

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YERLEŞİK ŞARJ CİHAZI SİSTEMLERİNİN
SİMÜLASYON ORTAMINDA ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İZZET EMRE KARSAVURAN

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ YUSUF ÇİLLİYÜZ

BİLECİK, 2024

10613795

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YERLEŞİK ŞARJ CİHAZI SİSTEMLERİNİN
SİMÜLASYON ORTAMINDA ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İZZET EMRE KARSAVURAN

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ YUSUF ÇİLLİYÜZ

BİLECİK, 2024

10613795

BEYAN

Elektrikli Araçlarda Yerleşik Şarj Cihazı Sistemlerinin Simülasyon Ortamında Analizi adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projeninvedestekleyenkurumunadıprojenumarasıilebirlikte,ETİKKURULOnayılınması durumundaiseETİK KURULTarihkararvesayıbilgilerininbeyan edilmesigerekmetedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

İzzet Emre KARSAVURAN

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÇİLLİYÜZ'e değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Savunma sınavı sırasında değerli jüri üyelerine çalışmamın son haline gelmesindeki değerli katkıları adına teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme teşekkür ederim.

İzzet Emre KARSAVURAN

2024



ÖZET

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YERLEŞİK ŞARJ CİHAZI SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYON ORTAMINDA ANALİZİ

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte ülkemizde ve dünyada elektrikli araç üretiminin ve kullanımının hızla arttığı görülmektedir. Fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması, doğaya zarar vermesi ve kullanıcı için maliyetinin yüksek olması gibi etkenler elektrikli araçlara olan ilginin artmasına yol açmıştır. Artan ilgi ile birlikte elektrikli araç teknolojisinde kritik öneme sahip menzile, batarya ömrü ve şarj süresi gibi problemler zamanla çözülmeye başlanmıştır. Bu problemlerin çözülmesi, diğer araç üreticilerinin de elektrikli araç teknolojisi üzerine çalışma yapmasının yolunu açmıştır. Bu kapsamda elektrikli araç bataryaları, yerleşik şarj cihazları, hızlı şarj teknolojisi ve otonom araç teknolojisi gibi konular üzerinde birçok çalışma yapılmış ve iyi seviyede ilerleme kaydedilmiştir.

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan yerleşik şarj cihazı topolojilerinden üç tanesi seçilerek simülasyon ortamında analiz edilmiş olup alınan çıktılar ışığında topolojilerin verimlilikleri, güvenilirlik durumları, maliyetleri ve kontrol algoritmaları karşılaştırılmıştır. İlerleyen yıllarda elektrikli araç kullanımının daha fazla artacağı düşünüldüğünde, şebekelerden araçlara enerji aktarımı sırasında kayıp olarak ortaya çıkan enerji miktarının, yüksek seviyelere çıkacağı söylenebilir. Bu kapsamda yerleşik şarj cihazı için seçilecek güç elektroniği topolojilerinin öncelikli olarak verim esaslı karşılaştırılması uygundur. Topoloji seçiminde karşılaştırma konusu olacak diğer önemli etkenler ise sistem güvenilirliği, maliyet ve kontrol algoritmalarıdır. Sistem güvenilirliği, topoloji kaynaklı meydana gelebilecek arızalardan aracın diğer bileşenlerinin etkilenmemesi veya az etkilenmesi yönünden oldukça önem arz etmektedir. Öte yandan düşük maliyet ve kolay kontrol edilebilirliği bakımından topolojilerin kontrol algoritmalarının mümkün olduğunca basit yapıda olması beklenmektedir. Son olarak, elektrikli araçların ticari birer ürün olduğu düşünüldüğünde, yerleşik şarj cihazlarında kullanılacak güç elektroniği topolojilerinin, diğer tüm ticari ürünler gibi uygun maliyetli olması gerekmektedir. Tez çalışmasında, incelenen tasarımlar ve alınan sonuçlar doğrultusunda, topolojiler bu dört ana başlık altında karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Bataryalar, Yerleşik Şarj Cihazları, Verim, Güç Elektroniği Topolojileri, Maliyet, Sistem Güvenilirliği.

ABSTRACT

**ANALYSIS OF ON-BOARD CHARGING SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLES
THROUGH SIMULATION ENVIRONMENT**

In recent years, with the advancement of technology, there has been a rapid increase in the production and use of electric vehicles in our country and around the world. Factors such as limited fossil fuel resources, environmental damage, and high costs for users have contributed to the growing interest in electric vehicles. Along with this increasing interest, critical issues in electric vehicle technology such as range, battery life, and charging time have gradually started to be addressed. The resolution of these issues has paved the way for other automotive manufacturers to engage in research and development in electric vehicle technology. In this context, extensive work has been carried out on electric vehicle batteries, built-in charging devices, fast charging technology, and autonomous vehicle technology, leading to significant progress.

In this thesis, three of the commonly utilized built-in charging device topologies in electric vehicles were selected and analyzed in a simulation environment. The outputs obtained from this analysis were used to compare the efficiencies, reliability statuses, costs and control algorithms of these topologies. Considering the anticipated further increase in electric vehicle usage in the coming years, it can be asserted that the amount of energy loss during energy transfer from the grids to vehicles may reach high levels. In this context, a primary consideration is the efficiency-based comparison of power electronics topologies selected for built-in charging devices. In the selection of topology, other significant factors that will be subject to comparison include system reliability, cost, and control algorithms. The reliability of the system is of paramount importance in terms of minimizing or completely eliminating the impact of faults originating from the topology on the other components of the vehicle. On the other hand, for the sake of low cost and ease of controllability, it is expected that the control algorithms of topologies should be as simple as possible. Finally, considering electric vehicles as commercial products, power electronics topologies used in built-in charging devices need to be cost-effective, similar to all other commercial products. In the thesis study, based on the examined designs and obtained results, topologies have been compared under these four main headings.

Keywords: Electric Vehicles, Batteries, Onboard Chargers, Efficiency, Power Electronics Topologies, Cost, System Reliability.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Çalışması.....	2
1.3. Yöntem.....	4
2. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ	6
2.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi	6
2.2. Elektrikli Araçların Temel Bileşenleri ve Çalışma Prensipleri.....	8
3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YAYGIN OLARAK KULLANILAN BATARYA TEKNOLOJİLERİ	10
3.1. Batarya Teknolojilerinin Tarihçesi.....	10
3.2. Bataryalar İçin Kullanılan Terimler	11
3.3. Kurşun Asit Bataryalar.....	11
3.4. Nikel Kadmiyum Bataryalar	12
3.5. Nikel Metal Hidrür Bataryalar	14
3.6. Lityum İyon Bataryalar	15
3.7. Lityum Demir Fosfat Bataryalar	17
4. EA BATARYALARI İÇİN ŞARJ YÖNTEMLERİ.....	19
4.1. Evde Şarj (AA Şarj)	19
4.2. Hızlı Şarj (DA Şarj).....	20
4.3. Süper Şarj (Super Charger)	20
4.4. Endüstriyel Şarj İstasyonları.....	20
4.5. Evde Duvar Tipi Şarj Üniteleri (EVSE –Electric Vehicle Supply Equipment). 21	
5. ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU HABERLEŞME PROTOKOLLERİ .. 22	
5.1. CHAdeMO	22
5.2. Combined Charging System (CCS)	22

5.3.	SAE J1772 (TİP 1 ve TİP 2).....	22
5.4.	Tesla Super Charger	22
5.5.	ISO/IEC 15118.....	22
6.	BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ (BYS)	24
6.1.	BYS'nin Ana İşlevleri.....	24
6.2.	BYS'nin Önemi	24
7.	YERLEŞİK ŞARJ CİHAZI	26
7.1.	Yerleşik Şarj Cihazının Görevi	26
7.2.	Yerleşik Şarj Cihazının Özellikleri.....	26
7.3.	Yerleşik Şarj Cihazlarının Önemi.....	26
7.4.	Yerleşik Şarj Cihazlarında Kullanılan Güç Elektroniği Topolojileri	27
7.4.1.	Köprüsüz Kutuplu Güç Faktörü Düzenleyici (GFD) Doğrultucu İki Yönlü Akü Şarj Yöntemi	28
7.4.2.	Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu Çift Aktif Köprü Şarj Yöntemi. 28	
7.4.3.	Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD Doğrultucu Seri Rezonans Dönüştürücü Şarj Yöntemi	29
7.4.4.	Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD Doğrultucu İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Şarj Yöntemi	30
7.4.5.	Tam Köprü DGM Dönüştürücü ve LLC Dönüştürücü Şarj Yöntemi.....	30
8.	TOPOLOJİLERİN GENEL YAPILARI	32
8.1.	AA-DA Dönüştürücüler	32
8.1.1.	Tam Dalga Doğrultucular	32
8.1.2.	KontROLSÜZ Tam Dalga Doğrultucular	32
8.1.3.	Kontrollü Tam Dalga Doğrultucular.....	33
8.2.	DA-DA Dönüştürücüler	34
8.2.1.	Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü.....	34
8.2.2.	Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü	36
8.3.	Sistem Kayıpları	38
8.3.1.	Reaktif Güç Kayıpları.....	38
8.3.1.1.	Kompanzasyon Yöntemi	39
8.3.1.2.	GFD Devreleri	40
8.3.1.3.	Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD	41
8.3.1.4.	Köprüsüz Kutuplu Tip GFD.....	41
8.3.2.	Yarı İletkenlerin Kayıpları.....	43
8.3.2.1.	MOSFET Kayıpları	43
8.3.2.2.	IGBT ve Diyot Kayıpları	45

8.3.2.3.	Bastırma Devreleri	46
8.3.2.4.	Aktif Sıfır Gerilim Geçiş Devreleri	48
8.3.2.5.	Aktif Sıfır Akım Geçiş Devreleri	49
8.3.3.	Pasif Devre Elemanı Kayıpları.....	51
8.3.3.1.	Omik (Rezistif) Kayıplar	51
8.3.3.2.	Dielektrik Kayıplar	51
8.3.3.3.	Demir Kayıpları	52
8.3.3.4.	Histerisiz Kayıpları.....	52
8.3.3.5.	Fuko Kayıpları	52
9.	MODELLEME.....	53
9.1.	Simülasyon Parametrelerinin Belirlenmesi.....	53
9.1.1.	Sistem Modellemesi	53
9.1.2.	Batarya Modellemesi.....	53
9.2.	Köprüsüz Kutuplu GFD Yöntemi ile DA Bara Geriliminin Modellenmesi.....	56
9.2.1.	Devre Bileşenlerinin Belirlenmesi.....	56
9.2.2.	Histerezis Akım Kontrolü Yöntemi	57
9.2.3.	Modelleme Çıktıları	58
9.3.	Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu İki Yönlü Şarj Devresi.....	60
9.3.1.	Topolojinin Çalışma Prensibi.....	61
9.3.2.	Devre Bileşenlerinin Belirlenmesi.....	62
9.3.3.	Modelleme Çıktıları	64
9.4.	Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi	69
9.4.1.	Topolojinin Çalışma Prensibi.....	69
9.4.1.1.	Tek Fazlı Kaydırma Yöntemi (SPS Modulation).....	70
9.4.1.2.	Genişletilmiş Faz Kaydırmalı Modülasyon (EPS Modulation)	70
9.4.1.3.	İkili Faz Kaydırmalı Modülasyon (DPS Modulation)	70
9.4.1.4.	Üçlü Faz Kaydırmalı Modülasyon (TPS Modulation)	70
9.4.2.	Devre Bileşenlerinin Belirlenmesi.....	72
9.4.3.	Modelleme Çıktıları	74
9.5.	Dönüşümlü Yükseltici Tipi Güç Faktörü Düzenleyicili İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü	80
9.5.1.	Topolojinin Çalışma Prensibi.....	81
9.5.1.1.	Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu (Sinusoidal Pulse Width Modulation SPWM).....	83
9.5.2.	Devre Bileşenlerinin Belirlenmesi.....	83
9.5.3.	Modelleme Çıktıları	86

10. Sonuç ve Öneriler	94
KAYNAKÇA	100



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Tamamen Elektrikli Araç ve Hibrit Elektrikli Araçların Yapısı.....	6
Şekil 2. 2. İlk Elektrikli Araç Olarak Bilinen Trolleybüs (Electromode)	7
Şekil 2. 3. Elektrikli Araç Bileşenler Şeması.....	9
Şekil 3. 1. Kurşun Asit (PB-Asit) Bataryaların Kimyasal Yapısı.....	12
Şekil 3. 2. Nikel Kadmiyum (Ni-CD) Bataryaların Kimyasal Yapısı	13
Şekil 3. 3. Nikel Metal Hidrür (NiMH) Bataryaların Kimyasal Yapısı.....	14
Şekil 3. 4. Lityum İyon (Li-ion) Bataryaların Kimyasal Yapısı	15
Şekil 3. 5. Lityum İyon Batarya Şarj Grafiği.....	17
Şekil 3. 6. Lityum Demir Fosfat (LiFePO ₄) Bataryaların Kimyasal Yapısı.....	17
Şekil 4. 1. Evde Şarj Yöntemi.....	20
Şekil 4. 2. Endüstriyel Şarj İstasyonu	21
Şekil 7. 1. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu İki Yönlü Şarj Devresi	28
Şekil 7. 2. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi.....	29
Şekil 7. 3. Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD Doğrultucu Seri Rezonans Dönüştürücülü Şarj Devresi	29
Şekil 7. 4. Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD Doğrultucu İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücülü Şarj Devresi	30
Şekil 7. 5. Tam Köprü DGM Dönüştürücü ve LLC Dönüştürücülü Şarj Devresi.....	31
Şekil 8. 1. Kontrolsüz Tam Dalga Doğrultucu.....	33
Şekil 8. 2. Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu Devre Şeması	33
Şekil 8. 3. Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü Devre Şeması	34
Şekil 8. 4. Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü Yarı İletken Anahtarın İletim ve Kesim Durumu.....	35
Şekil 8. 5. Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Devre Şeması.....	36
Şekil 8. 6. Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Yarı İletken Anahtarın İletim Durumu.....	37
Şekil 8. 7. Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Yarı İletken Anahtarın Kesim Durumu.....	37
Şekil 8. 8. Alternatif Akım Güç Üçgeni.....	39
Şekil 8. 9. Pasif GFD Devresi	40
Şekil 8. 10. Dönüşümlü Yükseltici GFD Yöntemi	41
Şekil 8. 11. Köprüsüz Yükseltici GFD Yöntemi	42
Şekil 8. 12. Köprüsüz Kutuplu GFD Yöntemi.....	42

Şekil 8. 13. Bir MOSFET'in V_{GS} Eğrisi	44
Şekil 8. 14. IGBT Katalog Verileri	45
Şekil 8. 15. Açma Bastırma Devresi Örneği	46
Şekil 8. 16. Kapatma Bastırma Devresi Örneği	47
Şekil 8. 17. Bastırma Devresinin Anahtarlama Anındaki Etkileri	47
Şekil 8. 18. Yükseltici Devre Üzerine Uygulanmış Temel Sıfır Gerilim Bastırma Devresi ...	48
Şekil 8. 19. Yükseltici Devre Üzerine Uygulanmış Geliştirilmiş Sıfır Gerilim Bastırma Devresi	49
Şekil 8. 20. Yükseltici Devre Üzerine Uygulanmış Temel Sıfır Akım Bastırma Devresi.....	50
Şekil 8. 21. Yükseltici Devre Üzerine Uygulanmış Geliştirilmiş Sıfır Akım Bastırma Devresi	50
Şekil 9. 1. Batarya Verisi 1	54
Şekil 9. 2. Batarya Verisi 2	55
Şekil 9. 3. Batarya Verisi 3	55
Şekil 9. 4. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu Bobin, Kondansatör ve IGBT Modeli.....	57
Şekil 9. 5. Örnek Histerezis Akım Kontrolü Anahtarlama Sinyali.....	58
Şekil 9. 6. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu.....	59
Şekil 9. 7. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu Histerrezis Akım Kontrol Bloğu.....	59
Şekil 9. 8. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu AA Giriş Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği)	59
Şekil 9. 9. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu 800V DA Bara Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği).....	60
Şekil 9. 10. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu IGBT Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği).....	60
Şekil 9. 11. İki Yönlü Yerleşik Şarj Cihazı Güç Akışı Şeması.....	61
Şekil 9. 12. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu İki Yönlü DA-DA Dönüştürücü, Devre Şeması	61
Şekil 9. 13. İki Yönlü Şarj Devresi ve PI Kontrol Bloğu.....	64
Şekil 9. 14. İki Yönlü Şarj Devresi için Batarya Durum Göstergesi	65
Şekil 9. 15. İki Yönlü Şarj Devresi için Batarya Akımı, Batarya Gerilimi, Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü Anahtarlama Sinyali (Gerilim, Akım-Zaman Grafiği)	65
Şekil 9. 16. İki Yönlü Şarj Devresi Güç Ölçüm Noktaları	66
Şekil 9. 17. İki Yönlü Şarj Devresi Giriş Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	67
Şekil 9. 18. İki Yönlü Şarj Devresi Güç Aktarım Noktası (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	67
Şekil 9. 19. İki Yönlü Şarj Devresi Çıkış Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği)	67

Şekil 9. 20. İki Yönlü Şarj Devresi için Güç Faktörü	68
Şekil 9. 21. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu Çift Aktif Köprülü DA-DA Dönüştürücü Devre Şeması.....	69
Şekil 9. 22. Çift Aktif Köprülü DA-DA Dönüştürücü Faz Kaydırma Modülasyonu	71
Şekil 9. 23. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi.....	74
Şekil 9. 24. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Faz Kaydırma Modülasyonu Bloğu	75
Şekil 9. 25. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Giriş Köprüsü Faz Kaydırılmış Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)	75
Şekil 9. 26. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Transformatör Giriş Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği).....	75
Şekil 9. 27. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Transformatör Çıkış Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği).....	76
Şekil 9. 28. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Çıkış Köprüsü Faz Kaydırılmış Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)	76
Şekil 9. 29. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Transformatör Giriş Gerilimi – Faz Kaydırılmış Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği).....	76
Şekil 9. 30. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Batarya Durum Göstergesi.....	77
Şekil 9. 31. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Güç Ölçüm Noktaları	77
Şekil 9. 32. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Giriş Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği)	78
Şekil 9. 33. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Güç Aktarım Noktası 1 (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	78
Şekil 9. 34. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Güç Aktarım Noktası 2 (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	79
Şekil 9. 35. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Çıkış Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	79
Şekil 9. 36. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi için Güç Katsayısı	80
Şekil 9. 37. Dönüşümlü Yükseltici GFD’li ve İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devre Şeması	81
Şekil 9. 38. Dönüşümlü Yükseltici GFD Giriş Akımı ve Bobin Akımı Durumları.....	82
Şekil 9. 39. SPWM Yöntemi için Örnek Referans-Çıkış Sinyali	83
Şekil 9. 40. Dönüşümlü Yükseltici Tipi Güç Faktörü Düzenleyici Devresi.....	86
Şekil 9. 41. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi.....	87
Şekil 9. 42. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi SPWM Kontrol Bloğu.....	87
Şekil 9. 43. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Anahtarlama Sinyali, Referans Testere Sinyali, SPWM Bloğu Çıkış Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)	87

Şekil 9. 44. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Giriş Köprüsü Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)	88
Şekil 9. 45. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Transformör Giriş Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği).....	88
Şekil 9. 46. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Batarya Durum Göstergesi....	88
Şekil 9. 47. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi İzole Doğrultucu Çıkış Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği).....	89
Şekil 9. 48. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Güç Ölçüm Noktaları	89
Şekil 9. 49. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Giriş Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	90
Şekil 9. 50. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Güç Aktarım Noktası 1 (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	90
Şekil 9. 51. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Güç Aktarım Noktası 2 (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	91
Şekil 9. 52. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Güç Aktarım Noktası 3 (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	92
Şekil 9. 53. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Çıkış Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği).....	92
Şekil 9. 54. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi için Güç Katsayısı	93

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3. 1 Batarya Karşılaştırma Tablosu	18
Tablo 4. 1. Elektrikli Araç Şarj Modları.....	19
Tablo 10. 1. Topoloji Maliyet Tablosu.....	98
Tablo 10. 2. Topoloji Karşılaştırma Tablosu.....	99



KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

DA: Doğu Akım

AA: Alternatif Akım

EA: Elektrikli Araç

BEA: Bataryalı Elektrikli Araç

HEA: Hibrit Elektrikli Araç

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç)

FCEV: Fuel Cell Electric Vehicles (Yakıt Hücresi Elektrikli Araç)

FV: Fotovoltaik

CCCV: Constant Current Constant Voltage (Sabit Akım Sabit Gerilim)

Pb: Kurşun

PbO₂: Kurşun Sülfat

H₂SO₄: Seyreltilmiş Sülfirik Asit

Cd: Kadmiyum

NiO(OH)₂: Nikel Oksit Hidroksit

KOH: Potasyum Hidroksit

MH: Metal hidrür

C₆: Grafit

LiCoO₂: Lityum Kobalt Oksit

Li₂CO₃: Lityum Tuzu

LiFePO₄: Lityum Demir Fosfat

BYS: Batarya Yönetim Sistemi

GPIO: General-Purpose Input Output (Genel Amaçlı Giriş Çıkış)

kW: Kilowatt

kWh: Kilowatt Saat

Ah: Amper Saat

mAh: miliAmper Saat

DGM : Darbe Genişlik Modülasyonu

PWM: Pulse-Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)

SPWM: Sinusoidal Pulse Width Modulation (Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu)

GFD: Güç Faktörü Düzenleyici

ZVS: Zero Voltage Switching (Sıfır Gerilimde Anahtarlama)

ZCS: Zero Current Switching (Sıfır Akımda Anahtarlama)

ZVT: Zero Voltage Transition (Sıfır Gerilimde Geçiş)

ZCS: Zero Current Transition (Sıfır Akımda Geçiş)

SPS: Single Phase Shift (Tek Faz Kaydırma Modülasyonu)

DPS: Dual Phase Shift (İkili Faz Kaydırma Modülasyonu)

TPS: Triple Phase Shift (Üçlü Faz Kaydırma Modülasyonu)

EPS: Extended Phase Shift (Genişletilmiş Faz Kaydırma Modülasyonu)

THD: Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozulma)

EMI: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)

1.GİRİŞ

1.1. Giriş

Dünya genelinde çevresel etkilerin minimize edilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla sürdürülebilir ulaşım çözümleri, gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, hızla tükenen fosil yakıtlı araçlardan elektrikli araçlara bir geçiş söz konusudur. Elektrikli araçlar, düşük karbon ayak izleri ve yüksek enerji verimliliği avantajlarıyla çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine önemli bir katkı sağlamaktadır. Ancak, bu araçların günlük kullanımını kolaylaştırmak, araç sürücülerine pratik bir ulaşım çözümü sunmak ve elektrikli araçların yaygınlaşmasını desteklemek için etkili şarj sistemleri gerekmektedir.

