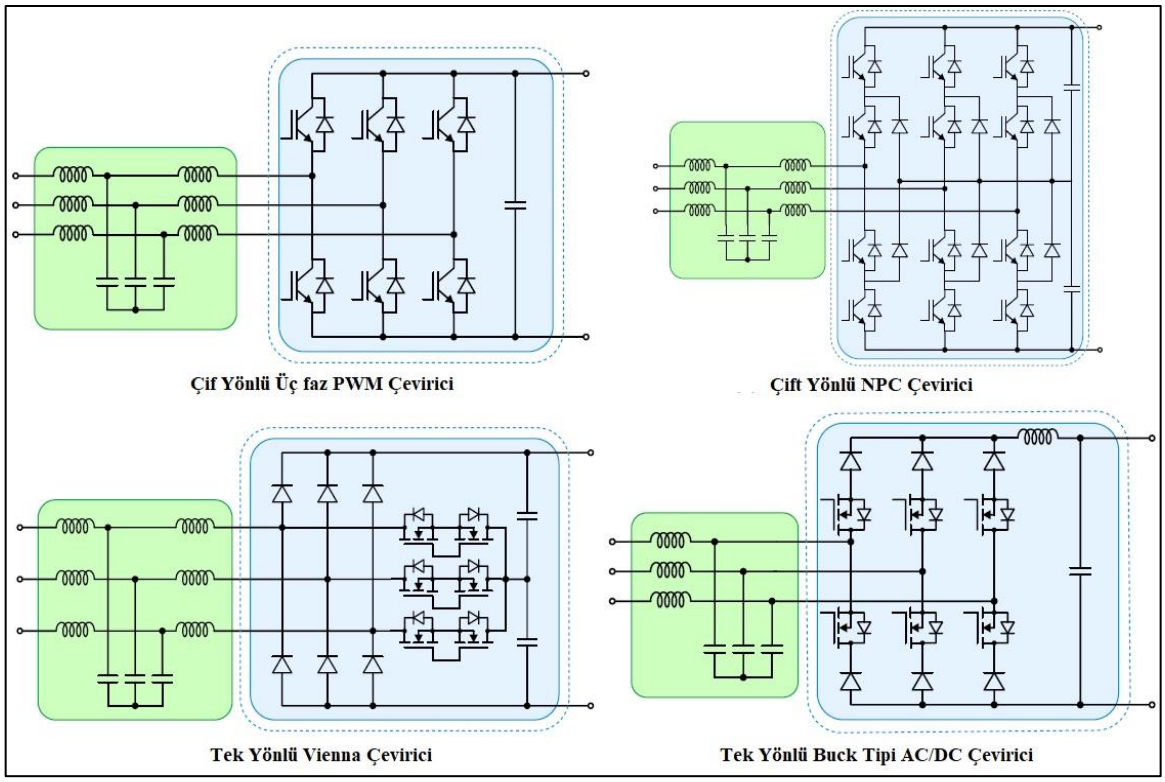
Şekil 4.12. AA bus için ideal şarj modülünün genel mimarisi

AA/DA çevirici devre mimarileri

Dahili ve harici şarj modüllerinin çift taraflı enerji akışını destekleyebilmesi için AA/DA çeviriciler çoğunlukla tam kontrollü olarak tasarlanırlar. Bununla beraber hacim, ağırlık ve verim gibi kaygılar sebebiyle galvanik izolasyonun bu devrede kullanılması genellikle tercih edilmez.

En yaygın kullanılan çift yönlü AA/DA çevirici, LCL filtreli üç faz tam dalga PWM çeviricidir. Altı yarı iletkenli PWM dönüştürücü, düşük harmonik giriş akımları üretir ve çift yönlü güç akışı sağlar. Bu topolojinin basit yapılı olması, iyi kurulmuş kontrol şemalarının olması ve yeterli akım ve gerilim derecelerine sahip düşük maliyetli yarı iletken malzemelerle tasarlanmış olması en son teknoloji ürünü DA hızlı şarj cihazlarında geniş çapta yer bulmasını sağlamıştır [108]. Yaygın kullanılan bir diğer çift yönlü AA/DA dönüştürücü nötr nokta kenetlemeli (NPC) çeviricilerdir. Bu çeviricinin üç faz tam dalga PWM çeviriciden üstünlüğü daha düşük harmonik akım ve dv/dt oranıdır.

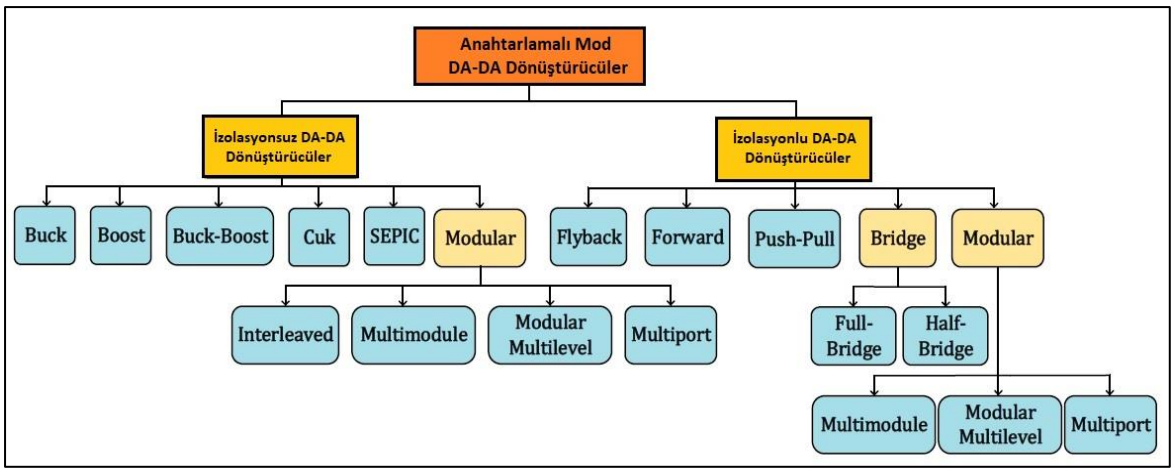
Yanlızca tek yönlü enerji akışı gerekiyorsa anahtar sayısı azaltılmış vienna çevirici topolojisi bir çözüm olabilir. Bir diğer çözüm ise buck tipi AA/DA çeviricidir. Bu devre ise işletme güvenliği açısından daha etkili bir çözümdür. Fakat çift yönlü olmamaları ve sınırlı reaktif güç kontrolüne sahip olmaları nedeniyle genellikle şarj modülleri içerisinde tercih edilmezler. Şekil 4.13' de şarj modüllerinde kullanılan AA/DA çevirici devre topolojileri verilmiştir [106].



Şekil 4.13. Şarj modüllerinde kullanılan AA/DA çevirici devre topolojileri [104]

DA/DA çevirici devre mimarileri

DA/DA dönüştürücü topolojileri genel olarak izole edilmemiş ve izole edilmiş topolojiler olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılırlar. Şekil 4.14, izole edilmiş ve izole edilmemiş topolojilere dayalı DA-DA dönüştürücülerin sınıflandırmasını göstermektedir. Temel fark, giriş ve çıkış arasında orta/yüksek frekanslı bir ara transformatör aracılığıyla elektriksel izolasyonun sağlanmasıdır [107].



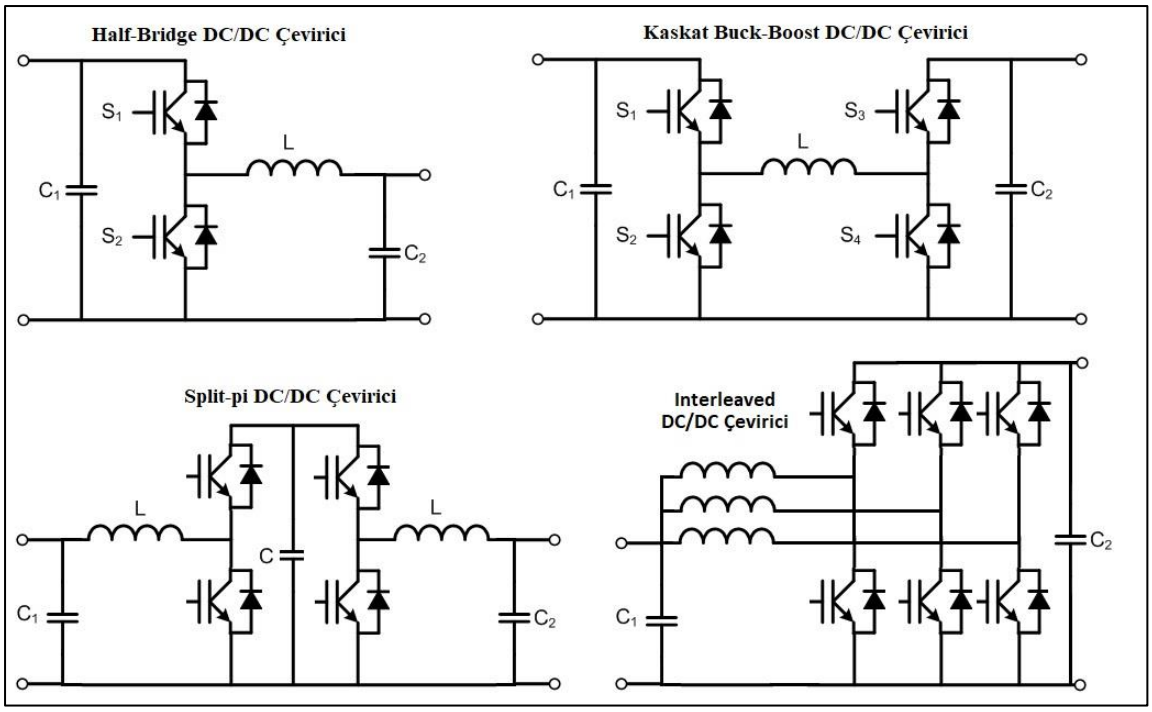
Şekil 4.14. DA/DA dönüştürücülerin sınıflandırılması [109]

Elektrikli araç şarjı için çift yönlü çevirici topolojileri önerildiği için çift yönlü izolasyonlu ve izolasyonsuz devre mimarileri tanıtılmıştır. Şekil 4.15' de yaygın kullanılan bazı izolasyonsuz çift yönlü DA/DA çevirici mimarileri verilmiştir.

Half-bridge DA/DA çevirici, çift taraflı enerji akışını destekleyen, kontrolü kolay en temel çift yönlü çevirici topolojisidir. Fakat güç kapasitesi sınırlıdır.

Kaskat buck-boost DA/DA çevirici, yine kolay kontrol edilebilir ve daha kararlı devre yapısına sahiptir. Çift yönlü hem yükselten hem de azaltan modda çalışabilir.

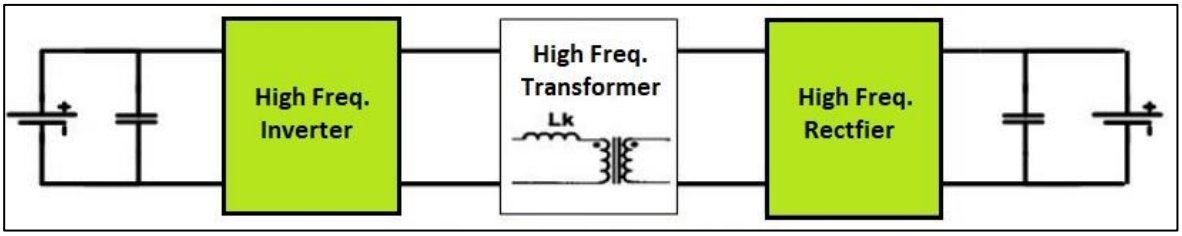
Split-pi DA/DA çevirici, diğer DA-DA dönüştürücüler arasında nispeten yeni bir topolojidir. Elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme olarak çok sayıda uygulama alanına sahiptir. Bir split-pi dönüştürücüde kullanılan pasif bileşenler boyut olarak oldukça küçüktür ve verim çok daha yüksektir. Ayrıca, çıkış akımı dalga formundaki anahtarlama kayıpları, bozulmalar ve dalgalanmalar nispeten daha azdır [110].



Şekil 4.15. İzolasyonsun çift taraflı DA/DA çevirici devre topolojileri

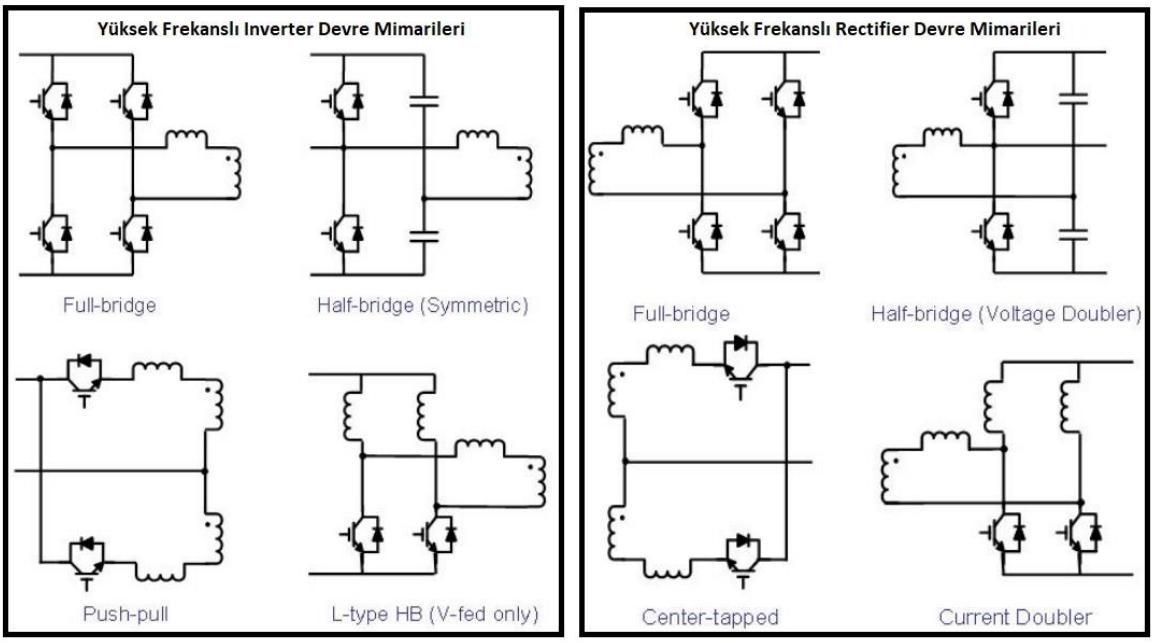
Interleaved DA/DA çevirici ise akım kapasitesi daha yüksek ve çıkış gerilim-akım dalgalılık oranı daha düşük bir devre topolojisine sahiptir. Half-bridge çevirici gibi kontrolü kolaydır.

İzolasyonlu çift yönlü DA/DA çeviriciler ise PWM kontrollü bir inverter (evirici), yüksek frekanslı bir transformatör ve yine PWM kontrollü bir rectifier (doğrultucu) bloklarından oluşur. Şekil 4.16' da izolasyonlu bir DA/DA çeviricinin devre blok topolojisi verilmiştir.



Şekil 4.16. İzolasyonlu çift taraflı DA/DA çevirici blok topolojisi

Devre blok topolojisi incelendiğinde çift yönlü DA/DA çevirici mimarileri farklı varyasyonlarla tasarlanabilir. Şekil 4.17' de inverter ve rectifier için öngörülen yaygın devre topolojileri verilmiştir [111]. Literatürde ortaya konulan izolasyonsuz çift yönlü DA/DA çeviriciler bu devrelerin varyasyonları veya temeliyle tasarlanmaktadır.



Şekil 4.17. Çift yönlü DA/DA çevirici için başlıca inverter ve rectifier topolojileri [111]

Bu topolojiler, full-bridge inverter ve rectifier, half-bridge inverter ve rectifier, push-pull inverter ve center-tapped rectifier, L-type half-bridge inverter ve current-doubler rectifier devre yapılarını içerir.

4.5.2. DA bus için kullanılan şarj modülleri

Şekil 4.10' da verilen DA bus mimarisinde kullanılan çeviriciler galvanik izolasyonlu çift yönlü DA/DA çeviricilerdir. Bu açıdan Şekil 4.15' de verilen inverter ve rectifier devre topolojilerinin varyasyonlarıyla tasarlanan DA/DA çeviriciler elektrikli araç şarjı için kullanılmaktadır. Günümüzde DA bus mimarisine sahip şarj istasyonu çok yaygın olmasa da pek çok avantajından dolayı yakın gelecekte yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

Bu tez çalışasında, laboratuvar ortamında MRTC algoritmasının denenebilmesi için half-bridge çift yönlü izolasyonsuz DA/DA çevirici tasarlanmıştır. Bu devre mimarisi, laboratuvar ortamında çalışmak için ideal olması, maliyet olarak düşük olması ve kontrolünün kolay olması sebebiyle tercih edildi. Bununla beraber DA/DA çeviriciden çok sayıda üretileceği için çok sayıda yarıiletken devre elemanının PWM ile kontrol edilmesi gerekecektir. Bu çerçevede değerlendirildiğinde kullanılacak olan mikrokontrolörün kapasitesinin aşılmaması için de bu devre topolojisi en uygun tercih olmuştur.

5. METASEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Önerilen MRTC algoritmasının en iyi sonucu bulabilmesi için metasezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu bağlamda Symbiotic Organisms Search (SOS), Artificial Bee Colony (ABC), Biogeography-Based Optimization (BBO), Differential Evolution (DE), Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Reptile Search Algorithm (RSA) ve Runge Kutta (RUN) olmak üzere 8 ayrı metasezgisel optimizasyon algoritması her durum çalışması için ayrı ayrı test edilmiştir. Bu sebeple bu bölümde kullanılan optimizasyon yöntemleri kısaca tanıtılmıştır.

5.1. SOS Optimizasyon Yöntemi

SOS algoritması Cheng ve Prayogo tarafından 2014 yılında önerilmiştir [112]. Bu yeni öneri, basit ve güçlü bir metasezgisel arama algoritmasıdır. SOS algoritması, canlılar arasındaki ortak davranış gibi çalışır. Doğada canlılar yalnız yaşamazlar ve her canlı, doğada yaşamak için diğer canlılara bağlıdır. Her iki tür arasında var olan bu karşılıklı iş birliği simbiyotik olarak adlandırılır. Doğadaki simbiyotik bağların bazıları, karşılıkcılık (mutualism), ortakçılık (commensalism) ve asalaklık (parasitism)'tır. SOS algoritması doğadaki bu simbiyotik ilişkiden esinlenerek geliştirilmiştir. SOS algoritmasında bir ekosistem çözüm adaylarından oluşur. Ekosistemde, "eko" organizmanın numarasıdır. Sonlandırma kriterleri ise ekosistemdeki en uygun çözümü arama işlemini durdurmak için tanımlanmıştır [113].

5.2. ABC Optimizasyon Yöntemi

Sürü halinde yaşayan arıların yiyecek arama sürecinde sosyal davranışlar sergilerler. Bu süreçte arılar kendi aralarında bir iş bölümü yapar, değişen şartlara göre iş bölümünde değişik roller üstlenirler ve sürüye hiçbir dış etki olmadan kendi içerisinde organize olabilirler. Ayrıca bulmuş oldukları yiyecek kaynaklarının kalitesini belirleme ve birbirleriyle haberleşerek bu kaynaklar hakkında bilgi paylaşımında bulunma arıların yiyecek arama süreci içerisinde sergilemiş oldukları zeki davranışlar arasındadır. ABC algoritması bu tür zeki davranışları gerçeğine uygun bir şekilde modelleyen bir optimizasyon tekniğidir [114].

5.3. BBO Optimizasyon Yöntemi

BBO 2008 yılında Dan Simon tarafından geliştirilen yeni bir biyo-ilham ve popülasyon tabanlı optimizasyon tekniğidir ve Robert MacArthur ve Edward Wilson tarafından biyocoğrafya'nın matematiksel modellerinden esinlenilmiştir. Biyocoğrafya doğadaki türlerin dağılımının bir çalışmasıdır. Her olası çözüm bir adadır ve uygunluk endeksi değişkenleri (SIV) adı verilen yaşanabilirliği karakterize eden özelliklere sahiptir. Her çözümün özüne kendi yaşam uygunluğu endeksi denir (HIS). BBO' da bir yaşam ortamı H, rastgele başlatılan SIV' lerin bir vektörüdür ve daha sonra hedefe ulaşmak için asgari göç ve mutasyon adımını takip eder [115].

5.4. DE Optimizasyon Yöntemi

DE optimizasyon problemleri için Price ve Storn tarafından 1996 yılında geliştirilmiş kullanımı kolay, tekniği sağlam bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma doğrusal olmayan ve türevi alınamayan sürekli fonksiyonları minimize etmek amacıyla yeni bir yaklaşım olarak sunulmuştur. DE sayısal optimizasyon yöntemleri için geliştirilmiş bir algoritmadır. Bu algoritma öncekilerden farklı olup kolay olmayan etkin bir mutasyon yöntemi uygulamaktadır. Önceleri tanımlı olan, olasılık dağılım fonksiyonuna dayalı olarak çalışan GA gibi gelişim tabanlı algoritmaların aksine DE gelişigüzel olarak seçilen amaç vektör çiftlerinin farklarına dayanan bir mutasyon yöntemi kullanır. DE 'de uygulanan basit mutasyon yöntemi algoritmanın başarısını arttırmakta ve onu daha güçlü yapmaktadır [116].

5.5. GA Optimizasyon Yöntemi

Doğada canlılar yaşam süreleri boyunca edindikleri bir takım fiziksel, biyolojik özellikleri ya da yetenekleri genler vasıtasıyla bir sonraki nesle aktarırlar. Böylece her nesil, yaşam ortamına adaptasyon açısından, önceki nesillere göre daha üstün hale gelmiş olur. Yeni bireylerin meydana gelmesi sırasında rastgele iki bireyden alınan genler birleşerek yeni bir gen yapısı ve yeni bir birey meydana getirir. Yeni birey, kendini meydana getiren bireylere ait özelliklerinin tesadüfi bir karışımını ihtiva eder. Bu karışım genlerin birleşmesi sırasındaki çaprazlama işleminden kaynaklanır. Yeni birey hem olumlu hem de olumsuz özelliklere sahip olabilir. Olumsuz özelliklere sahip olan birey doğada yaşamını

sürdüremez ve yok olur. Bu duruma doğal seleksiyon denir. Olumlu özellikleri taşıyan birey ise yaşamını sürdürür ve bu sırada değişim geçirerek yeni özellikler de kazanır, buna mutasyon denir. Kendini geliştiren bu bireyler tekrar üreyerek yeni nesle hem atalarından gelen olumlu özellikleri hem de yeni kazandıkları olumlu özellikleri aktarır. Böylece nesil kendini geliştirerek var olmaya devam eder ve yeniden ürer. Bu döngü canlılar hayatta kalabildiği sürece devam eder. Genetik algoritma bahsedilen bu döngüden esinlenilerek 1975 yılında J. Holland ve Goldberg tarafından geliştirilmiştir [117].

5.6. PSO Optimizasyon Yöntemi

PSO, sürü halinde hareket eden balıklar ve böceklerden esinlenerek Kenedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir. Temel olarak sürü zekasına dayanan bir algoritmadır. Sürü halinde hareket eden hayvanların yiyecek ve güvenlik gibi durumlarda, çoğu zaman rasgele sergiledikleri hareketlerin, amaçlarına daha kolay ulaşmalarını sağladığı görülmüştür. PSO bireyler arasındaki sosyal bilgi paylaşımını esas alır. Arama işlemi birey sayısı kadar yapılır. Her bireye parçacık denir ve parçacıklardan oluşan popülasyona da sürü denir. Her bir parçacık kendi pozisyonunu, bir önceki tecrübesinden yararlanarak sürüdeki en iyi pozisyona doğru ayarlar. PSO, temel olarak sürüde bulunan bireylerin pozisyonunun, sürünün en iyi pozisyona sahip olan bireyine yaklaştırılmasına dayanır [118].

5.7. RSA Optimizasyon Yöntemi

RSA timsahların doğal ortamlarından, avlanma ve sosyal davranışlarından ilham alır. Timsah davranışı iki aşamalıdır. Birincisi keşif (global) ve sömürü (lokal) ikincisi kurbanı çevreleme ve avlamadan oluşur. Bu mekanizmalar, önerilen RSA' yı sağlamak ve optimizasyon prosedürlerini gerçekleştirmek için matematiksel olarak temsil edilmiştir. RSA popülasyon tabanlı ve gradyan içermeyen bir yöntem olduğundan, önceden belirlenmiş kısıtlamalara tabi olan basit ve karmaşık optimizasyon problemlerine uygulanabilir. Timsahlar, dayanıklılıklarını artırdıkları ve aktif iş birliğine izin verdikleri için uyumlu gruplardan yararlanırlar [119].

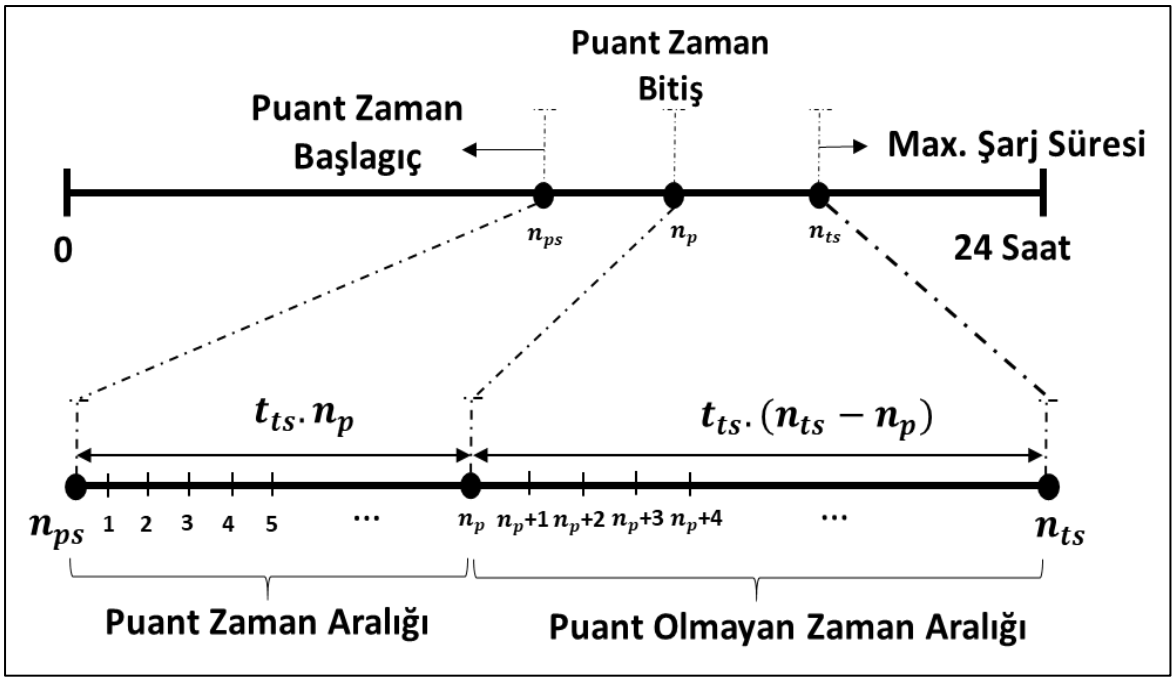
5.8. RUN Optimizasyon Yöntemi

RUN, sayısal yöntemlerde adi diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılan Runge-Kutta yöntemi teorisine dayanmaktadır. RUN' ın iki aşaması vardır; birincisi Runge-Kutta teorisini kullanan arama prosedürü, ikincisi ise geliştirilmiş çözüm kalitesi olarak adlandırılır. RUN algoritması, her iterasyonda mevcut çözümün konumunu güncellemek için Runge-Kutta yöntemine dayanan bir arama mekanizması kullanır. Geliştirilmiş çözüm kalitesi ise amaçlar doğrultusunda kullanılan bir adımdır. Çözümlerin kalitesini artırır ve her iterasyonda yerel optimumlardan kaçınır [120].

6. SİSTEM MODELİ VE TASARIMI

6.1. Sistem Modeli

EA yükü ile mevcut ana yük eğrisinin puant zaman aralıklarının yaklaşık olarak aynı saatlerde oluşması sebebiyle bu çalışmada özellikle puant saat aralığındaki EA yükünün bu zaman aralığına en yakın puant olmayan saat aralığına kaydırılması hedeflenmiştir. Toplam şarj süresi n_{ts} adet dilimlere bölünmüş bir zaman ufku olarak modellenmiştir. Her bir zaman dilimi ise t_{ts} saatlik periyoda sahiptir. Burada toplam şarj süresi puant ve puant olmayan saat aralığından oluşmaktadır. Şekil 6.1' de puant ve puant olmayan saat diliminin yer aldığı toplam şarj zaman aralığı tarif edilmiştir.



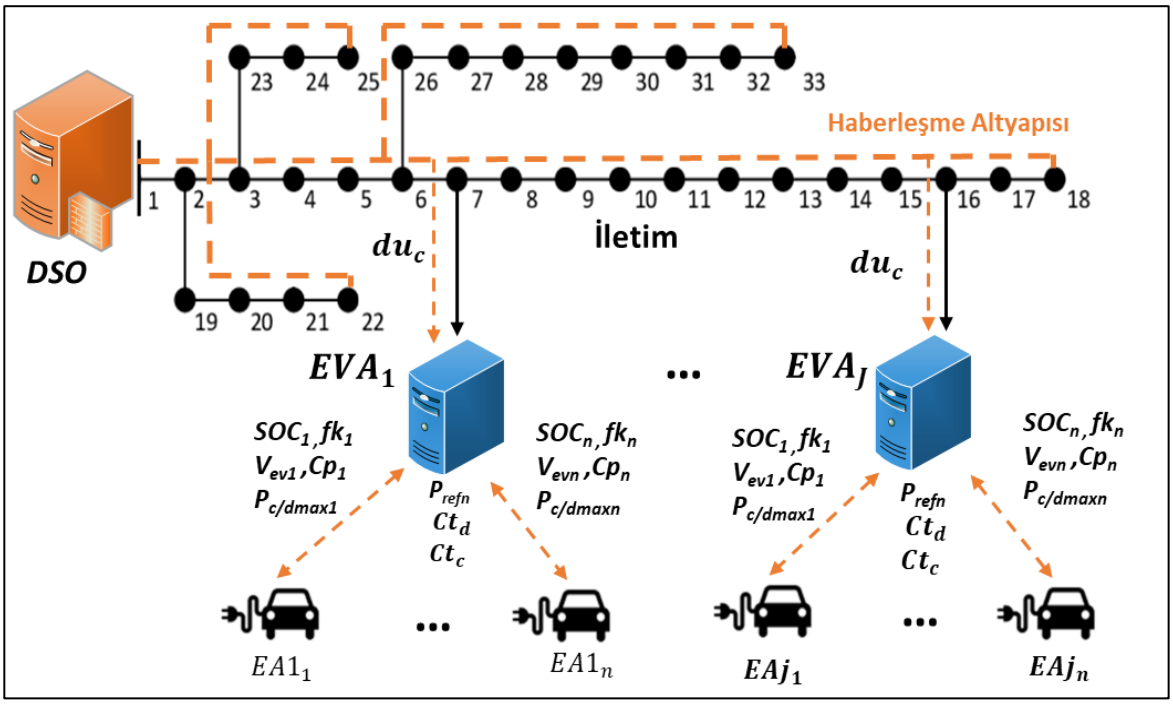
Şekil 6.1. Toplam şarj zaman aralığı

Önerilen algoritmada puant saat diliminin belirlenmesi için gün öncesi yük eğrisinin Electircal Vehicles Aggregaror (EVA) tarafından önceki verilere dayanarak kestirildiği kabul edilmiştir. Tahmini yük eğrisine göre puant saat diliminin başlayacağı nokta, puant saat aralığı ve toplam şarj aralığı belirlenmektedir.

MRTC algoritması, konut alanındaki herhangi bir OG/AG dağıtım noktasına bağlanabilecek EA' ların şarj koordinasyonu için tasarlanmıştır. Algoritmaya göre dağıtım

noktasındaki şarj koordinasyonu, hafıza birimi yüksek fakat hesap yoğunluğu düşük olduğu için işlem kapasitesi yüksek olmayan ve nispeten düşük maliyetli mikrokontrolörlerden oluşan EVA istasyonu tarafından yapılmaktadır.

Anlık tarife bilgisi, enerji birim maliyeti gibi merkezi politika kararlarının belirlenmesi ise Distributed System Operator (DSO) tarafından belirlenmektedir. Veri büyüklüğü yüksek olmadığı ve tek taraflı iletişim öngörüldüğü için haberleşme altyapı maliyetinin de düşük olacağı değerlendirilmektedir. Hatta MRTC algoritması konut alanı şarj istasyonları için önerildiği için mevcut şehir içi fiber altyapısının kullanımı mümkün olabilir. Şekil 6.2' de çalışmada öngörülen algoritma için IEEE-33 node test fideri üzerindeki altyapı konfigürasyonu şekilde verilmiştir.