Elektrikli araçlarda, batarya teknolojisinin önemi giderek artmaktadır. Bu teknolojik ilerlemeler, araç performansını belirlemede kritik bir rol oynamakta olup, enerji depolama kapasitesi, şarj hızları ve batarya ömürleri gibi faktörler, araç sürücülerinin günlük kullanım deneyimini belirleyen temel unsurlar haline gelmiştir. Batarya teknolojisinin gelişimi, elektrikli araçların menzilini artırarak, şarj sürelerini kısaltarak ve genel sürüş verimliliğini artırarak sürdürülebilir ulaşımın yaygınlaşmasını desteklemektedir. Bu nedenle, batarya teknolojilerinin sürekli olarak iyileştirilmesi, elektrikli araç sektöründe önemli bir odak noktası haline gelmiştir.

Bu noktada, yerleşik şarj cihazı sistemleri, elektrikli araç kullanımını daha erişilebilir hale getirerek, kullanıcı deneyimini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Bu tez, elektrikli araçlardaki yerleşik şarj cihazı sistemlerinin simülasyon ortamında detaylı bir analizini sunarak, bu sistemlerin enerji verimliliği, şarj hızları, güvenlik protokolleri ve şebeke entegrasyonu gibi kilit konulardaki performansını incelemeyi amaçlamaktadır. Elde edilecek bulgular, elektrikli araç teknolojilerinin evrimi ve sürdürülebilir ulaşımın küresel kabulü açısından önemli bir katkı sunabilecektir. Bu tez çalışmasında yapılanlar aşağıda belirtilmiştir:

- Elektrikli araç teknolojileri, çalışma prensipleri ve genel olarak elektrikli araç bileşenleri ile ilgili sistem araştırmaları yapılmıştır.
- Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların teknolojileri açıklanmış ve batarya çeşitleri üzerinde literatür taramaları yapılmıştır.
- Elektrikli araçlarda şarj yöntemlerinden ve bu yöntemler arasındaki farklardan bahsedilmiştir.

- Elektrikli araçların şarj istasyonlarındaki haberleşme protokollerinden bahsedilmiştir.
- Batarya yönetim sistemleri, yerleşik şarj sistemleri ve yerleşik şarj sistemlerinde kullanılan haberleşme protokolleri ile ilgili araştırmalar yapılmış ve analizlerine yer verilmiştir.
- Toplanan bütün bilgiler ışığında, güç elektroniği topolojilerinin analizleri ve simülasyonları yapılmış olup; sonuca ve tartışmalara hazırlanmıştır.

1.2. Literatür Çalışması

Elektrikli araç teknolojisinin farklı konuları ile alakalı birçok akademik çalışma yapılmıştır. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlar ile karşılaştırıldıklarında, şarj sürelerinin uzun olması, menzillerinin kısa olması, batarya ömürleri gibi faktörler, elektrikli araçların dezavantajları olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, son yıllarda elektrikli araçlar üzerine yapılan akademik çalışmaların bu konular etrafında yoğunlaştığı görülmektedir.

Yapılan akademik çalışmalar incelenecek olursa;

2012 yılında Akın'ın yaptığı çalışma, lityum iyon bataryaların şarj cihazlarında yaygın kullanılan GFD (Güç Faktörü Düzenleyici) devrelerinin analizini içermektedir. Bu analiz kapsamında, geleneksel yükseltici GFD, köprüsüz yükseltici GFD ve dönüşümlü yükseltici GFD devreleri, PSIM simülasyon ortamında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Simülasyon çıktılarına dayanılarak, GFD yöntemlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Bu çalışma, lityum iyon akülerin şarj süreçlerinde kullanılan GFD devrelerinin karşılaştırmalı bir analizini sunarak, bu alandaki teknolojik gelişmelerin anlaşılmasına katkıda bulunmuştur.

2016 yılında Muratoğlu ve Akkaya tarafından gerçekleştirilen çalışma, elektrikli araçlarda yaygın kullanılan batarya teknolojileri üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda, batarya analizleri ve karşılaştırmaları yapılarak, farklı batarya yönetim sistemleri incelenmiştir. Ayrıca, bataryaların performanslarını artırmaya yönelik çeşitli çalışmalarda kullanılan modellemeler, parametre kestirimi ve dengeleme teknikleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu araştırma, elektrikli araç teknolojilerindeki batarya kullanımının genel hatları ile anlaşılabilmesi açısından önemli bir bilgi kaynağı niteliğindedir.

2021 yılında Çetin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın, odak noktası elektrikli araçlar ve batarya sistemleridir. Araştırma kapsamında, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan

lityum iyon batarya paketleri, Matlab/Simulink ortamında detaylı bir şekilde modellenmiştir. Yapılan modelleme sonuçlarına dayanılarak, bataryaların deşarj sürelerinin, uygulanan yüke bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışma, elektrikli araç teknolojilerinde lityum iyon bataryaların performansının değerlendirilmesi anlamında, literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Cem 2023 yılındaki araştırmasında, elektrikli araçlarda kullanılan batarya teknolojileri üzerine odaklanmıştır. Bu bağlamda Python dilinde makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmanın temel amacı, batarya şarj süreçleri ile batarya ömrü arasındaki ilişkiyi anlamlandırmak ve tahmin etmektir. Bu şekilde, elektrikli araç teknolojilerinde batarya performansının iyileştirilmesine yönelik önemli bilgilerin elde edilmesi hedeflenmiştir.

Whitaker ve arkadaşları 2013 yılındaki çalışmasında, izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü yapısını kullanarak yüksek verimli bir yerleşik şarj cihazı tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu tasarım, aktarılan güç miktarına göre değerlendirildiğinde, Seviye 1 veya Seviye 2 modları için uygun olduğu söylenilebilir. Çalışmanın sonuçlarına göre, tasarımı yapılan yerleşik şarj cihazı 3.3kW güç aktarımı sırasında %94, 6.1kW güç aktarımı sırasında ise %95 verimle çalışabilmektedir. Bu veriler ışığında yerleşik şarj cihazlarında kullanılan izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü yaklaşımının verimli çalıştığı çıkarımı yapılabilir.

2015 yılında Marzouk çalışmasında, bir fazlı 7.3kW ve üç fazlı 20kW prototip yerleşik batarya şarj cihazı geliştirilmiştir. Çalışmanın devamında yerleşik şarj cihazları için iki yönlü şarj devresi simülasyon ortamında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Marzouk tasarım çalışmasının modellenmesi ve benzetimleri ile uygulama sonuçlarını karşılaştırarak doğrulamasını gerçekleştirmiştir.

2018 yılında Tarlak çalışmasında, elektrikli araçlar için iki yönlü şarj devresi tasarımı yapmıştır. Yapılan çalışma Matlab/Simulink ortama aktarılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Tasarlanan cihaz, 2.5kW güç aktarım kapasitesine sahiptir. Cihazın güç aktarım kapasitesi değerlendirildiğinde Seviye 1 veya Seviye 2 şarj modları için uygun olduğu görülmektedir. Tasarımda, şebekeden araca ve araçtan şebekeye enerji aktarım modları incelenmiş, o günün enerji maliyetleri göz önünde bulundurularak birim fiyat hesaplaması yapılmıştır.

2018 yılında Tarlak ve İşen'in gerçekleştirdiği çalışmada, elektrikli araçlar, şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar, yerleşik şarj cihazları ve yerleşik şarj cihazlarında yaygın

olarak kullanılan altı farklı güç elektroniği yaklaşımı değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma, yerleşik şarj cihazlarının ve bu cihazların güç aktarım yapılarının genel hatları ile anlaşılması açısından literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

2021 yılında Dantondji çalışmasında, izoleli tam köprülü DA-DA dönüştürücü topolojisinde ve faz kaydırma modülasyonu ile çalışan yerleşik şarj cihazı tasarımı yapmıştır. Yapılan tasarım 1.2kW güç aktarım kapasitesine sahiptir. Tasarlanan cihazın güç aktarım kapasitesi değerlendirildiğinde Seviye 1 şarj modu için uygun olduğu görülmektedir. Devamında tasarım PSIM simülasyon ortamında analiz edilmiştir. Simülasyondan alınan çıktılar doğrultusunda yapılan çalışma gerçek ortama aktarılmıştır. Çalışma sonucunda tasarlanan cihazın verimi %94.30 olarak ölçülmüştür. Bu çalışma izoleli tam köprülü DA-DA dönüştürücünün yapısı ve çalışma prensibi ile alakalı literatüre önemli seviyede katkıda bulunmaktadır.

2022 yılında Akgül çalışmasında, alçaltıcı düşürücü yaklaşımı ile yerleşik şarj cihazı geliştirmiştir. Çalışma PSIM simülasyon ortamında test edilmiştir. Devamında yerleşik şarj cihazına ek olarak giriş için güç filtresi tasarımının yapıldığı görülmektedir. Tasarlanan filtre devresinin farklı gerilimlerde toplam harmonik bozunum (THD) üzerindeki etkileri ve cihazın şebeke üzerindeki etkileri simülasyonlardan alınan sonuçlar doğrultusunda değerlendirilmiştir. Bu çalışma, yerleşik şarj cihazlarının elektrik şebekeleri üzerindeki etkileri konusunda önemli bir bilgi kaynağı niteliğindedir.

1.3. Yöntem

Yapılan araştırmalar sonucunda yerleşik şarj cihazlarında yaygın kullanılan güç elektroniği topolojileri belirlenmiştir. Bu topolojilerden verim, kontrol algoritmaları, maliyet ve güvenilirlik durumları temel alınarak karşılaştırılmak üzere üç tanesi seçilmiştir.

Buna göre;

- Topolojilerde kullanılan bileşenlerin değerleri hesaplanmıştır.
- Hesaplanan değerlere uygun ürünler bulunmuş ve karakteristik özellikleri incelenmiştir.
- Topolojilerin yapılarında kontrol gerektiren birimler için uygun kontrol algoritmaları seçilmiştir.
- Piyasada yaygın kullanılan elektrikli araçların batarya tipleri ve paketlenme şekilleri temel alınarak, simülasyon çalışmaları için batarya modeli oluşturulmuştur.

Bu bağlamda yapılan çalışmalar sırası ile aşağıda belirtilen şekilde simülasyon ortamına aktarılmıştır;

- Modellenen batarya verileri simülasyon ortamına aktarılmıştır.
- Topolojilerin şematik çizimleri simülasyon ortamına aktarılmıştır.
- Topolojiler için seçilen bileşenlerin karakteristik özellikleri simülasyon ortamına aktarılmıştır.
- Topolojilerin kontrol yapılarında kullanılmak üzere seçilen algoritmalar simülasyon ortamına aktarılmıştır.

Simülasyon ortamında kullanılan bileşenlere, hesaplamalar doğrultusunda seçilen ürünlerin karakteristik özellikleri girilmiş, böylelikle yapılan çalışmadan gerçeğe yakın sonuçların alınması hedeflenmiştir.

Tüm verilerin simülasyon ortamına aktarılmasının ardından topolojiler ayrı ayrı analiz edilmiştir.

İlk olarak topolojilerde giriş gerilimleri, çıkış gerilimleri, kontrol sinyalleri gibi noktalar ölçüm araçları ile gözlemlenmiştir. Devamında topolojilerin yapıları temel alınarak farklı noktalarda güç ölçümleri yapılmıştır. Bu yaklaşım ile meydana gelen güç kayıplarının sebepleri tespit edilmiştir. Alınan sonuçlar doğrultusunda giriş gücü ile çıkış gücü karşılaştırılarak topolojilerin verimleri hesaplanmıştır.

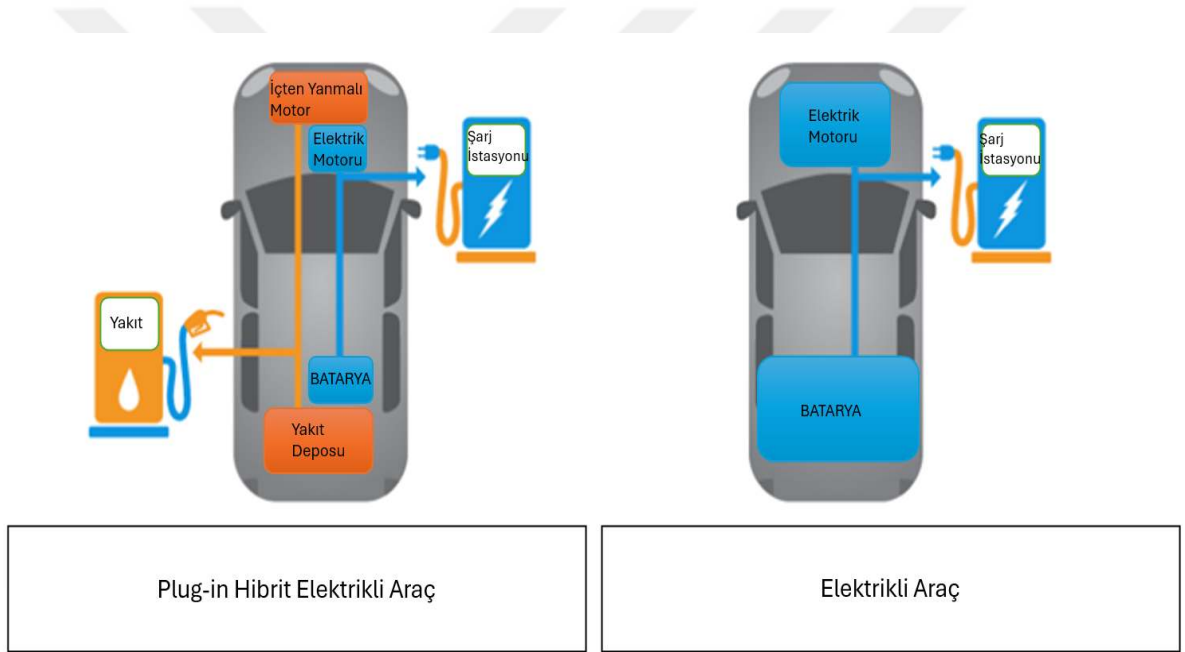
İncelenen topolojilerin yapılarından yola çıkılarak sistem güvenliği açısından avantaj - dezavantajları değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Topolojilerin çalışması için geliştirilen kontrol algoritmalarının karmaşıklık düzeyleri ve maliyetleri değerlendirilmiştir. Maliyet değerlendirmesi yapılırken hesaplamalar doğrultusunda seçilen gerçek ürünlerin maliyetleri ve sayıları dikkate alınmıştır.

2.ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ

EA (elektrikli araç); ya da dünyada bilinen adıyla EV (electric vehicle), ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini bataryadan alan, harici kaynaktan şarj edilen ve elektrik motoruyla tahrik edilebilen bir araç olarak tanımlanmaktadır.

EA'lar kısmen veya tamamen elektrik enerjisi ile çalışan araçlardır. Tamamen elektrikli araçlar, bataryadan elektrik enerjisi alan ve elektrik motoruyla tahrik edilebilen araçlar olarak tanımlanabilir. Kısmen elektrikli araçlar ise (plug-in hibrit) yine bir bataryadan elektrik enerjisi alan ve elektrik motorunun yanında ve içten yanmalı motor ile de tahrik edilebilen aracı temsil eder. Şekil 2.1'de tamamen elektrikli araçların ve hibrit elektrikli araçların yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2. 1. Tamamen Elektrikli Araç ve Hibrit Elektrikli Araçların Yapısı

2.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi

19. yüzyılın başlarındaki teknolojik atılımlar, bataryalar ve motorlar üzerindeki gelişmelerle birlikte, Atlantik'in her iki yakasındaki mühendislik ve otomotiv öncülerinin ilk elektrikli araçlarını geliştirmelerine olanak tanımıştır. 1830'ların başlarına gelindiğinde, Macaristan, Hollanda, İngiltere ve ABD'deki mucitler, motorlu bir araç yapma çabalarını bu teknolojik gelişmelerle birleştirme odaklı bir süreçte bulunmuşlardır. Tartışmalı bir konu olmasına rağmen, birçok kişi ilk küçük ölçekli elektrikli otomobillerin 1828-1832 yılları

arasında geliştirildiğini iddia etmektedir (Karahan vd., 2022). Bunula birlikte 1882 yılında geliştirilen ve denemelerine başlanan Siemens firmasının Trolleybüs aracı, tarihteki ilk elektrikli araç olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.2’de Trolleybüs aracına ait görsel gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. İlk Elektrikli Araç Olarak Bilinen Trolleybüs (Electromode)

Kaynak: (Restrepo, 2010)

20. yüzyılın başlarına gelindiğinde, birçok insan atlarını ve arabalarını motorlu araçlarla değiştirmeye başlamıştı. Bu durum, otomobilin popülerliğinin hızla artmasına ve gelecekteki mobiliteye dair bir rekabetin başlamasına yol açtı. Bu dönemde, buharla çalışan, benzinle çalışan ve elektrikle çalışan araçlar arasında Amerika yollarında oldukça dengeli bir ayrım vardı: Araçların yaklaşık %40'ı buharla, %38'i elektrikli ve yalnızca %22'si benzinle çalışıyordu (Karahan vd., 2022).

Buharlı araçların popülaritesi 1870'lerden bu yana artış göstermiş olsa da 20. yüzyılın başlarında ABD pazarında azınlıkta olup, zamanla düşüşü gerçekleştirmiştir. Buharlı araçlar, uzun başlatma süreleri ve sürekli su doldurma gerekliliği nedeniyle pratik olmayan bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, buharın fabrikalara ve trenlere güç sağlama konusundaki güvenilirliğinin, kişisel araçlar için geçerli olmadığı görülmüştür.

William Morrison'un elektrikli araba üzerinde çalıştığı dönemde, Gottlieb Daimler ve Carl Benz'in 1886 yılında Almanya'da geliştirdikleri içten yanmalı motorlu otomobil, otomotiv endüstrisinde önemli bir kilometre taşı olarak kabul edilir. Ancak, bu dönemdeki benzinle çalışan otomobiller, araç sürücülerinin manuel vites değiştirmesini ve aracı ağır bir el krankı ile çalıştırmasını gerektiriyordu. Ayrıca, bu otomobiller, o dönemdeki buharlı veya

elektrikli araçlara göre daha gürültülüydü ve egzozlarından çeşitli kirletici maddeler salınmaktaydı. Bu bağlamda içten yanmalı motora sahip otomobillerin üretimi ve kullanımındaki zorlayıcı özellikler, elektrikle çalışan araçların önemini zamanla artırmıştır. Böylece elektrikli otomobiller, diğer iki alternatif tür olan içten yanmalı ve buharlı araçlara göre rekabet avantajına sahip oldular. Elektrikli araçlar, hoş olmayan kirletici emisyonları en düşük düzeye getirerek çevre dostu bir seçenek sunmakta, manuel vites değiştirme zahmetinden ve uzun başlatma sürelerinden kurtararak kullanıcıya daha konforlu bir sürüş deneyimi sağlamaktadır. Bu avantajları, elektrikli araçların piyasada rekabetçi bir seçenek haline gelmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak, elektrikle çalışan arabalar, özellikle elektriğin kolayca erişilebildiği şehir sakinleri arasında hızla popülerlik kazanmıştır. Elektriğe olan bu artan talep, elektrikli araçların popülerliğinin daha da artmasına ve sürdürülebilir ulaşımın önemli bir öncüsü haline gelmesine katkı sağlamıştır.