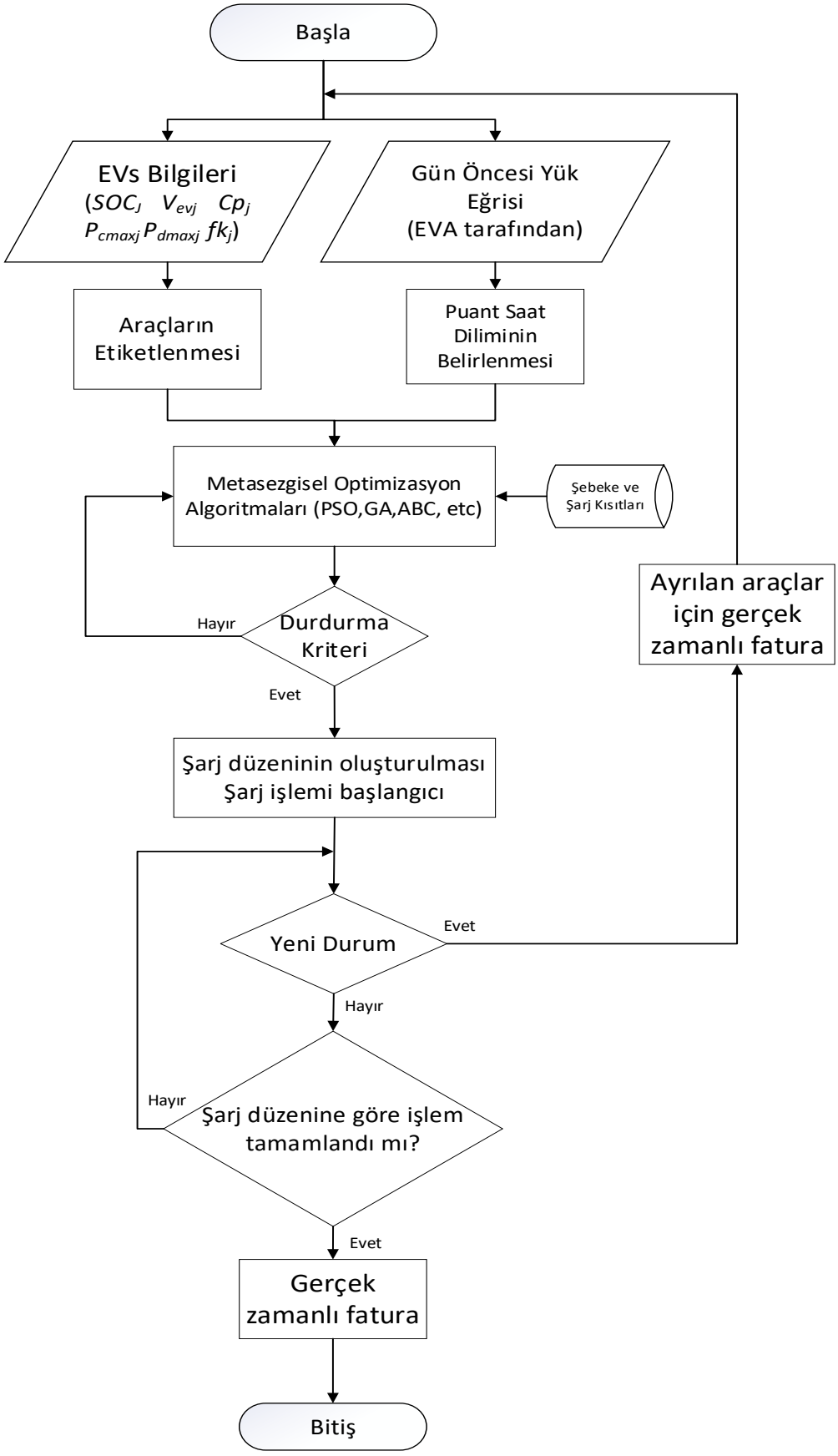
Şekil 6.2. Önerilen algoritmanın 33 node test fideri üzerindeki altyapı konfigürasyonu

EVA, dağıtım noktasına entegre olan araçların koordinasyonunu sağlamak için araç içi kontrol sistemi tarafından gerçek zamanlı olarak takip edilen bazı bilgilere ihtiyaç duymaktadır. Mevcut batarya seviyesi (SOC_j), batarya gerilim seviyesi (V_{evj}), batarya kapasitesi (Cp_j), maksimum şarj deşarj gücü ($P_{c/dmaxj}$), kullanım sıklık indeksi (fk_j) gibi spesifik veriler şarj ünitesi aracılığı ile EVA' ya iletilir. Burada kullanım sıklık indeksi

(fk_j) literatürde yeni bir yaklaşım olup yine araç içi batarya kontrol sistemi tarafından hesaplanabilen ve sürücünün davranışı hakkında ilham veren bir parametredir.

MRTC algoritması için gerekli olan bir diğer bilgi gün öncesi yük eğrisidir. Yük eğrisinin, bağlı olunan dağıtım noktasının önceki verileri dikkate alınarak EVA tarafından tahmin edildiği varsayılmaktadır. Önceki verilerin kayıt altında tutulabilmesi için işlemci harici bir hafıza birimine ihtiyaç duyacaktır. Burada her bir dağıtım noktasının küçük sapmalarla farklı puant yük değişimi sergileyeceği ve her bir noktanın limitleri kurulu güce göre farklılık göstereceği için gün öncesi yük eğrisi kritik bir öneme sahiptir. Özellikle şebeke ve şarj kısıtlarının belirlenebilmesi algoritmanın doğru sonuçlar vermesi açısından önemlidir.

Önerilen algoritmada tüm giriş verilerine göre puant saat aralığı, toplam şarj aralığı ve araç etiketlemeleri belirlenir. Burada araçlar üretici veya tüketici olarak etiketlenirler. Üretici olarak etiketlenen araçlar puant saat dilimi içerisinde lokal enerji sağlayıcı gibi davranır ve yükün dengelenmesine katkı sağlar. Etiketleme ve zaman aralıkları belirlendikten sonra şebeke ve şarj limitlerine göre metasezgisel optimizasyon algoritmasına göre en uygun şarj düzeni oluşturulur. Tüm istasyon için şarj işlemi başlatılır ve işlem bitene kadar sürekli olarak yeni durum kontrolü yapılır. Şarj işlemi bittikten sonra gerçek zamanlı ücretlendirme çıktıları oluşturulur. Şekil 6.3’ te MRTC algoritmasının akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.3. MRTC algoritması akış diyagramı

Geliştirilen algoritmaya göre şarj işlemi devam ederken yeni bir durum oluşması durumunda yeni koşullara göre yeni optimal çözüm üretilerek şarj işlemi yeniden başlatılır.

6.2. Problemin Matematiksel Modeli

Gün öncesi yük eğrisi ile belirlenen puant zaman dilimi içerisinde, d_m adet üretici etiketli aracın her biri için i_m adet parçacık oluşturulmuştur. Her bir parçacık ise n_{ts} adet zaman dilimine bölünmüştür. Dolayısıyla her parçacık n_{ts} boyutlu bir dizi olarak modellenmiştir. Her bir üretici etiketli araç için oluşturulan sürünün matris formunda gösterimi Eş. 6.1' de verilmiştir.

$$pr_{ij}^{d} = \begin{bmatrix} pr_{11}^{d} & pr_{12}^{d} & \cdots & pr_{1j}^{d} \\ pr_{21}^{d} & pr_{22}^{d} & \cdots & pr_{2j}^{d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ pr_{i1}^{d} & pr_{i2}^{d} & \cdots & pr_{ij}^{d} \end{bmatrix} \qquad \begin{matrix} d = 1,2,\dots,d_m \\ i = 1,2,\dots,i_m \\ j = 1,2,\dots,n_{ts} \end{matrix} \qquad i_m, n_{ts}, d_m \in Z^{+} \qquad (6.1)$$

Aynı şekilde k_m adet tüketici etiketli araçların her biri için i_m adet parçacık oluşturulmuştur. Her bir parçacık ise n_{ts} adet zaman dilimine bölünmüştür. Her bir tüketici etiketli araç için oluşturulan sürünün matris formunda gösterimi Eş. 6.2' de verilmiştir.

$$cn_{ij}^{k} = \begin{bmatrix} cn_{11}^{k} & cn_{12}^{k} & \cdots & cn_{1j}^{k} \\ cn_{21}^{k} & cn_{22}^{k} & \cdots & cn_{2j}^{k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ cn_{i1}^{k} & cn_{i2}^{k} & \cdots & cn_{ij}^{k} \end{bmatrix} \qquad \begin{matrix} k = 1,2,\dots,k_m \\ i = 1,2,\dots,i_m \\ j = 1,2,\dots,n_{ts} \end{matrix} \qquad i_m, n_{ts}, k_m \in Z^{+} \qquad (6.2)$$

Şarj istasyonuna bağlı üretici araç sayısı d_m, tüketici araç sayısı k_m ve puant saat dilimi n_p olmak üzere TP_{ep} toplam üretilen enerji ve TP_{ec} toplam tüketilen enerji miktarları Eş. 6.3 ve Eş. 6.4' e göre hesaplanır. Model içerisinde şarj ünitesinin verimi şebeke tarafından bakılarak değerlendirilmiştir.

$$TP_{ep} = \sum_{d=1}^{d_m} \sum_{j=1}^{n_p} pr_{ij}^{d} . \eta_{dc} . \Delta t_p . \frac{1}{fk_d} \qquad (6.3)$$

$$TP_{ec} = \sum_{k=1}^{k_m} \sum_{j=1}^{n_p} cn_{ij}^{k} . \Delta t_p . fk_k \tag{6.4}$$

Burada t_{ts} her zaman slotunun süresi olmak üzere Δt_p (puant zaman aralığı) Eş. 6.5' e göre hesaplanır.

$$\Delta t_p = t_{ts} . n_p \tag{6.5}$$

Eş. 6.3 ve Eş. 6.4 kullanılarak 1. Hedef fonksiyonu Eş. 6.6' da verilmiştir.

$$g_1(x) = TP_{ec} \ - TP_{ep} \tag{6.6}$$

Geliştirilen algoritmada 1. Hedef fonksiyonunu optimize etmek için istasyona bağlı üretici etiketli araçları enerji kaynağı olarak kullandığımız için ve puant saat aralığındaki toplam yükü puant olmayan saat dilimine kaydırma hedefimiz olduğu için araçların dolma süreleri de kritik bir problem haline gelmektedir. Bununla beraber sürücü davranışını dikkate almak için araçların şebekeye entegre olduğu andan itibaren en kısa sürede dolmasının sağlanması sürücülerin en temel talebi olacaktır. Bu bağlamda tüm araçların en kısa sürede şarj olmasını sağlamak için 2. Hedef fonksiyonu optimizasyon algoritmasına dahil edildi.

Burada *i.* parçacık için üretici ve tüketici araçların bataryalarının dolmasını Eş. 6.7 ve Eş. 6.8' i kullanarak formülüze edebiliriz. Model içerisinde şarj ünitesinin verimi EA tarafından bakılarak değerlendirilmiştir.

$$sp^{di} + t_{ts} . \sum_{j=n_p}^{n_i^d} \frac{pr_{ij}^{d} . \xi}{C_p^d . V_{ev}^d . fk_d} = 1 \qquad \xi = \begin{cases} 1 & if\ pr_{ij}^{d} < 0 \\ \eta_c & if\ pr_{ij}^{d} \geq 0 \end{cases} \tag{6.7}$$

$$sc^{ki} + t_{ts} . \sum_{j=n_p}^{n_i^k} \frac{cn_{ij}^{k} . \xi . fk_k}{C_p^k . V_{ev}^k} = 1 \qquad \xi = \eta_c \tag{6.8}$$

Bu eşitlikleri düzenlersek Eş. 6.9 ve Eş. 6.10 elde edilir.

$$\sum_{j=n_p}^{n_i^d} pr_{ij}^d = \frac{\left(1 - sp^{di}\right).C_p^d.V_{ev}^d.fk_d}{t_{ts}.\xi} \tag{6.9}$$

$$\sum_{j=n_p}^{n_i^k} cn_{ij}^k = \frac{\left(1 - sc^{ki}\right).C_p^k.V_{ev}^k}{t_{ts}.\xi.fk_k} \tag{6.10}$$

Bu eşitliklerde *i.* parçacık *d.* aracın puant olmayan zaman dilimindeki dolma zaman slotu n_i^d, *k.* aracın dolma zaman slotu ise n_i^k' dir. Burada Δtpr_i^d puant olmayan zaman dilimindeki üretici etiketli araç şarj süresi ve Δtcn_i^k puant olmayan zaman dilimindeki tüketici etiketli araç şarj süresi olmak üzere Eş. 6.11 ve Eş. 6.12 yazılabilir.

$$\Delta tpr_i^d = n_i^d.t_{ts} \tag{6.11}$$

$$\Delta tcn_i^k = n_i^k.t_{ts} \tag{6.12}$$

Bu eşitliklerden *i.* parçacık için üretici ve tüketici etiketli araçların nihai dolma sürelerini Eş. 6.13 ve Eş. 6.14 eşitlikleri ile formülüze edebiliriz.

$$\Delta TP_i^d = \Delta t_p + \Delta tpr_i^d \tag{6.13}$$

$$\Delta TC_i^k = \Delta t_p + \Delta tcn_i^k \tag{6.14}$$

Eş. 6.13 ve Eş. 6.14 kullanılarak 2. Hedef fonksiyon Eş. 6.15' de verilmiştir.

$$g_2(x) = \frac{\sum_{d=1}^{d_m} \Delta TP_i^d + \sum_{k=1}^{k_m} \Delta TC_i^k}{(d_m + k_m)} \tag{6.15}$$

6.3. Şebeke ve Şarj Kısıtları

Saat dilimi ne olursa olsun tüm araçların şarj/deşarj limitleri maksimum değerlerini aşmamalıdır. Eş. 6.16 ve Eş. 6.17' de bu kısıtlar verilmiştir.

$$P_{max}^{d} < -pr_{ij}^{d}.\frac{1}{fk_d} \qquad \begin{matrix} d = 1,2,\dots,d_m \\ i = 1,2,\dots,i_m \\ j = 1,2,\dots,n_{ts} \end{matrix} \qquad i_m, n_{ts}, d_m \in Z^+ \qquad (6.16)$$

$$P_{max}^{c} < cn_{ij}^{k}.fk_k \qquad \begin{matrix} d = 1,2,\dots,d_m \\ i = 1,2,\dots,i_m \\ j = 1,2,\dots,n_{ts} \end{matrix} \qquad i_m, n_{ts}, k_m \in Z^+ \qquad (6.17)$$

Puant saat diliminde *i.* parçacık *j.* zaman slotundaki toplam üretim miktarı P_p^{ij} ve yine *i.* parçacık *j.* Zaman slotundaki toplam tüketim gücü P_c^{ij} olmak üzere, hiçbir zaman slotunda üretici toplam gücü tüketici toplam gücünü geçmemelidir. Bu ortak DA baralı şarj istasyonu gerilim kararlılığı için gerekli kısıt şarttır. Eş. 6.18 ve Eş. 6.19' da bu kısıt için eşitlikler verilmiştir.

$$\left.\begin{aligned} P_p^{ij} &= \sum_{d=1}^{dt} pr_{ij}^{d}.\eta_{dc}.\frac{1}{fk_d} \\ P_c^{ij} &= \sum_{k=1}^{kt} cn_{ij}^{k}.fk_k \end{aligned}\right\} \qquad j = 1,2,\cdots n_p \qquad n_p \in Z^+ \qquad (6.18)$$

$$P_p^{ij} \le P_c^{ij} \qquad \begin{matrix} j = 1,2,3,\cdots n_p \\ i = 1,2,3,\dots,i_m \end{matrix} \qquad i_m, n_p \in Z^+ \qquad (6.19)$$

Adil bir şarj düzeninin oluşturulabilmesi için puant zaman dilimi sonunda herhangi bir üretici etiketli aracın tüketici etiketli aracın %SOC değerini geçmemesi kısıt olarak modellenmiştir. Buna göre üretici etiketli araçlardan *i.* parçacık *d.* araç için toplam güç miktarı TP_p^{di} ve tüketici etiketli araçlardan *i.* parçacık *k.* araç için toplam güç miktarı TP_c^{ki} Eş. 6.20 ve Eş. 6.21' de verilmiştir. Model içerisinde şarj ünitesinin verimi EA tarafından bakılarak değerlendirilmiştir.

$$TP_p^{di} = \sum_{j=1}^{n_p} pr_{ij}^d . \frac{1}{fk_d} \tag{6.20}$$

$$TP_c^{ki} = \sum_{j=1}^{n_p} cn_{ij}^k . \eta_c . fk_k \tag{6.21}$$

Buradan üretici etiketli araçlar için *i.* parçacık *d.* aracın puant saat sonundaki toplam %SOC değişim değeri Δsp^{di} ve tüketici etiketli araçlar için *i.* parçacık *k.* aracın puant saat sonundaki toplam %SOC değişim değeri Δsc^{ki} Eş. 6.22 ve Eş. 6.23' de verilmiştir.

$$\Delta sp^{di} = \frac{TP_p^{di} . \Delta t_p}{C_p^d . V_{ev}^d} \tag{6.22}$$

$$\Delta sc^{ki} = \frac{TP_c^{ki} . \Delta t_p}{C_p^k . V_{ev}^k} \tag{6.23}$$

Puant zaman dilimi sonundaki şarj seviyeleri Eş. 6.24 ve Eş. 6.25' de verilmiştir.

$$sp^{di} = SOC_{int}^d - \Delta sp^{di} \tag{6.24}$$

$$sc^{ki} = SOC_{int}^k + \Delta sc^{ki} \tag{6.25}$$

Nihai olarak modellenen bu kısıt için eşitsizlik Eş. 6.26' da verilmiştir.

$$\begin{aligned} sp^{di} &\geq S_B \\ sc^{ki} &\leq S_B \end{aligned} \tag{6.26}$$

Burada S_B sabit olup tasarımcı tarafından belirlenen denge noktasını temsil eder.

Geliştirilen MRTC algoritması, şarj işlemi sonunda her araç bataryasının tamamen dolmasını taahhüt etmektedir. Bu bağlamda şarj düzeni neticesinde tüm araçların nihai şarj seviyeleri SOC_{max} değerine ulaşmalıdır. Burada TNP_i^d puant olmayan zaman aralığındaki üretici etiketli araçlar için toplam güç ve TNC_i^k puant olmayan zaman aralığındaki tüketici etiketli araçlar için toplam güç olmak üzere toplam şarj seviyesi değişimler Eş. 6.27 ve Eş. 6.28' de verilmiştir.

$$\Delta snp_i^d = \frac{TNP_i^d . \Delta t_{np}}{C_p^d . V_{ev}^d} \tag{6.27}$$

$$\Delta snc_i^k = \frac{TNC_i^k . \Delta t_{np}}{C_p^k . V_{ev}^k} \tag{6.28}$$

Burada Δt_{np} puant olmayan zaman aralığı olmak üzere Eş. 6.29' da verilmiştir.

$$\Delta t_{np} = t_{ts} . (j - n_p) \tag{6.29}$$

Puant olmayan zaman dilimi sonundaki nihai şarj seviyeleri Eş. 6.30 ve Eş. 6.31' de verilmiştir.

$$snp_i^d = sp^{di} + \Delta snp_i^d \tag{6.30}$$

$$snc_i^k = sc^{ki} + \Delta snc_i^k \tag{6.31}$$

Sonuç olarak $snp_i^d, snc_i^k \leq SOC_{max}$ kısıt şart olarak modellenmiştir.

Optimizasyon sonucu oluşturulan şarj düzenlerinin şebeke üzerindeki etkileri detaylı şekilde irdelenmelidir. Buna göre puant olmayan saat dilimi içerisinde, şebekeden talep edilecek toplam yük grafiğinde farklı puant noktalarının oluşmaması kısıt olarak modellenmiştir. Burada puant olmayan saat dilimindeki toplam anlık güç değeri hiçbir zaman puant saat dilimindeki anlık gücün maksimum değerini aşmamalıdır.

$$P_{NT}^{ij} = P_p^{ij} + P_c^{ij} \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3,\dots,i_m \\ j = n_p, n_p+1,\dots,n_{ts} \end{matrix} \qquad i_m, n_{ts} \in Z^+ \qquad (6.32)$$

$$P_T^{ij} = P_c^{ij} - P_p^{ij} \qquad \begin{matrix} j = 1,2,3,\cdots n_p \\ i = 1,2,3,\dots,i_m \end{matrix} \qquad i_m, n_p \in Z^+ \qquad (6.33)$$

Burada P_{NT}^{ij} puant olmayan saat dilimindeki anlık EA yükü eşitliğini ve P_T^{ij} yine puant saat dilimindeki anlık EA yükü eşitliğini vermektedir. Gün öncesi yük eğrisi rl_j olmak üzere Eş. 6.34' de verilmiştir. Burada yük eğrisi n_{ts} tane aralığa bölünerek dizi olarak ifade edilmiştir.

$$rl_j = \left[r_1\ r_2\ r_3\ \dots r_j\ \right] \qquad j = 1,2,3,\cdots n_p \qquad i_m, n_{ts} \in Z^+ \qquad (6.34)$$

TL_{ij} puant zaman aralığındaki toplam anlık yük ve TNL_{ij} puant olmayan zaman aralığındaki toplam anlık yük olmak üzere sırasıyla Eş. 6.35 ve Eş. 6.36 ile verilmiştir.

$$TL_{ij} = P_T^{ij} + rl_j \qquad \begin{matrix} j = 1,2,3,\cdots n_p \\ i = 1,2,3,\dots,i_m \end{matrix} \qquad i_m, n_p \in Z^+ \qquad (6.35)$$

$$TNL_{ij} = P_{NT}^{ij} + rl_j \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3,\dots,i_m \\ j = n_p, n_p+1,\dots,n_{ts} \end{matrix} \qquad i_m, n_{ts} \in Z^+ \qquad (6.36)$$

Sonuç olarak $max(TL_{ij}) \geq TNL_{ij}$ kısıt şart olarak modellenmiştir.

6.4. Gerçek Zamanlı Ücretlendirme Modeli

Şarj işlemi sonucunda kullanıcılar için belirli kayıplar söz konusu olacaktır. Bu kayıplar özellikle üretici etiketli araçlar için zaman kaybı ve bataryanın kullanılmasından dolayı yıpranma maliyeti olacaktır. Tüketici etiketli araçlar için ise bir miktar zaman kaybı olacağından yine bu durum kayıp olarak nitelendirilebilir. Bu bağlamada her EA' nın dinamik olarak memnuniyetini arttırmak için hem deşarj süresi boyunca SOC değerlerinin düşmesi hem de batarya yıpranması sebebiyle bir ödül bedeli verilmelidir. Bu bağlamda bu çalışmada da üretici etiketli araç için ödül, tüketici araçlar için ceza olacak şekilde gerçek zamanlı bir fiyatlandırma modeli oluşturulmuştur.

Üretici etiketli araçlar için gerçek zamanlı fiyatlandırma formülü Eş. 6.37' de verilmiştir.

$$Ct_d = \varepsilon_u . per_c . \left(-\Delta sp_{d,best}\right) + \left[\sum_{j=1}^{n^d_{best}} \frac{pr^d_{ij}}{fk_d} . t_{ts} . \xi . u^c_j\right] \tag{6.37}$$

Burada ε_u batarya kullanımı ödül katsayısı, per_c bir çevrim batarya kullanımı için yıpranma maliyetidir. ξ ise verim olup Eş. 6.38' de verilmiştir.

$$\xi = \begin{cases} \eta_{dc} & pr^d_{ij} < 0 \\ 1 & pr^d_{ij} \geq 0 \end{cases} \tag{6.38}$$

u^c_j ise j. zaman slotu için EVA tarafından belirlenen birim maliyet olup Eş. 6.39' da verilmiştir.

$$u^c_j = \begin{cases} du_c . \varepsilon_d & if\ j < n_p \\ du_c & if\ j \geq n_p \end{cases} \tag{6.39}$$

Burada du_c DSO tarafından belirlenen enerji birim fiyatı, ε_d ise puant saat diliminde şarj/deşarj için ceza/ödül katsayısıdır.

Tüketici etiketli araç için gerçek zamanlı ücretlendirme modeli Eş. 6.40' da verilmiştir.

$$Ct_c = \left[\sum_{j=1}^{n^c_{best}} cn^d_{ij} . fk_k . t_{ts} . u^c_j . \eta_c\right] \tag{6.40}$$

Burada tüketici etiketli araçlar için puant saat dilimi için ceza uygulanırken puant olmayan saat dilimi için ise ödül katsayısı ile daha uygun birim fiyat ile maliyetini minimize edilebileceğinden dolayı memnuniyeti arttırıcı etki yaratacaktır.

6.5. EA Sürücüleri için Memnuniyet Kriterleri

Literatürde yapılan bazı çalışmalarda memnuniyet nihai SOC iken bazısında şarj süreleri veya enerji maliyeti olarak modellenmiştir. Fakat yapılan anket çalışmalarında bu faktörlerin tamamının sürücüler için önemli olduğu anlaşılmaktadır. Her ne kadar bölgesel ve toplumun ekonomik seviyesine göre önem dereceleri farklılık gösterse de bu parametrelerin hepsi memnuniyet kriteridir. Bundan dolayı bu çalışmada tüm parametreler dikkate alınarak memnuniyet kriterleri tanımlanmıştır.

MRTC algoritması şarj süresi içerisinde tüm araçların bataryalarının dolmasını zaten taahhüt etmektedir. Bu sebeple sürücülerin memnuniyet kriteri bataryaların dolma süreleri ve enerji maliyeti olarak modellenmiştir.

6.5.1. Şarj süresine göre memnuniyet kriteri

Burada optimal şarj programlaması sonucu oluşan şarj süreleri ile nominal güç ile şarj durumunda oluşan şarj sürelerinin oranı memnuniyet çıktısı olarak modellenmiştir. Buna göre üretici etiketli araçlar için memnuniyet modeli Eş. 6.41' de verilmiştir.

$$s_{d1} = \frac{\Delta t_{nom}^{d}}{\Delta t_{d}^{best}} + P(l).\left(1 - \frac{\Delta t_{nom}^{d}}{\Delta t_{d}^{best}}\right) \tag{6.41}$$

Burada $P(l)$ üretici etiketli aracın istasyondan ayrılmama ihtimali olarak alınmıştır. Üretici etiketli araçların EVA tarafından kullanım sıklığı daha düşük araçlar arasından seçileceği düşünüldüğünde puant saat dilimi içerisinde sürücünün istasyondan çıkma ihtimali daha düşük olacaktır. Bu bağlamda yapılan nümerik hesaplamalarda sürücünün istasyondan ayrılma veya ayrılmama ihtimali üzerinden bir değerlendirme yapmak doğru sonucun bulunması için gereklidir. Bu sebeple Eş. 6.41' in 2. terimi modele eklenmiştir.

Tüketici etiketli araçlar ise zaten istasyona yeni giriş yaptığı ve kullanıcının dolma süresi ile ilgili beklentisi tahmin edilebildiğinden ayrılma ihtimali dikkate alınmamıştır. Buna göre tüketici etiketli araçlar için memnuniyet modeli Eş. 6.42' de verilmiştir.

$$s_{c1} = \frac{\Delta t_{nom}^{k}}{\Delta t_{k}^{best}} \tag{6.42}$$

Nitekim araç üreticileri her model araçları için şebekeden şarj sürelerini bildirmektedir. Bu bağlamda aracın istasyona entegre olduğu andaki şarj seviyesinin bilindiği varsayılırsa sürücü sezgisel olarak şarj süresini tahmin edecektir. Bu sebeple üretici etiketli araç sahibi için şarj süresi ile ilgili beklenti bilinecektir.

6.5.2. Enerji maliyetlerine göre memnuniyet kriteri

ΔCt_d üretici etiketli araçlar için net kar olarak Eş. 6.43' de verilmiştir.

$$\Delta Ct_d = Ct_d^{nom} - Ct_d \tag{6.43}$$

Enerji maliyetlerine göre memnuniyet kıyaslaması yapabilmek için üretici etiketli bir aracın puant saat dilimi boyunca maksimum deşarj gücü ile bataryasını kullandırması durumunda elde edeceği maksimum karı hesaplamamız gerekecektir. Bu hesap şarj süresi, sürücü alışkanlıkları dikkate alınmadan sadece elde edilecek kar dikkate alınarak yapılmalıdır. Bu bağlamda maksimum SOC değişimi Eş. 6.44' de verilmiş olup elde edilecek maksimum kar Eş. 6.45' de verilmiştir.

$$\Delta sp_d^{max} = \frac{P_{max}^{d}.\Delta t_p}{C_p^d.V_{ev}^d} \tag{6.44}$$

$$Ct_d^{max} = [P_{max}^{d}.n_p.\xi.du_c.(\varepsilon_d - 1)] + [\Delta sp_d^{max}.\varepsilon_u.per_c] \tag{6.45}$$

Bu bağlamda fiyatlandırma modeline göre üretici etiketli araçların memnuniyet derecesi Eş. 6.46' da verilmiştir.

$$s_{d2} = \frac{\Delta Ct_d}{Ct_d^{max}} \tag{6.46}$$

ΔCt_c tüketici etiketli araçlar için toplam enerji maliyet tasarrufu Eş. 6.47' de verilmiştir.

$$\Delta Ct_c = Ct_c^{nom} - Ct_c \tag{6.47}$$

Tüketici etiketli araç için toplam kar oranından bahsedemeyiz çünkü araç sahipleri muhakkak bir fatura bedeli ödemeleri gerekir. Bundan dolayı tüketici etiketli araçlar için toplam tasarruf bedeli söz konusudur. Buna göre memnuniyet, tasarruf edilmiş bedel ile nominal fiyatın oranıdır. Tüketici etiketli araçlar için memnuniyet derecesi Eş. 6.48' de verilmiştir.

$$s_{c2} = \frac{\Delta Ct_c}{Ct_c^{nom}} \tag{6.48}$$

Her bir araç için toplam memnuniyet dolma süresi memnuniyeti ve maliyet memnuniyetinin ağırlıklı toplamları olarak değerlendirilebilir. Eş. 6.49 ve Eş. 6.50' de üretici ve tüketici etiketli araçlar için toplam memnuniyet eşitlikleri verilmiştir. $w_{d1} + w_{d2} = 1$ ve $w_{c1} + w_{c2} = 1$ olmak üzere ağırlık oranları üretici ve tüketici etiketli araçlar için farklı değerlendirilmiştir.

$$s_d = w_{d1}.s_{d1} + w_{d2}.s_{d2} \tag{6.49}$$

$$s_c = w_{c1}.s_{c1} + w_{c2}.s_{c2} \tag{6.50}$$

Burada üretici etiketli araçların bataryalarını kullandırdıkları oranda memnuniyet ağırlıkların değişeceği gerçeğinden yola çıkarak ağırlık durumları Eş. 6.51 ve Eş. 6.52 ile tanımlanmıştır.

$$w_{d1} = \frac{\Delta sp_{d,best}}{\Delta sp_d^{max}} \tag{6.51}$$

$$w_{d2} = 1 - w_{d1} \tag{6.52}$$

Tüketici etiketli araçlar için analitik simülasyonlarda ağırlıklar eşit olarak seçilmiş olup kullanıcının tercihlerine göre farklılık gösterebilir.

7. NÜMERİK HESAPLAMALAR VE DENEYSEL SONUÇLAR

7.1. MRTC Algoritmasının Çözümü için En İyi Yöntemin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında tanımlanan problemler doğrusal programlama ve karmaşık tamsayılı doğrusal programlama yöntemiyle formülüze edilmiştir. Bu bağlamda özellikle penetrasyon seviyesi arttıkça daha da artan işlem yükünün azaltılması ve gerçek zamanlı algoritma tasarlanması sebebiyle optimizasyon probleminin çözümü için metasezgisel optimizasyon yöntemleri önerilmiştir. MRTC algoritmasının en uygun çözümü için popülasyon temelli 8 farklı metasezgisel algoritma kullanılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Analizler yapılırken modelde belirlenen 2 farklı hedef, ağırlık yaklaşımıyla tek fonksiyon haline getirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmasında, EVA tarafından tahmin edildiği varsayılan gün öncesi yük eğrisi için 200 kW puant güce sahip Türkiye' deki bir konut alanının gerçek verileri kullanılmıştır. Nümerik analizin temel hedefi algoritmanın farklı penetrasyon ve senaryolardaki davranışını göstermektir. Bu bağlamda çalışmamızda tüm penetrayon seviyeleri için farklı senaryolar oluşturarak önerilen algoritmamızın davranışı test edilmiştir. Bu çerçevede tam elektrikli Renault Zoe modelini Seviye-1 şarj limitlerine göre farklı sayılardaki EA yığınları şeklinde kümeleyerek penetrasyon seviyeleri belirlenmiştir. Bu EA yığınlarını da her türlü tüketici-üretici varyasyonuna göre senaryolaştırarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirildi. Üretilen senaryoların dağılımı Çizelge 7.1' de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Durum-Penetrasyon Varyasyonları

Durumlar	Üretici (EA Sayısı)	Tüketici (EA Sayısı)	Penetrasyon Oranı
Durum-1	2	6	25%
Durum-2	4	4	25%
Durum-3	6	2	25%
Durum-4	4	12	50%
Durum-5	8	8	50%
Durum-6	12	4	50%
Durum-7	6	18	75%
Durum-8	12	12	75%
Durum-9	18	6	75%
Durum-10	8	24	100%
Durum-11	16	16	100%
Durum-12	24	8	100%

Nümerik hesaplama için zaman slot süresi 15 dakika seçilmiş ve 15 adet time slotu için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Burada ilk 6 zaman slotu puant saat dilimi, sonraki 9 slot ise puant olmayan saat dilimi olarak belirlenmiştir. Simülasyon çalışmaları için belirlenen kriterler aşağıda belirtilmiştir:

Nümerik hesaplamalarda popülasyon büyüklüğü 200, iterasyon sayısı ise tüm algoritmalar için 1000 olarak belirlenmiştir. Ayrıca her algoritma ve her durum çalışması için 30 bağımsız koşu gerçekleştirmiştir.

Metasezgisel algoritmaların diğer spesifik parametreleri yapılan testlerle en uygun değerlerine ayarlanmıştır. Belirlenen parametreler tüm durum çalışmalarında aynı seçilmiştir.

Sayısal sonuçların istatistiksel doğruluğunu göstermek ve en uygun algoritmanın başarı performansını kanıtlamak için Friedman test yöntemleri kullanılmıştır.

Nümerik hesaplamalar yukarıda belirtilen kriterler altında Symbiotic Organisms Search (SOS), Artificial Bee Colony (ABC), Biogeography-Based Optimization (BBO), Differential Evolution (DE), Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Reptile Search Algorithm (RSA) ve Runge Kutta Optimization (RUN) metasezgisel algoritmalar ile ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Farklı koşullar altında en iyi sonucun elde edilebilmesi için MRTC algortması 12 farklı durumda 8 farklı yöntemle test edilmiştir. %25 penetrasyon seviyesi için 3 farklı varyasyon oluşturulmuştur. Buna göre her araç için 15 zaman slotu olduğu dikkate alınırsa Durum-1, Durum-2 ve Durum-3 için toplam 120 bağımsız değişken MRTC algoritmasının optimal sonucunun bulunabilmesi için kullanılmıştır. Benzer şekilde Durum-4, Durum-5, Durum-6 %50 penetrasyon seviyesinde olduğundan 240 bağımsız değişken, Durum-7, Durum-8, Durum-9 %75 seviyesinde olduğundan 360 bağımsız değişken ve Durum-10, Durum-11, Durum-12 %100 seviyesinde olduğundan 480 bağımsız değişken kullanılmıştır. Kısaca her seviye 3 farklı varyasyonda gruplandırılarak ayrı ayrı test edilmiştir.

Durum-1, Durum-2 ve Durum-3 için amaç fonksiyonunun yakınsama karakteristikleri 8 farklı algoritma ile test edilerek Şekil 7.1’ de verilmiştir. Yakınsama eğrisinden görüleceği

üzere %25 penetrasyon seviyesi için SOS, DE, PSO ve BBO algoritmalarının yakınsama hızlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. En iyi sonucun elde edilmesi konusunda ise SOS' in en etkili algoritma olduğu anlaşılmaktadır.

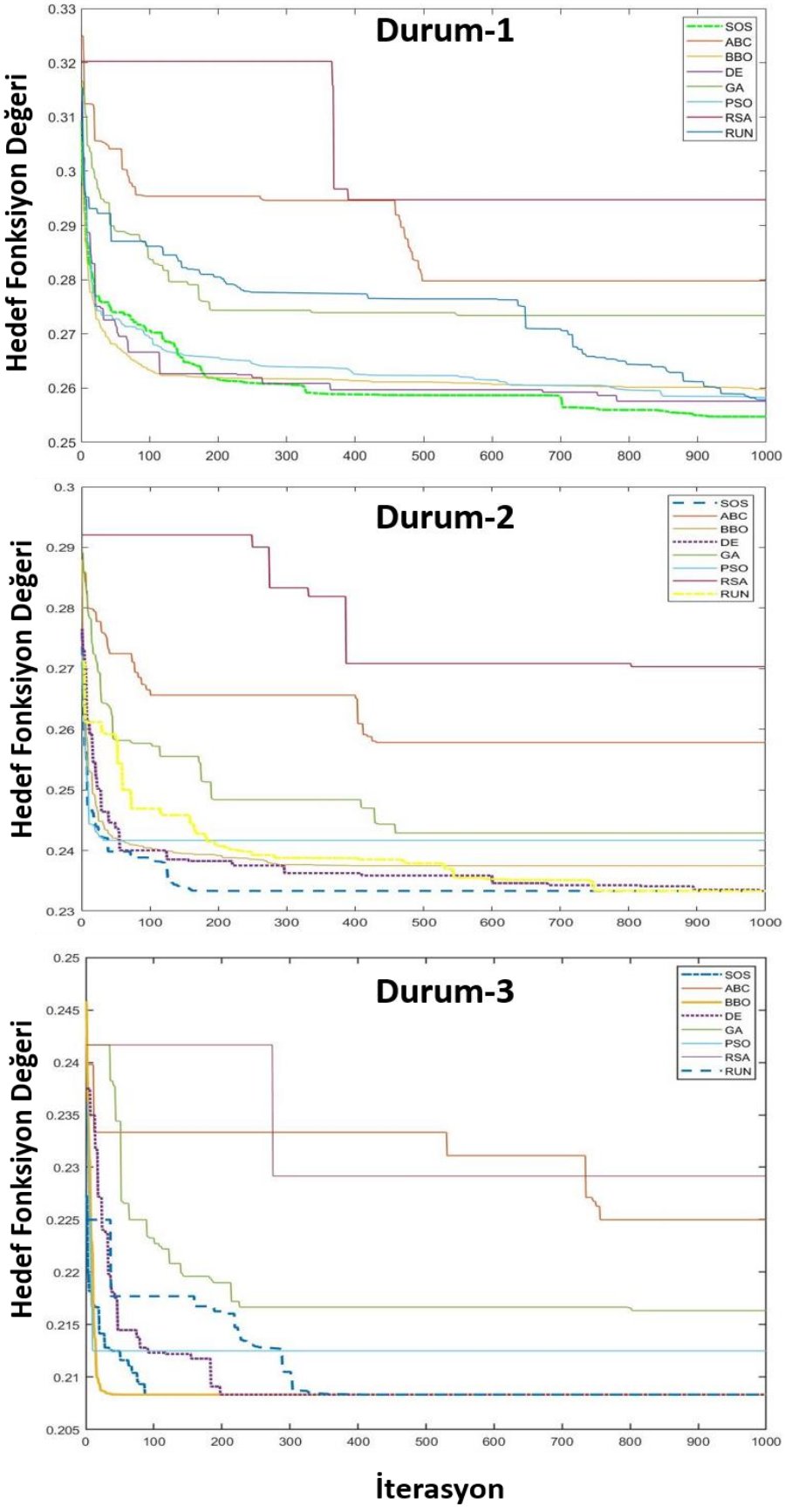
Benzer şekilde Durum-4, Durum-5 ve Durum-6 için amaç fonksiyonunun yakınsama karakteristikleri Şekil 7.2' de verilmiştir. Yakınsama eğrileri incelendiğinde %50 penetrasyon seviyesi için yine SOS, DE, PSO ve BBO algoritmalarının yakınsama hızlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. En iyi sonucun elde edilmesi konusunda ise yine SOS' in en etkili algoritma olduğu görülmektedir.

Durum-7, Durum-8 ve Durum-9 için amaç fonksiyonunun yakınsama karakteristikleri Şekil 7.3' de verilmiştir. Yakınsama eğrileri incelendiğinde %75 penetrasyon seviyesi için SOS, DE, ve RUN algoritmalarının yakınsama hızlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. En iyi sonucun elde edilmesi konusunda ise SOS, RUN ve DE yöntemlerinin etkili algoritmalar olduğu anlaşılmaktadır.

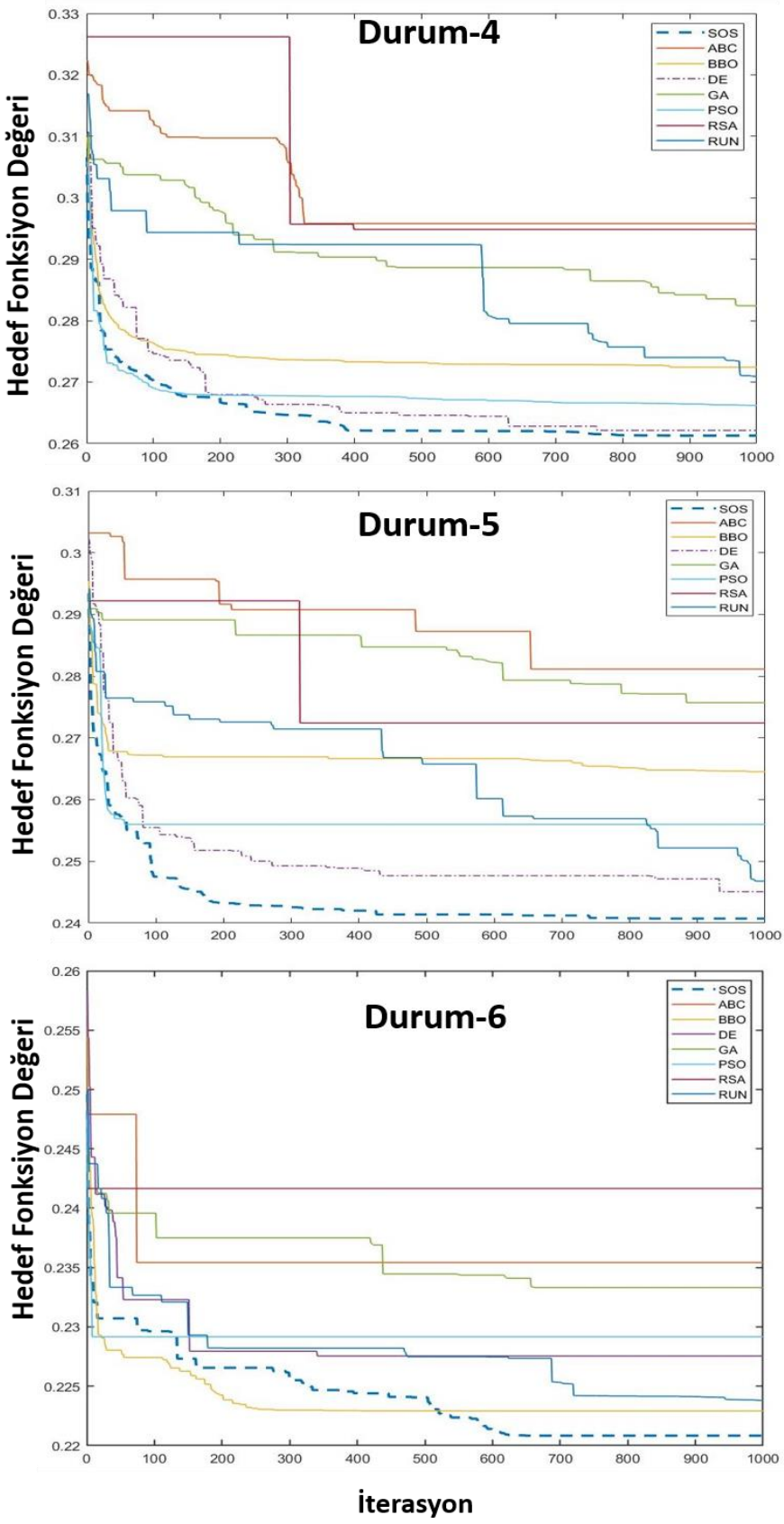
Durum-10, Durum-11 ve Durum-12 için amaç fonksiyonunun yakınsama karakteristikleri Şekil 7.4' de verilmiştir. Yakınsama eğrileri incelendiğinde %100 penetrasyon seviyesi için SOS, ve RUN algoritmalarının yakınsama hızlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. En iyi sonucun elde edilmesi konusunda ise RUN yönteminin en etkili algoritma olduğu anlaşılmaktadır.

Amaç fonksiyonunun minimizasyonunda kullanılan algoritmaların 30 bağımsız koşumundan elde edilen minimum ve ortalama değerleri Çizelge 7.2' de verilmiştir. Buna göre hedef fonksiyonun en iyi değeri verdiği algoritma ve minimum değerleri sırasıyla Durum-1 için SOS (0,2545), Durum-2 için SOS, DE ve RUN (0,2333), Durum-3 için SOS, DE, BBO ve RUN (0,2083), Durum-4 için SOS (0,2613), Durum-5 için SOS (0,2407), Durum-6 için SOS (0,2208), Durum-7 için DE (0,2674), Durum-8 için DE (0,2567), Durum-9 için RUN (0,2512), Durum-10 için SOS (0,2797), Durum-11 için RUN (0,2725) ve Durum-12 için RUN (0,2630). Minimum değerler için elde edilen verilere göre Durum-1, Durum-2, Durum-3, Durum-4, Durum-5, Durum-6 ve Durum-10 için en iyi değerler SOS ile üretilmiştir. Durum-7 ve Durum-8 için DE ile en iyi değerler DE ile ve Durum-9, Durum-11 ve Durum-12 için RUN ile en iyi değerler üretilmiştir.

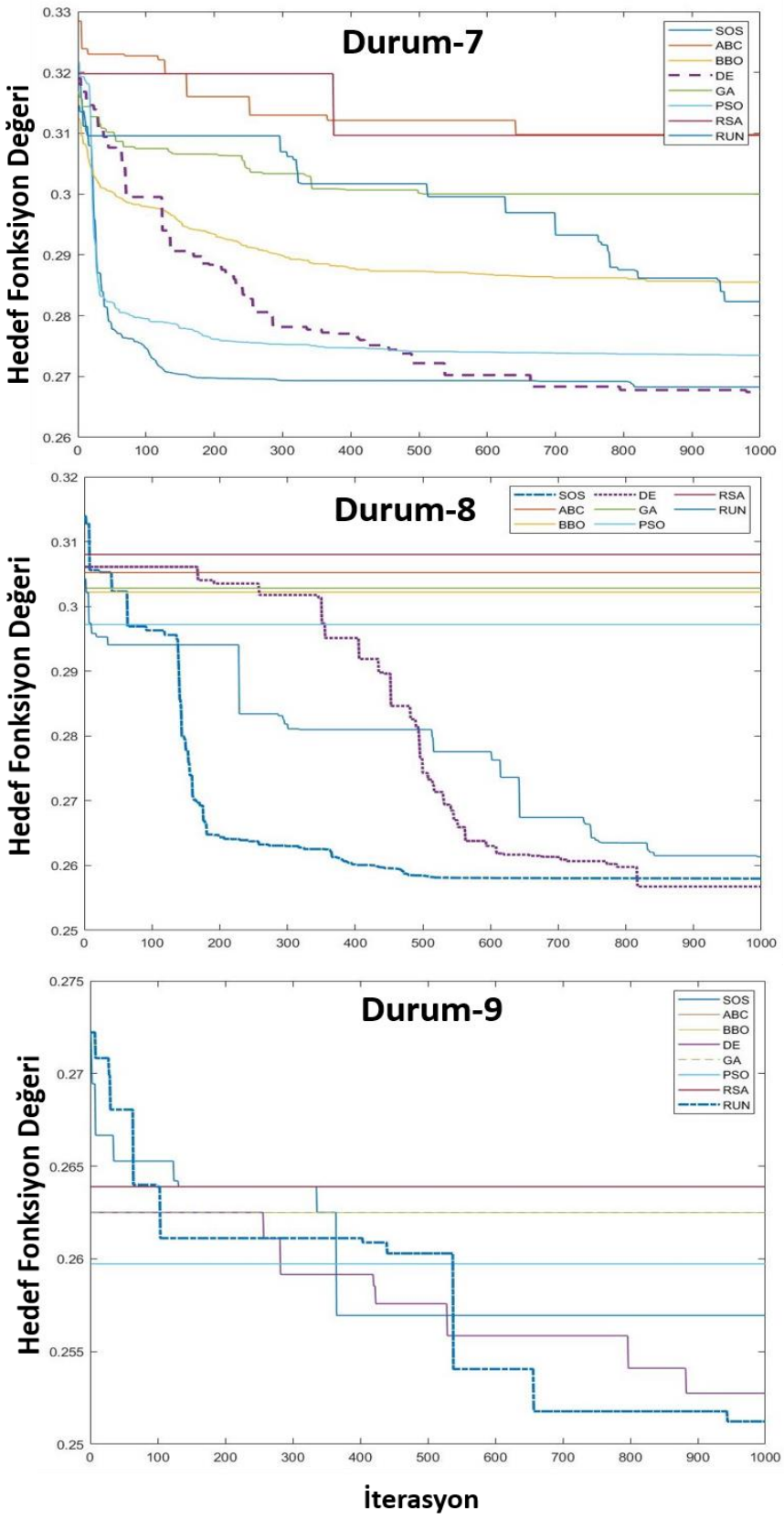
Ancak 30 bağımsız çalışmadan elde edilen ortalama değerlerin karşılaştırılması en uygun algoritmanın tespiti için önemli bir başka işaret olacaktır. Buna göre hedef fonksiyonun en iyi değeri verdiği algoritma ve ortalama değerleri sırasıyla Durum-1 için SOS (0,2567), Durum-2 için DE (0,2335), Durum-3 için RUN (0,2097), Durum-4 için DE (0,2638), Durum-5 için DE (0,2468), Durum-6 için SOS (0,224), Durum-7 için DE (0,2775), Durum-8 için SOS (0,2693), Durum-9 için RUN (0,2556), Durum-10 için SOS (0,2894), Durum-11 için RUN (0,2803) ve Durum-12 için RUN (0,2693). Ortalama değerler için elde edilen verilere göre Durum-1, Durum-6, Durum-8 ve Durum-10 için en iyi değerler SOS ile üretilmiştir. Durum-2, Durum-4, Durum-5 ve Durum-7 için en iyi değerler DE algoritması ile üretilmiştir. Durum-3, Durum-9, Durum-11 ve Durum-12 için en iyi sonuçlar RUN algoritması ile üretilmiştir. Çizelge 7.3’ de tüm vaka çalışmaları için standart sapmalar, Çizelge 7.4’ de ise maksimum ve medyan değerleri verilmiştir.



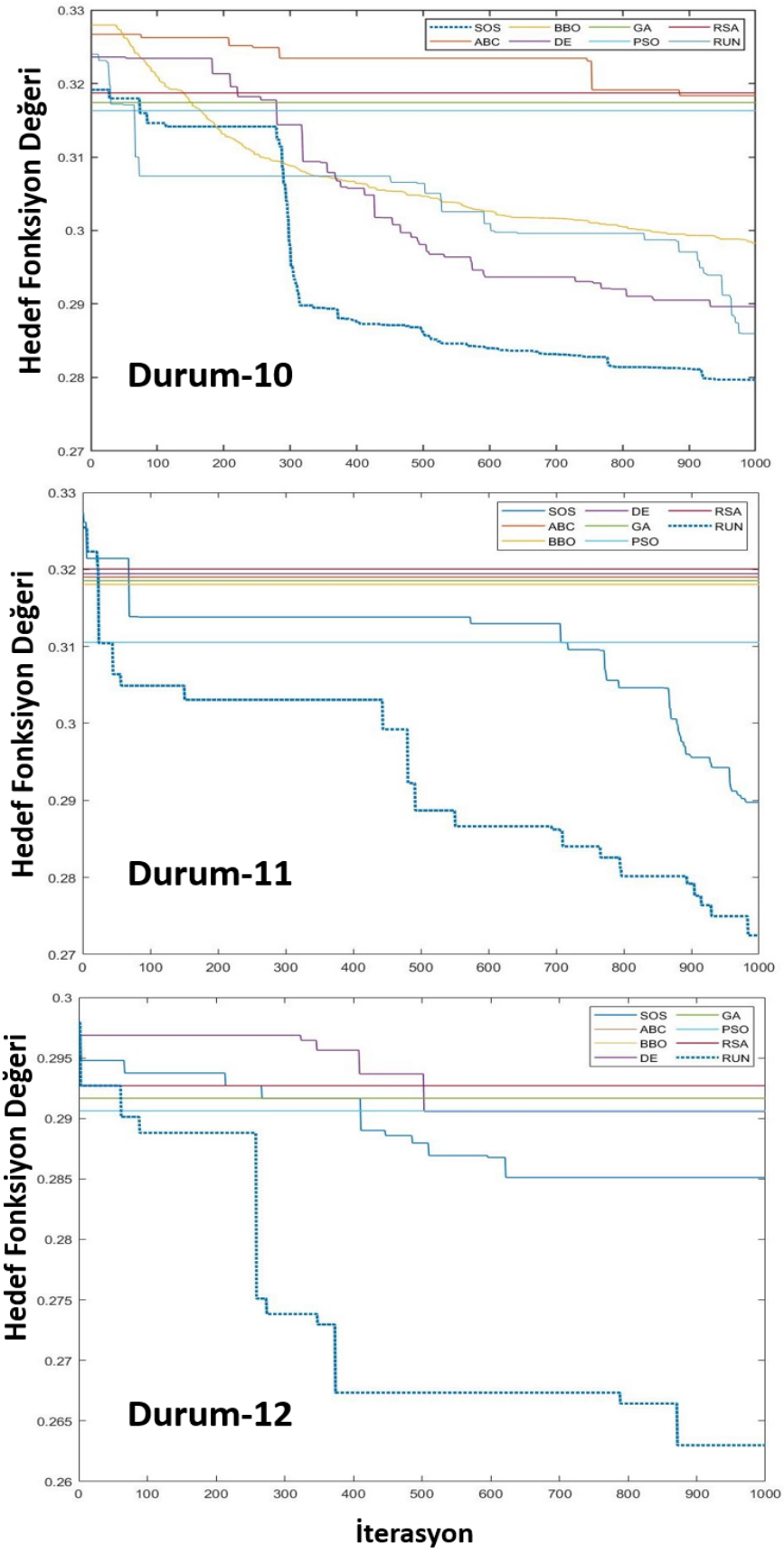
Şekil 7.1. Durum-1, Durum-2 ve Durum-3 için yakınsama hızları



Şekil 7.2. Durum-4, Durum-5 ve Durum-6 için yakınsama hızları



Şekil 7.3. Durum-7, Durum-8 ve Durum-9 için yakınsama hızları



Şekil 7.4. Durum-10, Durum-11 ve Durum-12 için yakınsama hızları

Çizelge 7.2. Tüm vaka çalışmaları için minimum ve ortalama değerleri

Durumlar/Alg.		SOS	ABC	BBO	DE	GA	PSO	RSA	RUN
Durum-1	Min	0,2545	0,2798	0,2597	0,2576	0,2734	0,2582	0,2947	0,2578
	Ort.	0,2567	0,2896	0,264	0,2588	0,2803	0,2642	0,3152	0,2622
Durum-2	Min	0,2333	0,2578	0,2375	0,2333	0,2429	0,2417	0,2703	0,2333
	Ort.	0,2357	0,266	0,2438	0,2335	0,2514	0,2481	0,2815	0,2364
Durum-3	Min	0,2083	0,225	0,2083	0,2083	0,2163	0,2125	0,2292	0,2083
	Ort.	0,2099	0,2284	0,22	0,2107	0,2233	0,2207	0,2368	0,2097
Durum-4	Min	0,2613	0,2902	0,2724	0,2621	0,2824	0,2662	0,2949	0,2709
	Ort.	0,2672	0,3013	0,2761	0,2638	0,2906	0,2712	0,3167	0,281
Durum-5	Min	0,2407	0,2811	0,2645	0,2451	0,2757	0,256	0,2724	0,2468
	Ort.	0,2491	0,2877	0,272	0,2468	0,2891	0,2748	0,2943	0,2567
Durum-6	Min	0,2208	0,2354	0,2229	0,2275	0,2333	0,2292	0,2417	0,2238
	Ort.	0,224	0,2429	0,2282	0,2297	0,2428	0,2351	0,2513	0,2279
Durum-7	Min	0,2683	0,3098	0,2855	0,2674	0,3	0,2735	0,3096	0,2823
	Ort.	0,2801	0,316	0,3026	0,2775	0,3142	0,2969	0,323	0,2926
Durum-8	Min	0,258	0,3052	0,3022	0,2567	0,3028	0,2972	0,308	0,2613
	Ort.	0,2693	0,3122	0,3119	0,2753	0,3103	0,3064	0,3127	0,2705
Durum-9	Min	0,2569	0,2625	0,2625	0,2527	0,2625	0,2597	0,2639	0,2512
	Ort.	0,2604	0,2679	0,2662	0,2563	0,2686	0,2652	0,2682	0,2556
Durum-10	Min	0,2797	0,3184	0,2983	0,2897	0,3174	0,3163	0,3187	0,286
	Ort.	0,2894	0,3238	0,3193	0,3007	0,3257	0,3216	0,3261	0,2991
Durum-11	Min	0,2898	0,319	0,3181	0,3194	0,3186	0,3105	0,3201	0,2725
	Ort.	0,3042	0,3307	0,3298	0,3295	0,3292	0,3232	0,3282	0,2803
Durum-12	Min	0,2851	0,2917	0,2927	0,2906	0,2917	0,2906	0,2927	0,263
	Ort.	0,2902	0,297	0,2973	0,2964	0,2966	0,2949	0,2977	0,2693

Çizelge 7.3. Tüm vaka çalışmaları için standart sapma değerleri

Durumlar/Alg.		SOS	ABC	BBO	DE	GA	PSO	RSA	RUN
Durum-1	Std	0,0016	0,0036	0,0021	0,0006	0,0046	0,0034	0,0084	0,0027
Durum-2	Std	0,0026	0,0034	0,0034	0,0004	0,0054	0,0043	0,0048	0,0021
Durum-3	Std	0,002	0,0026	0,0044	0,0018	0,006	0,0035	0,0038	0,002
Durum-4	Std	0,0036	0,0037	0,003	0,0011	0,0048	0,0031	0,008	0,0055
Durum-5	Std	0,0041	0,0027	0,0056	0,0008	0,006	0,0125	0,0075	0,0041
Durum-6	Std	0,0016	0,003	0,0026	0,0009	0,0043	0,0034	0,0035	0,0017
Durum-7	Std	0,0043	0,0021	0,0104	0,007	0,0057	0,0189	0,0041	0,0053
Durum-8	Std	0,0051	0,0033	0,0043	0,0184	0,0036	0,0034	0,0028	0,0047
Durum-9	Std	0,0011	0,0024	0,0018	0,0016	0,0022	0,0021	0,002	0,0022
Durum-10	Std	0,0052	0,0032	0,0085	0,0031	0,0029	0,0019	0,0025	0,0071
Durum-11	Std	0,0085	0,0045	0,0051	0,0042	0,0044	0,0048	0,0043	0,0039
Durum-12	Std	0,0014	0,0023	0,0018	0,0024	0,0022	0,0015	0,0021	0,0023

Çizelge 7.4. Tüm vaka çalışmaları için maksimum ve medyan değerleri

Durumlar/Alg.		SOS	ABC	BBO	DE	GA	PSO	RSA	RUN
Durum-1	Max	0,2594	0,2946	0,269	0,2597	0,2912	0,2721	0,3268	0,2691
	Median	0,2562	0,2902	0,264	0,259	0,2789	0,2639	0,3173	0,2618
Durum-2	Max	0,2417	0,272	0,25	0,235	0,2629	0,2542	0,2947	0,2417
	Median	0,2354	0,2659	0,2438	0,2333	0,2505	0,25	0,2819	0,2375
Durum-3	Max	0,2125	0,2333	0,2292	0,2125	0,2333	0,225	0,2424	0,2125
	Median	0,2083	0,2292	0,2208	0,2102	0,2208	0,2208	0,2375	0,2083
Durum-4	Max	0,2743	0,3072	0,2865	0,2663	0,3038	0,2783	0,3293	0,2913
	Median	0,2671	0,3026	0,2753	0,2638	0,2902	0,2707	0,3185	0,2802
Durum-5	Max	0,2591	0,2916	0,2858	0,2482	0,2991	0,2958	0,306	0,2629
	Median	0,2489	0,2883	0,2713	0,2468	0,2886	0,2732	0,2961	0,2576
Durum-6	Max	0,2278	0,2471	0,2337	0,2313	0,2507	0,2417	0,2583	0,2301
	Median	0,223	0,2438	0,2292	0,2298	0,2426	0,2348	0,2521	0,2286
Durum-7	Max	0,2904	0,3196	0,3206	0,2901	0,324	0,3223	0,329	0,3
	Median	0,2806	0,3159	0,3	0,2761	0,3145	0,2875	0,3239	0,294
Durum-8	Max	0,2765	0,3197	0,3192	0,3152	0,3158	0,3116	0,3201	0,2786
	Median	0,2707	0,3122	0,3123	0,2647	0,3113	0,3071	0,3125	0,271
Durum-9	Max	0,2625	0,2736	0,2702	0,2596	0,2722	0,2681	0,2722	0,2597
	Median	0,2611	0,2681	0,2661	0,2563	0,2694	0,2653	0,2681	0,2555
Durum-10	Max	0,303	0,3309	0,3276	0,3038	0,3312	0,3242	0,3318	0,3137
	Median	0,2888	0,3236	0,3223	0,3017	0,3261	0,3216	0,3262	0,2984
Durum-11	Max	0,3157	0,3382	0,3402	0,3363	0,3372	0,3338	0,338	0,2868
	Median	0,3048	0,3314	0,3293	0,3297	0,3293	0,3233	0,3276	0,281
Durum-12	Max	0,2927	0,3031	0,3	0,3002	0,301	0,2979	0,3021	0,2744
	Median	0,2906	0,2969	0,2969	0,2958	0,2964	0,2948	0,2979	0,2695

Deneysel çalışmada, önerilen MRTC algoritması için en güçlü metasezgisel optimizasyon yönetimin belirlenmesi için Friedman istatistiksel analiz ve Wilcoxon istatiksel analiz sonuçları da değerlendirilmiştir. Algoritmaların 12 durum için elde ettiği en iyi Friedman puanı Çizelge 7.5' de ve Wilcoxon skorları Çizelge 7.6’ da verilmiştir. Algoritmaların Friedman puanları incelendiğinde, keşif, sömürü ve dengeli arama yetenekleri açısından farklı durumlarda SOS, DE ve RUN yöntemlerinin en etkili algoritmalar olduğu anlaşılmaktadır. Algoritmaların Wilcoxon skorları incelendiğinde, yine SOS, DE ve RUN yöntemlerinin en etkili algoritmalar olduğu anlaşılmaktadır.

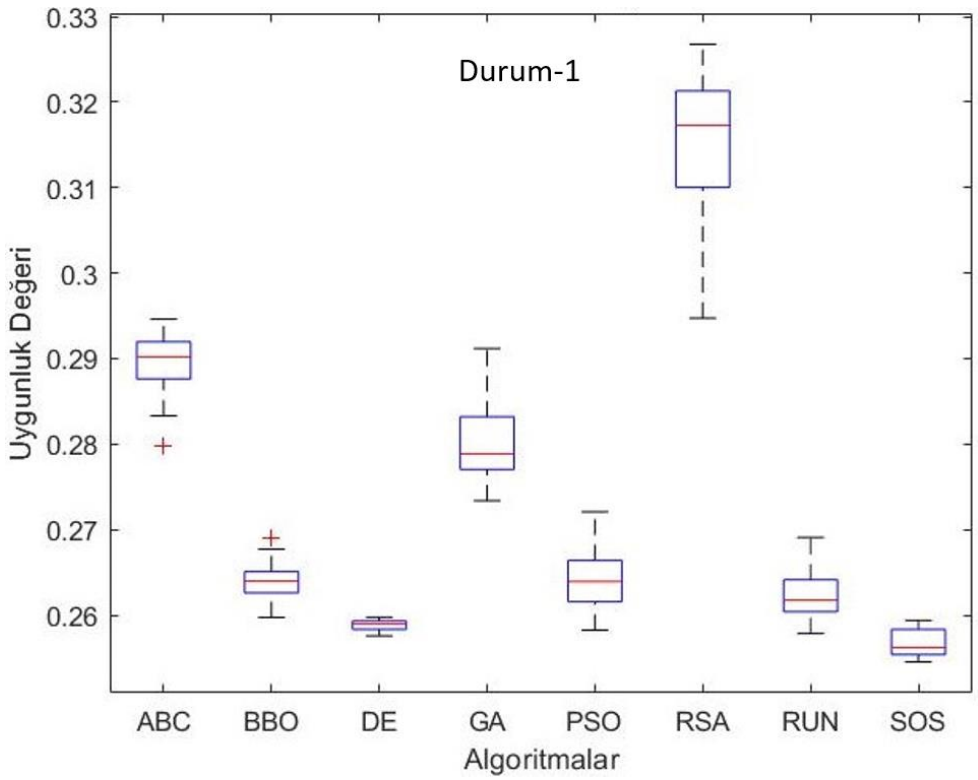
Çizelge 7.5. Metasezgisel algoritmalar için Friedman skorları

Alg.	D.-1	D.-2	D.-3	D.-4	D.-5	D.-6	D.-7	D.-8	D.-9	D.-10	D.-11	D.-12
SOS	1,267	2,117	1,900	2,100	1,767	1,217	1,933	1,933	3,050	1,200	2,000	2,083
ABC	6,967	6,967	6,717	7,000	6,367	6,450	6,233	6,350	6,383	5,917	6,417	5,817
BBO	4,133	4,317	4,617	4,200	4,500	2,750	4,767	6,367	5,200	5,267	5,850	6,150
DE	1,933	1,400	2,467	1,167	1,333	3,617	1,567	2,333	1,633	2,667	5,783	5,250
GA	6,033	5,583	5,650	5,967	6,533	6,500	5,967	5,683	6,850	6,750	5,817	5,300
PSO	4,067	5,033	4,933	2,867	5,067	5,017	4,100	4,467	4,900	4,733	3,600	4,133
RSA	8,000	8,000	7,900	7,933	7,467	7,933	7,800	6,833	6,617	7,200	5,533	6,267
RUN	3,600	2,583	1,817	4,767	2,967	2,517	3,633	2,033	1,367	2,267	1,000	1,000

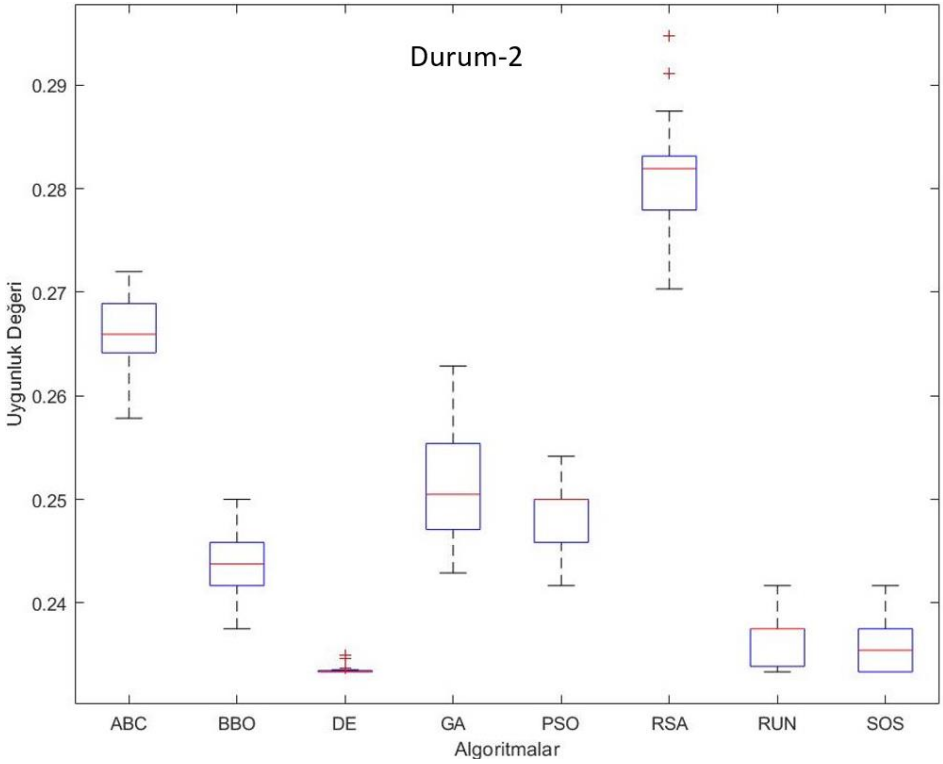
Çizelge 7.6. Metasezgisel algoritmalar için Wilcoxon skorları

Alg.	Durum-1			Durum-2			Durum-3			Durum-4			Durum-5			Durum-6		
	win	equal	lose	win	equal	lose	win	equal	lose	win	equal	lose	win	equal	lose	win	equal	lose
SOS	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
ABC	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
BBO	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
DE	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
GA	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
PSO	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
RSA	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
RUN	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Alg.	Durum-7			Durum-8			Durum-9			Durum-10			Durum-11			Durum-12		
	win	equal	lose	win	equal	lose	win	equal	lose	win	equal	lose	win	equal	lose	win	equal	lose
SOS	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
ABC	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
BBO	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
DE	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
GA	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
PSO	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
RSA	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
RUN	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1

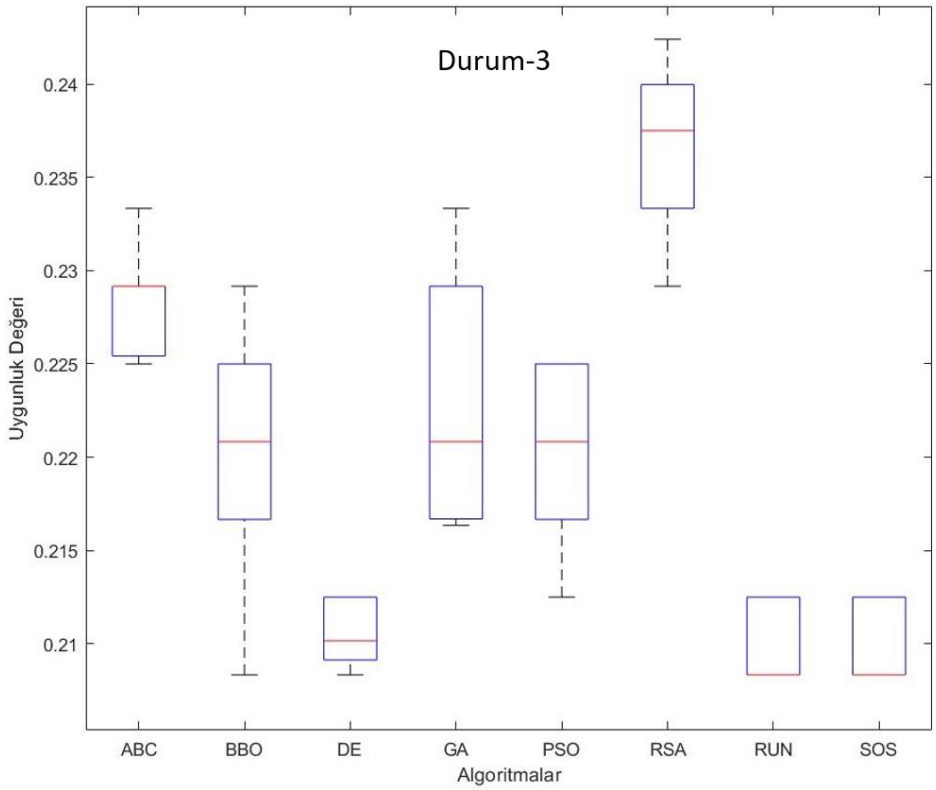
Kutu grafikleri, algoritmaların sömürü ve keşif yeteneklerini analiz etmek ayrıca minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma marjlarını grafik olarak göstermek için de etkili bir değerlendirme yöntemidir. Kutu grafikleri değerlendirilirken 30 çalıştırma sonucunda elde edilen sonuçların sıfır varyansa yakın olması istenir [121]. Çizelge 7.3' deki standart sapma değerleri de incelendiğinde ilk 6 durum çalışması için DE yönteminin varyansının sıfıra daha yakın olduğu sonraki 6 durum çalışması için ise farklı yöntemlerin varyanslarının sıfıra daha yakın olduğu görülmektedir. %25 penetrasyon seviyesi için Durum-1, Durum-2 ve Durum-3 çalışmalarının kutu grafiği Şekil 7.5, Şekil 7.6, Şekil 7.7' de verilmiştir. %50 penetrasyon için Durum-4, Durum-5 ve Durum-6 çalışmalarının kutu grafiği Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10' da verilmiştir. %75 penetrasyon için Durum-7, Durum-8 ve Durum-9 çalışmalarının kutu grafiği Şekil 7.11, Şekil 7.12, Şekil 7.13' de verilmiştir. %100 penetrasyon için Durum-10, Durum-11 ve Durum-12 çalışmalarının kutu grafikleri Şekil 7.14, Şekil 7.15, Şekil 7.16' da verilmiştir. Kutu grafikleri incelendiğinde farklı durum çalışmaları için farklı yöntemlerin etkili olduğu anlaşılmaktadır.