2.2. Elektrikli Araçların Temel Bileşenleri ve Çalışma Prensipleri

Tamamen elektrikli araçların temel bileşenleri şu şekildedir:

Şarj Portu: Şarj portu, çekiş batarya paketini şarj etmek için aracın harici bir güç kaynağına bağlanmasını sağlamaktadır. (Şekil 2.3 - A)

DA-DA Dönüştürücü: Bu cihaz, çekiş batarya grubundan gelen yüksek gerilimli DA gücünü, araç bileşenlerini çalıştırmak ve yardımcı bataryayı şarj etmek için gereken düşük gerilimli DA gücüne dönüştürmektedir. (Şekil 2.3 - B)

Elektrikli Çekiş Motoru: Batarya grubundan aldığı elektrik enerjisi ile aracın tekerleklerini hareket ettiren bileşendir. Bazı araçlarda farklı olarak hem sürüş hem de rejenerasyon işlevlerini yerine getiren jeneratörler kullanılmaktadır. (Şekil 2.3 - C)

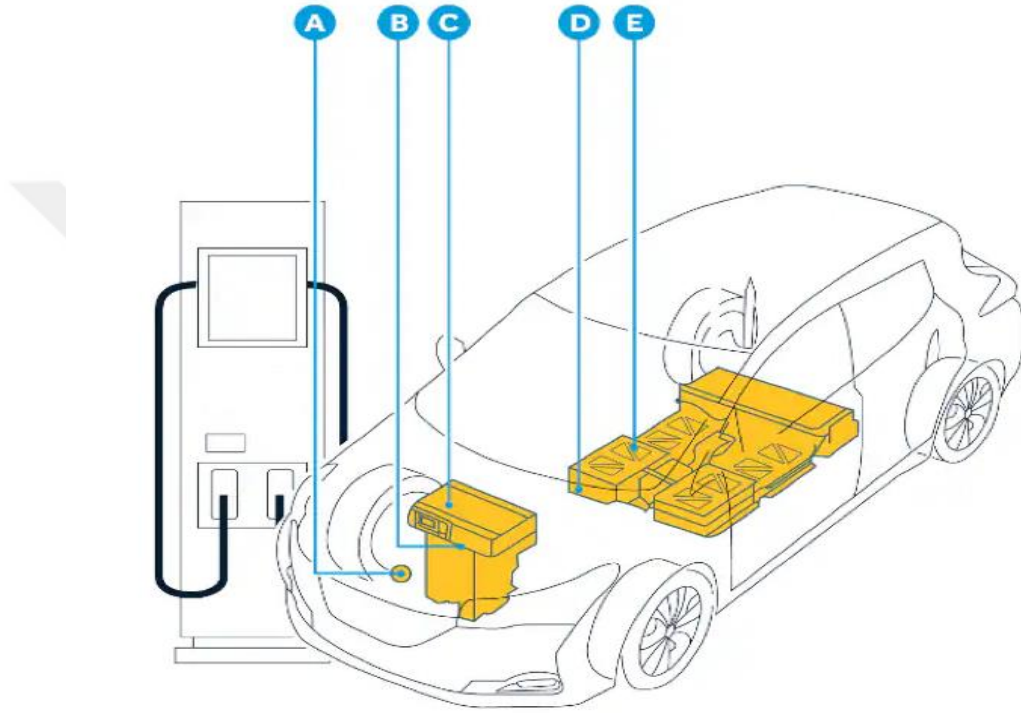
Yerleşik Şarj Cihazı: Şarj portu aracılığıyla sağlanan alternatif akımı çekiş aküsünü şarj etmek için gerekli olan doğru akıma dönüştürür. Ayrıca şarj ekipmanıyla iletişim kurar ve enerji aktarımı yapılacak olan şebekenin durumu hakkında bilgi alır.

Güç Elektroniği Denetleyicisi: Bu ünite, çekiş bataryası tarafından sağlanan elektrik enerjisi akışını yöneterek elektrikli çekiş motorunun hızını ve ürettiği torku kontrol etmektedir. (Şekil 2.3 - D)

Termal Soğutma Sistemi: Bu sistem, elektrik motorunun, araçta bulunan güç elektroniği bileşenlerinin ve diğer yapıların uygun çalışma sıcaklığı aralığında kalmasını sağlar.

Çekiş Bataryası Paketi: Aracın çekiş motorları ve diğer elemanları tarafından kullanılmak üzere elektrik enerjisinin depolandığı bileşendir. (Şekil 2.3 - E)

Şanzıman (Elektrikli): Şanzıman, tekerlekleri döndürmeyi etkin kılmak için elektrikli çekiş motorundan alınan mekanik gücü aktarmaya yarayan bileşendir.



Şekil 2. 3. Elektrikli Araç Bileşenler Şeması

Kaynak: (Nissan Global, 2024)

Özetle EA'lar, bir şarj istasyonundan veya şebekeden elektrik enerjisini alır ve bu enerjiyi bataryalarda depolar. Bataryaların görevi ise, aracın tekerleklerini döndüren motora enerji sağlamaktır. Motor hareketinin sağlanabilmesi için, aracın içinde birçok elektronik bileşen birbiriyle eşgüdümlü bir şekilde çalışmaktadır.

Elektrikli otomobil sektörü, kullanıcıların ve potansiyel alıcıların ihtiyaçlarına yönelik olarak çeşitli türdeki elektrikli araçları sürekli geliştirmekte ve çeşitlendirmektedir. Günümüzde, BEA, HEA, PHEV ve FCEV gibi terimler daha geniş bir kitle tarafından tanınmaya başlanmıştır. Bu bağlamda bir elektrikli aracın işleyişi, türüne göre değişiklik göstermektedir.

3.ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA YAYGIN OLARAK KULLANILAN BATARYA TEKNOLOJİLERİ

3.1. Batarya Teknolojilerinin Tarihçesi

Günümüzde pek çok farklı türde ve yapıda batarya tipi bulunsa da bu bataryaların çalışma prensipleri temelde aynı veya birbirine çok benzerdir. Bataryalar, depolanan enerjinin aktarımı için çeşitli kimyasal reaksiyonlar sonucunda akım üretirler. Buradaki reaksiyona elektrokimyasal reaksiyon denir. İtalyan fizikçi Alessandro Volta (Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta) 1799 yılında metal levhalar ve tuzlu suya batırılmış karton ile ilk basit bataryayı yapmıştır.

Batarya tarihindeki ikinci büyük gelişme 1836 yılında İngiliz kimyager John Frederick Daniell'in, Daniell bataryasını geliştirmesi ile meydana gelmiştir. Daniell bataryasında cam bir kavanozun dibine bakır bir levha yerleştirilmiş, kavanoz bakır sülfat çözeltisi ile yarısına kadar doldurulmuş, bakır sülfat çözeltisinin üst kısmına çinko levha asılmış ve ardından kabın kalanı çinko sülfat ile doldurulmuştur. Bakır sülfat çinko sülfata göre daha yoğun olduğundan iki çözelti karışmamakta, altta bakır sülfat üstte çinko sülfat olacak şekilde durmakta ve çinko levha da çinko sülfat çözeltisi ile kaplı kalmaktadır. Çinko levhaya bağlanan iletken negatif, bakır levhaya bağlanan iletken ise pozitif kutup görevi görmektedir. Daniell bataryası (Daniell bataryası) sabit duran makine ve cihazlar için ideal bir çözüm olmuş, elektrik üretimi ve dağıtımı gelişinceye kadar kapı zili ve telefonlar için güç kaynağı olarak kullanılmıştır.

Batarya tarihindeki üçüncü büyük gelişme, Fransız fizikçi Gaston Plante 1859 yılında ilk aküyü yani kurşun asit bataryayı icat etmesi ile meydana gelmiştir. Kurşun anot ve kurşun oksit katot ile sülfürik asit elektrolit kullanan Plante modern çağın otomobillerinin geliştirilebilmesine de liderlik etmiştir. Bu tarihten sonra çeşitli kimyasallar kullanılarak farklı ebatta ve enerji yoğunluğunda birçok batarya teknolojisi geliştirilmiştir. Günümüz teknolojisinde elektrikli araçların olmazsa olmazı şarj edilebilir bataryalardır. Bu bağlamda elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan batarya teknolojileri şunlardır;

- Kurşun Asit Bataryalar (PB-Asit)
- Nikel Kadmiyum Bataryalar (Ni-CD)
- Nikel Metal Hidrür Bataryalar (NiMH)
- Lityum İyon Bataryalar (Li-ion)
- Lityum Demir Fosfat Bataryalar (LiFePO4)

3.2. Bataryalar İçin Kullanılan Terimler

Nominal Gerilim (V): Bataryalarda nominal gerilim, tamamen dolu bir bataryanın nominal deşarj akımıyla tamamen boşaltıldığında, deşarj anındaki ortalama gerilimini ifade eder.

Enerji Yoğunluğu (Wh/kg): Bataryalardaki enerji yoğunluğu, birim hacimde depolanan enerji miktarını gösterir. Enerji yoğunluğu, özellikle elektrikli araç bataryaları için en önemli parametrelerden biridir.

Çevrim Sayısı: Batarya üreticileri tarafından tasarımda belirlenen kapasitesinin %80 seviyesine inmesi için gereken şarj – deşarj sayısı çevrim sayısı olarak tanımlanır. Basitçe bataryanın kullanım ömrünü ifade eden bir terimdir.

Hafıza Etkisi: Bataryaların kısmen boşaldıktan sonra tekrar şarj edildiklerinde maksimum enerji kapasitelerini kademeli olarak kaybetmeleri durumunu açıklar.

Çalışma Sıcaklıkları (C): Bataryaların hangi sıcaklık aralıklarında verimli olarak çalışabileceğini ifade eden değerlerdir.

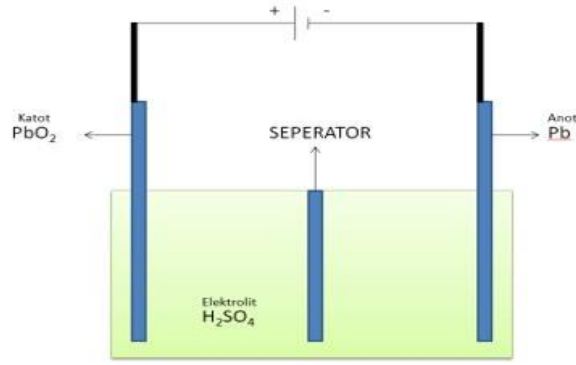
Stres: Bataryalarda "stres" terimi, bataryanın maruz kaldığı zorlanma, baskı veya olumsuz dış etkilere karşı verdiği tepkiyi ifade eder. Bu, bataryanın ömrü, performansı ve güvenliği için önemli bir parametredir.

Gaz Çıkışı: Batarya şarj edilirken, hücre içerisinde gerçekleşen kimyasal tepkimeler sonucunda açığa çıkan gaz miktarını ifade eder. Bu tepkimeler sırasında, bataryanın yapısında bulunan kimyasallara göre değişkenlik gösteren, hidrojen, oksijen gibi çeşitli gazlar oluşabilir. Hücre içerisinde biriken gaz, belirli bir basınca ulaştığında hücre dışına tahliye edilmelidir.

C: Genellikle amper saat (Ah) olarak ölçülen bir bataryanın kapasitesini belirtir ve mevcut batarya içindeki aktif malzeme miktarını gösterir.

3.3. Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun asit bataryalar 1859 yılında icat edilmiştir. Mucidi, Fransız fizikçi Gaston Plante'dir. Bataryalar, sulu ve düşük konsantrasyonlu bir sülfürik asit çözeltisi içinde bulunan iki kurşun plakadan oluşurlar. Kurşun asit bataryaların pozitif plakası kurşun sülfat (PbO_2), negatif plakası ise kurşun (Pb) ile kaplanmaktadır. Elektrolit sıvı olarak ise H_2SO_4 seyreltilmiş sülfürik asit kullanılmaktadır (Balci vd., 2023). Şekil 3.1'de kurşun asit bataryaların kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. 1. Kurşun Asit (PB-Asit) Bataryaların Kimyasal Yapısı

Kaynak: (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023)

Batarya Özellikleri:

- Nominal Batarya Gerilim: 2V
- Batarya Enerji Yoğunlukları: 25-35 Wh/kg
- Batarya Çevrim sayıları: 1200, 1800
- Batarya Çalışma Sıcaklıkları: -15°C +50°C (Muratoğlu ve Alkaya, 2016).

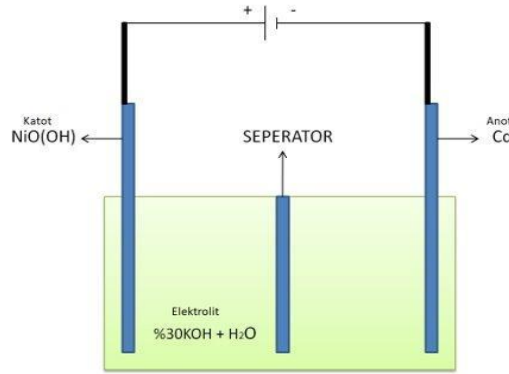
Kurşun Asit Bataryalarda Şarj Yöntemleri:

Kurşun asit bataryalarda şarj işlemi için çoğunlukla sabit akım, sabit gerilim (CCCV) şarj yöntemi kullanılır (BatteryUniversity, 2021b). Bataryaların deşarj akımlarının şarj akımlarından daha düşük seviyede olması gerekmektedir. Şarj akımı için önerilen değer, gelende 0.1C seviyelerindedir. Yaygın olarak kullanılan CCCV şarj yönteminde şarj işlemi üç aşamada tamamlanmaktadır. Bu aşamalar, sabit akım şarjı, tepe gerilimi şarjı, şamandıra şarjıdır (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023). Kurşun asit bataryalar kendi kendine deşarj olma özelliğine sahiptir ve şarj yöntemlerinde sonlandırma aşaması kullanılmaz. Bunun yerine şamandıra aşaması denilen yöntem kullanılarak bataryaya kendi kendine deşarj akımı kadar şarj akımı verilir. Böylece şarj sırasında bataryaların tam doluluk durumu korunmuş olur.

3.4. Nikel Kadmiyum Bataryalar

Nikel – kadmiyum bataryalar 1899 yılında icat edilmiştir. Şarj edilebilir diğer bataryalar ile karşılaştırıldıklarında düşük sıcaklıklarda uzun ömürlü olmaları ve performansları ile ön plana çıkmaktadırlar. Nikel kadmiyum bataryaların diğer önemli özellikleri ise raf ömürlerinin uzun olması ve çevrim, fiyat bakımından ekonomik olmalarıdır. (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023).

Nikel – kadmiyum bataryalar, negatif elektrot olarak metalik kadmiyum (Cd), pozitif elektrot olarak nikel oksit hidroksit ($\text{NiO}(\text{OH})_2$) kullanırlar. Elektrotlar arasındaki elektrolit, sulu potasyum hidroksit (KOH) çözeltisidir (Sezer ve Basmacı, 2022). Elektrolit, iyonların hareketine izin vererek kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlar (Çetin vd., 2021). Şekil 3.2’de nikel kadmiyum bataryaların kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. 2. Nikel Kadmiyum (Ni-CD) Bataryaların Kimyasal Yapısı

Kaynak: (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023)

Batarya Özellikleri:

- Nominal Gerilim: 1.2V
- Enerji Yoğunlukları: 70Wh/kg
- Çevrim sayıları: 500
- Çalışma Sıcaklıkları: -20°C +60°C (Muratoğlu ve Alkaya, 2016).

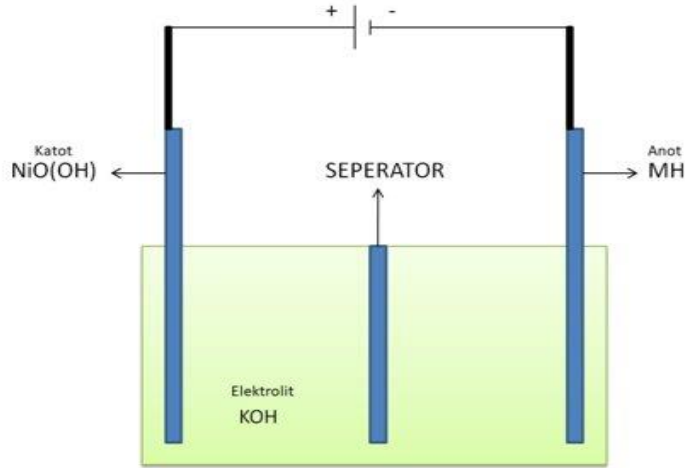
Nikel Kadmiyum Bataryalarda Şarj Yöntemleri:

Nikel kadmiyum bataryalar, kimyasal yapıları gereği diğer bataryaların şarj tekniklerinden farklı teknikler kullanılarak şarj edilirler. Şarj edilebilir diğer bataryalarda akım ve gerilim takibi yapılırken nikel kadmiyum bataryalarda yalnızca akım takibi yapılır ve gerilimin yükselmesine izin verilir. Bu şekilde bir yöntem izlenmesinin sebebi nikel kadmiyum bataryalarda maksimum şarj gerilimi durumunun meydana gelmemesidir. Şarj gerilimi, hücre empedansına bağlı olarak ve akımın zorlanması ile değişiklik gösterebilir. Gerilimin bu şekilde değişken olması, doğrudan batarya gerilim takibi ile tam doluluk durumunun tespit edilmesini zorlaştırmaktadır (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023). Bu nedenle nikel kadmiyum bataryalarda tam doluluk tespiti, gerilim imzası veya sıcaklık noktası takibi yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır (Hoffart, 2005). Sıcaklık noktası takibi yönteminde

bataryanın tam doluluk durumunu ifade eden bir sıcaklık değeri bulunur. Hücre içi sıcaklık bu değere ulaştığında şarj işlemi sonlandırılmaktadır. Bu yöntem, benzer bir şekilde sıcaklık değişim hızına bakılarak da uygulanabilir. Gerilim imzası yönteminde ise, bataryalar tam şarj durumuna geldiğinde, batarya geriliminde meydana gelmesi beklenen gerilim düşümünü takip ederek tam doluluk durumunu tespit etmektedir.

3.5. Nikel Metal Hidrür Bataryalar

İlk tüketici sınıfı Nikel Metal Hidrür (NiMH) bataryalar 1989 yılında piyasaya sürülmüşlerdir. Pozitif elektrotlarında meydana gelen kimyasal reaksiyon nikel – kadmiyum bataryalar ile çok benzerdir (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023). Nikel metal hidrür batarya teknolojisi nikel kadmiyum bataryaların dezavantajlarına alternatif olarak geliştirilmiştir (Akgundogdu vd., 2017). Nikel metal hidrür bataryalar, yapılarında çinko, civa ve kurşun gibi çevreye zararlı maddeler içermediklerinden çevre dostu olarak bilinirler. Katotları nikel hidroksit (Ni(OH)_2), anotları metal hidrür (MH) ile kaplanmıştır. Bu bataryalarda elektrolit olarak ise potasyum hidroksit (KOH) kullanılır (Küçükdeveci, 2018). Şekil 3.3'te nikel metal hidrür bataryaların kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. 3. Nikel Metal Hidrür (NiMH) Bataryaların Kimyasal Yapısı

Kaynak: (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023)

Batarya Özellikleri:

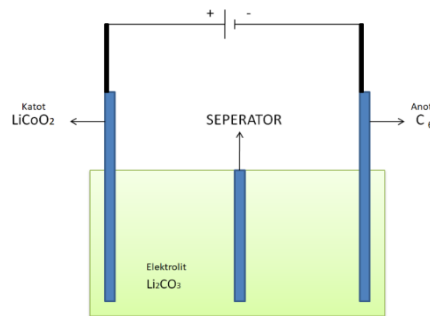
- Nominal Gerilim: 1.2V
- Enerji Yoğunlukları: 70Wh/kg
- Çevrim sayıları: 500
- Çalışma Sıcaklıkları: -20°C, +60°C

Nikel Metal Hidrür Bataryalarda Şarj Yöntemleri:

Nikel metal hidrür bataryalar ile nikel kadmiyum bataryalar arasındaki benzerlik batarya şarj yöntemleri için de kısmen geçerlidir. Nikel kadmiyum bataryalarda kullanılan sıcaklık noktası takibi, sıcaklık değişimi takibi ve gerilim imzası takibi yöntemleri, nikel metal hidrür bataryalarda tek başına kullanıldığında başarılı sonuçlar vermemektedirler. Nikel metal hidrür bataryalarda tam doluluk durumunda belirgin bir gerilim düşümü meydana gelmez, bu nedenle gerilim imzası yönteminin bu bataryalarda tek başına kullanılması uygun değildir. Sıcaklık takibi veya sıcaklık farkı yöntemlerinin de tek başına kullanılması, yine bu batarya tipi için güvenilir şarj yöntemi olarak değerlendirilmemektedir. Nikel kadmiyum bataryalarda kullanılan yöntemlerin, nikel metal hidrür bataryalarda doğrudan kullanılmasının uygun olmadığı görülmektedir. Bu nedenle nikel metal hidrür bataryalar için Kademeli Diferansiyel Şarj Tekniği denilen bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde, belirli aralıklarda bataryada meydana gelmesi beklenen gerilim düşümü, batarya sıcaklığı ve zaman aşımı parametreleri birlikte değerlendirilerek bataryaların aşırı şarja gitmesinin önüne geçilmekte ve tam doluluk durumu tespit edilmektedir (BatteryUniversity, 2021d).