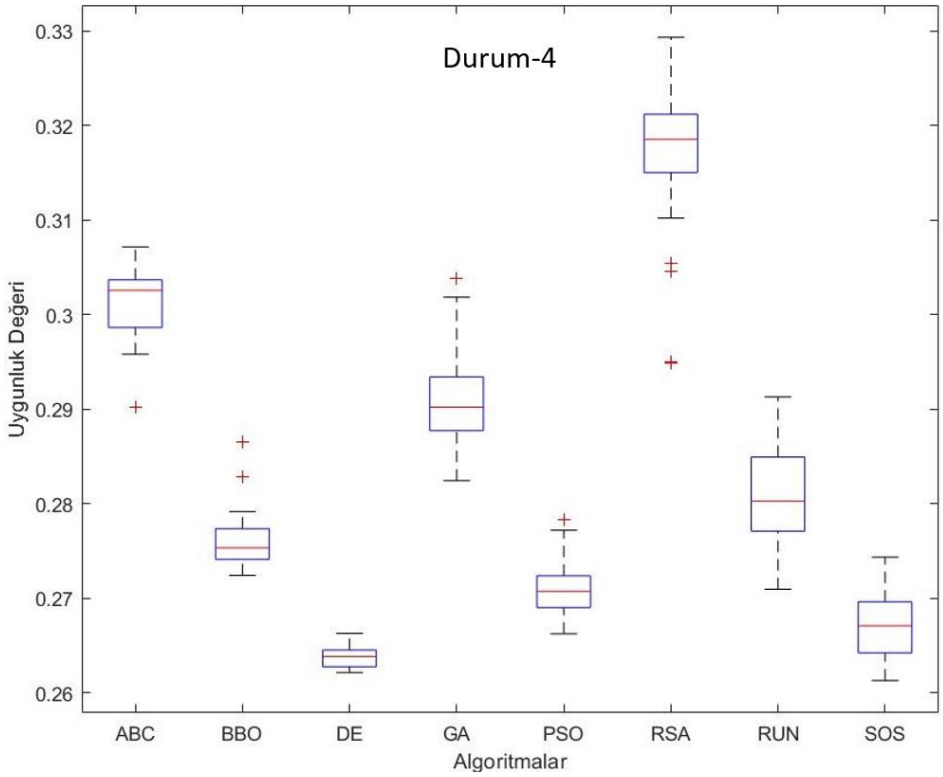
Şekil 7.5. Durum-1 için kutu grafiği



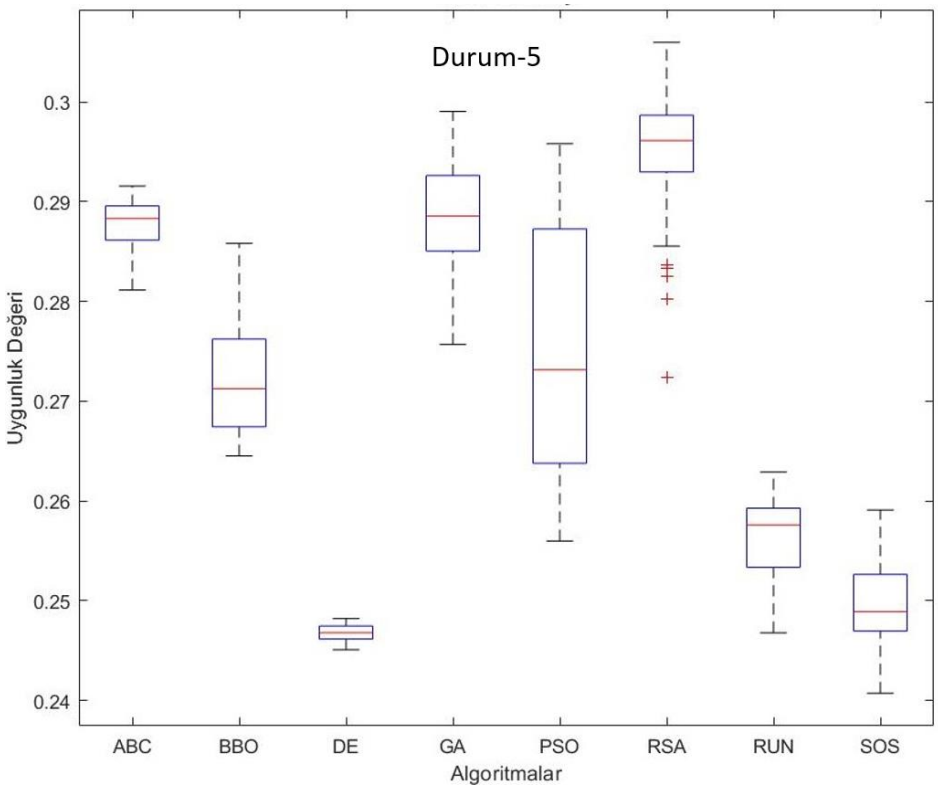
Şekil 7.6. Durum-2 için kutu grafiği



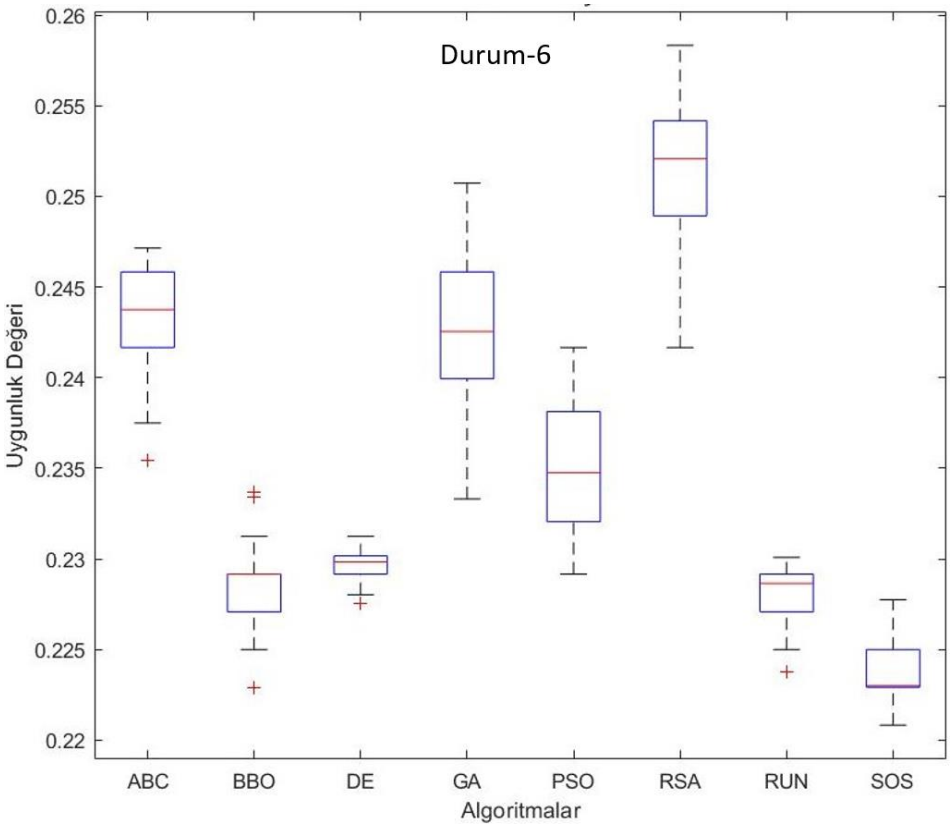
Şekil 7.7. Durum-3 için kutu grafiği



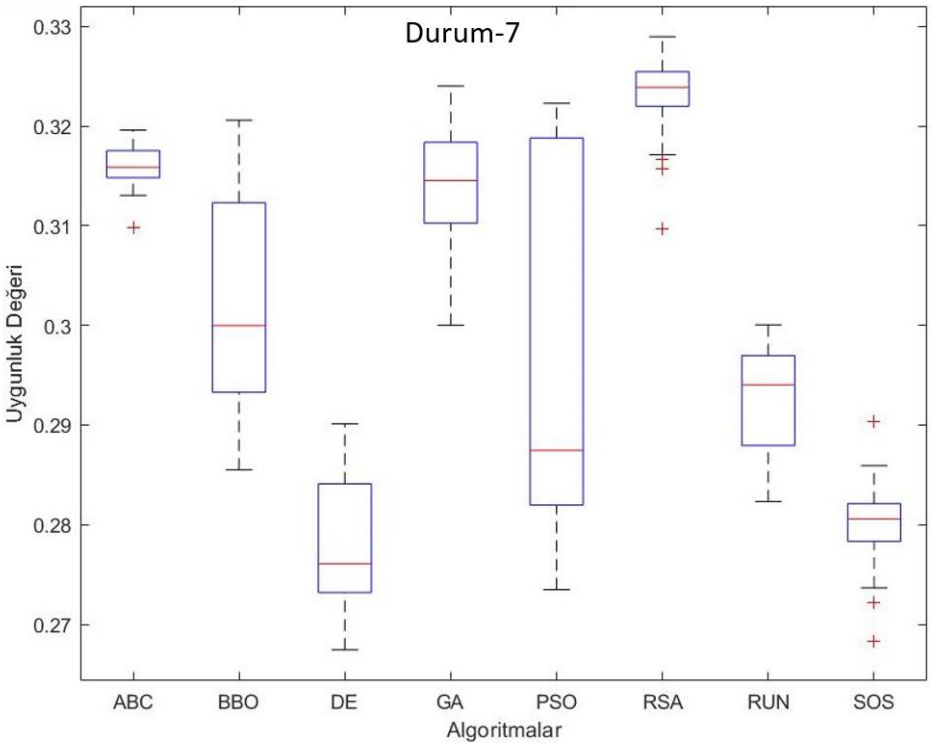
Şekil 7.8. Durum-4 için kutu grafiği



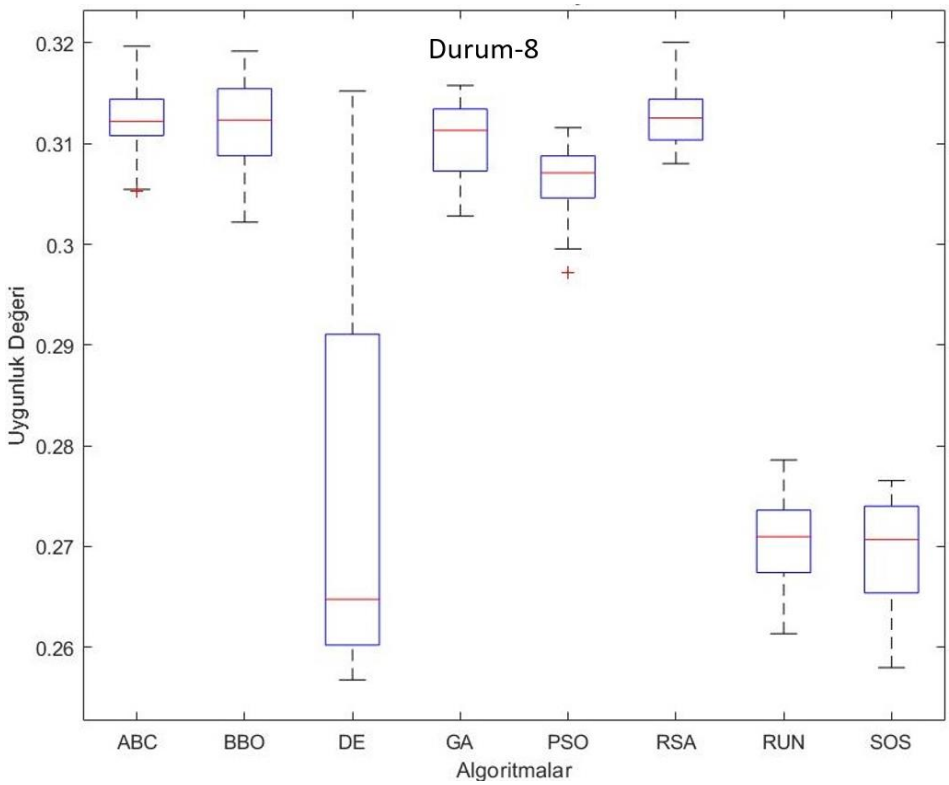
Şekil 7.9. Durum-5 için kutu grafiği



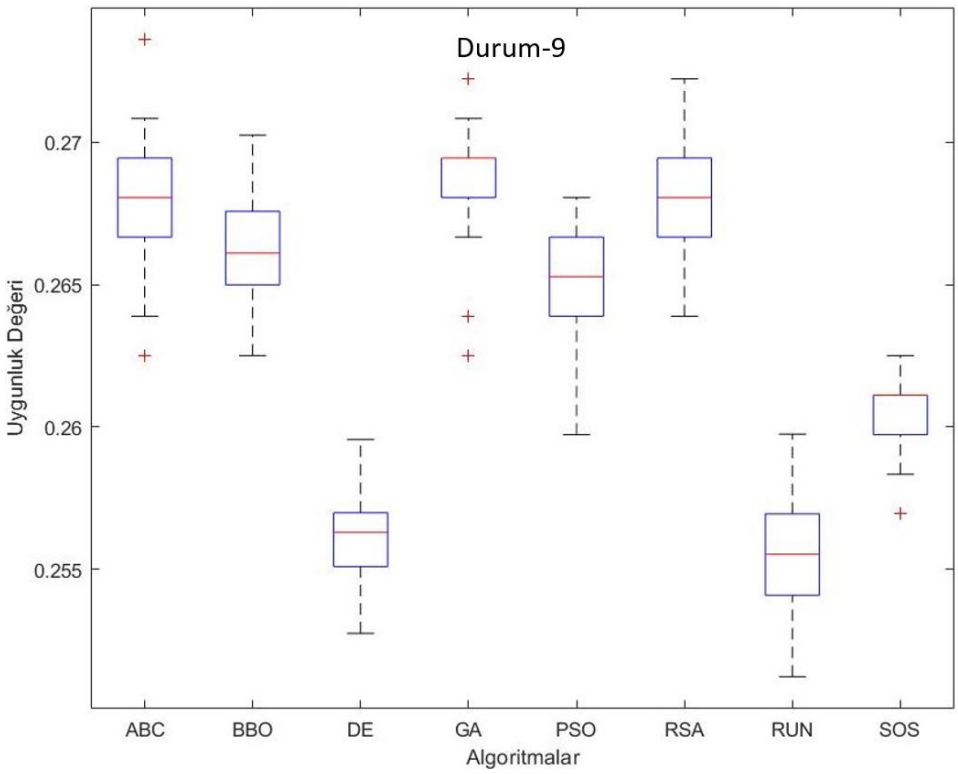
Şekil 7.10. Durum-6 için kutu grafiği



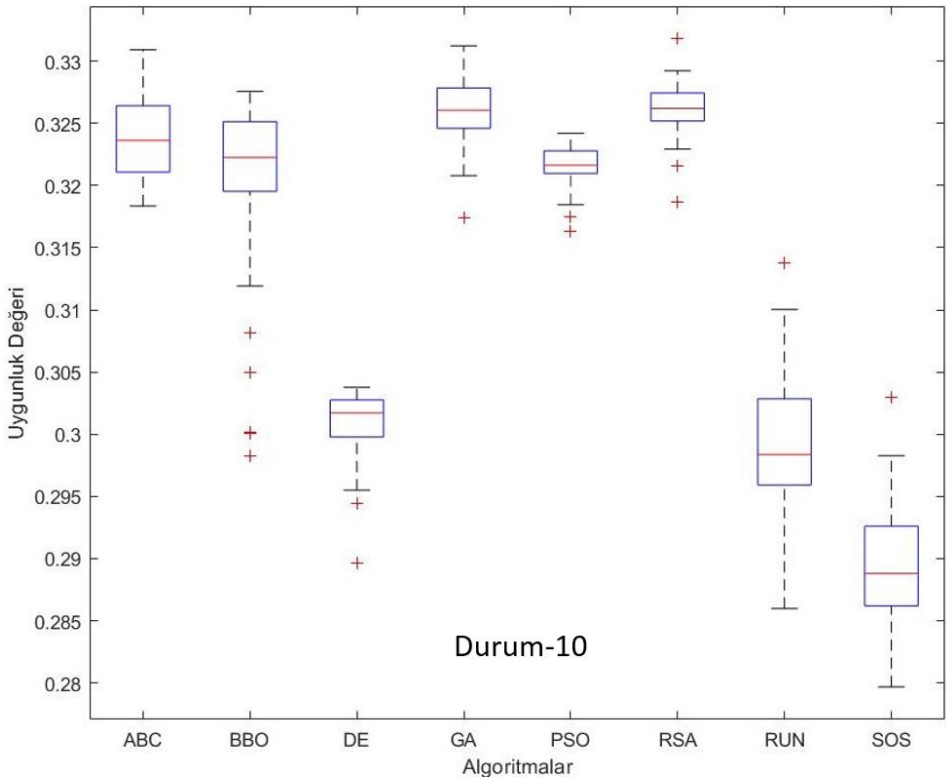
Şekil 7.11. Durum-7 için kutu grafiği



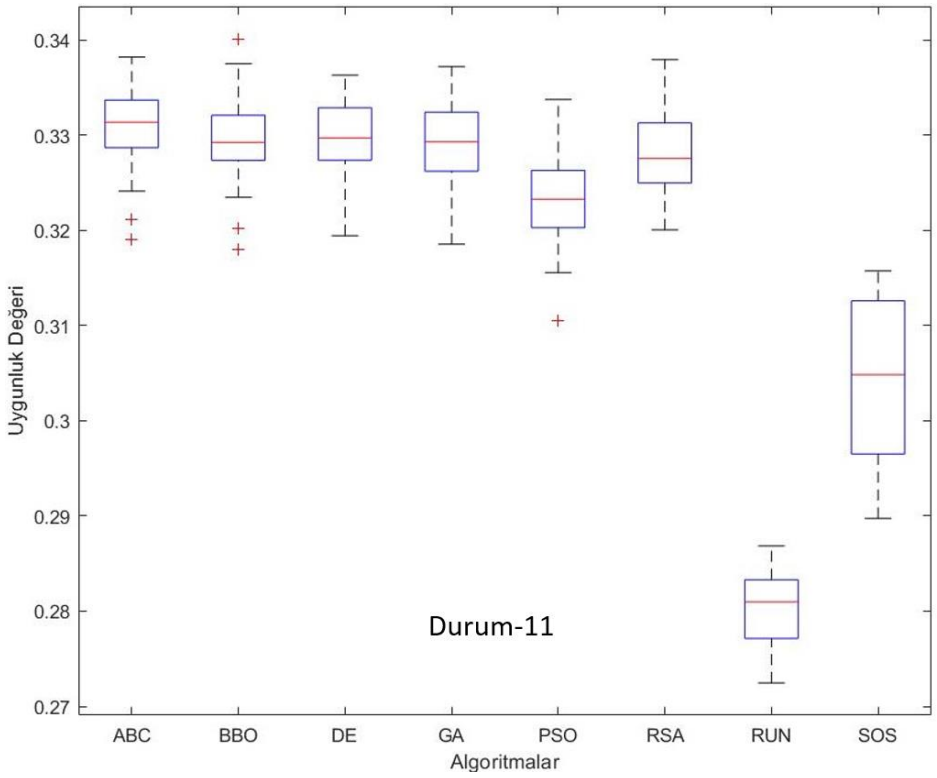
Şekil 7.12. Durum-8 için kutu grafiği



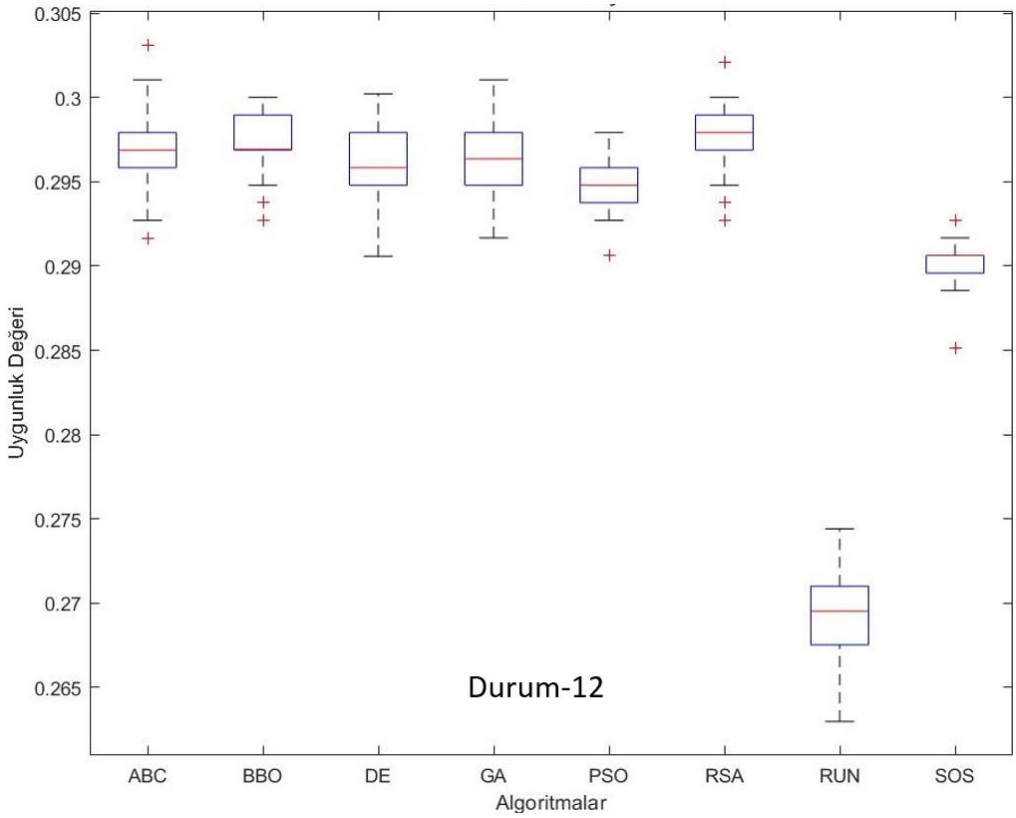
Şekil 7.13. Durum-9 için kutu grafiği



Şekil 7.14. Durum-10 için kutu grafiği



Şekil 7.15. Durum-11 için kutu grafiği



Şekil 7.16. Durum-12 için kutu grafiği

Tüm sonuçlar incelendiğnde MRTC algoritması için farklı durumlara göre pek çok yöntem önerilebilir. Tüketici araç sayısının üretici araç sayısından fazla olduğu durum çalışmaları için SOS ve DE yöntemlerinin en uygun algoritmalar olduğu söylenebilir. Fakat özellikle yüksek penetrasyon sevilelerinde DE yönteminin arama performansı düştüğü için tüketicinin üreticiden fazla olduğu durum çalışmaları için SOS algoritmasının en uygun yöntem olduğu söylenebilir. Üretici tüketici eşitliği ve üretici araç sayısının fazla olduğu durum çalışmalarında ise SOS, DE ve RUN yöntemleri en uygun algoritmalardır. Fakat %50 penetrasyon seviyesi için SOS ve DE, %100 seviyesi için ise RUN ve SOS yöntemleri daha etkili algoritmalardır.

Sonuçlar incelendiğinde özellikle bağımsız değişken sayısı arttıkça SOS ve RUN dışındaki algoritmaların arama performanslarının ciddi oranlarda düştüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca algoritmaların yakınsama hızlarının da yükseldiği görülmektedir. Gerçek zamanlı bir algoritma için bu sorunlar ciddi problemlerdir. Bu sebeple MRTC algoritması için tek bir yöntem yerine her koşul çalışması için en uygun algoritmanın kullanılması daha uygun olacaktır.

7.2. MRTC Algoritmasının Performansı ve Memnuniyet Çıktıları

Gün öncesi yük eğrisinden belirlenen puant ve puant olmayan zaman aralığı, şarj süreleri dikkate alındığından Seviye-1 şarj limiti için nispeten küçük sürelerdir. Ayrıca simülasyon çalışmasının hedefi önerilen algoritma için en iyi yöntemi belirlemek ve algoritmanın performansını test etmek olduğundan bu zaman diliminde istasyona giriş çıkış yapılmadığı varsayılarak gerçekleştirilmiştir. Yani temel hedef olarak puant saat diliminde şebekeden talep edilecek toplam EA yükünün tüm seviyelerine göre algoritmanın çıktıları değerlendirilmiştir. Fakat memnuniyet sonuçları değerlendirilirken algoritmanın performansını bozacak olan üretici araçların istasyondan çıkma olasılığı dikkate alınmıştır.

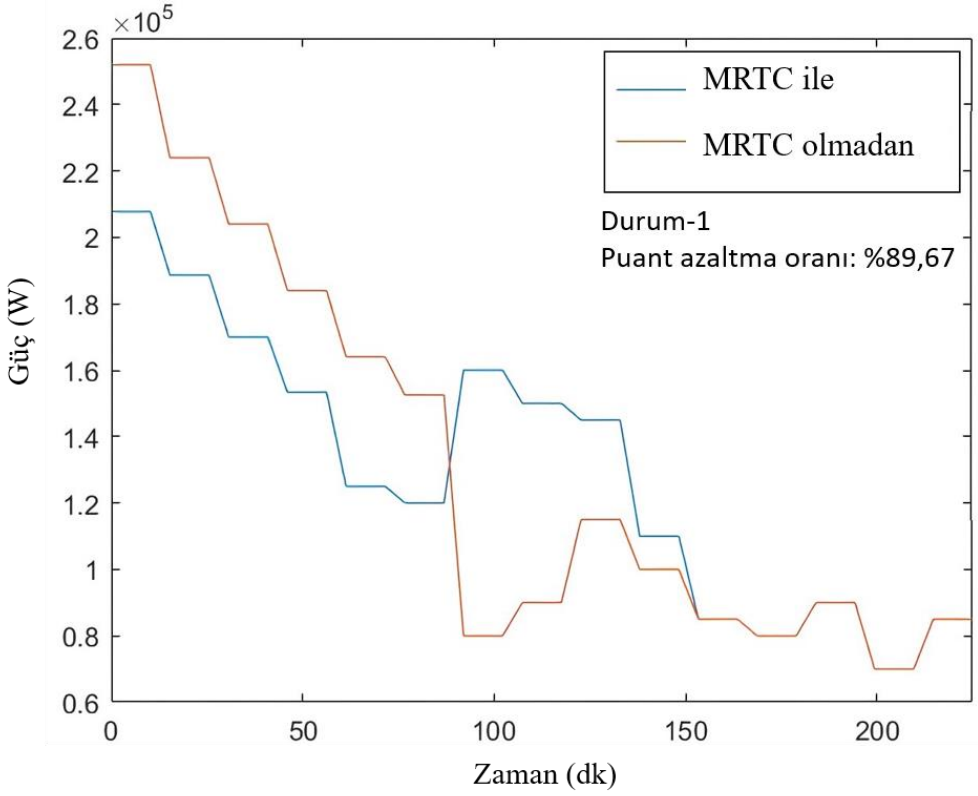
MRTC algoritmasının performansı metasezgisel yöntemlerin minimum değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmasına göre her durum çalışması için EA yükünün azaltılma oranı Çizelge 7.7' de verilmiştir.

Çizelge 7.7. MRTC Algoritmasının EA Yükünü Azaltma Oranı

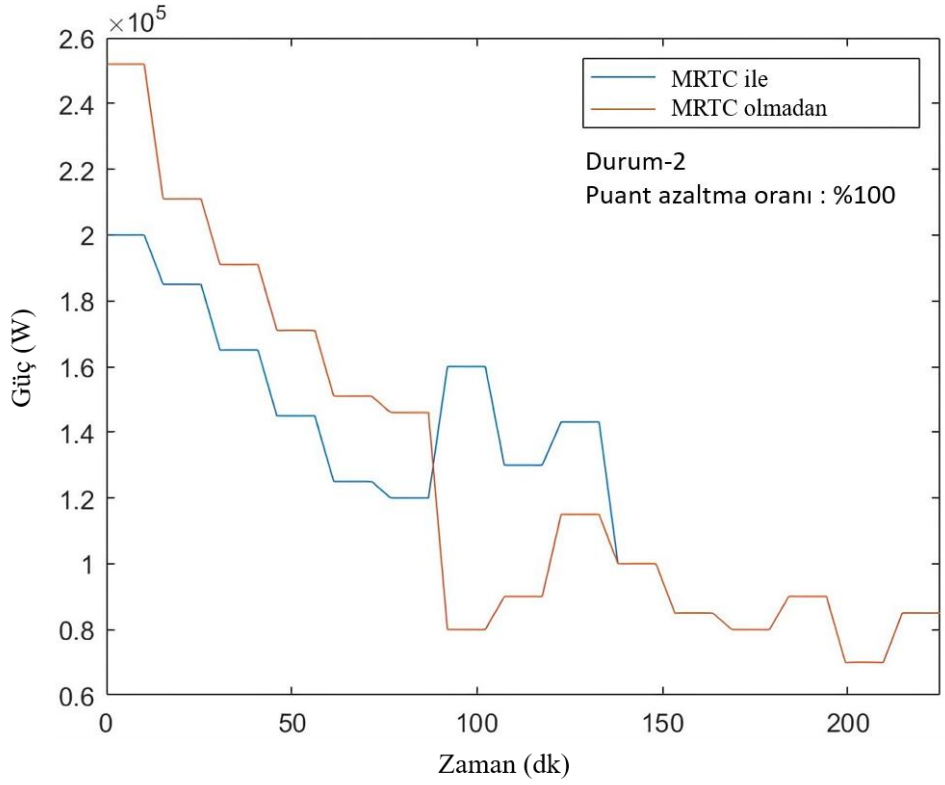
Durumlar	Penetrasyon Seviyesi %	Kullanılan Algoritmalar	Düşürme Oranı %
Durum-1	25	SOS	89,67
Durum-2	25	SOS	100
Durum-3	25	SOS	100
Durum-4	50	SOS	78,75
Durum-5	50	SOS	91,18
Durum-6	50	SOS	100
Durum-7	75	DE	59,56
Durum-8	75	DE	81,92
Durum-9	75	RUN	89,09
Durum-10	100	SOS	46,12
Durum-11	100	RUN	81,9
Durum-12	100	RUN	87,94

Sonuçlar incelendiğinde Durum-2, Durum-3 ve Durum-6’ da EA yükünün tamamı puant olmayan zaman aralığına kaydırılmıştır. Bununla beraber puant zaman aralığında tüketici etiketli araçların şarj işlemine devam edilerek sürücü memnuniyetleri maksimize edilmiştir. MRTC algoritması ile durum çalışmalarında %46,12 ile %100 oranlarında şebeke yükü tıraşlanmıştır. Bu sayede EA’ ların şebeke üzerindeki yükü azaltılmıştır.

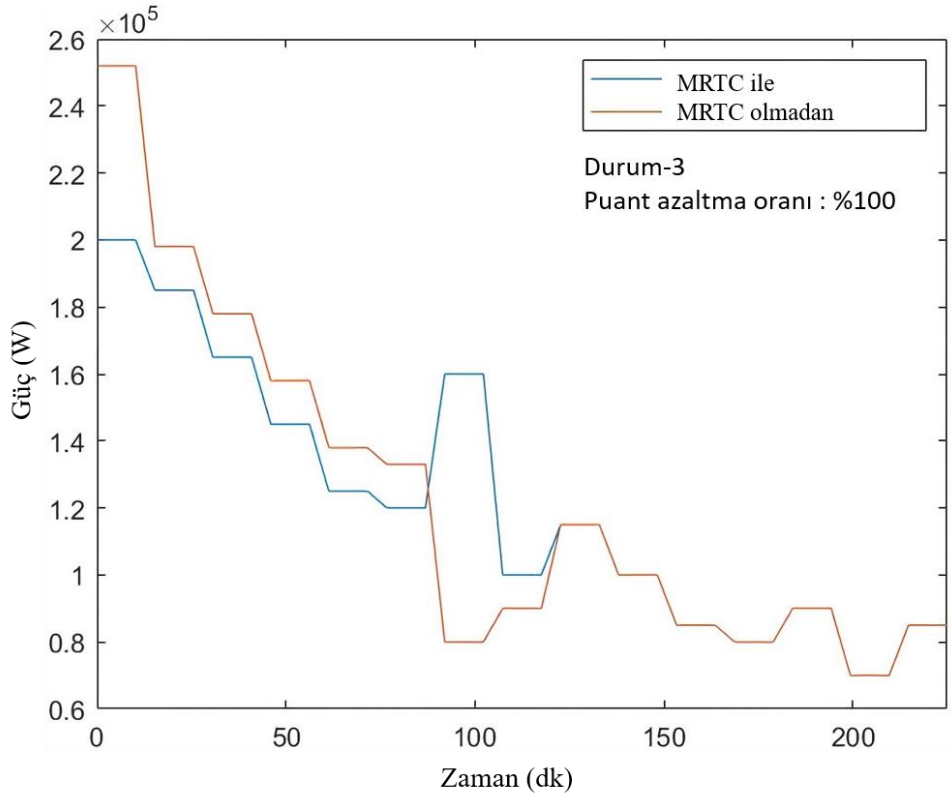
Yapılan nümerik hesaplamalar sonucunda her durum için belirlenen en uygun algoritmaların en iyi değerleri kullanılarak şarj süreci boyunca güç değişimleri verilmiştir. Buna göre Durum-1, Durum-2, Durum-3, Durum-4, Durum-5, Durum-6, Durum-7, Durum-8, Durum-9, Durum-10, Durum-11 ve Durum-12 için güç değişimleri sırasıyla Şekil 7.17, Şekil 7.18, Şekil 7.19, Şekil 7.20, Şekil 7.21, Şekil 7.22, Şekil 7.23, Şekil 7.24, Şekil 7.25, Şekil 7.26, Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’ de verilmiştir. Bu sayede MRTC algoritması ile akılsız şarj durumunda istasyonun bağlı olduğu OG/AG noktası için elde edilen anlık güç değişimi değerlendirilebilmiştir.



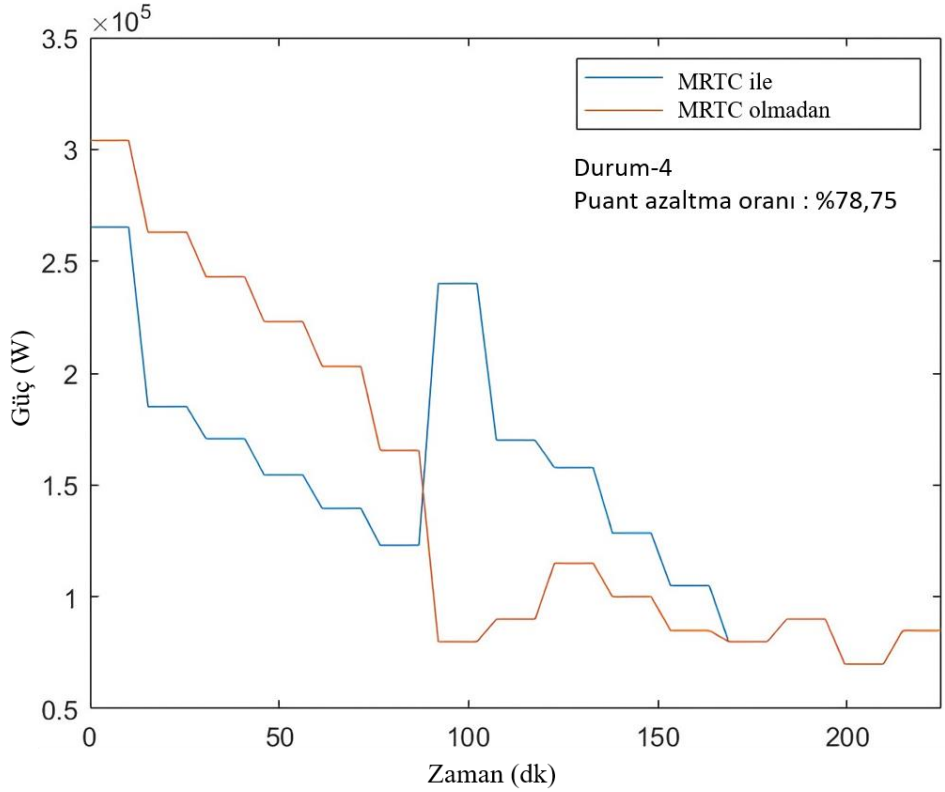
Şekil 7.17. Durum-1 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



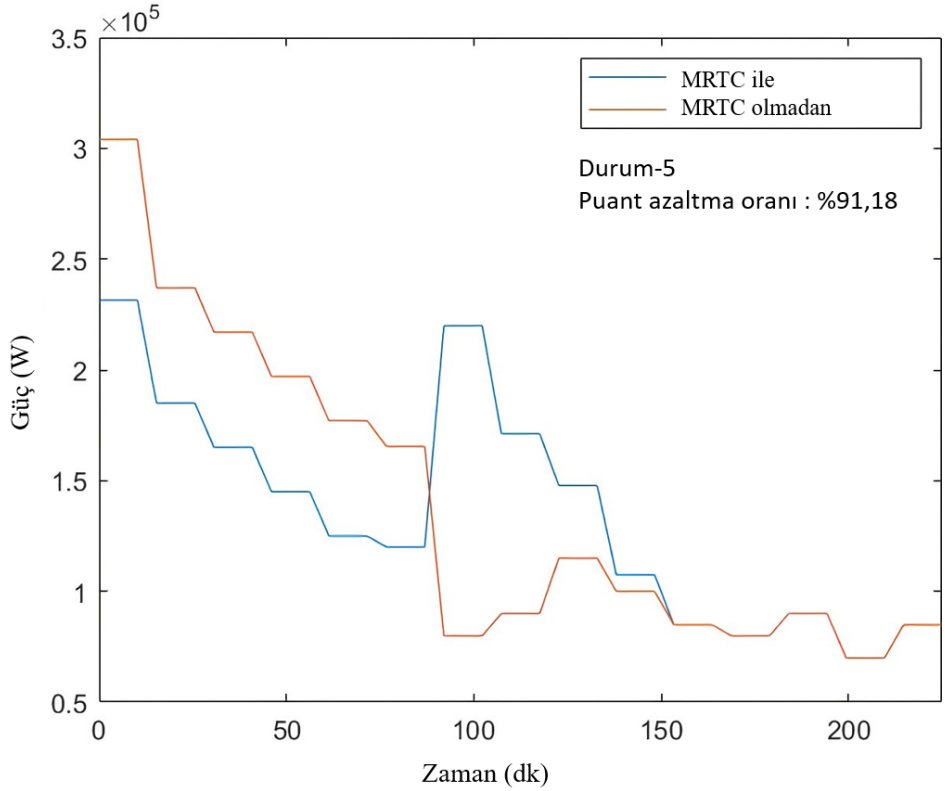
Şekil 7.18. Durum-2 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



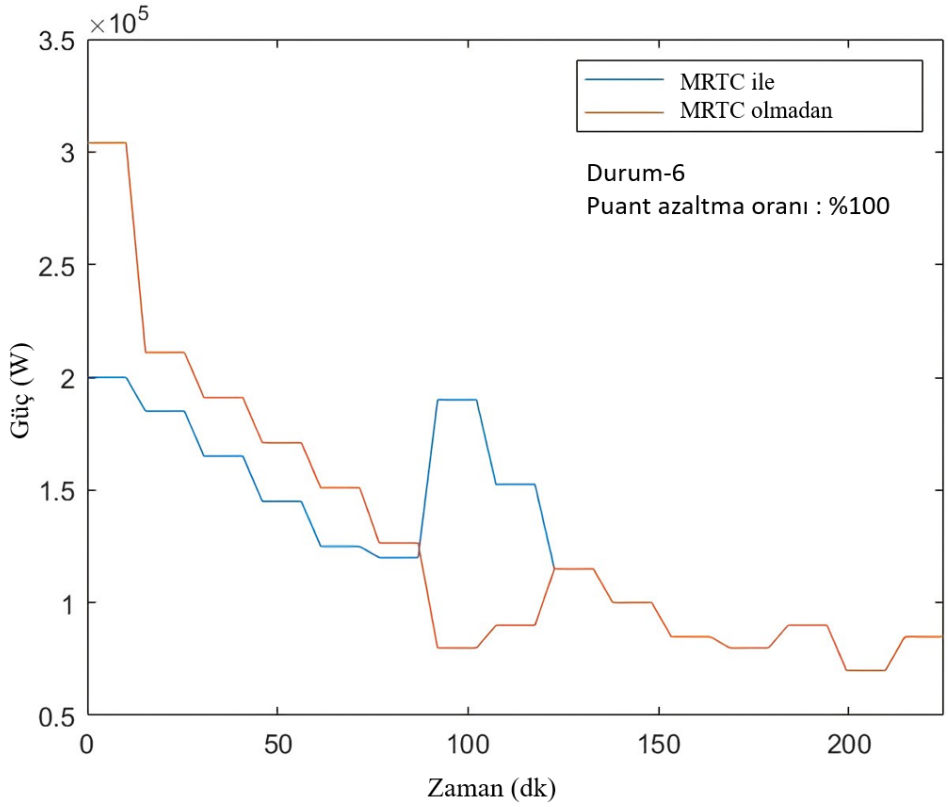
Şekil 7.19. Durum-3 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



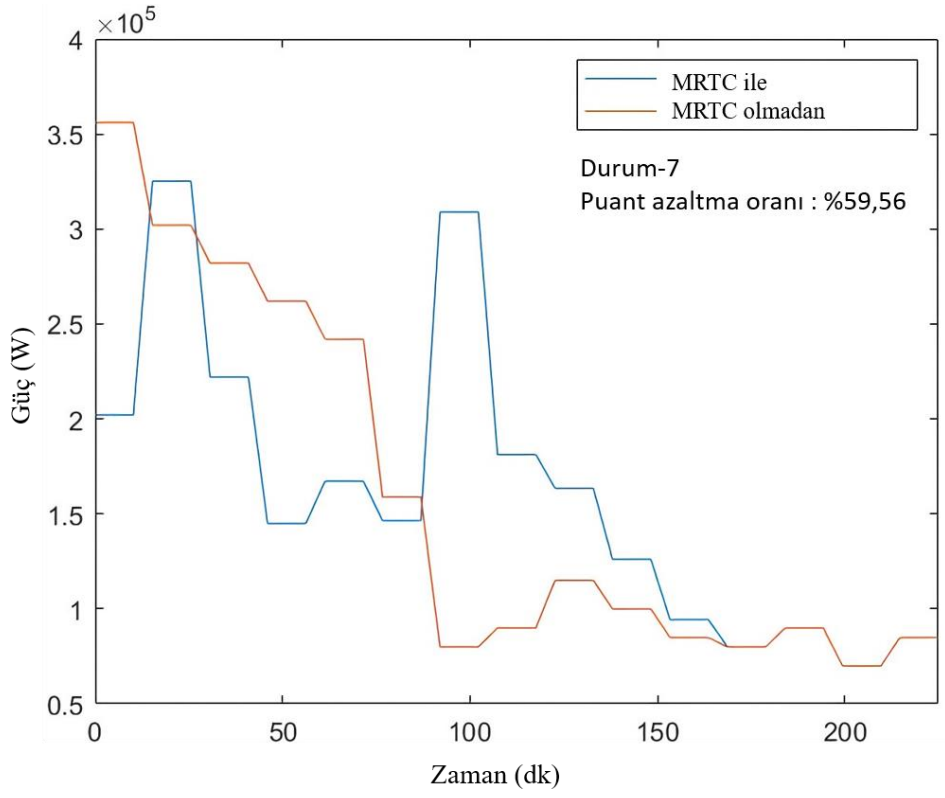
Şekil 7.20. Durum-4 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



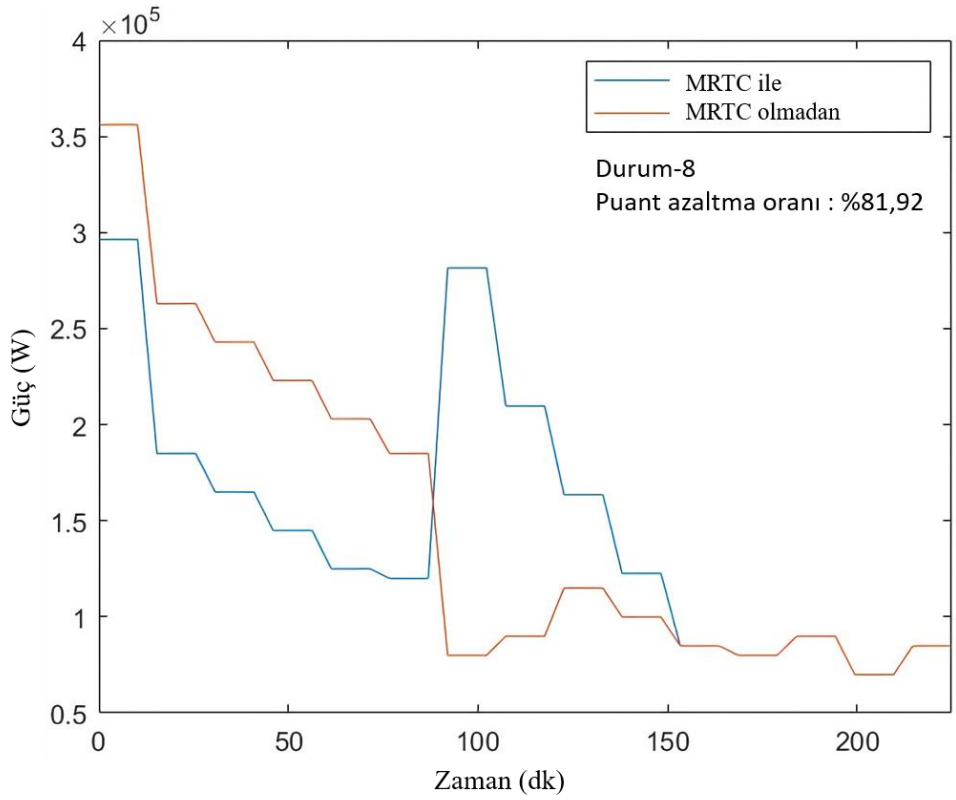
Şekil 7.21. Durum-5 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



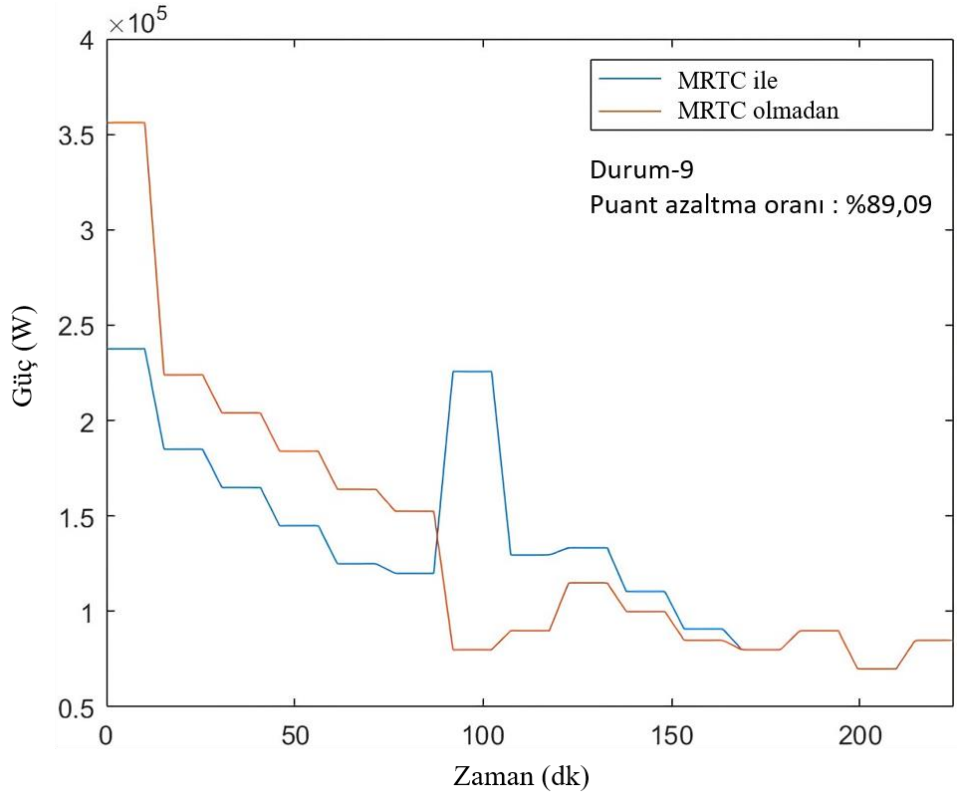
Şekil 7.22. Durum-6 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



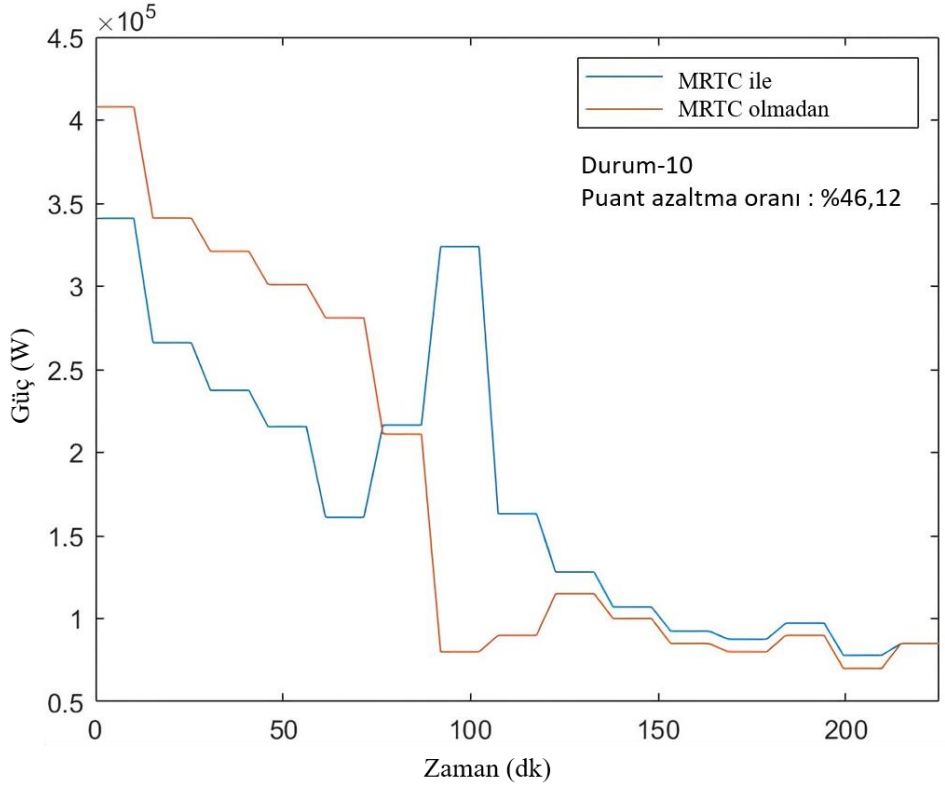
Şekil 7.23. Durum-7 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



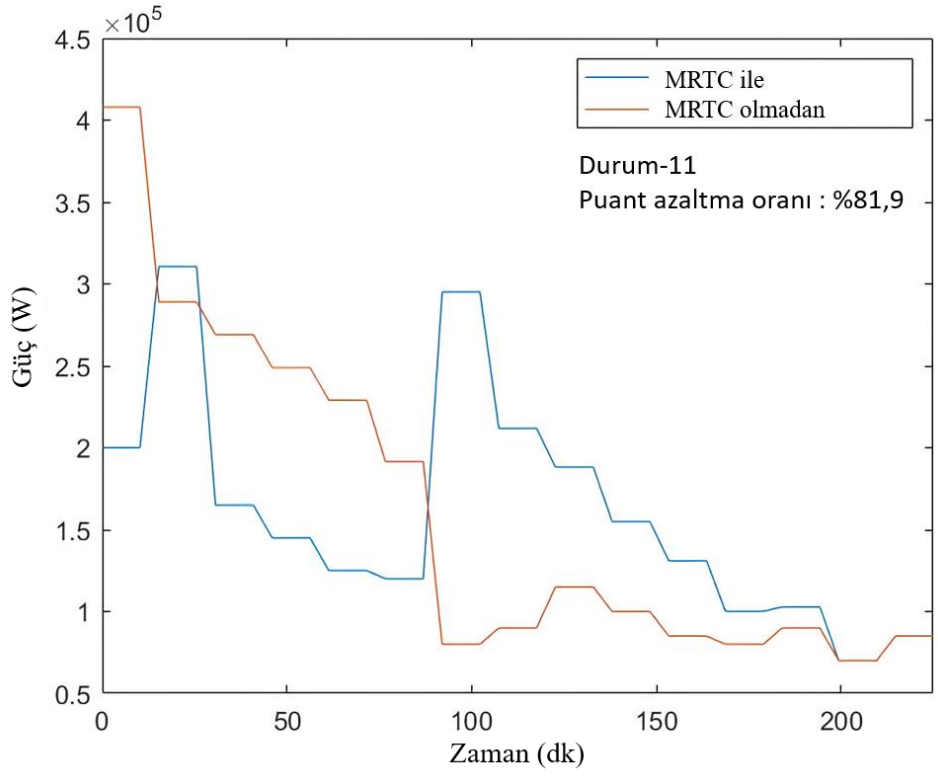
Şekil 7.24. Durum-8 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



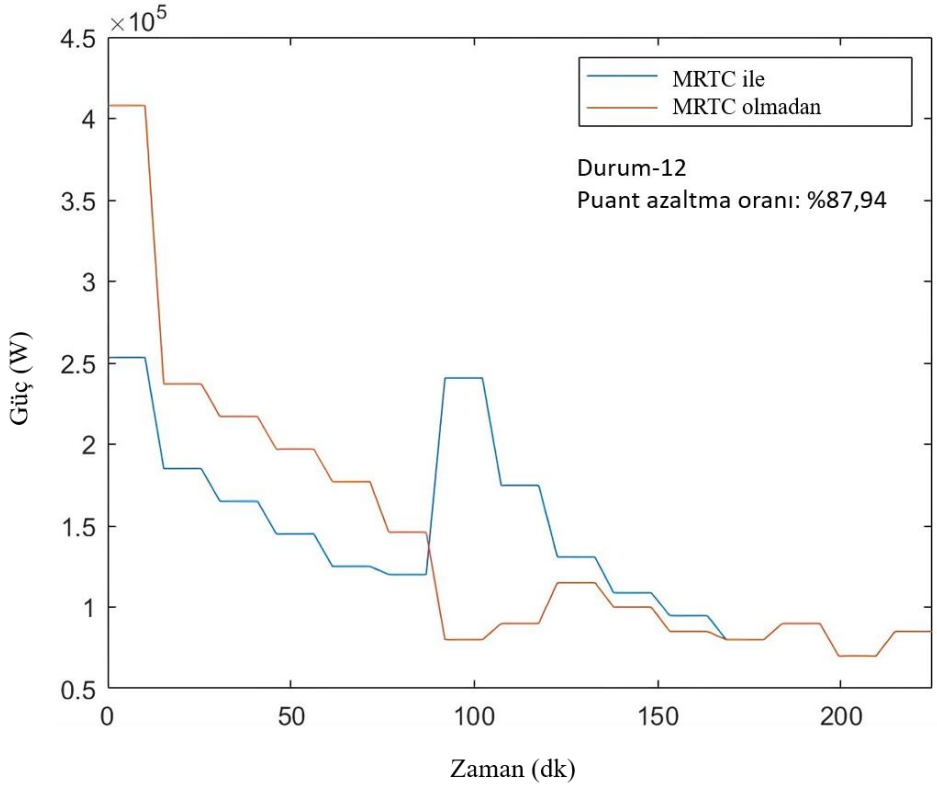
Şekil 7.25. Durum-9 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



Şekil 7.26. Durum-10 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



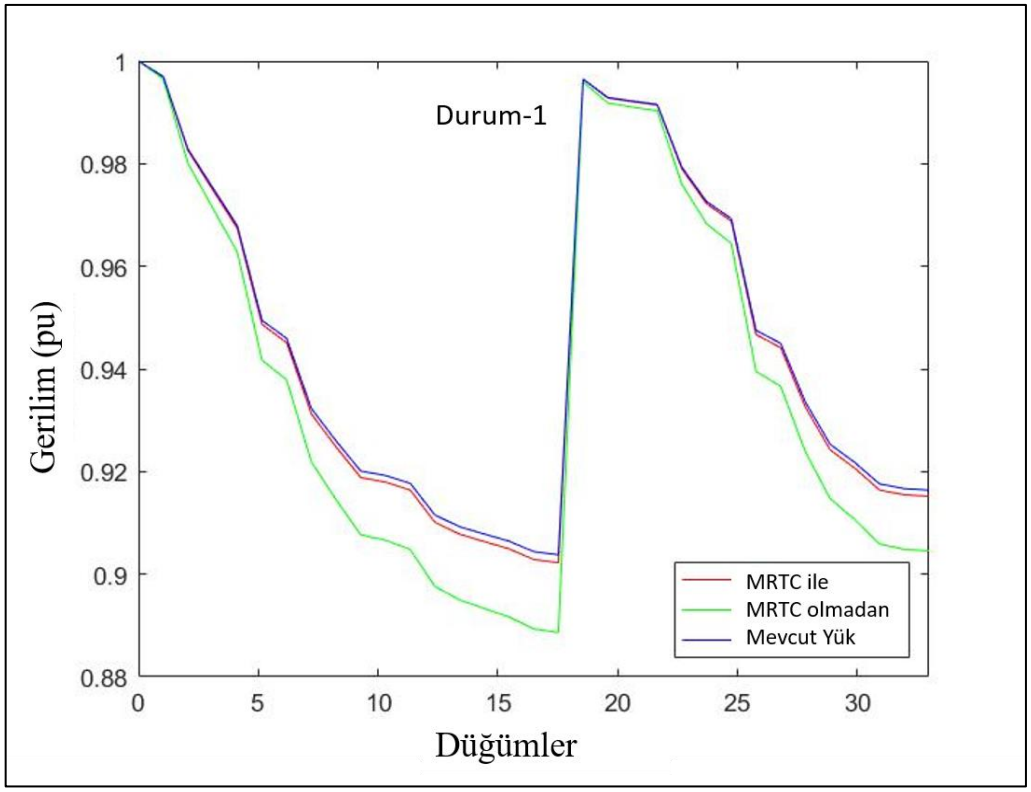
Şekil 7.27. Durum-11 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi



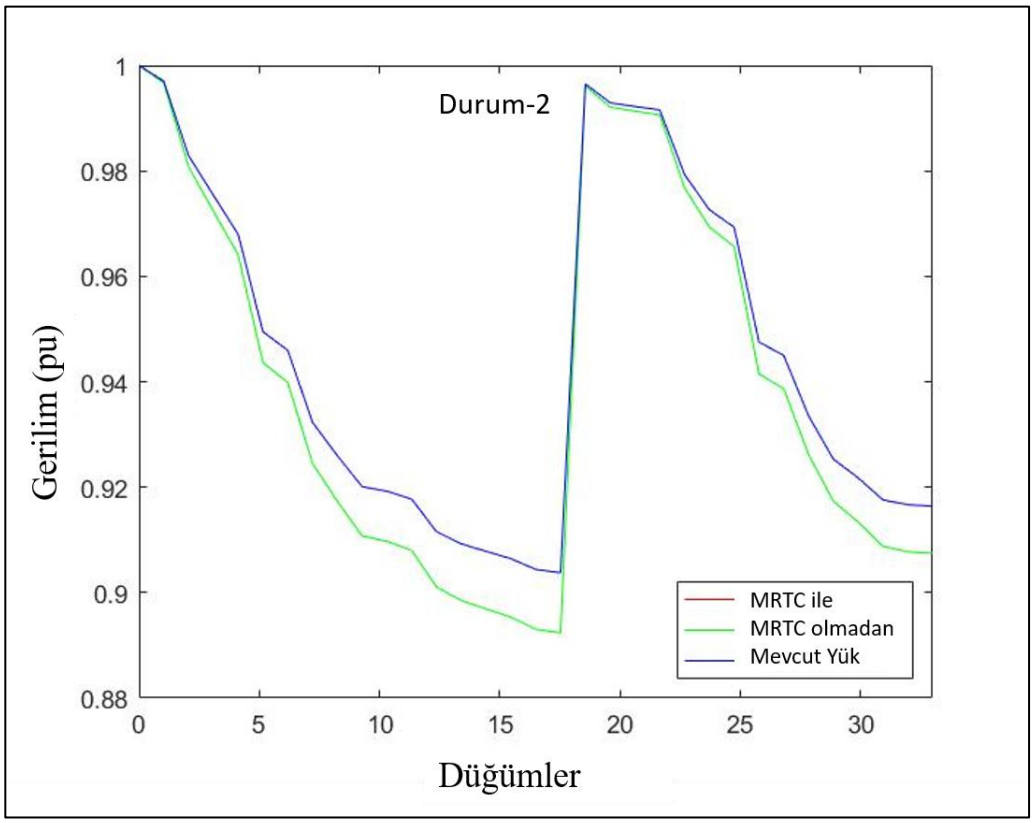
Şekil 7.28. Durum-12 için MRTC algoritmasının yük eğrisi üzerindeki etkisi

Güç değişim grafikleri incelendiğinde üretici araç sayısının oransal olarak az olduğu Durum-1, Durum-4, Durum-7 ve Durum-10 için puant yük azaltma oranı aynı penetrasyon seviyesi durum çalışmalarına göre daha düşüktür. Ayrıca üretici-tüketici oranları aynı olan durum çalışmaları incelendiğinde penetrasyon seviyesi arttıkça puant yük tıraşlama oranlarının her koşulda azaldığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte araçların bataryalarının dolma süreleri de uzamıştır. Üretici araç sayısı oransal olarak arttığında azaltma oranı da doğal olarak artmaktadır.

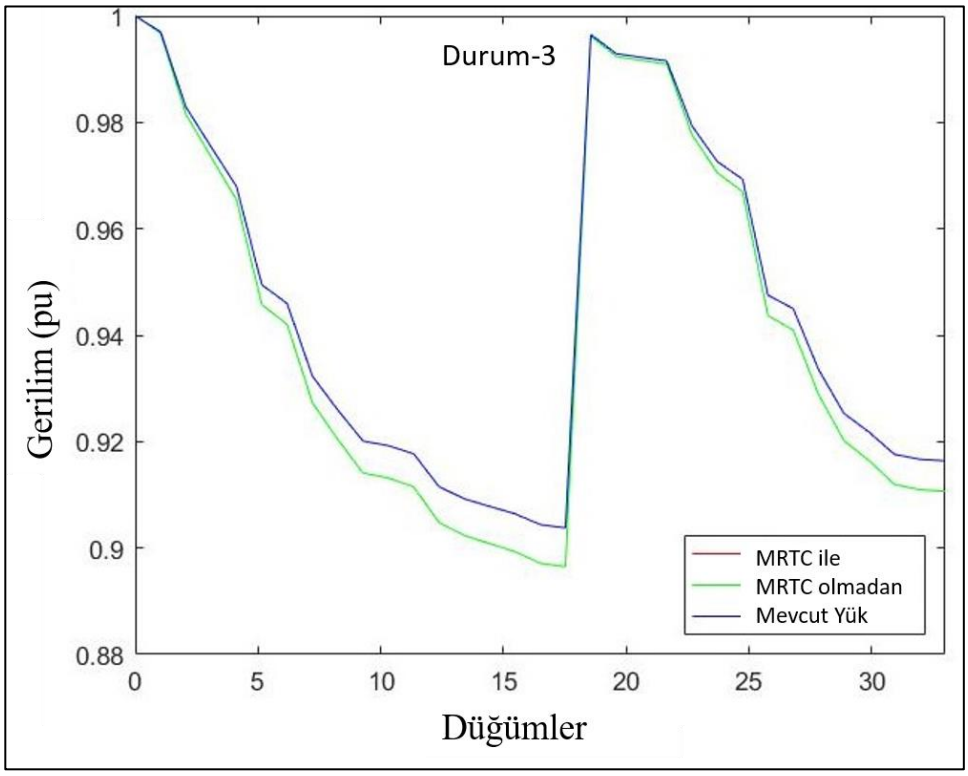
Elde edilen sonuçların ana şebeke üzerindeki etkilerinin değerlendirilebilmesi için MRTC algoritması IEEE-33 node test fideri üzerinde de simüle edilmiştir. İstasyon kurulu gücü bağlı bulunan nodun kapasitesine göre değişeceğinden dolayı tüm nodlar aynı EA yükü oranında artırılarak nümerik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Buna göre Durum-1, Durum-2, Durum-3, Durum-4, Durum-5, Durum-6, Durum-7, Durum-8, Durum-9, Durum-10, Durum-11 ve Durum-12 için her nodun gerilim değişimleri sırasıyla Şekil 7.29, Şekil 7.30, Şekil 7.31, Şekil 7.32, Şekil 7.33, Şekil 7.34, Şekil 7.35, Şekil 7.36, Şekil 7.37, Şekil 7.38, Şekil 7.39, Şekil 7.40’ da verilmiştir.