3.6. Lityum İyon Bataryalar

Lityum iyon bataryalar elektrikli araçlarda kullanımı en yaygın olan batarya tipidir. 1991 yılında Sony firması altında John B. Goodnough'un yönetimindeki çalışma grubu tarafından bulunmuştur (Doğan, 2019). Pozitif plakaları lityum kobalt oksit (LiCoO_2), negatif plakaları ise grafit (C_6) den oluşmaktadır. Lityum iyon bataryalarda elektrolit olarak lityum tuzu (Li_2CO_3) yaygın kullanılır (Sayın ve Yüksel, 2011). Şekil 3.4'te lityum iyon bataryaların kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. 4. Lityum İyon (Li-ion) Bataryaların Kimyasal Yapısı

Kaynak: (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023)

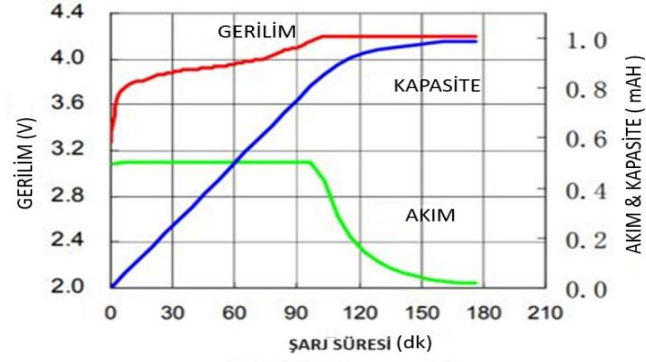
Batarya Özellikleri:

- Nominal Gerilim: 3.6V
- Enerji Yoğunlukları: 300Wh/kg
- Çevrim sayıları: 300-500
- Çalışma Sıcaklıkları: -20°C +60°C (Muratoğlu ve Alkaya, 2016).

Lityum İyon Bataryaların Şarj Yöntemleri:

Lityum iyon bataryalar, sabit akımda şarj, sabit gerilimde şarj, sonlandırma şarjı ve ek şarj olmak üzere dört adımda şarj edilirler (Saft, 2022). Maksimum şarj gerilimleri 4.20V, $\pm 50\text{mV}$ dur (BatteryUniversity, 2021c). Şarj işlemi, kurşun asit bataryalara benzer şekilde sabit akım, sabit gerilim (CCCV) yöntemi ile başlatılır. Batarya kapasitesi istenilen seviyeye gelene kadar sabit akım şarj yöntemi uygulanır. Şarj başlangıcında bataryanın tam boş durumda olması gerekli değildir. Batarya gerilimi 3V altında bir değere sahip ise şarj işlemi sabit akım ile başlamaktadır (BatteryUniversity, 2021c). Batarya gerilimi istenilen seviyeye ulaştığında (4.2V), akım düşürülerek sabit gerilimde şarj aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada, düşük miktarda enerji aktarımı ile şarj seviyesi tam doluluk durumuna yaklaştırılmaktadır. Lityum iyon bataryalarda tam doluluk durumu iki farklı şekilde algılanabilmektedir. İlk yaklaşım, sabit gerilim aşamasında şarj akımını kontrol ederek akımın, 0,002C – 0,007C değerlerine gerilemesi durumunda şarj işleminin sonlandırılmasıdır. İkinci yaklaşımda ise, yine sabit gerilim aşamasında akım kontrol edilmektedir. Şarj akımı eşik değerinin altına düştüğünde bir zamanlayıcı yardımı ile belirli bir süre sonunda şarj işlemi sonlandırılmaktadır (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023).

Lityum iyon bataryalar, diğer birçok batarya çeşidi gibi kendi kendilerine deşarj olmaktadır. Bu bataryalarda şarj işlemi sonlandırıldığından kurşun asit bataryalarda olduğu gibi şamandıra şarjı yapılmamaktadır. Şamandıra şarjı yerine sonlandırma şarjı denilen bir yöntem kullanılır. Bu yöntemde batarya gerilimi sürekli olarak takip edilmektedir. Batarya geriliminin 4V seviyesinin altına düşmesi durumunda son aşama olan ek şarj aşaması devreye girerek batarya şarj işlemini yeniden başlatmaktadır (BatteryUniversity, 2021f). Şekil 3.5, LIR18650 model bataryanın veri sayfasından alınmıştır ve lityum iyon bataryanın şarj eğrisini göstermektedir.

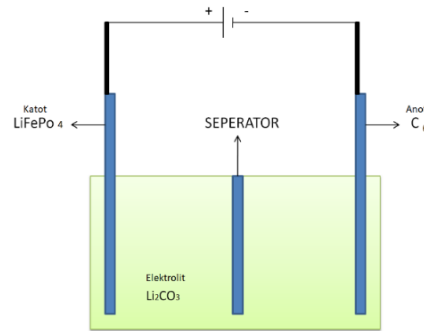


Şekil 3. 5. Lityum İyon Batarya Şarj Grafiği

Kaynak: (EMB, 2010)

3.7. Lityum Demir Fosfat Bataryalar

Lityum demir fosfat batarya 1996 yılında keşfedilmiştir ve aynı yıl ticari kullanımına başlanmıştır. Kimyasal yapıları bakımından lityum iyon bataryalara benzemektedirler (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023). Katotlarında lityum demir fosfat (LiFePO_4), anotlarında ise genellikle grafit (C_6) kullanılır. Lityum demir fosfat bataryalarda elektrolit olarak lityum tuzu (Li_2CO_3) tercih edilir (Moralı ve Salim, 2020). LiFePO_4 , özellikle hibrit elektrikli araçlar gibi geniş formattaki modüller için dikkat çeken, en popüler katot malzemesi olarak görülmektedir (Gültek ve Altın, 2022). Bu bataryaların en dikkat çeken özellikleri çevrim sayılarıdır. Diğer şarj edilebilir bataryalar ile karşılaştırıldıklarında, çevrim sayılarının azımsanmayacak oranda yüksek olduğu görülmektedir. Bu özellikleri, son yıllarda elektrikli araçlarda kullanımlarının artmasına neden olmuştur. Şekil 3.6'da lityum demir fosfat bataryaların kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. 6. Lityum Demir Fosfat (LiFePO_4) Bataryaların Kimyasal Yapısı

Kaynak: (Karsavuran ve Çilliyüz, 2023)

Batarya Özellikleri:

- Nominal Gerilim: 3.2V
- Enerji Yoğunlukları: 90 – 160Wh/kg
- Çevrim sayıları: 1000, 10000
- Çalışma Sıcaklıkları: – 20°C +60°C (Muratoğlu ve Alkaya, 2016).

Lityum Demir Fosfat Bataryaların Şarj Yöntemleri:

LiFePO₄ bataryalar, lityum iyon bataryalara benzer şekilde dört aşamada şarj edilmektedirler. Şarj aşamaları, yine lityum iyon bataryalarda olduğu gibi sabit akımda şarj, sabit gerilimde şarj, sonlandırma şarjı ve ek şarj aşamalarından oluşmaktadır. Bu bataryaların diğer lityum türevi bataryalar ile aralarındaki en belirgin fark nominal gerilimlerinin düşük olmasıdır. LiFePO₄ bataryalarda nominal gerilimi 3.2V seviyesindedir. Bu özelliği sayesinde diğer lityum türevi bataryalar ile karşılaştırıldıklarında tam şarj koşullarına daha fazla toleranslı oldukları görülmektedir (BatteryUniversity, 2021e).

Tüm bu bilgiler ışığında elektrikli araçlarda yaygın kullanılan batarya teknolojileri için karşılaştırma tablosu Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3. 1 Batarya Karşılaştırma Tablosu

BATARYA	NOMİNAL GERİLİM (V)	ENERJİ YOĞUNLUĞU	ÇEVRESEL ÖZELLİK	MALİYET (TL/Wh)	ÇEVİRİM SAYISI
PB-Asit	2	25-35	TOKSİK	9,6	1200- 1800
Ni-CD	1,2	50-80	TOKSİK	48	2000
NiMH	1,2	70	DÜŞÜK TOKSİK	32	500
Li-ion	3,6	300	TEHLİKELİ	6,4	300-1200
LiFePO₄	3,3	90-160	TEHLİKELİ	128	1000- 10000

4.EA BATARYALARI İÇİN ŞARJ YÖNTEMLERİ

Elektrikli araç (EA) bataryaları genellikle bir dizi hücreden oluşur ve bu hücreler belirli bir gerilimle birleştirilir. Elektrikli araçların bataryaları genellikle DA (doğru akım) gerilimine sahiptir. Bu nedenle, EA bataryalarını şarj etmek için kullanılan şarj yöntemleri genellikle DA şarj odaklıdır. Araç bataryalarını şarj etmek için temelde iki farklı yöntem bulunmaktadır. İlk yöntemde, şebekeden alınan AA'yı bataryaların ihtiyaç duyduğu DA'ya dönüştürmek için araçta dahili olarak bulunan yerleşik şarj cihazları kullanılır. İkinci yöntemde ise araç bataryaları bir şarj istasyonu üzerinden doğrudan DA ile şarj edilir. Bu bağlamda iki yöntemi de kapsayan standartlaşmış şarj modları bulunmaktadır. Tablo 4.1'de elektrikli araç şarj modları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4. 1. Elektrikli Araç Şarj Modları

Şarj Modu	İzin Verilen Maksimum Gerilim Seviyesi	İzin Verilen Maksimum Akım Seviyesi	Haberleşme Protokolü
Seviye 1	1 Faz 250V 3 Faz 480V	16A	Zorunlu Değil
Seviye 2	1 Faz 250V 3 Faz 480V	32A	Zorunlu
Seviye 3	1 Faz 230V 3 Faz 400V	1 Faz 16 – 32A 3 Faz 16 – 32A	Zorunlu
Seviye 4	Batarya Şarj Gerilimi	400A _{DC}	Zorunlu

4.1. Evde Şarj (AA Şarj)

Evde şarj, elektrikli aracı evdeki standart bir elektrik prizinden şarj etmek anlamına gelmektedir. Bu yöntem, genellikle AA (alternatif akım) şarjı olarak adlandırılır ve genellikle daha düşük şarj hızlarına sahiptir. AA şarj, genellikle geceleri aracın uzun süre park edildiği durumlar için uygundur. Seviye 1 ve Seviye 2 şarj modlarını kapsamaktadır. Seviye 1 Şarj, 250V_{efektif}, 450V_{efektif}, seviyeleri aralığında ve maksimum 16A akım ile enerji aktarımı yapan şarj modudur. Seviye 2 şarj modu ise 250V_{efektif}, 450V_{efektif}, gerilim seviyesinde, 32A akım ile enerji aktarımı yapabilmektedir. Seviye 2 Şarj modunda Seviye 1 Şarj moduna ek olarak haberleşme adaptörü bulunması zorunludur. Bu değerler uluslararası bir standart olan

elektrikli araçların şarj edilmesi ve şarj modları üzerine düzenlemelerin yapıldığı IEC 62196 standartları kapsamında belirlenmiştir. Şekil 4.1’de evde şarj işleminin gösterimi mevcuttur.



Şekil 4. 1. Evde Şarj Yöntemi

4.2. Hızlı Şarj (DA Şarj)

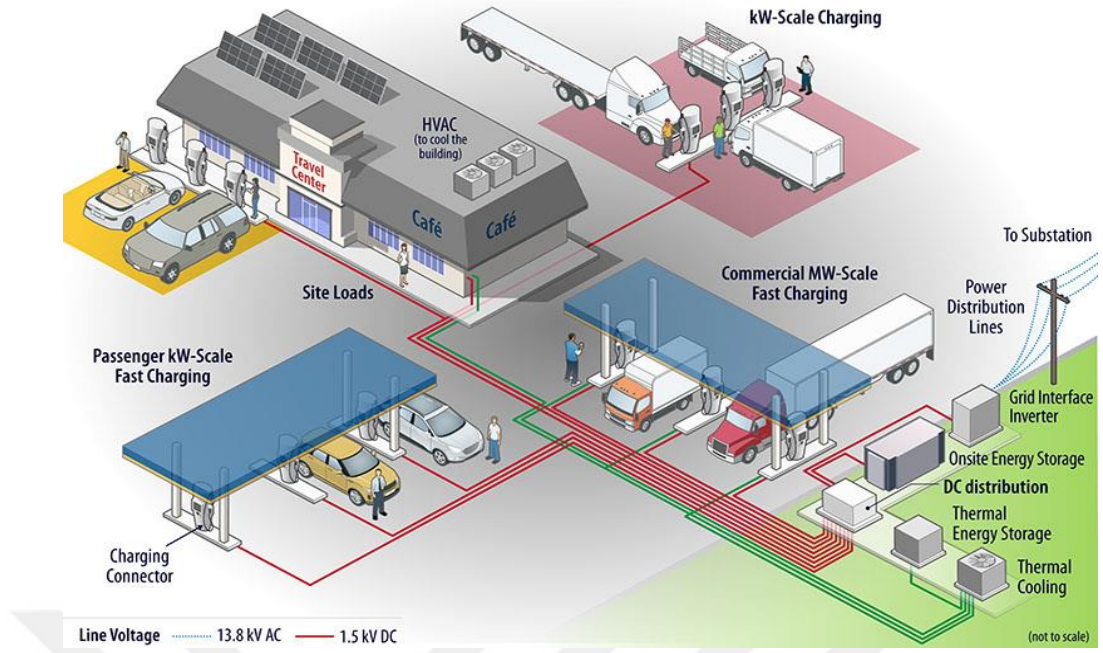
Hızlı şarj istasyonları, genellikle DA kullanarak, elektrikli aracı daha hızlı bir şekilde şarj etmeye olanak tanır. Bu tip şarj istasyonları genellikle kamuya açık yerlerde, alışveriş merkezlerinde veya otoyol kenarlarında bulunmaktadır. Hızlı şarj, elektrikli araç bataryasını daha kısa bir sürede %80'e kadar doldurabilmektedir. Seviye 4 şarj modu olarak da isimlendirilmektedir. IEC 62196 standartlarına göre DA şarj istasyonundan yapılan ve 400A'e kadar olan enerji aktarım işlemlerini kapsamaktadır.

4.3. Süper Şarj (Super Charger)

Bazı elektrikli araç üreticileri, kendi özel şarj ağlarına sahip olabilir. Tesla'nın Super Charger istasyonu bunlardan en yaygın kullanılanıdır. Süper şarj istasyonları, yüksek güçte enerji aktarımına imkan tanır ve özellikle daha uzun mesafelere seyahat eden araç sürücülerini için oldukça kullanışlıdır.

4.4. Endüstriyel Şarj İstasyonları

Büyük iş yerleri, alışveriş merkezleri ve şehir merkezlerinde bulunan endüstriyel şarj istasyonları, genellikle hızlı şarj sağlar. Bu tip şarj istasyonları Seviye 3 veya Seviye 4 şarj modunda kurulabilmektedir. Şekil 4.2’de örnek bir endüstriyel şarj istasyonu tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 4. 2. Endüstriyel Şarj İstasyonu

Kaynak: (Meintz vd., 2020)

4.5. Evde Duvar Tipi Şarj Üniteleri (EVSE –Electric Vehicle Supply Equipment)

Bu yöntem, EA sahiplerinin evlerinde daha hızlı şarj yapabilmeleri için özel olarak kurulan ev şarj ünitelerini içerir. Duvar tipi şarj üniteleri, araç sahiplerine evde şarj (Seviye 1 veya Seviye2) yöntemine kıyasla daha hızlı şarj imkanı sağlamaktadır. Seviye 3 Şarj modu kapsamındadır. IEC 62196 standartlarına göre 450V_{efektif}, 16A 11kVA, veya 450V_{efektif}, 32A 22kVA, seviyelerinde enerji aktarımı yapabilmektedir. Şarj cihazı ile ünite arasındaki bağlantı 7 pinli mennekes tipi konnektörler ile yapılmaktadır (Şen vd., 2011).

5.ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU HABERLEŞME PROTOKOLLERİ

Elektrikli araç şarj istasyonları, şarj işleminin etkinliğini ve güvenliğini sağlamak için çeşitli haberleşme protokolleri kullanılmaktadır. Bu protokoller, şarj istasyonu ve elektrikli aracın şarj sürecinin kontrolü, enerji yönetimi ve kullanıcı arayüzü işlemleri için etkileşimde bulunmasını sağlar.

5.1. CHAdeMO

CHAdeMO, DA hızlı şarj için Japonya'da geliştirilen bir protokoldür. Bu protokol, araç ve şarj istasyonu arasında iki yönlü iletişim sağlayarak, şarj sürecini optimize eder ve batarya sağlığını korur. CHAdeMO, özellikle Nissan, Mitsubishi ve Toyota gibi markalar tarafından desteklenmektedir.

5.2. Combined Charging System (CCS)

CCS, AA ve DA şarjı destekleyen, Avrupa ve Amerika'da yaygın olarak kullanılan bir protokoldür. CCS, bir AA konektörüne ek olarak iki ek pin ile DA hızlı şarj imkanı sunar. Bu protokol, BMW, Volkswagen, General Motors gibi birçok büyük otomobil üreticisi tarafından desteklenmektedir.

5.3. SAE J1772 (TİP 1 ve TİP 2)

SAE J1772, Kuzey Amerika'da (Tip 1) ve Avrupa'da (Tip 2) yaygın olarak kullanılan bir AA şarj standardıdır. Tip 2 konektör, CCS protokolünün bir parçası olarak da kullanılır. Bu protokol, AA ile şarj için üniversal bir standart sunar.

5.4. Tesla Super Charger

Tesla Super Charger, sadece Tesla araçları için tasarlanmış bir DA hızlı şarj protokolüdür. Bu sistem, Tesla araçlarının bataryalarını çok hızlı bir şekilde şarj edebilir. Tesla'nın kendi şarj ağı bu protokolü kullanmaktadır.

5.5. ISO/IEC 15118

ISO/IEC 15118, araç ile şarj istasyonu arasında daha gelişmiş bir iletişim kurmayı hedefleyen bir uluslararası standarttır. Bu protokol, "Plug & Charge" (tak-şarj et) özelliği

sayesinde kullanıcının kimlik doğrulama ve ödeme işlemlerini otomatize eder. Ayrıca, akıllı şarj ve şebekeye entegrasyon gibi gelecek vaat eden özellikleri destekler.

Haberleşme protokolleri, elektrikli araç şarj istasyonlarının etkin ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Her protokol, kendi içerisinde bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Genellikle belirli araç, marka ve modelleriyle uyumlu olacak şekilde tasarlanmaktadır.



6.BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ (BYS)

Batarya yönetim sistemi (BYS) elektrikli araçların (EA) batarya paketlerinin yönetimi konusunda oldukça kritik bir rol oynar. Bir BYS, bataryanın güvenli ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamak için batarya paketinin durumunu izler ve kontrol eder.

6.1.BYS'nin Ana İşlevleri

Hücre İzleme ve Dengeleme: BYS, her bir batarya hücresinin ayrı ayrı gerilimini ve sıcaklığını izler. Bu, tüm hücrelerin eşit seviyede şarj ve deşarj olmasını sağlar, böylece batarya ömrü uzar ve performans optimize edilmiş olur.

Şarj ve Deşarj Kontrolü: Bataryanın aşırı şarj olmasını veya deşarj olmasını önler. BYS, batarya hücrelerinin güvenli çalışma aralığında kalmasını sağlamaktadır.

Sıcaklık Yönetimi: Bataryaların aşırı ısınmasını önlemek için sıcaklık izleme ve kontrol işlevleri gerçekleştirilir. Bu bağlamda, gerekli durumda soğutma sistemleri devreye sokulabilir.

Durum İzleme: Bataryanın mevcut durumunu (State of Charge - SOC ve State of Health - SOH) izler. Şarj durumları ve çevrim sayıları hakkında bilgi verir.

Güvenlik Koruma: Kısa devre, aşırı akım ve aşırı gerilim gibi durumlarda batarya grubunu korumakla görevlidir.

6.2.BYS'nin Önemi

Bir veri yolu veya dış iletişim aktarım sistemine bağlı bir batarya yönetim sistemine (BYS) sahip olan batarya paketleri, 'akıllı batarya paketi' olarak adlandırılır. Bu paketler, yakıt göstergesi entegrasyonu, gelişmiş veri yolu iletişim protokolleri, genel amaçlı giriş/çıkış (GPIO) opsiyonları, hücre dengesi, kablosuz şarj, yerleşik şarj cihazları ve koruma devreleri gibi çeşitli özellikler içerebilir. Bu özellikler, bataryanın enerji durumu hakkında detaylı bilgi sağlamak ve bu bilgiyi enerjiyi verimli bir şekilde yönetmek için kullanılmaktadır.

Akıllı batarya paketleri, kendi şarj durumlarını yönetebilir, batarya durumunu içeren raporları üretebilir, düşük şarj durumlarını algılayıp cihaza bildirebilir ve bataryanın ne kadar süre dayanacağını veya kalan çalışma süresini tahmin edebilir. Ayrıca, hücrenin akım, gerilim ve sıcaklık bilgilerini tutarak tahminlerin doğruluğunu sürekli olarak kendiliğinden düzelten

bir sistem içerir. Bu bağlamda batarya ömrünün uzatılması, performans optimizasyonu, enerji yönetimi ve kullanıcı bilgilendirilmesi gibi konular, BYS'nin ikincil görevleri olarak nitelendirilebilir.

Batarya Ömrünün Uzatılması: Düzensiz şarj ve deşarj döngüleri, batarya ömrünü kısaltabilir. BYS, bu döngüleri optimize ederek batarya ömrünü uzatır.

Batarya Performans Optimizasyonu: BYS, bataryanın en iyi performansını sağlamak için enerji kullanımını düzenler.

Enerji Yönetimi: BYS, elektrikli araçların enerji verimliliğini artırarak daha uzun menzil ve daha iyi hızlanma sağlar.

Kullanıcı Bilgilendirmesi: Sürücülere batarya durumu hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlar, böylece sürüş ve şarj planlaması yapabilirler.

BYS, elektrikli araçların bataryalarının temel bir bileşenidir ve performans, güvenlik, ve uzun ömür açısından hayati öneme sahiptir. Gelişen teknolojiyle birlikte BYS'ler daha da gelişmiş hale gelmekte ve elektrikli araçların enerji verimliliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır.

7.YERLEŞİK ŞARJ CİHAZI

Yerleşik şarj cihazı elektrikli araçların bataryalarını şarj etmek için kullanılan dahili bir cihazdır. Elektrikli araçlarda (EA) en önemli bileşenlerden biridir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak, Tesla Model S, Nissan Leaf, Chevrolet Bolt, BMW i3 ve Audi e-tron gibi elektrikli araçlarda dahili olarak yerleşik şarj cihazı bulunmaktadır.

7.1. Yerleşik Şarj Cihazının Görevi

Yerleşik Şarj Cihazının temel işlevi, elektrik şebekesinden alınan alternatif akımı aracın bataryasında depolanabilen doğru akıma dönüştürmektir. Evlerde ve halka açık şarj istasyonlarında bulunan standart AA şarj noktalarından alınan elektrik enerjisini kullanırlar.

7.2. Yerleşik Şarj Cihazının Özellikleri

Güç Kapasitesi: Yerleşik şarj cihazları farklı güç seviyelerinde çalışabilirler. Güç kapasitesi genellikle kilowatt (kW) cinsinden ifade edilir ve şarj süresini doğrudan etkiler. Daha yüksek güç kapasitesine sahip bir yerleşik şarj cihazı, daha hızlı şarj imkanı sunar.

Enerji Verimliliği: Yerleşik şarj cihazları, AA gerilimi mümkün olan en yüksek verimlilikle DA gerilime dönüştürmeye çalışır. Böylece şarj sırasında enerji kayıplarını azaltır ve enerji kullanımını optimize eder.

İletişim ve Kontrol: Yerleşik şarj cihazları araçla ve bazen dış şarj altyapısıyla iletişim kurabilirler. Bu özellik, şarj sürecinin kontrol edilmesi ve aracın batarya yönetim sistemi (BYS) ile uyumlu çalışması için önemlidir.

Güvenlik Özellikleri: Yerleşik şarj cihazları, aşırı şarj, aşırı akım, aşırı gerilim ve aşırı ısınma gibi risklere karşı koruma sağlar. Bu özellikleri, batarya ömrünün korunmasına ve aracın güvenliğinin artırılmasına yardımcı olur.

7.3. Yerleşik Şarj Cihazlarının Önemi

Esneklik: Yerleşik şarj cihazları, araç sahiplerine evde ve standart AA şarj noktalarında araçlarını şarj edebilme esnekliği sağlar.

Maliyet Etkinliği: Yerleşik şarj cihazı kullanılarak yapılan AA şarj işlemi, genellikle yüksek güçlü DA şarj istasyonlarında yapılan şarj işlemine kıyasla daha uygun maliyetlidir,

Türkiye’de elektrikli araç kiralama ve şarj hizmeti veren Hedef Filo firmasının 02/2024

verilerine göre, 7.4kW altında yapılacak güç aktarımı için DA'da şarj dakika fiyatı 3.9 TL iken Seviye 2 AA'da şarj dakika ücreti 55 kuruş olarak fiyatlandırılmaktadır. Ülkemizde ve dünya genelinde, yüksek güçlü DA şarj ile AA şarj arasında ortalama 7-10 kat fiyat farkı bulunmaktadır.

Kullanıcı Kolaylığı: Yerleşik şarj cihazları, kullanıcıların araçlarını herhangi bir AA prizden şarj edebilmesine olanak tanır, bu durum EA'ları daha kullanışlı hale getirmektedir.

Yerleşik şarj cihazı, elektrikli araçların şarj altyapısının temel bir bileşenidir ve kullanıcılara esneklik, maliyet etkinliği ve şarj kolaylığı sağlar. Yerleşik şarj cihazının güç kapasitesi, verimliliği ve güvenlik özellikleri, elektrikli aracın genel performansı ve kullanıcı deneyimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

7.4. Yerleşik Şarj Cihazlarında Kullanılan Güç Elektroniği Topolojileri

Elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik şarj cihazları için en önemli bileşen gerilim dönüştürücü yapılarıdır. Bir elektrikli araç bataryası şebeke üzerinden şarj edilmek istendiğinde, öncelikle AA şebeke geriliminin DA batarya gerilimine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem sonrasında oluşturulan DA gerilim batarya şarj gerilimi seviyesine dönüştürülerek bataryalara güç aktarımı yapılmaktadır.

Yerleşik şarj cihazlarının bir diğer önemli bileşeni güç faktörü düzenleyicilerdir. Şarj cihazları şebekeler için lineer olmayan yük durumunda olduğundan, şebeke üzerinde olumsuz etki yaratmamaları için güç faktörü düzenleyici yapılarının varlığı kritik öneme sahiptir. Yerleşik şarj cihazları için üzerinde çalışma yapılmış ve kullanımı yaygınlaşmaya başlamış güç elektroniği yaklaşımları şunlardır;

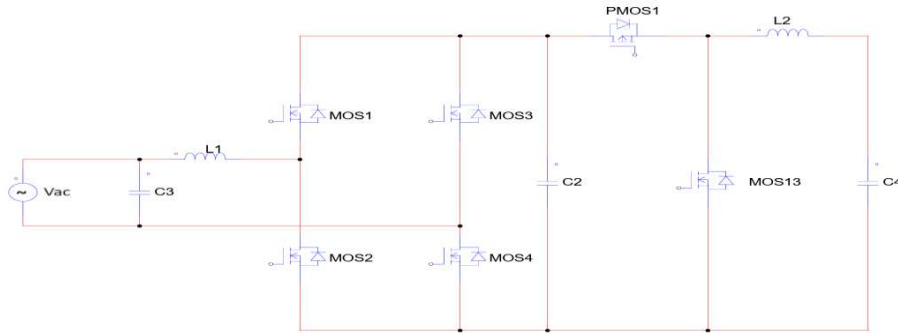
- Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu İki Yönlü Şarj Yöntemi
- Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu Çift Aktif Köprülü Şarj Yöntemi
- Dönüşümlü Yükseltici Tipi GFD Doğrultucu Seri Rezonans Dönüştürücülü Şarj Yöntemi
- Dönüşümlü Yükseltici Tipi GFD Doğrultucu İzole Tam Köprü DA-DA Dönüştürücülü Şarj Yöntemi
- Tam Köprü DGM Dönüştürücü ve LLC Dönüştürücülü Şarj Yöntemi (İşen ve Tarlak, 2018).

7.4.1. Köprüsüz Kutuplu Güç Faktörü Düzenleyici (GFD) Doğrultuculu İki Yönlü Akü Şarj Yöntemi

İki yönlü şarj devreleri, bir elektrikli aracın yalnızca şarj edilmesini değil, aynı zamanda bataryalarında depolanan enerjiyi geri şebekeye iletebilmesini sağlayan bir teknolojiyi ifade etmektedir. Bu sistemler, elektrikli araç bataryasının hem enerji alıcı (şarj eden) hem de enerji verici (deşarj eden) bir cihaz olarak kullanılmasını mümkün kılar. İki yönlü şarj devrelerinin güç akış durumuna göre farklı modları bulunmaktadır;

- G2V: Şebekeden Araca
- V2G: Araçtan Şebekeye
- V2H: Araçtan Eve

Şekil 7.1’de Köprüsüz kutuplu GFD doğrultuculu iki yönlü şarj yöntemi için devre şeması gösterilmiştir.



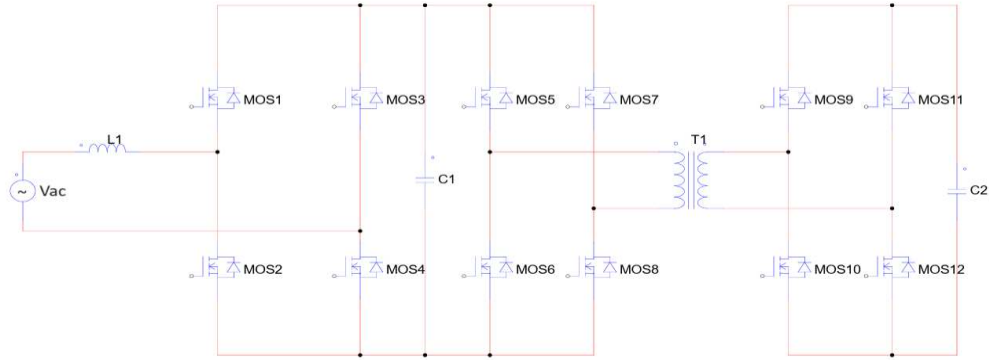
Şekil 7. 1. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu İki Yönlü Şarj Devresi

Bu topolojinin girişinde bulunan köprüsüz kutuplu GFD yapısı ile şebeke üzerindeki olumsuz etkilerini minimuma indirilmesi amaçlanır. Az sayıda elektronik bileşenden oluşması düşük maliyet ve yüksek verim ile çalışmaları bu topolojinin öne çıkan özelliklerindendir.

7.4.2. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu Çift Aktif Köprülü Şarj Yöntemi

Çift aktif köprülü dönüştürücü, yüksek verimli, çift yönlü DA-DA dönüştürücüdür ve yüksek frekansta bir transformatör ile izole edilmiştir. Bu yöntemde, faz kaydırma modülasyonu ile çıkış gerilimi kontrol edilir. Birçok DA-DA dönüştürücü ile karşılaştırıldığında, yüksek güç yoğunluğu, basit uygulama, düşük sayıda pasif bileşen (endüktans, kapasite) ve sıfır voltaj anahtarlama (ZVS) özellik gibi birçok çekici avantaja sahiptir. Bu avantajları özellikle yüksek güç uygulamaları için yaygın olarak kullanılmasını

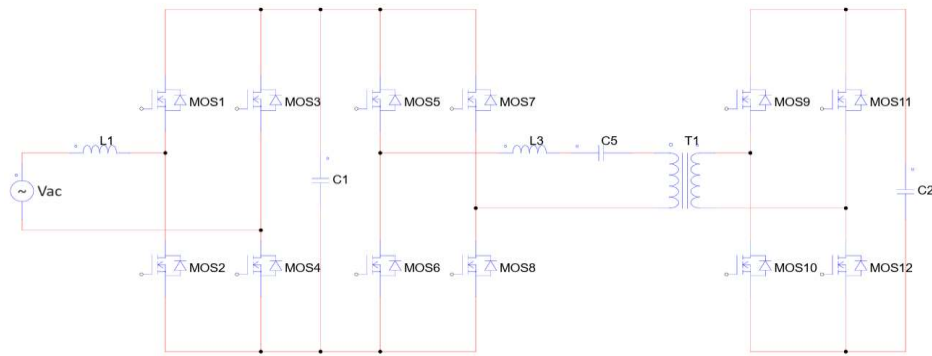
önünü açmıştır. Şekil 7.2’de köprüsüz kutuplu GFD doğrultuculu çift aktif köprülü şarj yöntemi için devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 7. 2. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi

7.4.3. Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD Doğrultuculu Seri Rezonans Dönüştürücülü Şarj Yöntemi

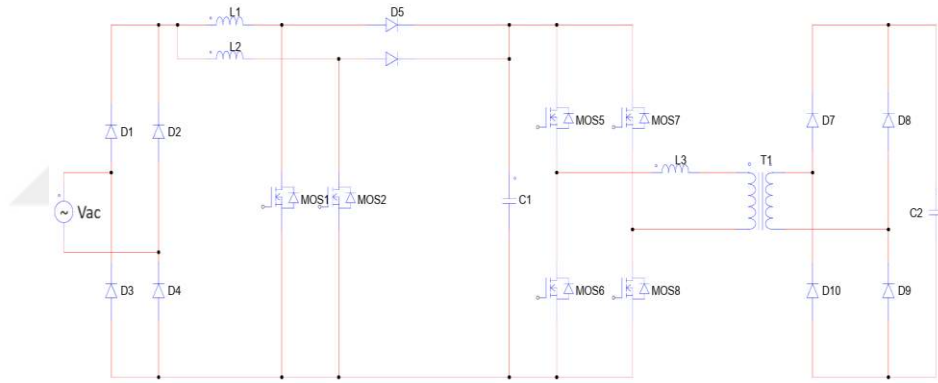
Bu yaklaşım yüksek giriş gerilimi ve yüksek güç gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Topolojinin yapısında iki kontrollü köprü tip doğrultucu arasında yüksek frekanslı bir transformatör bulunmaktadır. Faz kaydırma modülasyonu ile çıkış gerilimi kontrol edilir. Bu yaklaşımın en belirgin özellikleri arasında, dönüştürücü işletim aralığına bağlı olarak değişen yumuşak anahtarlama yeteneği ve parazit endüktanslarının emilimi gibi özellikler bulunmaktadır. Bu ve benzeri sebeplerden yerleşik şarj cihazı uygulamalarında tercih edilen yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Pavlovic vd., 2012). Şekil 7.3’te dönüşümlü yükseltici tip GFD doğrultuculu seri rezonans dönüştürücülü şarj yöntemi için devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 7. 3. Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD Doğrultuculu Seri Rezonans Dönüştürücülü Şarj Devresi

7.4.4. Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD Doğrultuculu İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücülü Şarj Yöntemi

İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücülü Yerleşik şarj sistemi yaklaşımı, elektrikli araçlarda ve şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlarda yaygın kullanılan bir güç elektroniği topolojisidir. Bu topolojinin girişinde dönüşümlü yükseltici tipi güç faktörü düzenleyici devre kullanılarak reaktif güç kayıplarının ve şebeke etkilerinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Aynı şekilde izole transformatör girişinde sıfır voltaj anahtarlama (ZVS) yapısı kullanılması topolojinin verimini artırmaktadır. Verimli çalışmaları ve az sayıda pasif bileşen içermeleri, yerleşik şarj cihazlarında ve farklı alanlarda kullanılan yüksek güç uygulamalarında tercih sebebi olmalarını sağlamıştır. Şekil 7.4'te dönüşümlü yükseltici tip GFD doğrultuculu izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücülü şarj yöntemi için devre şeması gösterilmiştir.

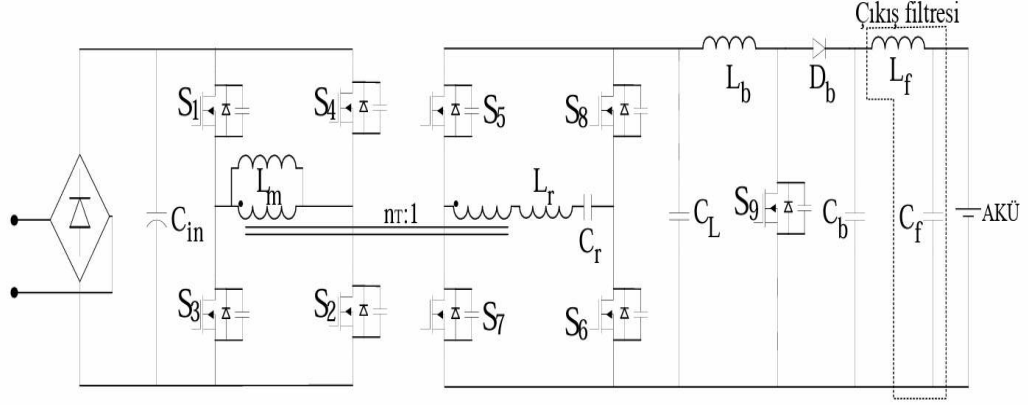


Şekil 7. 4. Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD Doğrultuculu İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücülü Şarj Devresi

7.4.5. Tam Köprü DGM Dönüştürücü ve LLC Dönüştürücülü Şarj Yöntemi

LLC rezonans dönüştürücüler LC rezonans devreleri ile belirli bir frekansta salım yapan bobin ve kondansatörlerden oluşurlar. Yüksek anahtarlama frekansında düşük anahtarlama kayıpları ile çalışabilirler. Yüksek frekansta çalışabilme özellikleri çıkış gerilim dalgalanmalarını küçülteceğinden DA-DA dönüştürücü uygulamalarında büyük boyutlarda kondansatör kullanımını ortadan kaldırırlar. Bu ve benzeri özellikleri yerleşik şarj cihazları gibi yüksek güç ve yüksek verim gerektiren uygulamalarda kullanımlarının önünü açmaktadır (Tran, 2016).

Şekil 7.5'te tam köprü DGM dönüştürücü ve LLC dönüştürücülü şarj yöntemi için devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 7. 5. Tam Köprü DGM Dönüştürücü ve LLC Dönüştürücülü Şarj Devresi

Kaynak: (İşen ve Tarlak, 2018)

8. TOPOLOJİLERİN GENEL YAPILARI

Yapılan tez çalışması kapsamında, yerleşik şarj cihazları için yaygın kullanılan yaklaşımlar arasından, köprüsüz kutuplu GFD doğrultuculu iki yönlü şarj yöntemi, köprüsüz kutuplu GFD doğrultuculu çift aktif köprülü şarj yöntemi ve yükseltici GFD doğrultucu izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücülü şarj yöntemi simülasyon ortamında analiz edilmek üzere seçilmiştir. Analiz edilecek yaklaşımların seçimi, topolojilerin GFD blokları ve DA-DA dönüştürücü blokları temel alınarak yapılmıştır. Analiz sonucunda bu yaklaşımların şarj sırasındaki kayıpları temel alınarak verimlilikleri değerlendirilmiştir.

Bu bölümde yöntemlerin analizine geçilmeden önce, analiz sırasında karşılaşılabilecek kavramların daha iyi anlaşılması açısından, dönüştürücü topolojileri ve sistem kayıpları hakkında bilgilendirme yapılmaktadır.

8.1. AA-DA Dönüştürücüler

Elektrikli araçların (EA) Seviye 1 Şarj ile şebekeden şarj edilmesi sırasında, öncelikle bir fazlı AA gerilimin DA gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. AA-DA dönüşüm işlemi, yarım dalga doğrultucu, tam dalga doğrultucu, flyback dönüştürücü gibi birçok farklı yöntem ile yapılabilmektedir. İncelenen topolojilerde AA-DA dönüşüm işlemi için tam dalga doğrultucu yöntemi ve bu yöntemin türevleri kullanılmaktadır.

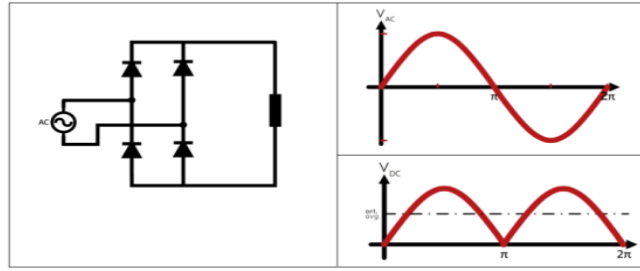
8.1.1. Tam Dalga Doğrultucular

Tam dalga doğrultma, bir AA sinyali DA sinyaline dönüştürmek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, AA sinyalinin her iki alternansını da kullanarak etkili bir doğrultma işlemi sağlar. Tam dalga doğrultma genellikle köprü doğrultucu devreleri aracılığıyla uygulanır. Tam dalga AA gerilim doğrultma işlemi, kontrolsüz, yarı kontrollü veya kontrollü olarak yapılabilmektedir. Yapılan çalışma için, incelenen topolojiler doğrultusunda, kontrolsüz ve kontrollü doğrultucu devreler kullanılmıştır.