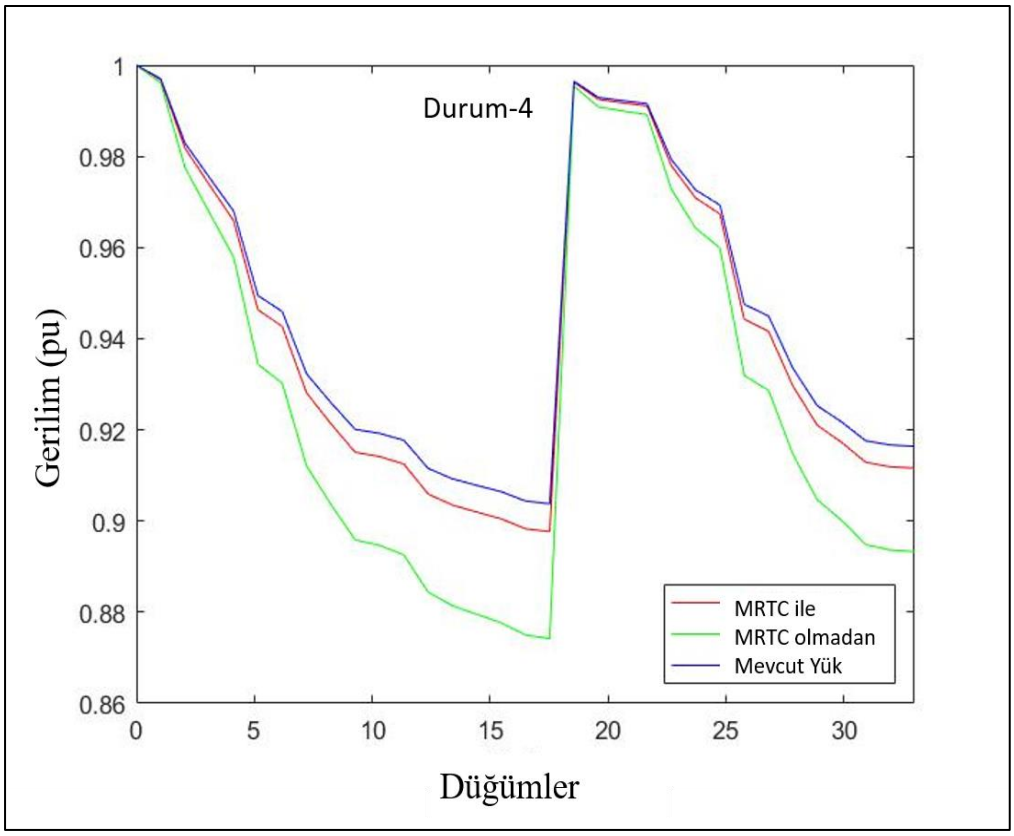
Şekil 7.29. Durum-1 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



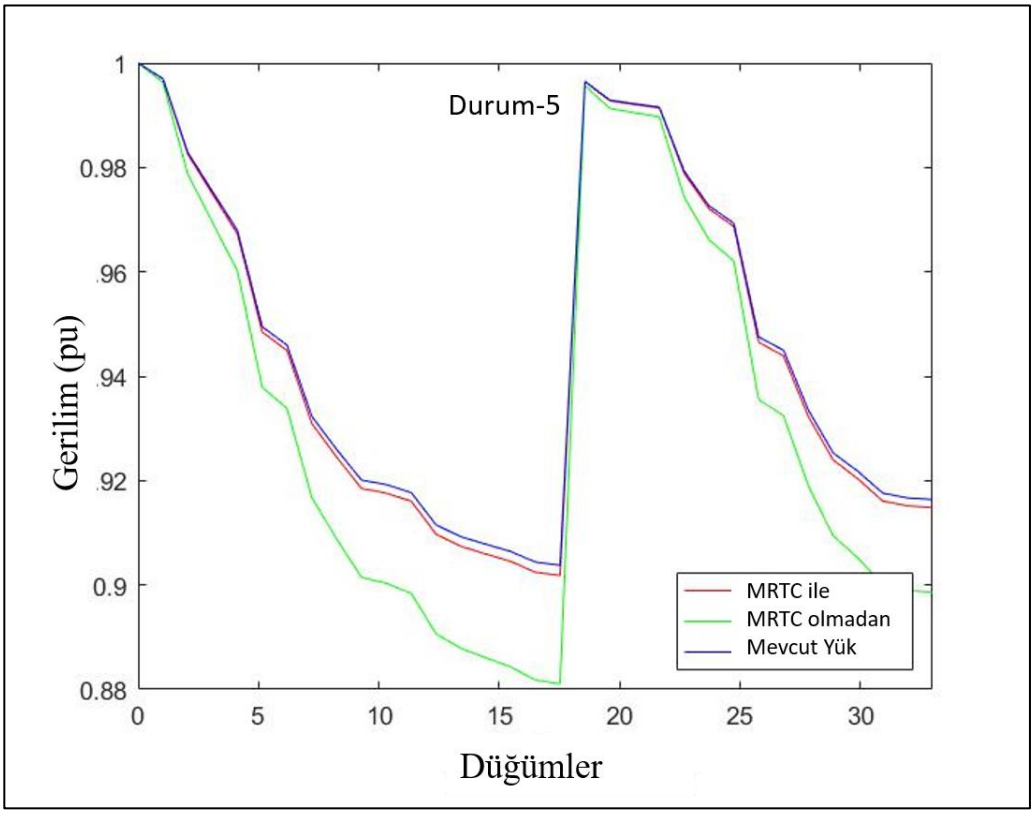
Şekil 7.30. Durum-2 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



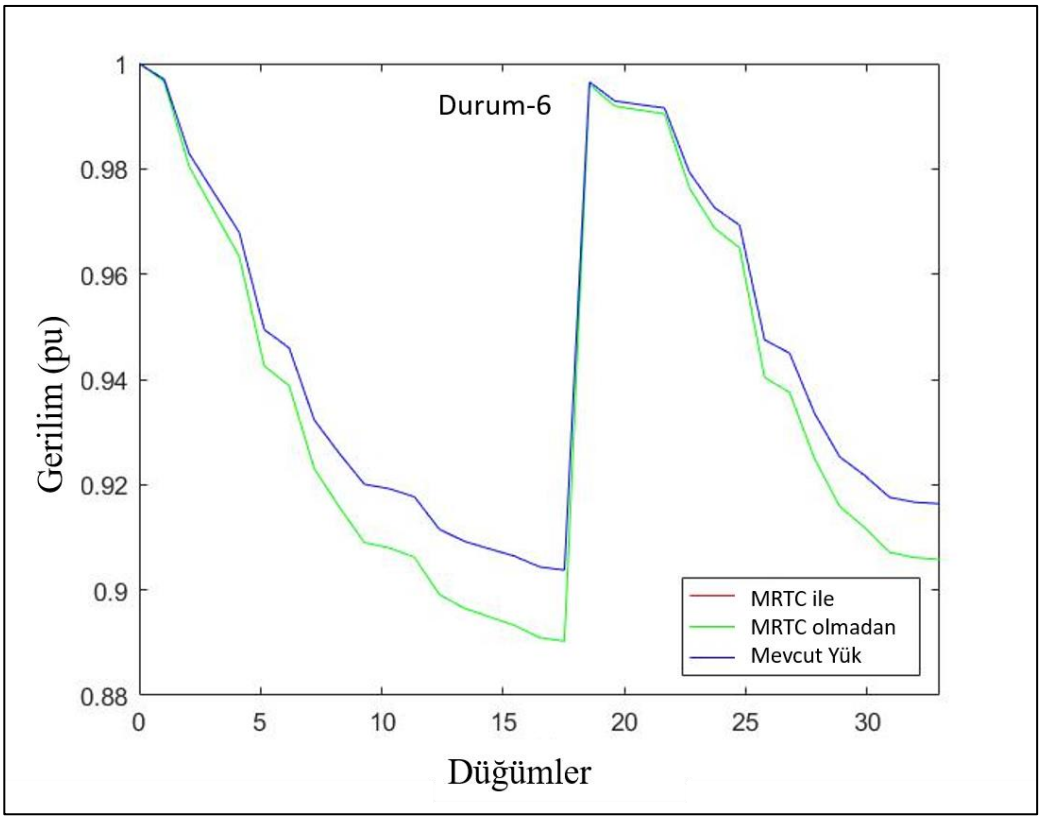
Şekil 7.31. Durum-3 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



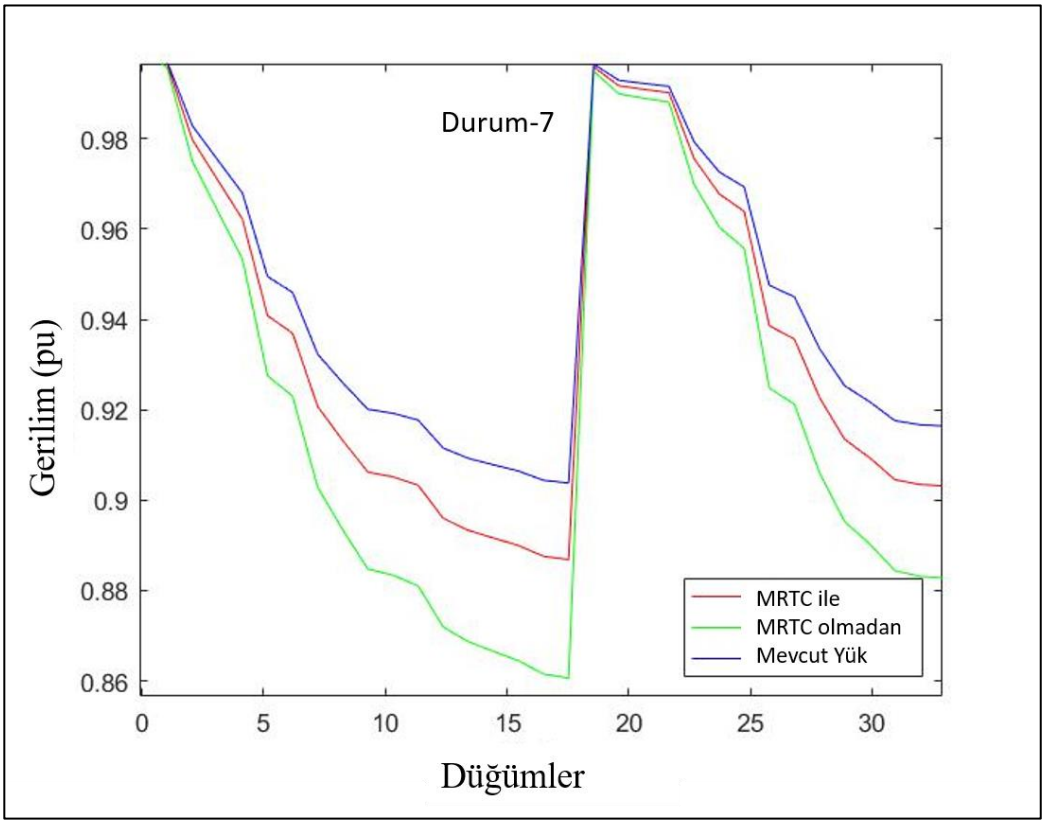
Şekil 7.32. Durum-4 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



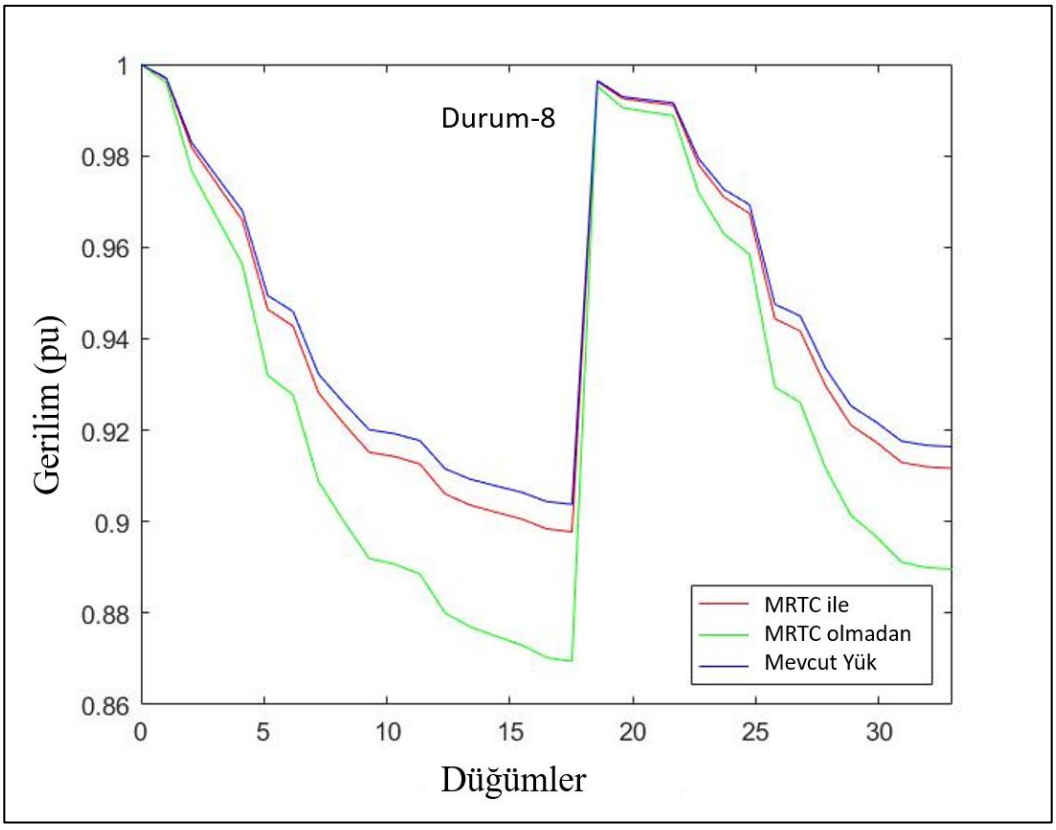
Şekil 7.33. Durum-5 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



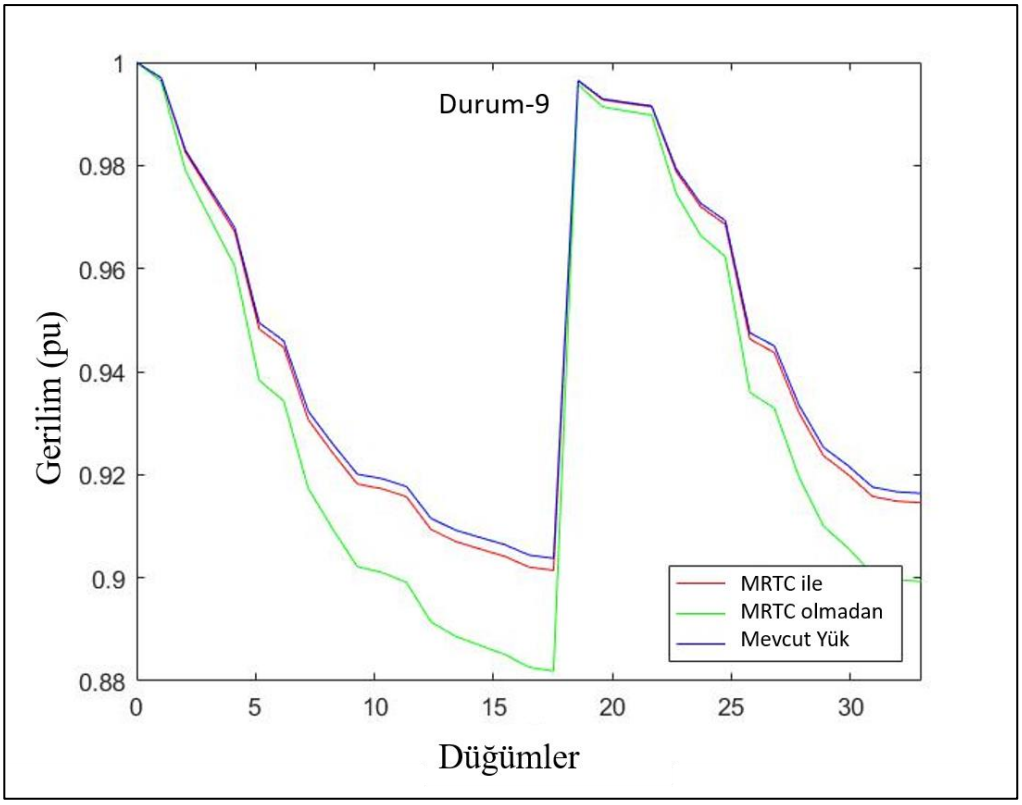
Şekil 7.34. Durum-6 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



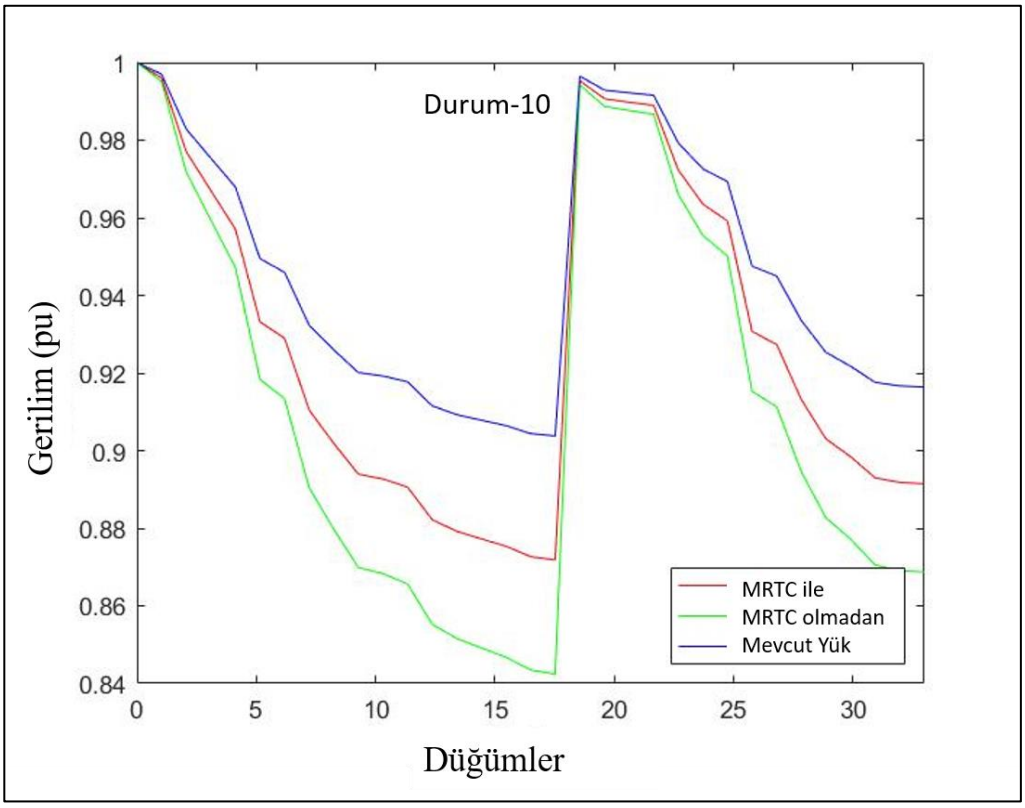
Şekil 7.35. Durum-7 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



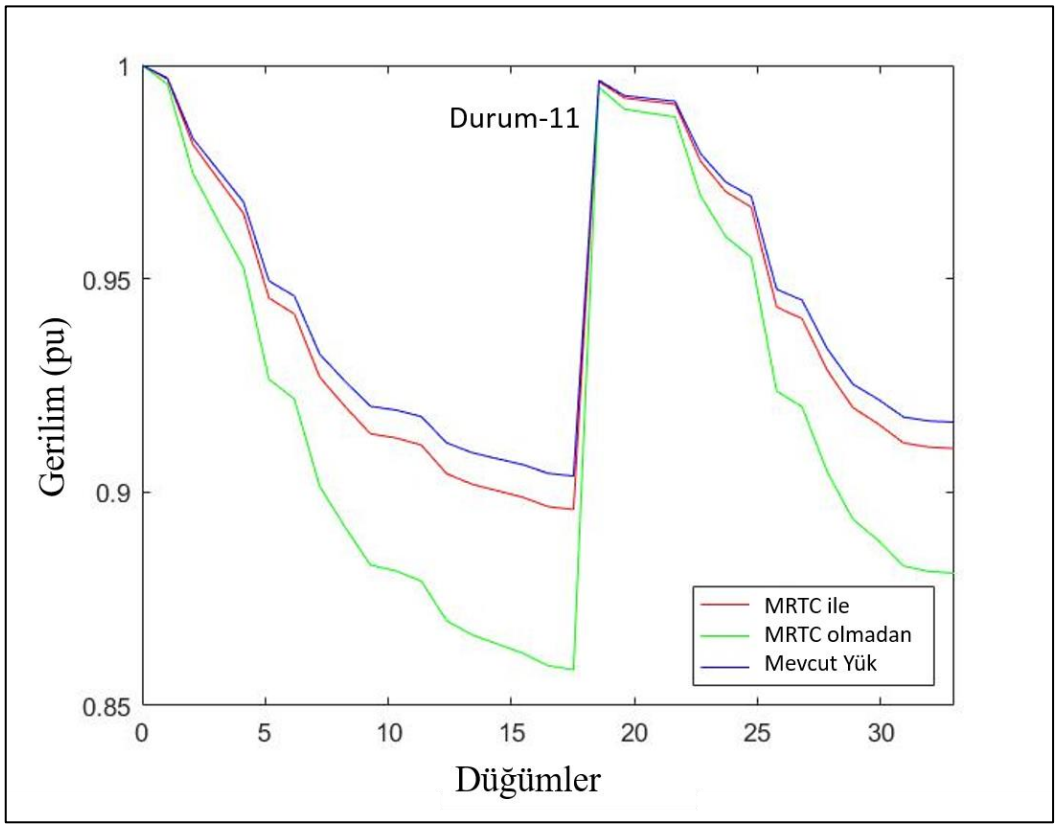
Şekil 7.36. Durum-8 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



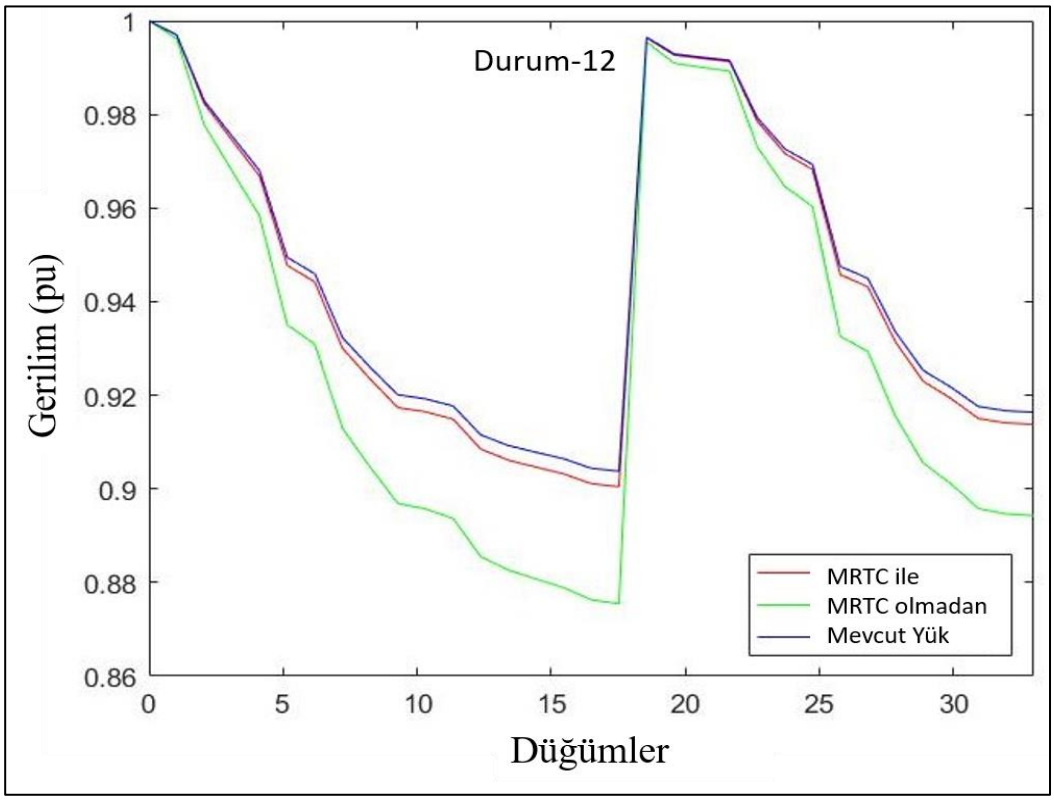
Şekil 7.37. Durum-9 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



Şekil 7.38. Durum-10 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



Şekil 7.39. Durum-11 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri



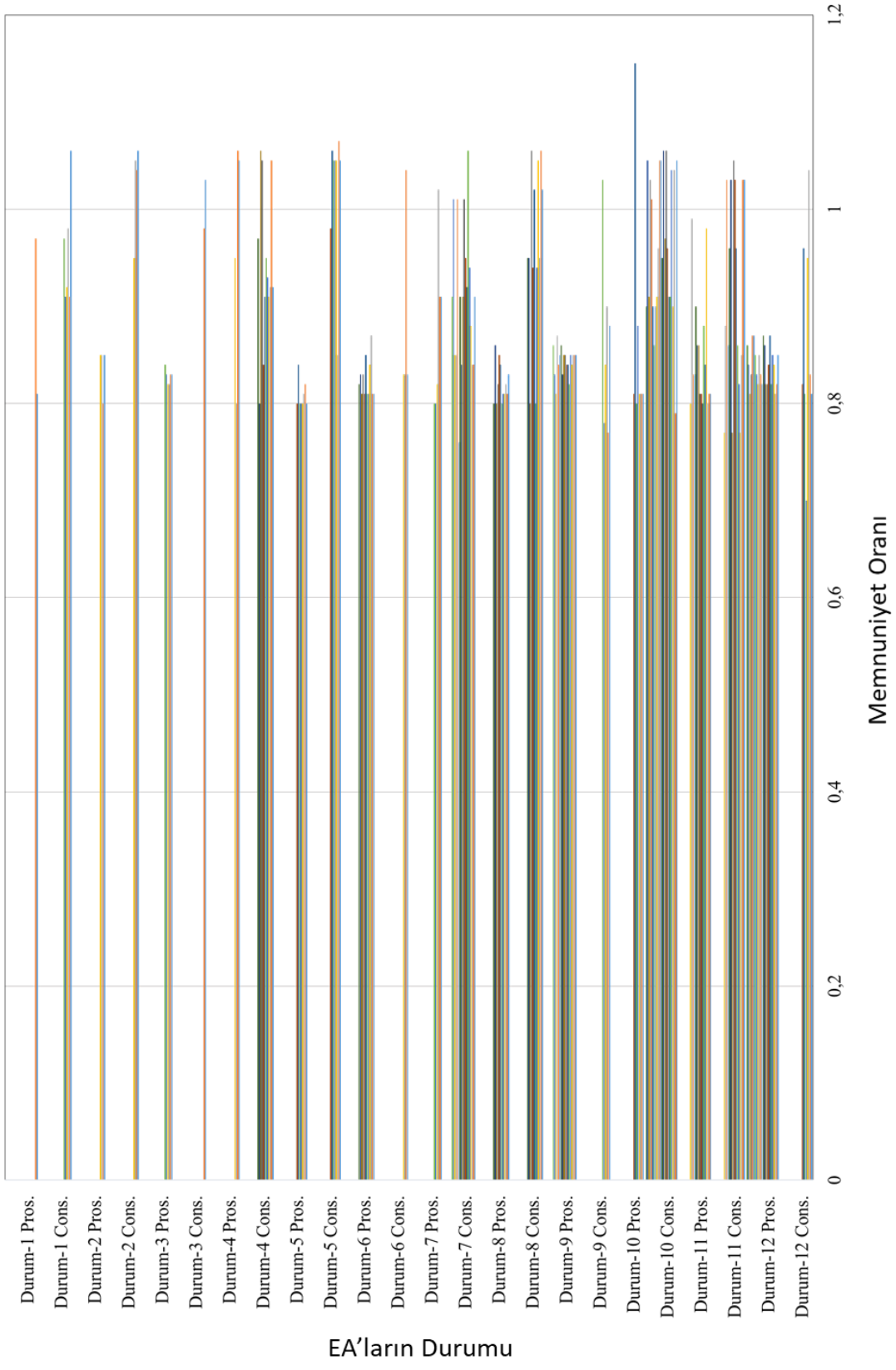
Şekil 7.40. Durum-12 için IEEE-33 düğümlü test fiderindeki gerilim değişimleri

Gerilim değişimleri incelendiğinde MRTC algoritmasının özellikle mesafesi daha uzak nodlar üzerindeki etkisi anlaşılmaktadır. Bu bağlamda önerilen algoritmanın gerilim kararlılığına katkı sağlayacağı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte algoritmanın enerji arz-talebi arasında oluşacak dengesizliği azaltıcı etki oluşturacağı görülmektedir.

Nümerik hesapları yapılan durum çalışmalarının Bölüm-6' da açıklanan memnuniyet kriterlerine göre sonuçları ise Şekil 7.41' de verilmiştir. Buna göre yapılan tüm durum çalışmalarında sürücülerin %96,7' si 0,8' den fazla, %40,4' ü 0,9' dan fazla ve 19,16' sı ise 1' in üzerinde bir memnuniyet oranına ulaşmıştır. Yani araç kullanıcılarının %19,16' sının akılsız şarj durumuna göre memnuniyetlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Kullanıcıların %40,4' ünün memnuniyetlerinde %0-10 aralığında bir memnuniyet kaybı olduğu ve %59,16'sı ise %10-20 aralığında bir memnuniyet kaybına uğradığı anlaşılmaktadır.

Şekil 7.41 incelendiğinde 0,9' un altında memnuniyet oranları genellikle üretici etiketli araçların kullanıcılarına aittir. Hesaplamalar yapılırken aracın istasyondan ayrılmama ihtimali ($P(l)$) 0,85 olarak alınmıştır [12,16]. Fakat puant saatlerin evden işe dönme saatleri olduğu düşünülürse üretici etiketli araçların bu saat diliminde istasyondan hiç ayrılmaması beklenebilir. Nitekim üretici etiketli araç kullanıcılarının kullanım sıklıklarının çok düşük olacağı dikkate alındığında bu değerlendirmenin gerçekçi olduğu anlaşılacaktır. Bu anlamda söz konusu memnuniyet kayıplarının gerçek uygulamalarda azalacağı değerlendirilmektedir.

MRTC algoritmasının literatürde yer alan çalışmalarda belirtilen puant tıraşlama oranlarına göre kıyaslaması Çizelge 7.9' da verilmiştir. Buna göre yapılan diğer çalışmalara göre daha detaylı analizler yapıldığı ve maksimum oranlara ulaşıldığı görülmektedir. Burada en dikkat çekici fark literatürde yapılan çalışmaların pek çoğunda memnuniyet kriterlerinin dikkate alınmaması ve detaylı durum çalışmalarının yapılmamasıdır. Bu tez çalışmasında kapsamlı analizler gerçekleştirilmiş ve tüm sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 7.41. EA' ların memnuniyet oranları

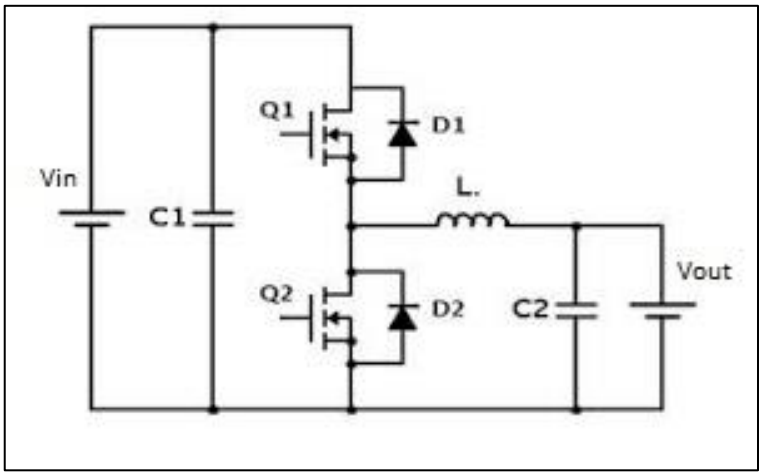
Çizelge 7.8. MRTC Algoritmasının Literatürle Karşılaştırılması

Lit.	Online/Offline	Penetrasyon Oranı (%)	Enerji Maliyetindeki Tasarruf Oranı	EA Yük Tıraşlama Oranı (Puant Saatlerde)
[4]	Online	50%	Belirtilmemiş	20%
[8]	Online	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	39%
[9]	Offline	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	47-65%
[12]	Offline	Yüksek (Oran Yok)	Belirtilmemiş	21.99-43.62%
[23]	Offline	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	3.4-28.8%
[31]	Offline	Belirtilmemiş	14.6 %	Belirtilmemiş
[35]	Online	Belirtilmemiş	8.59 %	Belirtilmemiş
[41]	Online	Belirtilmemiş	138.5 % (Şarj istasyonu için kar oranın)	Belirtilmemiş
[122]	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	25.1 %	34.9%
[123]	Offline	30%	Oran yok	20-35%
[124]	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	71.52 %	14.1%
[125]	Online	Belirtilmemiş	11.11 %	13.36%
[126]	Online	100%	Belirtilmemiş	37.26%
MRTC	Online	25-100 %	Oran yok	46.12-100%

7.3. Deneysel Çalışma ve Sonuçları

Bu tez çalışmasında önerilen MRTC algoritması araçlar arasında enerji alışverişini (V2V) kullanmaktadır. Bu bağlamda önerilen algoritma için bu topolojiye uygun altyapı mimarisi kullanılmalıdır. Nitekim geçmiş bölümlerde de değinildiği gibi önerilen algoritma için DA mikroşebeke mimarili şarj istasyonu önerilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde DA mikroşebeke için V2V topolojisinin uygulanabilirliği test edilmemiştir. Bu sebeple MRTC algoritmasının uygulanabilirliğini ve şarj istasyonu mimarisinin çıktılarını göstermek için laboratuvar ortamında 4 şarj modüllü düşük güçlü DA şarj istasyonu tasarlandı. Tasarlanan şarj istasyonu, 2 üretici ve 2 tüketici etiketli aracı temsil edecek 4 adet 12V-5ah akü kullanılarak test edilmiştir. [126]'da önerilen DBS algoritmasının çıktıları referans güç değerleri olarak kullanılarak sistem çalıştırılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir.