8.1.2. Kontrolsüz Tam Dalga Doğrultucular

Kontrolsüz tam dalga doğrultucu en yaygın kullanılan doğrultucu tipidir. Dört diyot içerir ve bir köprü yapısı oluşturarak AA giriş sinyalini doğrultur. Tam dalga doğrultucular AA sinyalin pozitif ve negatif yarıları kullanılırlar. Birinci ve ikinci yarı dalgada sırasıyla iki farklı diyot devrede iletken hale gelir, böylece akım bir yönde akar ve AA sinyalinin her iki

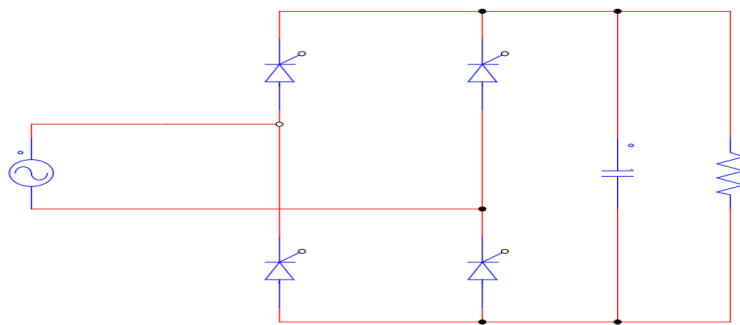
alternansının da kullanılması sağlanır. Şekil 8.1’de kontrolsüz tam dalga doğrultucu gerilim-zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 8. 1. Kontrolsüz Tam Dalga Doğrultucu

8.1.3. Kontrollü Tam Dalga Doğrultucular

Kontrollü doğrultucular temelde tam dalga doğrultucular ile aynı prensipte çalışmaktadır. Kontrollü doğrultucuların kontrolsüz doğrultuculardan farkı, köprünün diyot yerine kontrollü yarı iletkenler olan tristör, MOSFET veya IGBT gibi elemanlar ile oluşturulmasıdır. Şekil 8.2’de örnek bir kontrollü tam dalga doğrultucu devresi gösterilmektedir. Doğrultma işlemi, kontrollü yarı iletkenlerin kontrol girişlerine sürekli bir işaret uygulanarak gerçekleştirilir. İletim sırasında kapılara işaret verilirken, işaret verilmediği takdirde anahtarlar kesim durumuna geçer. Bu tür bir işleyiş tristörler kullanılarak gerçekleştirilebilir, ancak yerleşik şarj cihazlarında genellikle kontrol devrelerinde MOSFET veya IGBT gibi anahtarlama elemanları tercih edilir. Kontrollü tam dalga tip doğrultucularda çıkış gerilimi, darbe genişliği modülasyonu (DGM-PWM) aracılığıyla yönetilir. Bu yöntemle, anahtarlama elemanlarına gönderilecek işaretin genişliği değiştirilerek anahtarların açık kalma süreleri ayarlanabilir. Darbe genişliği modülasyonu, birçok güç elektroniği uygulamasında çıkış akımı veya geriliminin kontrolü için kullanılır. Alınan geri bildirim ile çeşitli algoritmalar tarafından değerlendirilir ve istenilen akım-gerilim çıkışı için uygun darbe genişliğinde sinyal üretilir.



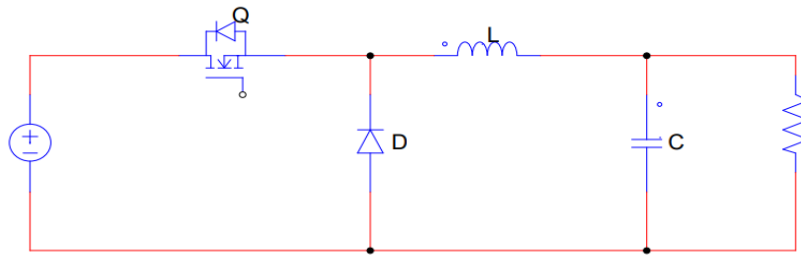
Şekil 8. 2. Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu Devre Şeması

8.2. DA-DA Dönüştürücüler

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar şarj işlemi için DA gerilime ihtiyaç duymaktadır. Şarj işlemi sırasında, şebekeden elde edilen AA gerilim, doğrultucular kullanılarak DA gerilime dönüştürülür ve bataryalara aktarılır. Şebekeden alınan AA gerilim doğrudan batarya gerilim seviyesine dönüştürülmez. Bunun nedeni bataryanın şarj sırasında gerilimleri değişkendir ve çeşitli kontrol algoritmaları ile kontrol edilmeleri gerekir. İkinci olarak AA geriliminin doğrudan batarya gerilimine dönüştürülmesi, şarj sırasında reaktif güç kaynaklı kayıpların artmasına sebep olabilir. Bu ve benzeri sebeplerden AA gerilim DA bara gerilimi denilen ara bir gerilim seviyesine doğrultulur. DA bara gerilimi aracın tasarımına ve üreticiye göre değişiklik gösterebilmektedir (300V – 800V). Elektrikli araç bataryaları DA barası üzerinden şarj olurlar. Aynı şekilde çalışma sırasında bataryalar DA barası üzerine deşarj olur ve sistemde bulunan tüm yapılar enerjisini DA barası üzerinden alırlar. Bu kapsamda DA bara geriliminin batarya şarj gerilimine dönüşümü ve batarya geriliminin tekrardan DA bara gerilimine dönüşümü için sistemde DA-DA dönüştürücüler kullanılmaktadır. Yerleşik şarj cihazlarında DA bara gerilimleri batarya gerilimlerinden daha yüksek seviyededir. Bu nedenle şarj sırasında DA barasından batarya üzerine enerji aktarımı için gerilim seviyesinin düşürülmesi gerekir. Ters durumda, yani sistemin bataryalar üzerinden beslendiği durumda ise batarya gerilimi DA bara geriliminden daha düşük seviyede kalmaktadır. Bu durumda ise batarya geriliminin DA bara gerilimine yükseltilmesi gerekmektedir. Bu işlemler için bazı topolojilerde transformatör veya köprü yapıları kullanılırken bazı topolojilerde düşürücü tip DA-DA dönüştürücü veya yükseltici tip DA-DA dönüştürücü gibi anahtarlama güç elektroniği dönüştürücü yöntemleri kullanılmaktadır.

8.2.1. Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü

Düşürücü tip DA-DA dönüştürücü girişine uygulanan gerilimi çıkışta daha düşük seviyede bir gerilime dönüştüren güç elektroniği topolojisidir.

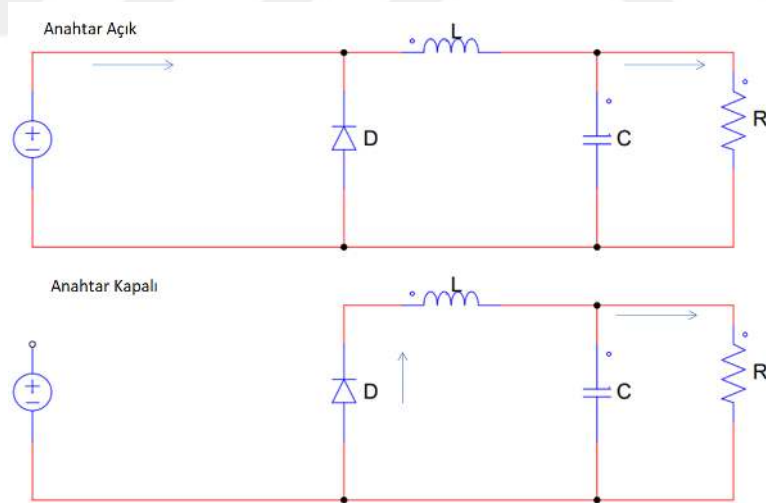


Şekil 8. 3. Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü Devre Şeması

Şekil 8.3'te düşürücü tip DA-DA dönüştürücü yapısının basitleştirilmiş bir şeması görülmektedir. C kapasitesi çıkış gerilimini filtrelemek için kullanılmaktadır. Devrede çıkış yükü R direnci ile gösterilmektedir. D diyotu genellikle serbest geçiş diyotu olarak isimlendirilir.

Dönüştürücünün güç katı için, bobinin akımı sürekli ya da süreksiz akım modunda çalışmaktadır. Dönüştürücü, kararlı hal durumu ve sürekli akım modunda çalışırken bobin içerisinde kesintisiz olarak akım geçişi olur. Süreksiz çalışma modunda ise bir periyotta bobin akımı sıfırdan başlar, sonrasında tepe değerine yükselir ve anahtarlama periyodu sonlanmadan yeniden sıfıra düşer.

Düşürücünün güç katı için iki farklı durum göz önüne alınır. İlk olarak yarı iletken güç anahtarı, Q anahtarı iletimde ve D diyotu kesimdedir. Süreksiz akım çalışma modunda ise Q anahtarı kesimde ve D diyotu iletimdedir. Şekil 8.4'te basitleştirilmiş bir lineer devrede Q anahtarı yerine eşdeğeri eklenerek çalışma modları gösterilmiştir. Yarı iletken anahtarın iletimde olduğu durum $D \times T_s = T_{Açık}$ süresi ile ifade edilir. Bu denklemde D oranı kontrol devresi tarafından belirlenen T_s periyodundaki iletim süresini ifade etmektedir. Kesim süresi ise $T_{Kapalı}$ sembolü ile ifade edilir (Ürgün vd.).



Şekil 8. 4. Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü Yarı İletken Anahtarın İletim ve Kesim Durumu

Düşürücü tip DA-DA dönüştürücü için tasarım denklemleri sırası ile aşağıdaki gibidir;

Görev oranı için gereken denklem;

$$D = T_{Açık} / (T_{Açık} + T_{Kapalı}) = T_{Açık} / T \quad (8.1)$$

Dalgalanma akımı oranı için gereken denklem;

$$Dalgalanma Akımı = \left(\frac{Dalgalanma Oran}{100} \right) * I_{çıkış} \quad (8.2)$$

Bobin değeri için gereken denklem;

$$L = \frac{V_{giriş}(1-D)D}{I_{dalgalanma} * f} \quad (8.3)$$

Dalgalanma gerilim oranı için gereken denklem;

$$Dalgalanma Gerilimi = \frac{Dalgalanma Oranı}{100} * V_{çıkış} \quad (8.4)$$

Çıkış kondansatörü için gereken denklem;

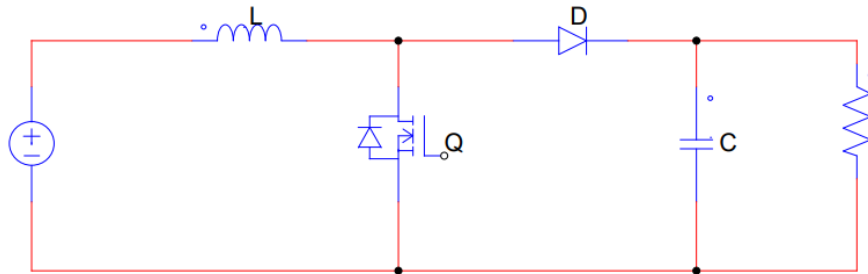
$$C = \frac{V_{giriş}(1-D)D}{8Lf2V_{dalgalanma}} \quad (8.5)$$

Çıkış Gerilimi;

$$V_{çıkış} = V_{giriş} * D \quad (8.6)$$

8.2.2. Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü

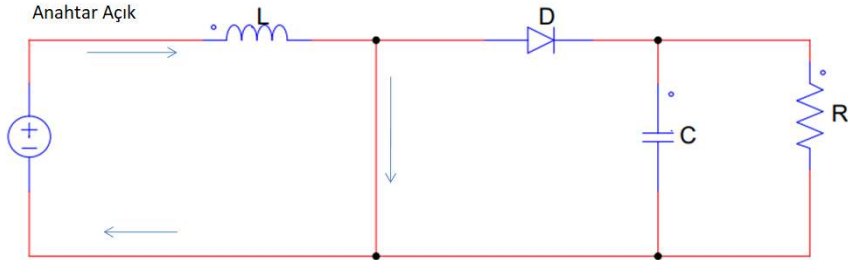
Yükseltici tip DA-DA dönüştürücü, girişine uygulanan gerilimi çıkışta daha yüksek seviyede bir gerilime dönüştüren güç elektroniği topolojisidir.



Şekil 8. 5. Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Devre Şeması

Şekil 8.5'te gösterilen devrenin kontrol mekanizması, yarı iletken güç anahtarının iletme ve kesime götürülmesine göre gerçekleştirilmektedir. Q anahtarının iletme götürülmesi durumunda bobin içerisinden geçen akım artar ve bobin üzerinde enerji depolanmaya başlar. Q anahtarının kesimi durumunda, bobin içerisinden geçecek olan şarj akımı D diyotu üzerinden C kapasitesine ve yüke doğru akmaya başlar. Bobin, enerjisini yük üzerine deşarj eder ve bobin üzerindeki gerilimin polaritesi gerilim kaynağının polaritesi ile aynı yönde olur. Bu devrede D diyotu üzerinden yüke bağlanır. Bu sayede çıkış gerilim seviyesi yükseltilmiş olur. Şekil 8.6 ve Şekil 8.7'de lineer devrede Q anahtarı yerine eşdeğeri

eklenerek çalışma modları gösterilmiştir. Çıkış geriliminin sabit kalması için RC devresinin zaman sabitinin anahtarlama periyodundan çok büyük olması gerekir. Son olarak Q anahtarının kesim durumunda ise yine Şekil 8.7’de görüldüğü gibi, yük kaynak üzerinden beslenecektir.



Şekil 8. 6. Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Yarı İletken Anahtarın İletim Durumu



Şekil 8. 7. Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Yarı İletken Anahtarın Kesim Durumu

Yükseltici tip DA-DA dönüştürücü için tasarım denklemleri sırası ile aşağıdaki gibidir;

Bobin değeri için gereken denklem;

$$L = \frac{V_{giriş} \cdot D}{I_{dalgalanma} \cdot f} \quad (8.7)$$

Çıkış kondansatörü için gereken denklem;

$$C = \frac{I_{çıkış} \cdot D}{f \cdot V_{dalgalanma}} \quad (8.8)$$

Çıkış Gerilimi;

$$V_{ÇIKIŞ} = \frac{V_{giriş}}{(1-D)} \quad (8.9)$$

Görev oranı (D);

$$D = 1 - \frac{V_{giriş}}{V_{çıkış}} \quad (8.10)$$

8.3. Sistem Kayıpları

Bir yerleşik şarj cihazında kullanılan güç elektroniği topolojisinin en önemli noktalarından birisi verimliliğidir. Bu konu bir örnek ile açıklanacak olunursa, yerli elektrikli araç üretimi yapan TOGG firmasının T10X modelinin verilerini incelediğimizde 88,5kWh kapasiteli aracın tam kapasite ile 523km gidebildiğini görmekteyiz. Aynı aracın 100000 km yol gittiği düşünüldüğünde, bataryaların bu durum için yaklaşık 191 defa şarj deşarj olması gerekmektedir. Böylelikle enerji aktarımı sırasında topoloji kaynaklı meydana gelebilecek %1 oranında enerji kaybı yaklaşık 885Wh olarak hesaplanmaktadır. Bu durum 100000 km yol yapan bir araç için düşünüldüğünde, $885 \times 191 = 169\text{kWh}$ enerjinin kayıp olarak yansıdığını görmekteyiz. Yapılan hesap doğrultusunda, ilerleyen yıllarda elektrikli araç kullanımının artması ile %1 oranında enerji kaybının bile genele yayıldığına çok büyük rakamlarda kayıplara neden olacağı görülmektedir. Buradan yola çıkarak yerleşik şarj cihazı topolojilerinin olabilecek minimum kayıpla enerji aktarımı yapması, büyük bir önem taşımaktadır. Güç elektroniği uygulamalarında kayıplar, sistem bileşenleri, topolojilerin yapıları, malzeme kalitesi gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Pasif eleman kayıpları, reaktif güç kayıpları, yarı iletken kayıpları, transformatör kayıpları enerji aktarımı sırasında verimliliği düşüren en önemli etkenlerdendir.

8.3.1. Reaktif Güç Kayıpları

Reaktif Güç (Q): Reaktif güç kavramı en basit tabiri ile şebekeye geri aktarılan gücü ifade etmektedir. Endüktif yüklü devrelerde manyetik devrenin uyarılması için kullanılıp bir sonraki periyotta şebekeye tekrardan aktarılan güçtür. Elektriksel gücün tanımına bakıldığında üç bileşenden oluştuğu görülmektedir.

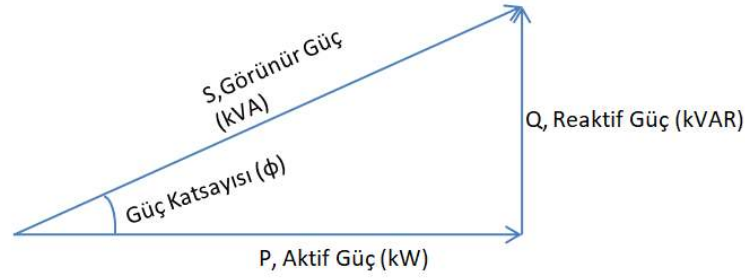
Görünür Güç (S): Alternatif akımda aktif güç ile reaktif gücün bileşkesi olan ve gerekli olan güç hesabında dikkate alınan güç görünür güçtür.

Aktif Güç (P) : Şebekeden çekilen ve aktif olarak omik dirençlerde harcanan, yararlı işe dönüşen güçtür.

Görünür gücün, aktif güç ve reaktif güç ile bağıntısı denklem 8.11 ve 8.12' de gösterildiği gibidir. Şekil 8.8'de ise alternatif akım güç üçgeni gösterilmektedir.

$$P = S \cdot \cos\varphi \text{ (W)} \quad (8.11)$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi \text{ (VAr)} \quad (8.12)$$



Şekil 8. 8. Alternatif Akım Güç Üçgeni

Sistemlerin şebekeden çektiği toplam güç görünür güç, iş yapan güç ise aktif güç olarak isimlendirilir. Bu nedenle sistemde reaktif güç oranının artması veya başka bir tabir ile güç katsayısının düşmesi, sistemin verimini düşürecektir. Reaktif güçlerin en önemli sebepleri sistemde var olan endüktif yüklerdir. Bu kapsamda incelenen topolojilerde özellikle transformatör bulunduran yaklaşımlar reaktif güç tüketmeye daha elverişlidir. Endüktif yük bulunduran sistemlerde reaktif gücün düşürülmesi için bazı uygulamalara başvurulmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları kompanzasyon yöntemi ve güç faktörü düzenleyicilerdir. Güç faktörü düzenleme uygulamaları, sistemde oluşacak harmoniklerin önüne geçilmesi açısından da büyük bir önem taşımaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan şarj topolojileri şebeke için lineer olmayan yüklerdir. Lineer olmayan yükler elektrik dağıtım sistemleri üzerinde gerilim bozulmalarına ve akım harmonik distorsiyonunda önemli bir artışa neden olmaktadır. Ayrıca harmonikler sistemdeki cihazlara ek reaktif güç yükü ekleyebilmektedir. Bu ve benzeri nedenler ile endüktif yük barındıran sistemlerde çeşitli yaklaşımlar ile güç faktörü düzenleme işlemi yapılmaktadır.

8.3.1.1. Kompanzasyon Yöntemi

Kompanzasyon işlemi güç katsayısını artırmak için yapılan yaygın uygulamalardan birisidir. Bu işlem ile, sisteme reaktif güç desteği sağlanarak şebekeden çektiği reaktif güç miktarının azaltılması amaçlanmaktadır. Yüke paralel kondansatör eklenerek yapılmaktadır. Bir enerji sisteminde harcanan reaktif güç miktarı biliniyorsa ve belirli bir seviyeye indirilmesi isteniyorsa, sisteme eklenecek kondansatör değeri aşağıda belirtildiği gibi hesaplanabilir;

$Q_1(\text{VAR})$: Sistemin Reaktif Güç Miktarı

$Q_2(\text{VAR})$: istenilen Reaktif Güç Seviyesi

$$Q(VAr) = Q_1 - Q_2$$

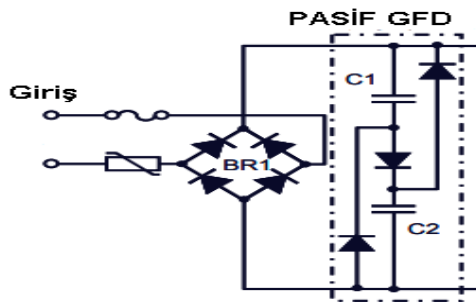
$$X_c = \frac{V_{rms}^2}{Q} \quad (8.13)$$

$$C = 1/(2.\pi.f.X_c) \quad (8.14)$$

Kompanzasyon ile güç faktörü düzenleme işlemi daha çok fabrika, işletme tarzı genel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bunun nedeni sisteme eklenecek veya iletimden çıkartılacak cihazlar ile tüketilen reaktif güç miktarında değişiklikler meydana gelebilir. Bu değişiklikler kompanzasyon sistemine ekstra kondansatör eklenerek veya çıkartılarak kolaylıkla dengelenebilmektedir.