Çalışmada kullanılacak şarj modülleri endüstriyel ortamda kullanılmayacağından her bir modül için Non-isolated bi-directional DA/DA çevirici topolojisi kullanılmıştır. Literatürde Non-isolated half bridge senkron DA/DA çevirici olarak da isimlendirilir. Bu çevirici topolojisi için 2 mod bulunmaktadır. İlki girişten çıkışa enerji akışının gerçekleştiği Buck modtur. İkincisi ise çıkıştan girişe enerji aktarıldığı Boost modtur. Şekil 7.42' de bi-directional DA-DA çevirici topolojisi yer almaktadır.



Şekil 7.42. İzolesiz yarım köprü senkron DA/DA çevirici topolojisi

Buck Modu: Bi-directional DA/DA çevirici topolojisinde V_{in} herzaman V_{out} gerilim değerinden büyüktür. Dolayısıyla girişten çıkışa enerji akışı için buck modu aktiftir. Buck mod için genel formüller Eş. 7.1, Eş. 7.2 ve Eş. 7.3' de verilmiştir;

$$\frac{Vout}{Vin} = \frac{Iin}{Iout} = D \tag{7.1}$$

$$\Delta Iout = \frac{(1-D).Ts.Vout}{L}, \qquad L = \frac{(1-D).R}{2f} \ (\Delta Iout = 2I_L \ için) \tag{7.2}$$

$$\Delta Vout = \frac{Vout(1-D).Ts^2}{8LC}, \qquad C = \frac{(1-D).Ts^2}{16L} \ (\Delta Vout = 2Vout \ için) \tag{7.3}$$

D=0.33 (V_{out}=4V, V_{in}=12V), f=15 kHz, R=1.0 ohm ve I_L=4A için bobin ve kondansatör için optimum değerler L> 23,33µH ve C> 7,97µF olarak hesaplanmıştır. Bu değerler ideal şartlar için hesaplanmıştır. Yani kaynak direnci, tüm kablo dirençleri, güç mosfetlerinin V_{ds} gerilimleri, endüktans iç direnci, kondansatör direnci gibi birçok değer göz önüne

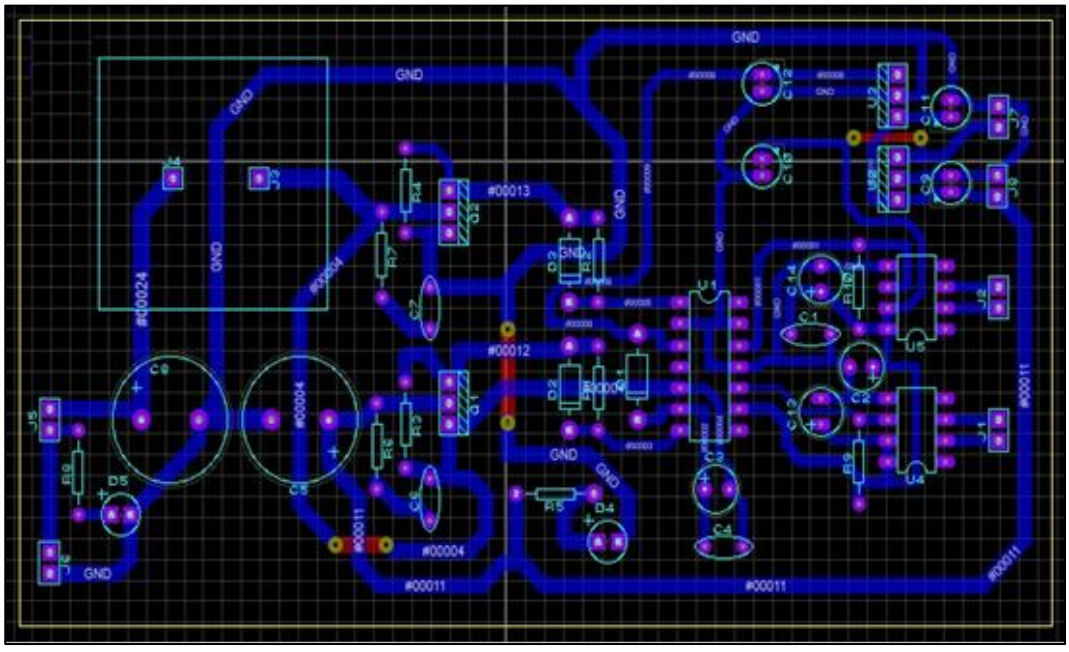
alındığında seçilen güç bobini ve kondansatör değerleri çok daha yüksek seçilmiştir. Seçilen güç bobini ve kondansatör değerleri Ls=100 µH ve Cs=1000 µF' dır.

Boost Modu: Çıkış kaynağından girişe doğru enerji akışı olması durumunda Boost modu aktiftir. Boost modu için genel formüller Eş. 7.4, Eş. 7.5 ve Eş. 7.6' de verilmiştir.

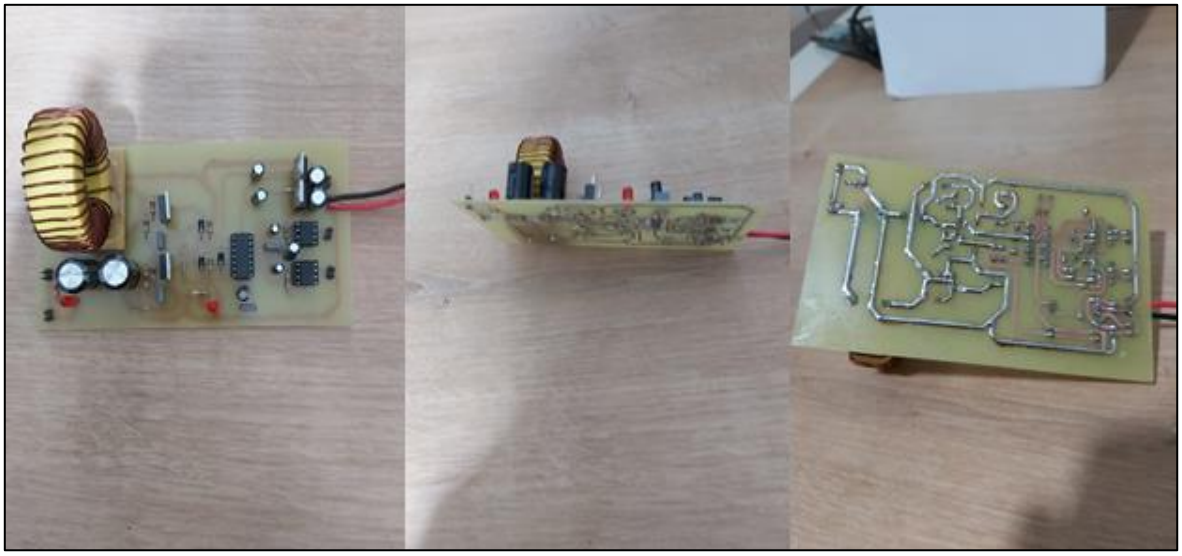
$$\Delta Iout = \frac{(1-D).D.Vout}{L.f}, \qquad L = \frac{D(1-D)^2.R}{2f} \ (\Delta Iout = 2I_L \ için) \tag{7.4}$$

$$\Delta Vout = \frac{Iout.D}{C.f}, \qquad C = \frac{D}{2fR} \ (\Delta Vout = 2Vout \ için) \tag{7.5}$$

Aynı devre hem buck hem de boost modda kullanıldığı için hesaplar tekrarlanmamıştır. Kart tasarımı yapılırken güç mosfeti olarak IRFZ 44N, sürücü olarak IR 2110, 10 amper 0.1 mH güç bobini, sürücü beslemesi ve optokuplör için 7812 ve 7805 entegreleri kullanılmıştır. Tasarlanan güç kartının proteus baskı devre modeli Şekil 7.43' de, baskı devrenin dizgilenmiş hali Şekil 7.44' de verilmiştir.



Şekil 7.43. İzolesiz yarım köprü senkron DA/DA çevirici baskı devresi



Şekil 7.44. İzolesiz yarım köprü senkron DA/DA çevirici dizgilenmiş hali

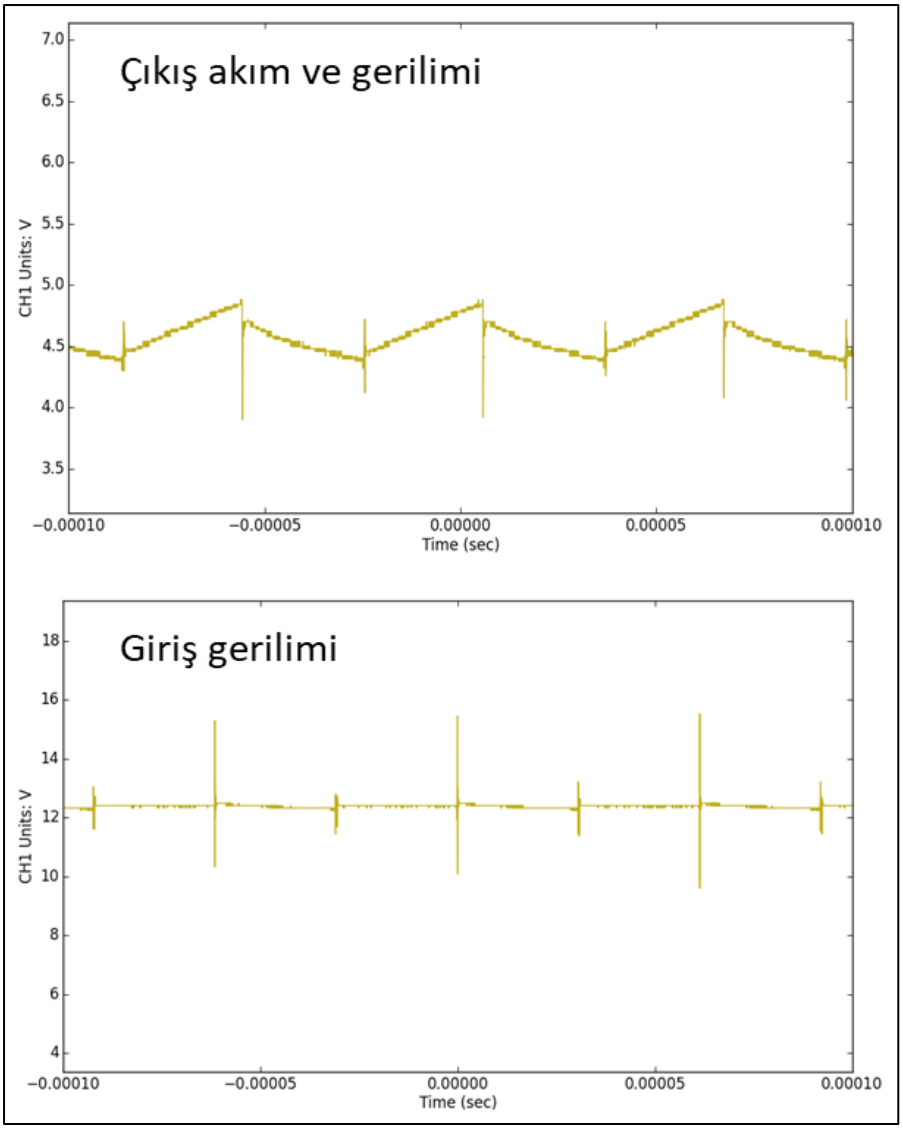
Verim Hesabı: Tasarlanan devre R=1,0 Ω yük için D=0,5 ve f=15000 Hz frekansta çalıştırılmıştır. Buna göre;

Çıkış verileri: Vo=4,55V, Io=4,08A
Giriş verileri: Vin=12,51V, Iin=1,53A

olarak multimetre ile ölçüm yapılmıştır. Ampermetre devreye seri bağlandığı ve yük direnci çok düşük olduğu için ampermetre iç direnci devre karakteristiğini az da olsa etkilemiştir. Akım probu olmadığı için osiloskop ölçümleri yük üzerindeki direnç üzerinden alınmıştır. Verim hesabı gerçek değerler üzerinden yapılmıştır. Verim çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak formüle edilmektedir.

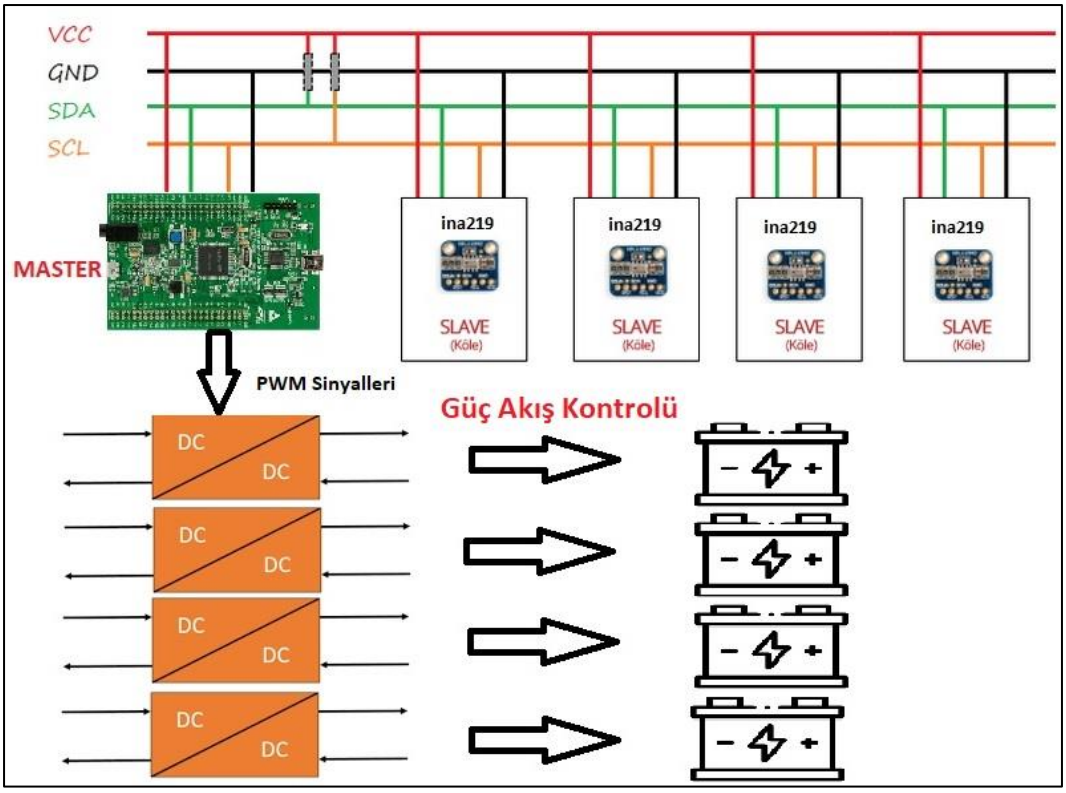
$$\%\eta = \frac{V_0 x I_o}{V_i x I_i} = \frac{P_O}{P_i} \tag{7.6}$$

Sonuçta tasarlanan devrenin verimi yaklaşık %95 olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan çevirici için R=1,0 kΩ, D=0,4 ve f=15000 Hz frekansta osiloskop çıkışları Şekil 7.45' de verilmiştir.



Şekil 7.45. Çevirici için osiloskop görüntüleri

Tasarlanan çeviriciden 4 adet daha üretilerek ortak DA baralı bir şarj istasyonu modeli oluşturuldu. Tasarlanan şarj istasyonu modelinin işletilmesi için STM32F407 serisi mikrodenetleyici kullanılmıştır. Birçok sektörde sıklıkla kullanılan işlemciler olması ve tasarlanan sistemin gereklerini yerine getirebilecek kapasitede olması sebebiyle bu mikrodenetleyici tercih edilmiştir. Tasarladığımız sistemi çalıştırmak için CubeMX programı ve TrueStudio kullanılarak high level kodlama yapılmıştır. Tasarlanan şarj sisteminde çeviricilerin kontrolü Ina219 akım-gerilim sensöründen ölçülen değerlere göre PWM sinyalleriyle gerçekleştirilecektir. Temel işletme topolojisi Şekil 7.46' da verilmiştir.

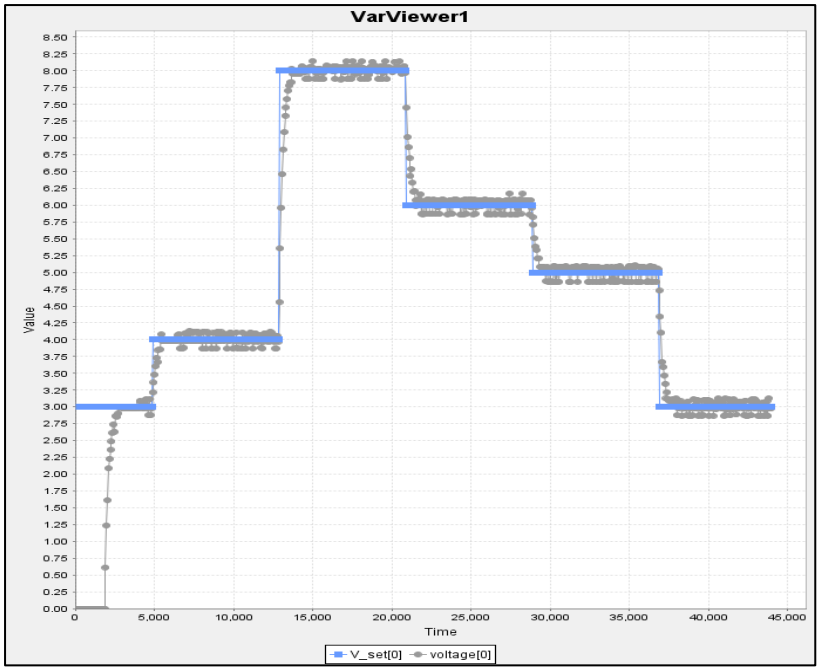


Şekil 7.46. Deneysel çalışma temel topolojisi

Algoritmaya göre yazılımda 3 temel katman bulunmaktadır. İlk olarak verilerin alınması ve ilk şarj seviyelerinin oluşturulması, ikinci olarak referens değerlerin programa girilmesi ve son olarak hata sinyalinin oluşturularak PID kontrol çıkışının üretilmesi olarak özetlenebilir. Temel işletim yazılımı hazırlanırken sistem alt fonksiyon yazılımları ayrı ayrı hazırlanıp sınanarak tek bir bütün haline getirildi. Alt fonksiyonlar;

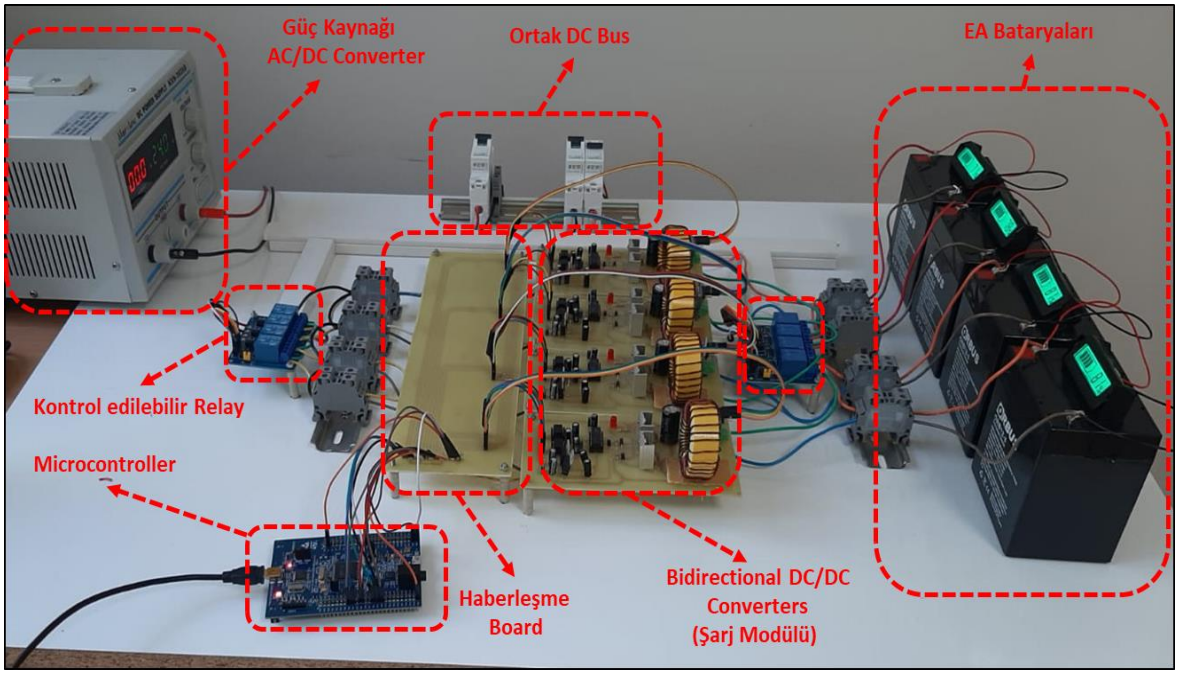
- INA-219 sensöründen I2C (Inter-Integrated Circuit) protokolü ile okuma alt fonksiyonu,
- Referans değerlere göre PI ve PWM üretimi alt fonksiyonu,
- SOC için oluşturulan timer interrupt alt fonksiyonudur.

Sonuçlar gerçek zamanlı kayıt ve görüntüleme yapılabilen StmStudio programında izlenmiştir. Tasarlanan yazılım gerilim kontrolü için tek çevirici üzerinde denenmiş olup referanslara göre değişimleri Şekil 7.47’ de verilmiştir.



Şekil 7.47. StmStudio programı ile ölçülen çevirici çıkış gerilim değişimi

Küçük güçlü tasarlanan ortak DA baralı ve 4 şarj modülü olan şarj istasyonu modeli Şekil 7.48’ de verilmiştir.

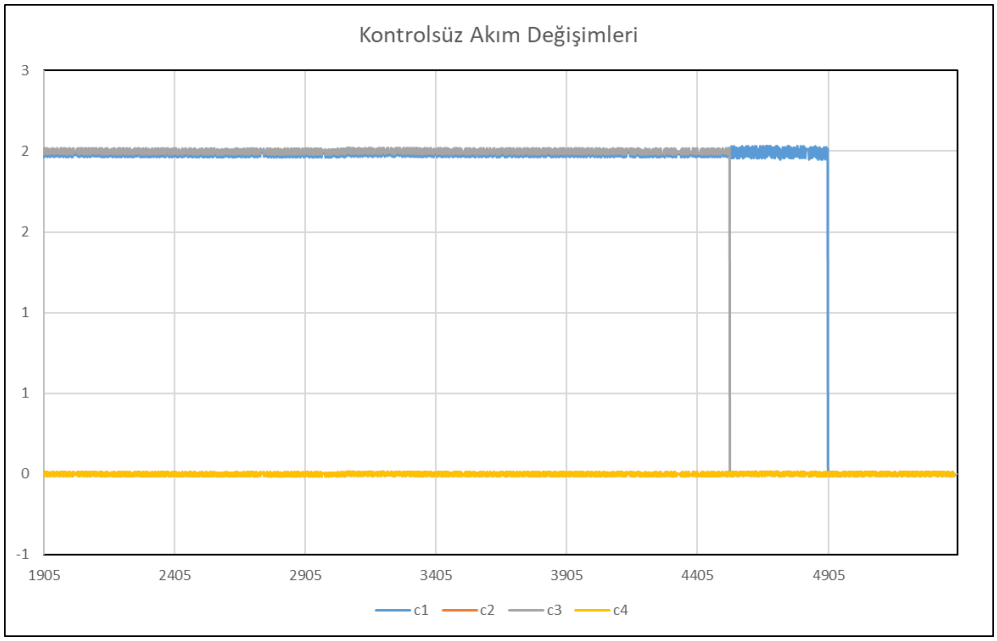


Şekil 7.48. Tasarlanan prototip DA şarj istasyonu

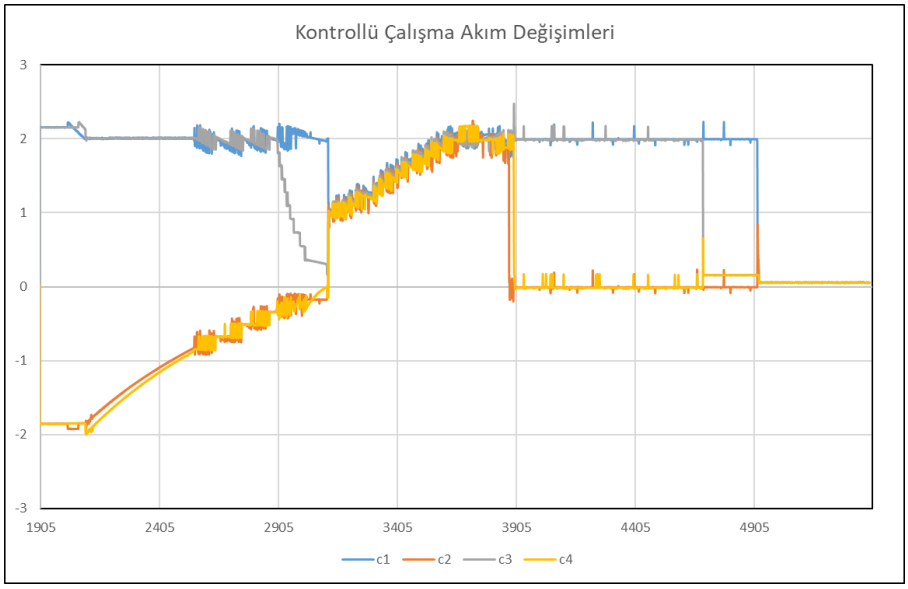
Deneysel çalışma yapılmadan önce 24 saatlik gerçek verilerin 1:16 oranında ölçeklendirilmesiyle elde edilmiş mevcut yük eğrisi dizi haline getirilerek yazılıma entegre

edilmiştir. Çalışma bataryaların kapasiteleri de dikkate alınarak toplam 90 dakika yapılmıştır. Puant zaman dilimi yük eğrisi dikkate alınarak 1900-3100 saniye aralığı olarak belirlenmiştir. Bu zaman aralığında 2 araç üretici 2 araç ise tüketici olarak etiketlenmiş ve [126]'da üretilen referans güç değerlerine göre kontrol edilmiştir. Aynı senaryo tüm araçlar bataryalarının nominal şarj gücü ile şarj edildiği durum için tekrar edilmiş ve 2 güç değişim grafiği karşılaştırılmıştır.

Kontrollü ve kontrolsüz deneysel çalışma sonucunda elde edilen akım değişimleri Şekil 7.49 ve Şekil 7.50' de verilmiştir. Buna göre kontrollü çalışmada akım değişimlerindeki dalgalanma daha fazladır. Kontrolsüz çalışmadaki akım değişimlerinin dalgalanmasının ise daha düşük olduğu görülmektedir.

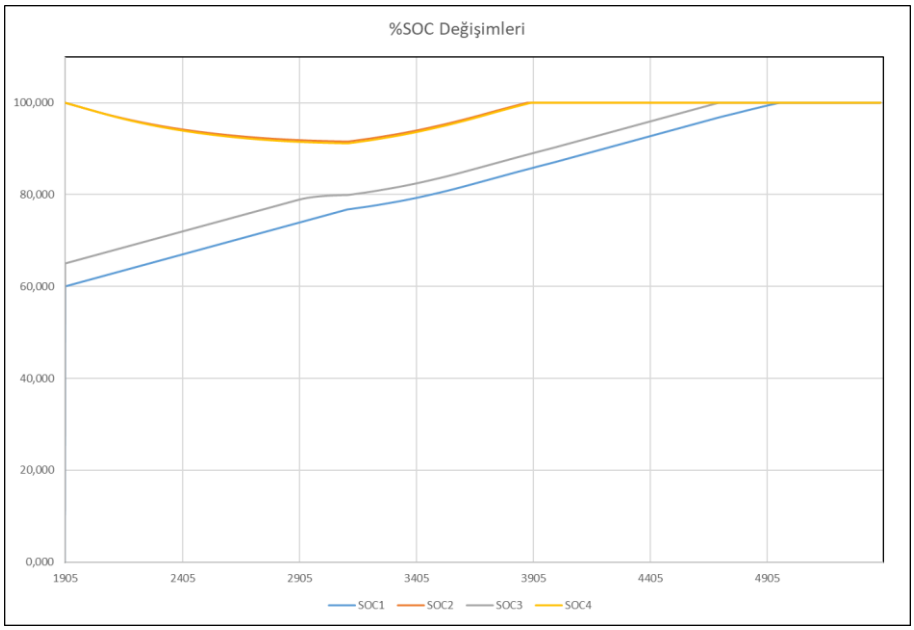


Şekil 7.49. Kontrolsüz çalışmadaki akım değişimleri



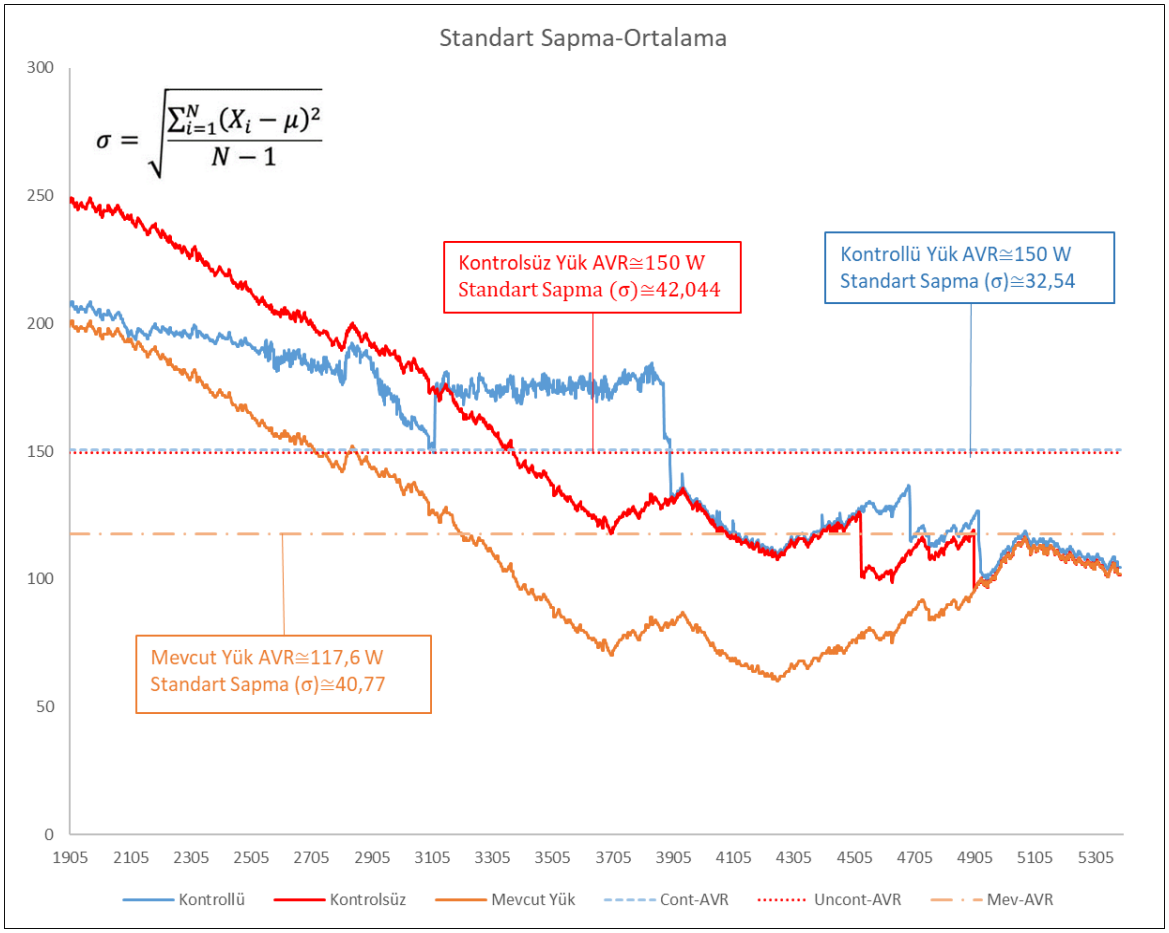
Şekil 7.50. Kontrollü çalışmadaki akım değişimleri

Kontrollü çalışma sonucunda elde edilen %SOC değişimleri ise Şekil 7.51' de verilmiştir. Buna göre belirlenen puant zaman aralığında bataryaları tam dolu üretici etiketli 2 araç, sırasıyla %60 ve %65 seviyesinde 2 tüketici etiketli araca enerji sağlamıştır. Burada en kritik husus anlık üretim miktarının tüketim miktarını hiçbir anda geçmemesidir. Bu durum referanslar üretilirken kontrol edilmiştir. Bu sayede DA bara gerilimi çalışma boyunda 24 Volt değerinde sabit kalmış ve çalışma kararlılığı sağlanmıştır.



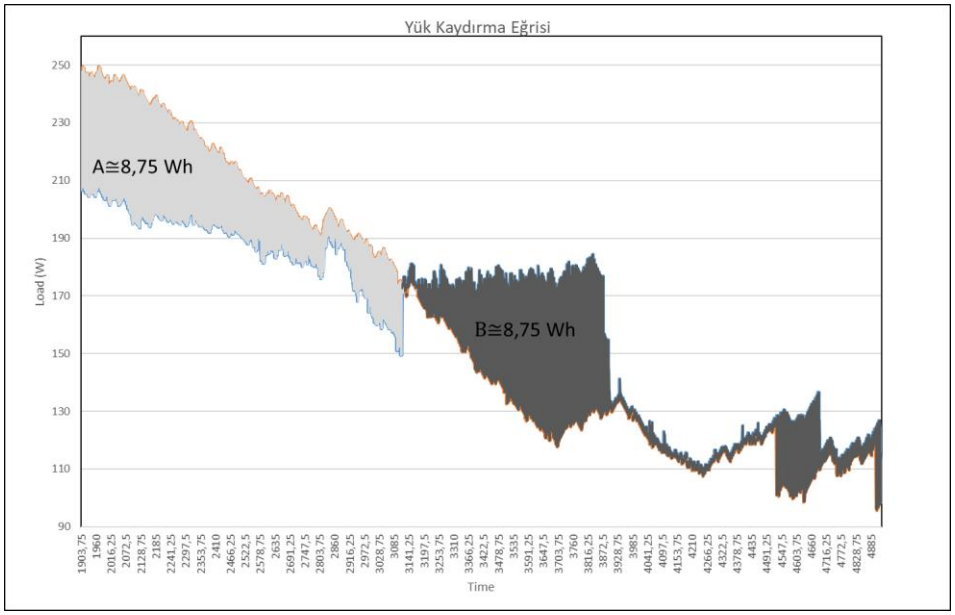
Şekil 7.51. Kontrollü çalışmadaki %SOC değişimleri

Kontrollü ve kontrolsüz güç değişimleri ile standart sapma ve ortalamaları ise Şekil 7.52' de verilmiştir. Burada puant zaman aralığındaki EA yükünün araçlar arası enerji akışı sağlayarak puant olmayan zaman aralığına aktarılabildiği görülmektedir. Ayrıca total yük eğrisindeki standart sapma azaltılmıştır.

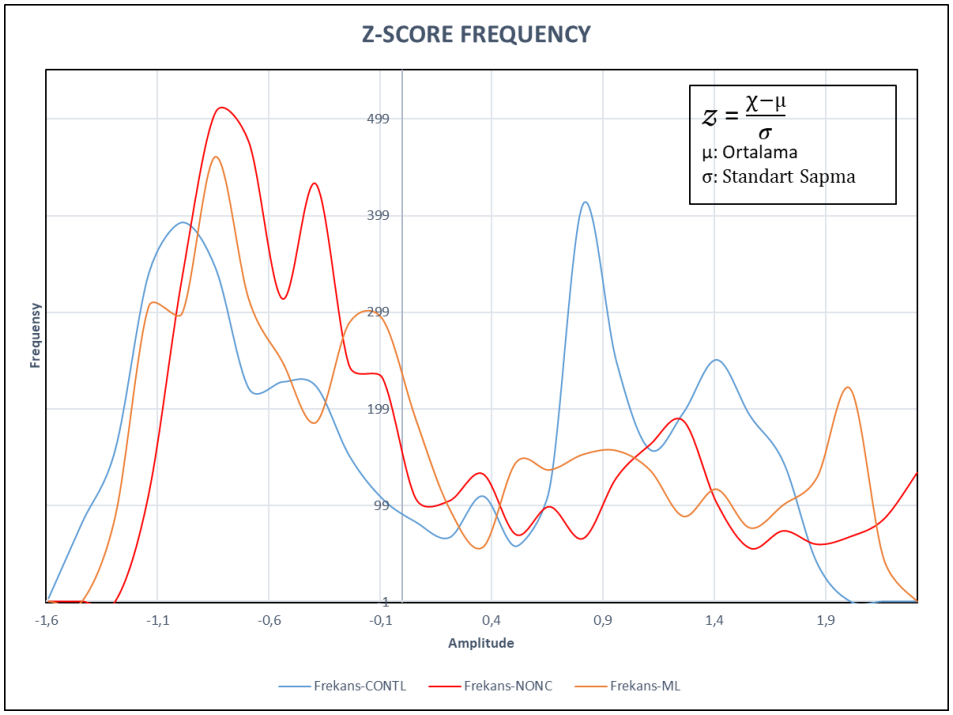


Şekil 7.52. Anlık güç değişimleri

Şekil 7.53' de ise kaydırılan enerji miktarı grafik olarak gösterilmiştir. Buna göre yaklaşık 8,75 Wh enerji puant olmayan zaman aralığına kaydırılmıştır. Şekil 7.54' de ise Z-skor frekans değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde güç dalgalanmasının kontrolsüz şarj durumunda daha da attığı anlaşılmaktadır.



Şekil 7.53. Kaydırılan yükün değişimi



Şekil 7.54. Z-Skor frekans değişimi

Görüleceği üzere DA baralı şarj istasyonu altyapısı ile araçlar arası enerji akışı mümkün olabilmektedir. Bu durum ana şebeke üzerinde gerilim ve frekans kararlılığına katkı sağlayacak ayrıca arz talep arasındaki dengesizliği azaltıcı etki yaratacaktır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

EA'ların hızla artan sayıları şebekenin kararlılığını tehdit etmektedir. Özellikle arz-talep arasındaki dengesizliğin artması en büyük tehdit olarak görülüyor. Bu sorunun çözümü için hızla enerji kaynaklarının arttırılması ve altyapının revizyonu kısa vadede akıllıca bir çözüm olmadığından EA'ların şebeke entegrasyonunun koordineli bir şekilde gerçekleştirilmesi kaçınılmaz olacaktır.

Bu çalışmada EA'ların şebeke entegrasyonunun koordinasyonunun gerçekleştirilmesi için gerçek zamanlı bir MRTC algoritması önerilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak bu algoritmada puant saat tespiti ve buna bağlı olarak doğrudan EA yükünün tıraşlanması hedef olarak modellenmiştir. Bununla beraber araçların en kısa sürede şarj edilmeleri sürücülerin doğal talebi olarak modellenmiştir. Ayrıca literatürden farklı olarak bu çalışmada kullanıcı memnuniyet kriterleri belirlenmiş ve sürücüleri araç bataryalarını kullandırmaya teşvik etmek için gerçek zamanlı ücretlendirme modeli tasarlanmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen MRTC algoritmasının performansının ölçülmesi ve uygun optimizasyon yönteminin belirlenebilmesi için detaylı durum çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Buna göre her durum çalışması için tek bir yöntemin olmadığı aksine her durum için farklı algoritmaların kullanılabileceği tespit edilmiştir. Bununla beraber MRTC algoritması ile %46,12-100 arasında bir tepe yük tıraşlama oranına ulaşılmıştır. Bunu sağlarken altyapı gereksinimleri de minimum seviyede tutulmuştur. Ayrıca kullanıcı memnuniyetleri de 0,8-1,2 arasında değişkenlik göstermiştir.

MRTC algoritmasının uygulanabilirliğini ve şarj istasyonu mimarisinin çıktılarını göstermek için laboratuvar ortamında 4 şarj modüllü düşük güçlü DA şarj istasyonu tasarlandı ve sonuçları analiz edildi. Buna göre araçlar arasında enerji akışı verimli bir şekilde mümkün olabilmektedir.

Sonuçlar gösteriyor ki bu yazıda önerilen gerçek zamanlı MRTC algoritması gerçek uygulamalarda kullanılabilir. Fakat önerilen algoritma kamusal alanlardaki veya konutsal alanlardaki şarj istasyonları için uygundur. Gelecek çalışmalarda gerçek şarj istasyonları üzerinde uygulama yapılabilir.

Bu tez çalışması ile geliştirilen özgün MRTC algoritması literatüre aşağıdaki katkıları sağlamıştır.

- MRTC algoritması ile literatürde belirtilen bilgilere göre pek çok senaryo-penetrasyon varyasyonunda en yüksek puant tepe tıraşlama oranlarına (%46,12-100) ulaşılmıştır. Bu oranlar temel olarak puant saat dilimindeki EA yükünün V2V topoloji mimarisine göre modellenmesi ile sağlanmıştır.
- Maksimum puant tıraşlama oranları elde edilirken kullanıcı memnuniyeti 2. hedef olarak modellenmiştir. Bu sayede ortalama sürücü memnuniyetleri de maksimize edilmiş olacaktır.
- Sürücüleri araç bataryalarını kullandırmaya ve V2G, V2V topolojileri için gerekli kısıt şartlara uymaya teşvik etmek için gerçek zamanlı ücretlendirme modeli geliştirilmiştir. Literatürde var olan ceza-ödül prensibine dayalı model, önerdiğimiz algoritmaya uyarlanarak geliştirilmiştir.
- Bu tez çalışmasında, literatürde detaylı olarak ele alınmamış kullanıcı memnuniyet kriterleri kapsamlı şekilde modellenerek sunulmuştur.
- Önerilen model çevrimiçi mimaride olduğundan istasyon içinde haberleşme için gerekli olan ekipmanlara ihtiyaç yoktur. Bu sayede şarj istasyonu altyapı maliyeti de azaltılmıştır. MRTC algoritması kullanıcı davranışlarına bağımlı olmadığı için gerçek projelerde uygulanabilir bir modeldir.

Yukarıda bahsedilen tüm katkılar ile gelecekte EA' lerın şebeke entegrasyonunda yaşanabilecek gerilim ve frekans sapmaları, aşırı şebeke yüklenmesi, yüksek altyapı maliyeti gibi birçok olumsuzluğun EA sürücü konfor ve memnuniyetini yüksek seviyelerde tutarak üstesinden gelinecektir. Nitekim yapılan simülasyon ve laboratuvar çalışmaları sonuçlarında tasarlanan MRTC algoritmasının etkinliği ortaya koyulmuştur.

Gelecek çalışmalarda algoritmanın gerçek şarj istasyonlarında uygulanabilirliğini arttırmak için her türlü faktör dikkate alınarak model genişletilebilir. Örneğin şarj verimliliği dikkate alınarak hedef fonksiyonlar arttırılabilir veya kısıtlar modele dahil edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Van Vliet, O., Brouwer, A. S., Kuramochi, T., van Den Broek, M. ve Faaij, A. (2011). Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. *Journal of Power Sources*, 196(4), 2298-2310.

2. Tan, K. M., Ramachandaramurthy, V. K. ve Yong, J. Y. (2016). Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 720-732.

3. Falahati, S., Taher, S. A. ve Shahidehpour, M. (2017). Grid secondary frequency control by optimized fuzzy control of electric vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 5613-5621.

4. Alonso, M., Amaris, H., Germain, J. G. ve Galan, J. M. (2014). Optimal charging scheduling of electric vehicles in smart grids by heuristic algorithms. *Energies*, 7(4), 2449-2475.

5. Mehta, R., Srinivasan, D., Khambadkone, A. M., Yang, J. ve Trivedi, A. (2016). Smart charging strategies for optimal integration of plug-in electric vehicles within existing distribution system infrastructure. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(1), 299-312.

6. Yang, J., He, L. ve Fu, S. (2014). An improved PSO-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid. *Applied Energy*, 128, 82-92.

7. Feng, J., Yang, J., Wang, H., Wang, K., Ji, H., Yuan, J. ve Ma, Y. (2022). Flexible optimal scheduling of power system based on renewable energy and electric vehicles. *Energy Reports*, 8, 1414-1422.

8. Ghotge, R., Snow, Y., Farahani, S., Lukszo, Z. ve van Wijk, A. (2020). Optimized scheduling of EV charging in solar parking lots for local peak reduction under EV demand uncertainty. *Energies*, 13(5), 1275.

9. Nimalsiri, N. I., Ratnam, E. L., Smith, D. B., Mediwaththe, C. P. ve Halgamuge, S. K. (2021). Coordinated charge and discharge scheduling of electric vehicles for load curve shaping. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 7653-7665.

10. Ireshika, M. A. S. T., Rheinberger, K., Lliuyacc-Blas, R., Kolhe, M. L., Preißinger, M. ve Kepplinger, P. (2022). Optimal power tracking for autonomous demand side management of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 52, 104917.

11. Moghaddam, Z., Ahmad, I., Habibi, D. ve Phung, Q. V. (2017). Smart charging strategy for electric vehicle charging stations. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 76-88.

12. Zhou, K., Cheng, L., Wen, L., Lu, X. ve Ding, T. (2020). A coordinated charging scheduling method for electric vehicles considering different charging demands. *Energy*, 213, 118882.

13. Frendo, O., Gaertner, N. ve Stuckenschmidt, H. (2019). Real-time smart charging based on precomputed schedules. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(6), 6921-6932.

14. Pan, J. ve Liu, T. (2022). Optimal scheduling for unit commitment with electric vehicles and uncertainty of renewable energy sources. *Energy Reports*, 8, 13023-13036.

15. Luo, L., He, P., Zhou, S., Lou, G., Fang, B. ve Wang, P. (2022). Optimal scheduling strategy of EVs considering the limitation of battery state switching times. *Energy Reports*, 8, 918-927.

16. Jin, H., Lee, S., Nengroo, S. H. ve Har, D. (2022). Development of charging/discharging scheduling algorithm for economical and energy-efficient operation of multi-EV charging station. *Applied Sciences*, 12(9), 4786.

17. Wu, Z. ve Chen, B. (2021). Distributed electric vehicle charging scheduling with transactive energy management. *Energies*, 15(1), 163.

18. Abo-Elyousr, F. K., Sharaf, A. M., Darwish, M. M., Lehtonen, M. ve Mahmoud, K. (2022). Optimal scheduling of DG and EV parking lots simultaneously with demand response based on self-adjusted PSO and K-means clustering. *Energy Science & Engineering*, 10(10), 4025-4043.

19. Alinia, B., Hajiesmaili, M. H. ve Crespi, N. (2019). Online EV charging scheduling with on-arrival commitment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(12), 4524-4537.

20. Lu, S., Han, B., Xue, F., Jiang, L., ve Qian, K. (2022). Research on multi-objective optimization of EV charging and discharging for different stakeholders. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, DOI: 10.17775/CSEEJPES.2020.02300.

21. You, P., Yang, Z., Chow, M. Y. ve Sun, Y. (2015). Optimal cooperative charging strategy for a smart charging station of electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 2946-2956.

22. Shao, S., Harirchi, F., Dave, D. ve Gupta, A. (2023). Preemptive scheduling of EV charging for providing demand response services. *Sustainable Energy*, Grids and Networks, 33, 100986.

23. Wu, W., Lin, Y., Liu, R., Li, Y., Zhang, Y. ve Ma, C. (2020). Online EV charge scheduling based on time-of-use pricing and peak load minimization: Properties and efficient algorithms. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 572-586.

24. Zheng, J., Wang, X., Men, K., Zhu, C. ve Zhu, S. (2013). Aggregation model-based optimization for electric vehicle charging strategy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(2), 1058-1066.

25. Lou, Y. L., Wu, C. X., Shi, Z. Z. ve Yang, R. (2022). Evaluation of EV penetration level limit in distribution system applying charging and scheduling strategies. Sustainable Energy, *Grids and Networks*, 32, 100922.

26. Wang, K., Wang, H., Yang, J., Feng, J., Li, Y., Zhang, S. ve Okoye, M. O. (2022). Electric vehicle clusters scheduling strategy considering real-time electricity prices based on deep reinforcement learning. *Energy Reports*, 8, 695-703.

27. Li, H., Wan, Z. ve He, H. (2019). Constrained EV charging scheduling based on safe deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(3), 2427-2439.

28. You, M., Wang, Q., Sun, H., Castro, I. ve Jiang, J. (2022). Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties. *Applied Energy*, 305, 117899.

29. Khaki, B., Chu, C. ve Gadh, R. (2019). Hierarchical distributed framework for EV charging scheduling using exchange problem. *Applied Energy*, 241, 461-471.

30. Jiang, Z., Jia, Q. S. ve Guan, X. (2022). On large action space in EV charging scheduling optimization. *Science China Information Sciences*, 65(2), 122201.

31. Erdogan, N., Kucuksari, S. ve Murphy, J. (2022). A multi-objective optimization model for EVSE deployment at workplaces with smart charging strategies and scheduling policies. *Energy*, 254, 124161.

32. Titus, F., Thanikanti, S. B., Deb, S. ve Kumar, N. M. (2022). Charge scheduling optimization of plug-in electric vehicle in a PV powered grid-connected charging station based on day-ahead solar energy forecasting in Australia. *Sustainability*, 14(6), 3498.

33. Ren, H., Zhang, A., Wang, F., Yan, X., Li, Y., Duić, N. ve Catalão, J. P. (2021). Optimal scheduling of an EV aggregator for demand response considering triple level benefits of three-parties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106447.

34. Wan, Y., Qin, J., Li, F., Yu, X. ve Kang, Y. (2020). Game theoretic-based distributed charging strategy for PEVs in a smart charging station. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1), 538-547.

35. Kim, J., Lee, J., Park, S. ve Choi, J. K. (2022). Power scheduling scheme for a charging facility considering the satisfaction of electric vehicle users. *IEEE Access*, 10, 25153-25164.

36. Li, Z., Sun, Y., Yang, H. ve Anvari-Moghaddam, A. (2022). A consumer-oriented incentive strategy for EV charging in multiareas under stochastic risk-constrained scheduling framework. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(4), 5262-5274.

37. Kurniawan, T., Baguley, C. A., Madawala, U. K., Hariyanto, N. ve Adianto, Y. (2020). An electric vehicle charge scheduling approach suited to local and supplying distribution transformers. *Energies*, 13(13), 3486.

38. Erdogan, N., Pamucar, D., Kucuksari, S. ve Deveci, M. (2022). A hybrid power Heronian function-based multicriteria decision-making model for workplace charging scheduling algorithms. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(1), 1564-1578.

39. Jiang, W. ve Zhen, Y. (2019). A real-time EV charging scheduling for parking lots with PV system and energy store system. *IEEE Access*, 7, 86184-86193.

40. Wang, R., Chen, Z., Xing, Q., Zhang, Z. ve Zhang, T. (2022). A modified rainbow-based deep reinforcement learning method for optimal scheduling of charging station. *Sustainability*, 14(3), 1884.

41. Wang, S., Bi, S. ve Zhang, Y. A. (2019). Reinforcement learning for real-time pricing and scheduling control in EV charging stations. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2), 849-859.

42. Xie, R., Wei, W., Wu, Q., Ding, T. ve Mei, S. (2019). Optimal service pricing and charging scheduling of an electric vehicle sharing system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 78-89.

43. İnternet: Türkiyede Resmi Olarak 2022 Yılında Trafiğe Kayıtlı Araç Sayısı. URL: https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2022-45704, Son Erişim Tarihi: 07.09.2023.

44. Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M. ve Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and sustainable energy reviews*, 49, 365-385.

45. İnternet: Geleneksel İçten Yanmalı Araçların Verimi. URL: https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml#:~:text=EVs%20have%20several%20advantages%20over,to%20power%20at%20the%20wheels, Son Erişim Tarihi: 07.09.2023.

46. İnternet: Elektrikli Araçlar için Tasarlanan Platformlar. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Electric_vehicle_platforms, Son Erişim Tarihi: 09.07.2023.

47. İnternet: Volkswagen Marka Aracın Platformu. URL: https://www.volkswagen-newsroom.com/en/modular-electric-drive-matrix-meb-3677, Son Erişim Tarihi: 07.09.2023.

48. Çayırlı, M. (2021). *Lityum Pillerde Anot Malzemesi Olarak Yüksek Entropili Oksitlerin Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 105.

49. Meesala, Y., Jena, A., Chang, H. ve Liu, R. S. (2017). Recent advancements in Li-ion conductors for all-solid-state Li-ion batteries. *ACS Energy Letters*, 2(12), 2734-2751.

50. Borenstein, A., Hanna, O., Attias, R., Luski, S., Brousse, T. ve Aurbach, D. (2017). Carbon-based composite materials for supercapacitor electrodes: a review. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(25), 12653-12672.

51. Ma, T., Yang, H. ve Lu, L. (2015). Development of hybrid battery–supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems. *Applied Energy*, 153, 56-62.

52. Zhou, Y., Wang, Y., Wang, K., Kang, L., Peng, F., Wang, L. ve Pang, J. (2020). Hybrid genetic algorithm method for efficient and robust evaluation of remaining useful life of supercapacitors. *Applied Energy*, 260, 114169.

53. Karaal, Ş. (2013). *Lityum İyon Pillerde Elektrolit Olarak Libf4 Kullanımının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 84.

54. Er, M. (2016). *Sn-Sb-Cu-C Ve Sn-Co-C Sentezi ve Lityum İyon Pil Anot Materyali Olarak Kullanılmalarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 110.

55. Dokan, Kılıç, F. (2016). *Lityum İyon Pillerde Anot Aktif Madde Olarak Kullanılan Li4Ti5O12 Bileşiğinin Elektrokimyasal Özelliklerinin İyilestirilmesi*. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 142.

56. İnternet: Batarya Teknolojileri. URL: https://www.targray.com/li-ion-battery/cathode-materials/nmc, Son Erişim Tarihi: 07.09.2023.

57. İnternet: Lityum-ion Muhteviyatındaki Bataryaların Teknolojileri. URL: https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion, Son Erişim Tarihi: 07.09.2023.

58. Korthauer, R. (Ed.). (2018). *Lithium-ion batteries: basics and applications*. Springer.

59. Genç, Y. (2015). *Güç Kalitesi Problemlerinde Geleneksel Kontrol Teorisi ve Bulanik Mantık Kontrol Teorisinin Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 182.

60. Smith, J. C., Hensley, G. ve Ray, L. (1995). IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Std*, 1159-1995.

61. Okampo, E. J., Nwulu, N. ve Bokoro, P. N. (2021). Transient stability analysis of a transmission network using eigenvalue principles with automated var compensation: A case study of the nigerian eastern grid. *Energies*, 14(17), 5289.

62. Berdibek, Murat. (2009). *Güç Sistemlerinde Güç Kalitesinin Ayrık Dalgacık Dönüşümü Kullanılarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 86.

63. Çetin, F. (2021). *Nesnelerin İnterneti Teknolojisi Kullanilarak Belirli Güç Kalitesi Problemlerinin Analizi*. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 67.

64. Avraam, C., Rines, J., Sarker, A., Mallada, E. ve Paganini, F. (2019). *Voltage Collapse Stabilization in Star DC Networks*. In 2019 American Control Conference (ACC), 1957-1964, IEEE.

65. Uyar, M. (2008). *Güç kalitesindeki bozulma türlerinin akıllı örüntü tanıma yaklaşımları ile belirlenmesi*. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 160.

66. Santoso, S., McGranaghan, M. F., Dugan, R. C. ve Beaty, H. W. (2012). *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill Education.

67. Stringer, N. T. (1998). The effect of DC offset on current-operated relays. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(1), 30-34.

68. Keller, J. ve Kroposki, B. (2010). *Understanding fault characteristics of inverter-based distributed energy resources* (No. NREL/TP-550-46698). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

69. Kang, H., & Kim, H. (2020). Household appliance classification using lower odd-numbered harmonics and the bagging decision tree. *IEEE Access*, 8, 55937-55952.

70. Blooming, T. M., & Carnovale, D. J. (2006, June). *Application of IEEE Std 519-1992 harmonic limits*. In Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1-9, IEEE.

71. Gökozan, H. (2011). *Endüstriyel Tesislerde Güç Kalitesinin İzlenmesi, Analizi Ve Uygun Harmonik Filtre Seçimi*. Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 125.

72. Apryansyah, M. ve Garniwa, M. I. (2021). Effect of K-Factor on Capability in Power Transformers. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1962(1): 012005, IOP Publishing.

73. Erhan, K. (2013). *Gerilim Çentiği Tespiti İçin Yeni Bir Algoritma Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 73.

74. Öner, İ. V., Yeşilyurt, M. K. ve Yilmaz, E. Ç. (2017). Wavelet Analiz Tekniği ve Uygulama Alanları. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 42-56.

75. Aksoy, S. (2014). *Bir Endüstriyel Tesis Elektrik Dağıtım Sisteminin Gerilim Çökmeleri Bakımından İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 203.

76. Silsüpür, M. ve Türkay, B. E. (2015). Flicker source detection methods based on IEC 61000-4-15 and signal processing techniques–a review. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3(2).

77. İnternet: Determination of Flicker Propagation Direction in Power Systems. URL:http://www.iust.ac.ir/files/ee/Banke_maghalat/daneshjoo/paper_id_64_51047.pdf , Son Erişim Tarihi: 07.09.2023.

78. Moghadam Banayem, H., Doroudi, A. ve Poormonfared Azimi, M. (2015). Flicker source tracing by wavelet transform. *Electric Power Components and Systems*, 43(4), 412-421.

79. Greenwood, D. M., Lim, K. Y., Patsios, C., Lyons, P. F., Lim, Y. S. ve Taylor, P. C. (2017). Frequency response services designed for energy storage. *Applied Energy*, 203, 115-127.

80. İnternet: Elektrik Şebeke Yönetmeliği. URL: https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-6730/elektrik--sebeke-, Son Erişim Tarihi: 07.09.2023.

81. Králiková, E. ve Čičáková, O. (2013). *Distortion power measurements in education*. In The 9th International Conference Measurement 2013 was organized by the Institute of Measurement Science, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia, 75.

82. Akyel, A. (2011). *Elektrik Enerji Sistemlerinde Güç Kalitesinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 114.

83. Piasecki, S., Zaleski, J., Jasinski, M., Bachman, S. ve Turzyński, M. (2021). Analysis of AC/DC/DC Converter Modules for Direct Current Fast-Charging Applications. *Energies*, 14(19), 6369.

84. Bozkurt, N. (2006). *Mikrodenetleyici Kontrollü Servo Gerilim Regülatörünün Tasarım ve Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 93.

85. Panfilov, D. I., Petrov, M. I., Rashitov, P. A., Astashev, M. G. ve Rozhkov, A. N. (2018). *Development of thyristors voltage regulator operating with different load characteristics*. In 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), 1-4, IEEE.

86. Karaarslan, K. (2018). *Çok Seviyeli Evirici Tabanlı Aktif Güç Filtresi Tasarımı ve Uygulaması*. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 98.

87. Santoso, S., McGranaghan, M. F., Dugan, R. C. ve Beaty, H. W. (2012). *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill Education.

88. Gupta, S. ve Gupta, P. (2013). Harmonics mitigation using active power filter. *International Journal of Advanced Computer Research*, 3(2), 116.

89. Meloni, L. F. J., Tofoli, F. L., Rezek, Â. J. J. ve Ribeiro, E. R. (2019). Modeling and experimental validation of a single-phase series active power filter for harmonic voltage reduction. *IEEE Access*, 7, 151971-151984.

90. Kmail, M. (2012). *Investigation of shunt active power filter for power quality improvment*. Yüksek Lisans Tezi. Near East.

91. Ketsingsoi, S. ve Kumsuwan, Y. (2014). An off-line battery charger based on buck-boost power factor correction converter for plug-in electric vehicles. *Energy Procedia*, 56, 659-666.

92. Pamuk, N. (2009). *380 ve 154 Kv'luk Kuzeybatı Anadolu Şebekesi Güç Akişi Benzetimleri*. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 109.

93. İnternet: Primary frequency response and control of power system frequency. URL: https://eta-publications.lbl.gov, Son Erişim Tarihi: 10.09.2023.

94. Hansen, A. D., Sørensen, P. E., Zeni, L. ve Altin, M. (2016). Frequency control modelling-basics. *DTU Wind Energy E*, 49: 0103.

95. İnternet: Kurulu Güç Raporları. URL: https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari, Son Erişim Tarihi: 07.09.2023.

96. Eltoumi, F. (2020). *Charging station for electric vehicle using hybrid sources*. Doktora Tezi. Bourgogne Franche-Comté.

97. Mouli, G. C., Bauer, P. ve Zeman, M. (2015). *Comparison of system architecture and converter topology for a solar powered electric vehicle charging station*. In 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 1908-1915, IEEE.

98. Hadero, M. ve Khan, B. (2022). Development of DC Microgrid Integrated Electric Vehicle Charging Station with Fuzzy Logic Controller. *Frontiers in Energy Research*, 10, 922384.

99. Locment, F. ve Sechilariu, M. (2015). Modeling and simulation of DC microgrids for electric vehicle charging stations. *Energies*, 8(5), 4335-4356.

100. Zheng, Y., Niu, S., Shang, Y., Shao, Z. ve Jian, L. (2019). Integrating plug-in electric vehicles into power grids: A comprehensive review on power interaction mode, scheduling methodology and mathematical foundation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 424-439.

101. Chen, Z., Liu, Q., Xiao, X., Liu, N. ve Yan, X. (2013). *Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid*, In 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG Beijing), 1-4, IEEE.

102. Bidram, A. and A. Davoudi. (2012). Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1963-1976.

103. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuña, L. G. ve Castilla, M. (2010). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172.

104. Vandoorn, T. L., Vasquez, J. C., De Kooning, J., Guerrero, J. M. ve Vandevelde, L. (2013). Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(4), 42-55.

105. Turker, H. ve Bacha, S. (2014). Smart charging of plug-in electric vehicles (PEVs) in residential areas: Vehicle-to-home (V2H) and vehicle-to-grid (V2G) concepts. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(4), 859-871.

106. Tu, H., Feng, H., Srdic, S. ve Lukic, S. (2019). Extreme fast charging of electric vehicles: A technology overview. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(4), 861-878.

107. Çalışkan, E. (2022). *Batarya Şarj Uygulamalarında Kullanılan Llc Rezonans Çeviricilerde Optimum Verim Eldesi İçin Yeni Bir Yöntem*. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 149.

108. Aggeler, D., Canales, F., Zelaya-De La Parra, H., Coccia, A., Butcher, N. ve Apeldoorn, O. (2010). *Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids*. In 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 1-8, IEEE.

109. Wan, H. (2012). *High efficiency DC-DC converter for EV battery charger using hybrid resonant and PWM technique*. Doktora Tezi. Virginia Tech, 115.

110. Kabalci, E. (2014). *Power electronics and drives used in automotive applications*. Autonomous Vehicles: Intelligent Transport Systems and Smart Technologies; Bizon, N., Dascalescu, L., Tabatabaei, NM, Eds, 249-273.

111. Du, Y., Lukic, S., Jacobson, B. ve Huang, A. (2011). *Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure*. In 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 553-560, IEEE.

112. Cheng, M. Y. ve Prayogo, D. (2014). Symbiotic organisms search: a new metaheuristic optimization algorithm. *Computers & Structures*, 139, 98-112.

113. Sönmez, Y. ve Mesut, Ü. (2019). Rulet Tekerleği Yöntemi Kullanılarak Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritmasının Geliştirilmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 11(3), 186-200.

114. Özdemir, R. (2012). *Yapay arı kolonisi algoritması için yeni seçme ve arama mekanizmalarının geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 69.

115. Saraçoğlu, B., Güvenç, U., Dursun, M., Poyraz, G. ve Duman, S. (2013). Biyocağrafya Tabanlı Optimizasyon Metodu Kullanarak Asenkron Motor Parametre Tahmini. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1), 46-54.

116. Doğru, A. S. ve Tolga, E. (2020). Kablosuz Sensör Ağlarında Konum Belirlemede Parçacık Sürü Optimizasyonu, Yarasa Algoritması, Diferansiyel Gelişim Algoritması ve Ateşböceği Algoritması Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(3), 52-64.

117. Erkol, H. O. (2017). GA ve PSO ile Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 179-185.

118. Özsağlam, M. Y., & Çunkaş, M. (2008). Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçaçık sürü optimizasyonu algoritması. *Politeknik Dergisi*, 11(4), 299-305.

119. Abualigah, L., Habash, M., Hanandeh, E. S., Hussein, A. M., Shinwan, M. A., Zitar, R. A. ve Jia, H. (2023). Improved Reptile Search algorithm by Salp Swarm algorithm for medical image segmentation. *Journal of Bionic Engineering*, 20, 1766–1790.

120. Shaban, H., Houssein, E. H., Pérez-Cisneros, M., Oliva, D., Hassan, A. Y., Ismaeel, A. A. ve Said, M. (2021). Identification of parameters in photovoltaic models through a runge kutta optimizer. *Mathematics*, 9(18), 2313.

121. Kaymaz, E., Güvenç, U. ve Döşoğlu, M. K. (2023). Optimal PSS design using FDB-based social network search algorithm in multi-machine power systems. *Neural Computing and Applications*, 35(17), 12627-12653.

122. Zhaoan, F., Baochuan, F., Xuefeng, X., Zhengtian, W., Zhenping, C. ve Xinyin, X. (2020). Power charging management strategy for electric vehicles based on a Stackelberg game. *IET Intelligent Transport Systems*, 14(5), 432-439.

123. Zhang, G., Tan, S. T. ve Wang, G. G. (2017). Real-time smart charging of electric vehicles for demand charge reduction at non-residential sites. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5), 4027-4037.

124. Zheng, Y., Luo, J., Yang, X. ve Yang, Y. (2020). Intelligent regulation on demand response for electric vehicle charging: a dynamic game method. *IEEE Access*, 8, 66105-66115.

125. Seo, M., Kim, C. ve Han, S. (2019). *Peak shaving of an EV aggregator using quadratic programming*. In 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2794-2798, IEEE.

126. Üstünsoy, F. ve Sayan, H. H. (2021). Real-time realization of network integration of electric vehicles with a unique balancing strategy. *Electrical Engineering*, 103(6), 2647-2660.



Gazili olmak ayrıcalıktır