8.3.1.2. GFD Devreleri

Güç Faktörü Düzenleyiciler kompanzasyon yöntemine kıyasla daha çok güç kaynakları, batarya şarj sistemleri gibi lokal uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bu kapsamda GFD'ler yerleşik şarj cihazlarında da sıklıkla kullanılmaktadırlar. Güç faktörünün düzeltilmesi veya iyileştirilmesi için, yük ve uygulama türüne bağlı olarak, pasif veya aktif yöntemler kullanılmaktadır. Her iki yöntemin de avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Pasif yöntemlerde, prensip olarak giriş akımını düzeltmek için doğrultucu giriş veya çıkışına bobin ve kondansatörler bağlanır. Basit bir yapıya sahip bu sistemde şebeke frekanslı bobin ve kondansatörlerin kullanılması nedeniyle oldukça yavaştır. Ayrıca, bu sistemde güç faktörü oldukça düşüktür ve kontrolü olmayan çıkış geriliminde büyük dalgalanmalar olmaktadır. Şekil 8.9' da pasif GFD devresi örneği gösterilmiştir.



Şekil 8. 9. Pasif GFD Devresi

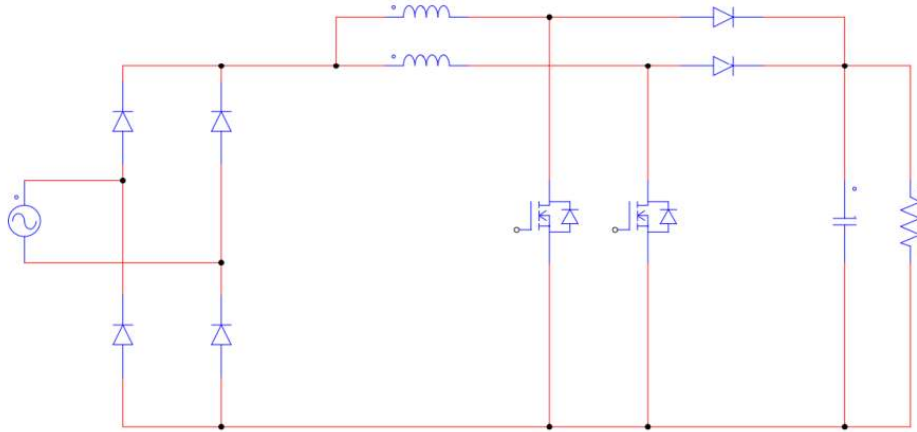
Aktif GFD yöntemlerinde AA çıkışına ikinci bir devre bağlanır. Bu yöntemlerde doğrultulmuş AA gerilim, çıkışına eklenen bir devre ile yükseltilir. En basit anlatım ile bağlanan bu devre, girişten rezistif olarak güç çeker ve bu sayede giriş akımının giriş gerilimi takip etmesi sağlanır. Rezistif güç çekilmesi GFD devrelerinde bir miktar enerjinin ısıya dönüşmesine neden olacaktır. Bu nedenle aktif GFD'lerin sistemlerde verimi düşürdüğü

söylenbilir. Yerleşik şarj cihazları için çoğunlukla aktif GFD yaklaşımları tercih edilmektedir. Tez çalışmasında analizi yapılacak topolojilerde, köprüsüz kutuplu güç faktörü düzenleyici ve dönüşümlü yükseltici tipi güç faktörü düzenleyici devreler kullanılmaktadır.

8.3.1.3. Dönüşümlü Yükseltici Tip GFD

Dönüşümlü yükselticiler, yüksek güçlerde çalışan geleneksel yükselticilerin güç dağılımlarını ve akım dalgalanmalarını azaltmak için geliştirilmiştir. Girişlerinde kontrolsüz köprü yapısı ve çıkışlarında 180° dönüşümlü olarak çalışan iki adet yükseltici tip DA-DA dönüştürücü devre ile kullanılmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajı EMI performansı ve akım dalgalanma oranının düşük olmasıdır (Moralı ve Salim, 2020).

Diğer yöntemler ile karşılaştırıldıklarında çıkışında iki adet yükseltici devre bulunduğu için eleman sayıları fazladır. Ayrıca kontrol mekanizmaları diğer devrelerden daha karmaşıktır ve daha fazla kontrol elemanı gerektirir. Giriş gerilimini kontrolsüz köprü yapısı ile doğrultulmaları ve çıkışlarında iki adet yükseltici devre bulunması, bu topoloji için verimi düşüren etkenler olarak değerlendirilebilir. Şekil 8.10'da dönüşümlü yükseltici tip GFD için devre şeması gösterilmiştir.

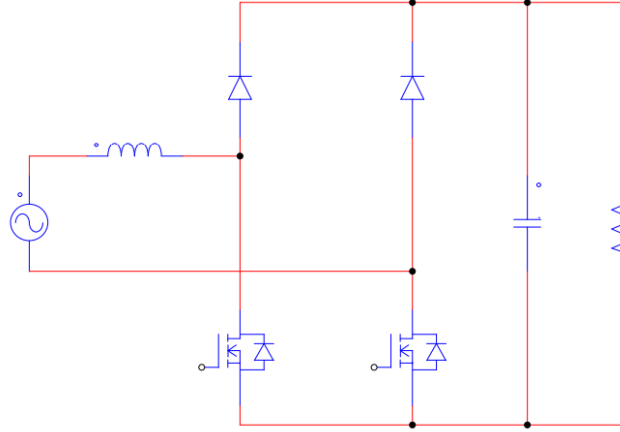


Şekil 8. 10. Dönüşümlü Yükseltici GFD Yöntemi

8.3.1.4. Köprüsüz Kutuplu Tip GFD

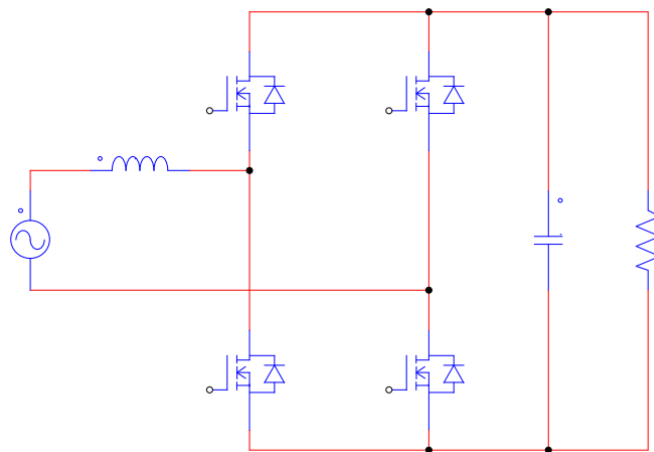
En basit yapıya sahip aktif GFD yöntemi geleneksel yükseltici tip GFD yöntemidir. Bu yöntemde, köprü diyot çıkışında yükseltici tip DA-DA dönüştürücü devre bulunur. Kontrolsüz köprü yapısı ile doğrultulmuş giriş gerilimi yükseltilerek çıkış gerilimi kontrol edilir. Bu yaklaşımda, köprü için kullanılan diyotlar kayıplara, dolayısıyla verimin düşmesine neden olmaktadır. Geleneksel devrede girişte bulunan köprü diyot kayıplarını azaltmak için

köprüsüz yükseltici GFD devreler geliştirilmiştir. Köprüsüz yükseltici GFD devrelerde girişte bulunan iki köprü diyot yerine yarı iletken anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Şekil 8.11’de köprüsüz yükseltici GFD devresi gösterilmektedir.



Şekil 8. 11. Köprüsüz Yükseltici GFD Yöntemi

Girişlerinde köprü diyot olmaması ve gerilimin doğrultma sırasında yükseltiliyor olması yüksek verimde çalışmalarını sağlar. Bu devreler geleneksel yükselticilere göre daha verimlidir fakat köprü yapısında bulunan iki diyot sistem verimliliğine olumsuz yönde etki etmektedir. Kalan iki diyotun sebep olduğu kayıpları yok etmek için köprüsüz kutuplu GFD yöntemi kullanılır. Bu yöntemde köprünün kalan iki diyotu yerine diyot köprüsünün yaptığı gibi geçiş yapmak üzere hassas bir şekilde kontrol edilen yarı iletken anahtarlama elemanları kullanılmaktadır. Şekil 8.12’de köprüsüz kutuplu GFD yöntemi devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 8. 12. Köprüsüz Kutuplu GFD Yöntemi

Köprüsüz dönüştürücülerde verim geleneksel dönüştürücülere göre yüksektir fakat toplam harmonik bozulma ve EMI seviyeleri geleneksel yükselticilere kıyasla daha da

artmaktadır. Köprüsüz yükselticinin kontrolü, her sıfır geçişinde ilgili anahtar giriş akım ve gerilimi ile çıkış gerilimine bağlı olarak kontrol edilir. Bu devrelerde, hem güç katsayısını düzeltmek hem de toplam harmonik bozunumlarının azaltılması için kontrolün hızlı ve doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir (Akın, 2012).

8.3.2. Yarı İletkenlerin Kayıpları

Güç elektroniği topolojilerinde verimi etkileyen en önemli etkenlerden bir tanesi de yarı iletken yapılarıdır. Topolojilerin tasarımı sırasında yarı iletken seçimi, devrelerin gerilimi, frekansı ve akımı göz önünde bulundurularak yapılır. Örneğin, yüksek anahtarlama frekansı gerektiren devrelerde anahtarlama elemanı olarak MOSFET'ler tercih edilirken yüksek güç gereken devrelerde IGBT'ler kullanılmaktadır. Güç elektroniği devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanları özellikle anahtarlama sırasında, çeşitli kayıplara ve gürültülere neden olmaktadır. Bu kayıpların önüne geçebilmek ve gürültüleri bastırabilmek amacı ile bazı ek devreler kullanılır. Bu devrelere yumuşak anahtarlama devreleri denir. Bastırma devreleri, sıfır akım geçiş devreleri ve sıfır gerilim geçiş devreleri en yaygın kullanılan yumuşak anahtarlama yöntemleridir.

Güç elektroniği topolojilerinde kullanılan ve kayıplara neden olan bir diğer eleman, kontrolsüz yarı iletken olarak sınıflandırabileceğimiz diyotlardır. Yerleşik şarj cihazları için tasarlanan topolojilerde diyotlar, AA-DA doğrultma işlemleri sırasında ve DA-DA dönüştürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu kapsamda yerleşik şarj cihazlarında yarı iletken kayıpları, MOSFET veya IGBT kayıpları ve diyot kayıpları olarak sınıflandırılabilir.

8.3.2.1. MOSFET Kayıpları

Taşıyıcısı yarı iletken olan MOSFET'lerde kayıplar, anlık iletim kayıpları ve anahtarlama kayıpları olarak ikiye ayrılır. Anlık iletim kayıpları Denklem 8.15'te ki gibi ifade edilmektedir.

$$P_{M-C}(t) = I_D^2(t) \cdot R_{DS\text{ açık}}(I_D(t), V_{GS}, T_J) \quad (8.15)$$

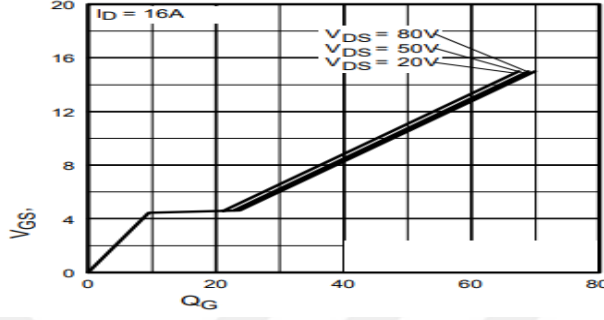
I_D : MOSFET Akımı,

R_{D-S} açık: MOSFET Direnci

V_{GS} : Kapı Gerilimi

T_j : Jonksiyon Sıcaklığı

Bu parametrelere seçilen MOSFET'lerin veri sayfalarından ulaşılabilir. MOSFET'lerde kayıplara neden olan bir diğer etken anahtarlama kayıplarıdır. Bu kayıplar anahtarlama başına enerji kaybından yola çıkılarak, akım ve gerilimin, yükselme ve kesim zamanına bağlı olarak hesaplanır.



Şekil 8. 13. Bir MOSFET'in V_{GS} Eğrisi

MOSFET'lerde kesim zamanları $Q_G - V_{GS}$ eğrileri ile hesaplanabilir. Şekil 8.13'te bir MOSFET'in $Q_G - V_{GS}$ örneği verilmiştir. MOSFET'lerde akım yükselme ve kesme süreleri çeşitli yöntemler ile hesaplanabilir fakat çoğunlukla bu değerler MOSFET'lerin kataloglarında paylaşıldığından hesaplamaya ihtiyaç duyulmaz. Bu süreleri kullanarak MOSFET'lerin anahtarlama sırasındaki enerjisi Denklem 8.16'daki gibi hesaplanabilir.

$$E_{MAE} = \frac{1}{2} V_{DS} I_D (t_{r-i} * t_{r-v} * t_{f-i} * t_{f-v}) \quad (8.16)$$

E_{MAE} : MOSFET Anahtarlama Enerjisi

t_{r-i} : Akım Yükseliş Süresi

t_{r-v} : Gerilim Yükseliş Süresi

t_{f-i} : Akım Düşüş Süresi

t_{f-v} : Gerilim Düşüş Süresi

Denklem 8.17'de Anahtar iletme geçtiğinde MOSFET üzerinde çıkış sığasından kaynaklı enerji kayıpları ifade edilmektedir.

$$E_{MSK} = \frac{1}{2} (C_{DS} + C_{GD}) V_{DS}^2 \quad (8.17)$$

E_{MSK} : MOSFET Sığa Kaybı

C_{DS} : MOSFET Drain Source Sığa Değeri

C_{GD} : MOSFET Gate Drain Sığa Değeri

Bu iki bileşen ile birlikte hızlı anahtarlama yapan MOSFET’lerde diyotun ters polarlanmasından kaynaklı enerji kayıpları meydana gelir. Bu kayıplar Denklem 8.18’de ifade edilmiştir.

$$E_{MDK}: V_{ds} \cdot Q_{rr} \quad (8.18)$$

E_{MDK} : MOSFET Diyot Kaybı

Q_{rr} : Diyot Ters Polarlanma Şarj Süresi

Bir MOSFET’teki temel anahtarlama kayıpları bu dört bileşenin toplamı olarak ifade edilebilir (Özkan ve Hava, 2012).

8.3.2.2. IGBT ve Diyot Kayıpları

IGBT’lerde iletim kayıplarını incelediğimizde MOSFET’lere ek olarak gerilim düşümü kayıplarının bulunduğunu görmekteyiz. IGBT’lerde iletim kayıpları Denklem 8.19’daki gibi ifade edilebilir.

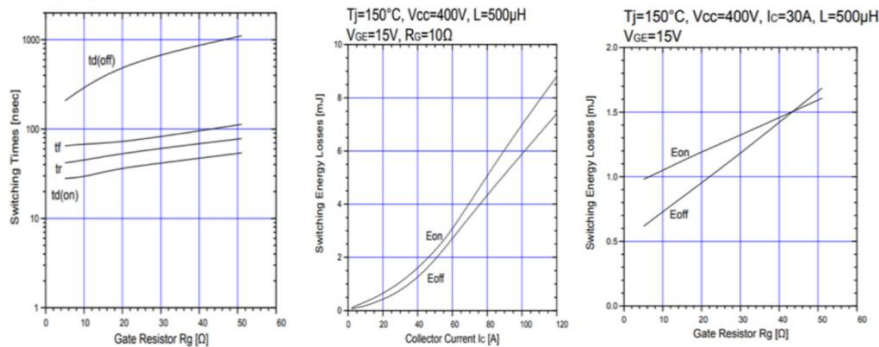
$$P_{IK} = I_C(t) \cdot V_{CE-açık} + I_C^2(t) \cdot R_{CE-açık} \quad (8.19)$$

$V_{CE-açık}$: Sabit Gerilim Düşümü

$R_{CE-açık}$: İletim Direnci

$$R_{CE-açık} = \frac{\Delta V_{IGBT}}{\Delta I_{IGBT}} \quad (8.20)$$

IGBT’lerin anahtarlama enerjileri de çeşitli yöntemler ile hesaplanabilir fakat bu değerler ürün kataloglarında kullanıcı ile paylaşıldığından hesaplamalara ihtiyaç duyulmamaktadır (Özkan ve Hava, 2012). Şekil 8.14, anahtarlama frekansına göre değişen gate direncini, kol akımına göre değişen anahtarlama enerji kaybını ve gate direncine göre değişen enerji kaybını ifade eden grafikler gösterilmektedir.



Şekil 8. 14. IGBT Katalog Verileri

Diyotlarda iletim kayıpları IGBT'ler ile benzer şekilde hesaplanmaktadır. İletim sırasında gerilim düşümü ve direnç sebebi ile kayıplar meydana gelmektedir. Diyotlar için iletim kayıpları Denklem 8.21'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_{DİK} = I_f(t) \cdot V_{D-açık} + I_f^2(t) \cdot R_{D-açık} \quad (8.21)$$

$V_{D-açık}$: Diyot için Sabit Gerilim Düşümü

$R_{D-açık}$: Diyot iletim Direnci

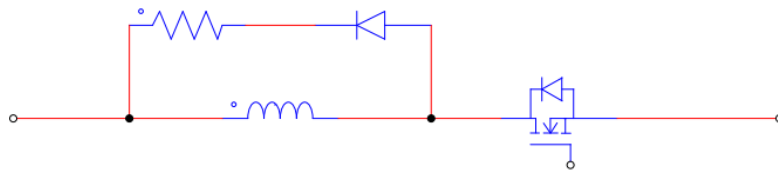
Diyotlarda anahtarlama kayıpları, ters polarlanma akımından dolayı, akım kesimi sırasında meydana gelmektedir. Diyotlarda kesim sırasındaki ters yük, ileri yöndeki akımları, kesilen akımın düşüş hızının türevi ve sıcaklığı gibi parametreler ile orantılı değişiklik gösterir. Bu kapsamda diyotlarda ters polarlanma yükü ve gerilimleri ile ilişkili olan anahtarlama enerjileri için Denklem 8.22'deki ifade kullanılmaktadır.

$$E_{DK} = V_D * Q_{rr} * \frac{\frac{I_{f-açık}}{dt}}{4} \quad (8.22)$$

8.3.2.3. Bastırma Devreleri

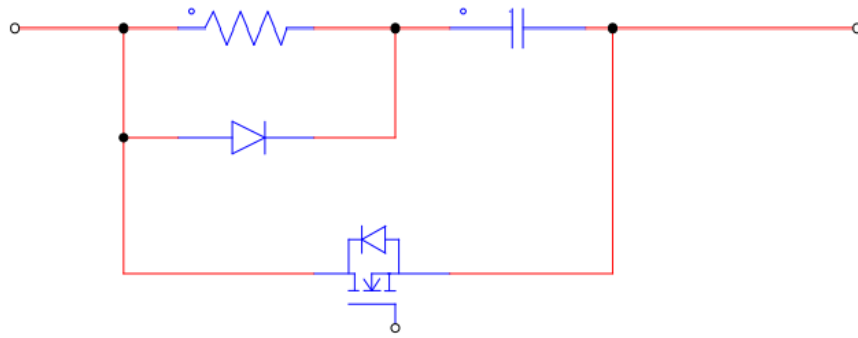
Bastırma devreleri güç elektroniği topolojilerinde koruma, akım ve gerilim dalga şekillerini biçimlendirme, anahtarlama kayıplarını azaltma ve geçici rejim esnasındaki taşmaları gibi birçok farklı amaç ile kullanılmaktadır.

Anahtarlama elemanlarında kesim durumunda anahtar uçlarında hızlı bir gerilim yükselmesine ve iletim durumunda hızlı bir akım yükselmesine maruz kalırlar. Bu ve benzeri problemlerin çözümü için yaygın kullanılan üç temel bastırma devresi bulunmaktadır. İletim esnasında akımın yükselmesi anahtarın müsaade edilen di/dt 'sinden çok daha büyük olabilir. Bu durumda bir açma bastırma devresi kullanılarak akımın yükselme hızı sınırlandırılabilir. Benzer şekilde anahtar, kesime gittiği durumda aşırı gerilimlere veya dv/dt 'ye maruz kalabilir. Bu durum da bir kapatma ya da aşırı gerilim bastırma devresi kullanılarak düzeltilebilir.



Şekil 8. 15. Açma Bastırma Devresi Örneği

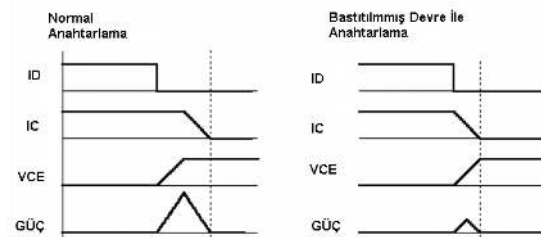
Şekil 8.15'te açma bastırma devresi örneği gösterilmiştir. Açma bastırma devreleri iletim durumunda anahtardaki aşırı akımları azaltmak için veya başka bir tabir ile, anahtarlama elemanında di/dt 'yi düşürmek için kullanılır. Anahtarlama elemanlarının ileri ön gerilimli güvenli çalışma alanları büyük olduğundan dolayı açma bastırma devreleri sadece yüksek anahtarlama frekanslarında iletime girme kayıplarını azaltmak için kullanılır. Açma bastırma devresi, anahtarlama elemanı akımının di/dt 'sini sınırlamak için anahtarlama elemanına seri bağlı küçük bir indüktanstan oluşur. Anahtarlama elemanı kesime girdiğinde bu endüktansta biriken enerji kendisine seri bağlı bir diyot ve direnç üzerinde harcanır.



Şekil 8. 16. Kapatma Bastırma Devresi Örneği

Şekil 8.16'da kapatma bastırma devresi örneği gösterilmiştir. Kapatma bastırma devreleri kesim durumunda oluşan problemleri azaltmak için kullanılır. Bu devrenin amacı anahtarlama elemanının üzerinden geçen akım sıfıra ulaşınca kadar anahtarlama elemanı uçlarında sıfır ya da küçük bir gerilim sağlamaktır. Bu durum, Şekil 8.16'da gösterildiği gibi transistör uçlarına bir direnç, kondansatör ve diyot bağlayarak gerçekleştirilebilir.

Devre iletimdeyken anahtarlama elemanı üzerinden akım akmaktadır ve yine anahtarlama elemanı üzerindeki gerilim sıfıra eşittir. Kesim anında anahtarlama elemanı üzerinden geçen akım sabit bir di/dt ile azalır ve D bastırma diyotu ile kapasite üzerinden akar. Şekil 8.17'de bastırma devresinin devreye olan etkileri görülmektedir.



Şekil 8. 17. Bastırma Devresinin Anahtarlama Anındaki Etkileri

Anahtarlama modunda çalışma durumlarında IGBT'lerin güvenli çalışma alanı çoğu durumlarda IGBT'ler için bastırma devre ihtiyacını minimize eder. IGBT'lerin gate akımını kontrol ederek açma ve kapatma zamanlarını kontrol etme kapasitesi, açma ve kapatma bastırma devrelerine olan ihtiyaçlarını daha da azaltır. IGBT'nin tepe akımlarına dayanma kapasiteleri çoğu durumlarda bastırma devresi kullanımını gereksiz kılan başka bir faktördür.

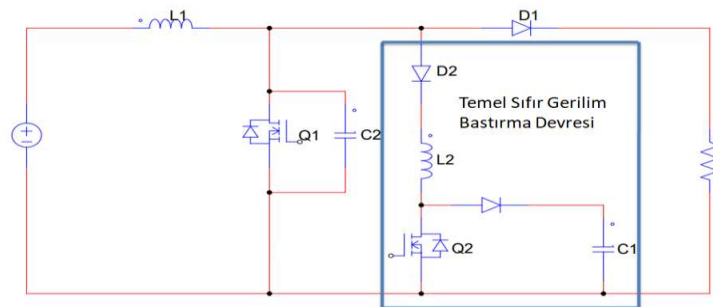
Tez çalışması kapsamında incelenen yerleşik şarj cihazı topolojilerinde anahtarlama elemanı olarak IGBT'ler kullanılmıştır. Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı topolojilerde bulunan IGBT'ler için harici bir bastırma devreleri kullanılmamıştır.

8.3.2.4. Aktif Sıfır Gerilim Geçiş Devreleri

Sıfır gerilimde geçiş devreleri bastırma devrelerine benzer şekilde kontrollü yarı iletkenlerde anahtarlama kayıplarını azaltmak amacı ile kullanılmaktadır. Bu yöntem için birçok farklı yaklaşım bulunmakla birlikte temel sıfır gerilim ile geçiş devreleri ve geliştirilmiş sıfır gerilim geçiş devreleri en yaygın kullanılan yöntemlerdir.

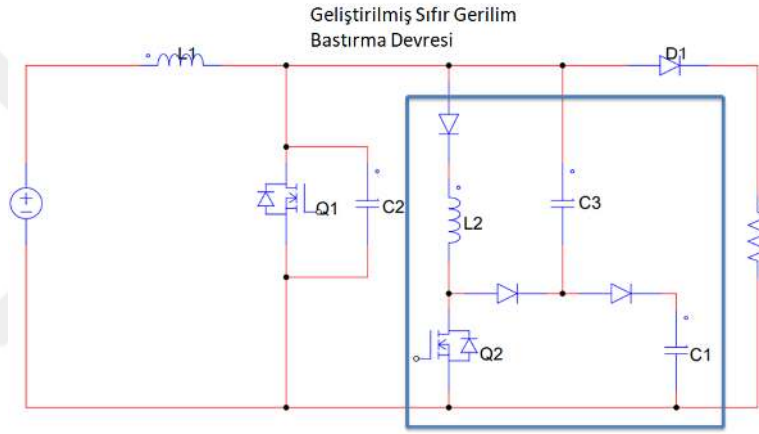
Temel sıfır gerilim geçiş devreleri yapılarında aktif ve pasif elemanlardan bulunduran basit ve ucuz devrelerdir.

Şekil 8.18'de yükseltici devre üzerine uygulanmış temel sıfır gerilim bastırma devresi örneği verilmiştir. Bu devrede ana anahtar Q_1 , C_2 kondansatöründen dolayı sıfır gerilim altında kesime gider. D_1 diyotu L_2 endüktansı sayesinde sıfır akım ile kesime gitmektedir. Bu sayede devrede ters polarlama kayıpları büyük ölçüde düşürülmüş olur. Ana diyot D_1 kesim durumundan iletim durumuna sıfır gerilim altında girer. Topolojide bulunan Q_2 yardımcı anahtarı sıfır akım ile iletime girmektedir. Bu topolojide yalnızca Q_2 yardımcı anahtarında kabul edilebilir seviyede akım stresi bulunur. Diğer elemanlarda akım veya gerilim stresi bulunmaz.



Şekil 8. 18. Yükseltici Devre Üzerine Uygulanmış Temel Sıfır Gerilim Bastırma Devresi

Şekil 8.19’da geliştirilmiş sıfır gerilim geçiş yöntemi gösterilmiştir. Bu yöntem temel sıfır gerilim geçiş yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için tasarlanmıştır. Temel devreye ek olarak yapısında bir diyot ve bir kondansatör bulunmaktadır. Topolojide MOSFET kesimdeyken C_2 parazitif kondansatörü çıkış gerilimi ile şarj olur. C_2 kondansatörünün anahtar üzerinden deşarj olması $(1/2).C.V_o^2$ değerinde bir enerjinin her periyotta kaybolması anlamına gelir. Bu enerjinin geri kazanılması amacı ile Q_1 anahtarına sıfır gerilim geçişli anahtarlama yöntemi uygulanır. Şekil 8.19’da gösterilen geliştirilmiş sıfır gerilim anahtarlama yönteminde C_3 kondansatörü yardımı ile Q_2 yardımcı anahtarının yumuşak bir şekilde devreye girmesi sağlanır. Böylece temel devrenin dezavantajı ortadan kaldırılmış, verim yükseltilmiş olur. Bu devrelerin en belirgin dezavantajları, hafif yüklerde düşük bir performansa sahip olmalarıdır (Şahin vd., 2014).



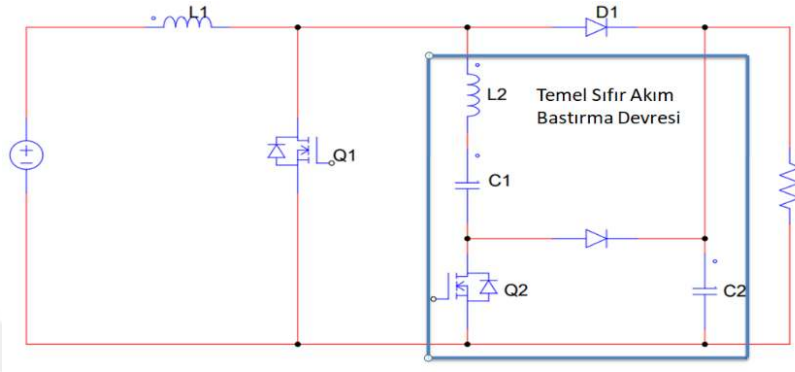
Şekil 8. 19. Yükseltici Devre Üzerine Uygulanmış Geliştirilmiş Sıfır Gerilim Bastırma Devresi

8.3.2.5. Aktif Sıfır Akım Geçiş Devreleri

Sıfır akımda geçiş devrelerinin amacı devrede üzerinden akım geçen anahtarın kayıpsız bir şekilde kesime gitmesini sağlamaktır. Genellikle orta veya büyük frekans uygulamalarında kullanılan IGBT'lere uygulanırlar. Sıfır gerilim geçiş yönteminde olduğu gibi temel ve geliştirilmiş geçiş devreleri en yaygın kullanılan topolojilerdir.

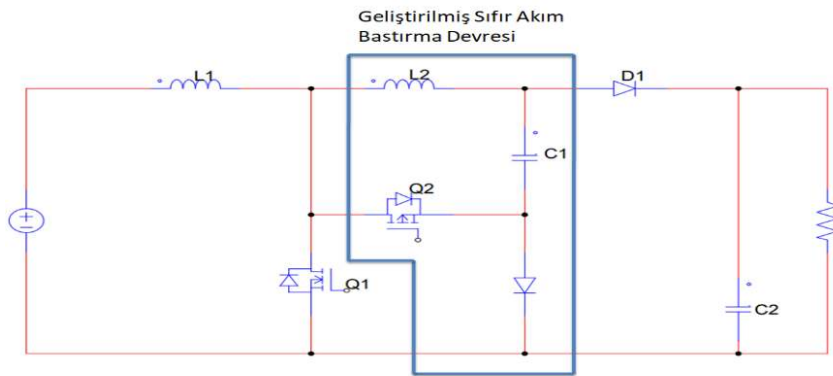
Şekil 8.20’de temel sıfır akım geçiş devresi gösterilmektedir. Q_1 anahtarı iletimdeyken geçiş devresinin yardımı ile akım sıfıra düşürülür. Akım sıfıra düşürüldükten sonra Q_1 sıfır akım anahtarlama ile kayıpsız bir şekilde kesim durumuna geçer. Topolojide D_1 diyaotu sıfır gerilim ile iletime girdiğinde Q_2 anahtarı sıfır akım ile kesim durumuna geçmektedir. Q_1 anahtarı yeniden iletime girmesi sert anahtarlama ile olmaktadır. Ayrıca D_1 diyaotunun kesim

durumundan iletim durumuna geçişi de sert anahtarlama ile olmaktadır. Bu nedenle Q_1 anahtarının parazitif kondansatöründeki (C_1) enerji kaybedilmektedir. Devrede bulunan Q_2 anahtarının kesime durumuna geçmesi de sert anahtarlama ile meydana gelmektedir (Şahin vd., 2014). Topolojide bulunan sert anahtarlama verimini düşürür, ayrıca elemanların üzerine binecek akım stresini düşürmediğinden bu devre için yüksek değerli elemanlar kullanılması gerekir ve bu durum devre maliyetini artırmaktadır.



Şekil 8. 20. Yükseltici Devre Üzerine Uygulanmış Temel Sıfır Akım Bastırma Devresi

Şekil 8.21’de geliştirilmiş sıfır gerilim geçiş devresi görülmektedir. Bu devre temel sıfır gerilim geçiş devresinin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Devrede temel devre ile aynı sayıda eleman bulunmaktadır. Verimleri temel sıfır gerilim geçiş devrelerinden daha yüksek ve maliyetleri daha düşüktür. Devrede L_2 endüktansı yardımı ile Q_1 anahtarı yumuşak anahtarlama ile devreye girer. Yine hatta seri olan L_2 endüktansı sayesinde D_1 ana diyotunun ters toparlanma kayıpları büyük oranda engellenir. Q_2 anahtarı sıfır akım altında anahtarlama ile kesim durumuna geçer. Bu topolojide hiçbir anahtarlama elemanı üzerinde akım veya gerilim stresi oluşmaz. Bu devrenin en büyük dezavantajı ana akım yolu üzerinde seri endüktans (L_2) bulunmasıdır. Endüktansın iç direncinden kaynaklı kayıplar devrenin verimini düşürmektedir (Şahin vd., 2014).



Şekil 8. 21. Yükseltici Devre Üzerine Uygulanmış Geliştirilmiş Sıfır Akım Bastırma Devresi

8.3.3. Pasif Devre Elemanı Kayıpları

Pasif eleman kayıpları, güç elektroniği topolojilerinde verimi etkileyen önemli faktörlerdendir. Bu kayıplar kondansatörlerde kontak direnci ve dielektrik kayıpları, endüktif yüklerde rezistif (omik) kayıplar, transformatörlerde çekirdek kayıpları ve bakır kayıpları olarak karşımıza çıkmaktadır. Hesaplanması çalışma koşulları da göz önünde bulundurularak, kabaca bu pasif elemanların eşdeğer seri ve paralel dirençlerinden yola çıkılmasıyla ya da ampirik formüllerle gerçekleştirilebilir.

8.3.3.1. Omik (Rezistif) Kayıplar

Omik (Rezistif) kayıplar malzemenin direnç özelliğinden dolayı meydana gelen ısı kayıpları olarak isimlendirilebilir. Bu enerji genellikle ısınma olarak ortaya çıkar. İletkenlerdeki direnç arttıkça, rezistif kayıplar da artar. Güç elektroniği topolojilerinde özellikle bobin ve transformatörlerin iç dirençleri yüksek akımlarda rezistif kayıplara neden olmaktadır. Düşük frekanslı transformatör veya bobin uygulamalarında kalın kesitli ve düşük dirençli iletkenler kullanılması ile bakır kaybı minimum seviyelere çekilebilir.

Direnç özelliği gösteren bir malzemenin harcadığı güç üstünden geçen akımın karesi ile orantılıdır.

$$P = I^2 R \quad (8.23)$$

Bu durum sistemlerde doğrudan aktif güç kaybına sebebiyet vermektedir.

8.3.3.2. Dielektrik Kayıplar

Dielektrik (elektriksel yalıtkan) malzemeler elektronik devrelerde yalıtım amacı ile kullanılırlar. Bu materyaller, kullanım sırasında gerilime maruz kaldıklarında bu gerilim seviyesi oranında bir akım geçirmeye başlarlar. Dielektrik üzerinden geçen bu akım, malzeme üzerinde bir güç kaybına neden olur. İdeal bir dielektrik malzemenin üzerinden geçen akım reaktiftir ve bu nedenle sadece reaktif güç kaybına yol açar. Ancak ideal olmayan dielektrik malzemelerde, reaktif güç kaybının yanı sıra aktif güç kayıpları da ortaya çıkar. Malzemelerde meydana gelen aktif güç kayıpları ısı olarak ortaya çıkar ve dielektrik kayıplar olarak adlandırılır. Kısacası, dielektrik kayıpları, dielektrik malzemelere uygulanan gerilimle ortaya çıkan ve ısı olarak açığa çıkan kayıplardır. Güç elektroniği topolojilerinde dielektrik malzeme içeren kondansatör, bobin, transformatör gibi elemanlarda dielektrik kayıpları

görülebılır. Dielektrik kayıpları, elektriksel eşdeğer devrelerde omik direnç ile sembolize edilirler.

8.3.3.3. Demir Kayıpları

Çekirdek nüve veya demir kayıpları, transformatörlerde gözlemlenen enerji kayıplarıdır. Bu kayıplar, transformatörlerin boşta çalışma durumunda meydana gelir. Boş durumdaki akımın neden olduğu ve ihmal edilebilecek kadar küçük olan bakır kayıpları genellikle göz ardı edilir. Bu durumda, boşta çalışma kayıpları hesaplanırken yalnızca demir kayıpları göz önüne alınır. Demir kayıpları, histerisiz kayıplar ve fuko kayıpları olmak üzere iki kategoriye ayrılır.

8.3.3.4. Histerisiz Kayıpları

Demir gibi bazı ferromanyetik maddeler, harici manyetik alana maruz kaldıklarında geçici veya kalıcı bir manyetiklik sergiler. Bu manyetiklik, transformatör üzerindeki mevcut manyetik alana karşı yönlendirilmiştir ve ısı olarak enerji kaybına neden olur. Bu kayıplara histerisiz kayıpları denmektedir. Histerisiz kayıp, nüve moleküllerinin frekansa bağlı olarak yönlendikleri sırada moleküller arasındaki sürtünmelerin bir sonucu olarak ortaya çıkar ve bu da ısı olarak açığa çıkar.

8.3.3.5. Fuko Kayıpları

Bir çekirdek üzerine sarılmış bir bobinden değişken akım geçirildiğinde, çekirdek üzerinde gerilim indüklenir. Bu gerilim, çekirdek içinde ve yüzeyinde çok sayıda kapalı akım yolunun oluşmasına neden olur. Bu olgu, fuko akımları (eddy akımları) olarak adlandırılır. Fuko akımları çekirdek yüzeyinde ve çekirdek içerisinde de meydana gelir. Oluşan her bir kapalı akım yolundaki akım şiddeti, doğrudan endüklenen gerilimle orantılıdır. Akım şiddeti, bu akım yolunun elektriksel direnci ile ters orantılıdır.

9.MODELLEME

9.1. Simülasyon Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu tezde, yerleşik şarj cihazlarında yaygın olarak kullanılan üç farklı güç elektroniği topolojisi, Matlab/Simulink ortamında incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, devre kayıpları değerlendirilerek topolojilerin verimlilikleri, sistem için güvenilirlik düzeyleri, kontrol algoritmaları ve maliyetleri karşılaştırılmaktadır.

Simülasyon çalışmalarının tamamında topolojiler aynı parametreler kullanılarak test edilmiştir. Bu kapsamda kullanılan parametrelerden bazıları elektrikli araçlara ve üreticiye göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu konu bir örnek ile açıklanacak olursa, DA bara gerilimi üreticinin pil paketleme yöntemine göre (300V – 800V) arasındadır. DA bara geriliminin belirlenmesinde ISO-19642-5, ISO-6722-1:2011 gibi araç içi kablolama standartlarının önemli rolü bulunmaktadır. Bazı araç üreticileri DA bara gerilimini 300V – 400V civarı belirlerken özellikle Avrupa’da üretim yapan firmalar araç içi kablo kesitlerini düşürebilmek için bu değeri 800V seviyelerine çıkartmaktadır. ISO6722-1:2011 standartlarına göre gerilimi yükseltmek ekstra güvenlik önlemleri gerektirdiğinden tüm üreticiler tarafından tercih edilmemektedir. Aynı şekilde batarya tipi, bataryaların toplam kapasitesi, şarj oranı gibi değerler üreticiye ve araca göre değişiklik gösterebilmektedir. Yapılacak çalışmalar için çeşitli elektrikli araç modelleri incelenerek ihtiyaç duyulan parametreler belirlenmiştir.

9.1.1. Sistem Modellemesi

- Şebeke Gerilimi: $220V_{\text{efektif}}$ (IEC 62196 Seviye1 Şarj)
- DA Bara Gerilimi: (300V – 800V) 800V DA (ISO-6722-1:2011)
- Şarj Oranı: 2.9kW Seviye1 Şarj

9.1.2. Batarya Modellemesi

- Batarya Kapasitesi: 75.6kWh (IEC 62660-3:2022)
- Batarya Tipi: Lityum İyon (3000mAh) (IEC 62660-3:2022)
- Lityum-İyon Batarya Tepe Gerilimi: 4.2V
- Batarya Paketleme:
- 100 Adet Lityum İyon Batarya seri bağlandığında; $100 * 4,2 = 420 \text{ V}$ (3000mAh)
- $420V * 3Ah = 1260Wh$

- $75600\text{Wh} / 1260\text{Wh} = 60$
- Bataryalar 100 adet seri, 60 adet paralel olacak şekilde paketlenmiştir.
- Maksimum Batarya Gerilimi: 420V
- Şarj Akımı:
Bataryalar Seviye 1 Şarj ile şarj edilecektir.
 $2900\text{W} / 420 = 6.9\text{ A}$ Maksimum Şarj Akımı
- Şarj Oranı: $6,9 / 180 = 0.083\text{C}$

Modelleme sırasında hesaplanan batarya verileri simülasyon ortamına aktarılmıştır.

Şekil 9.1, Şekil 9.2 ve Şekil 9.3'te simülasyon ortamına aktarılan batarya verileri gösterilmektedir.

Block Parameters: Battery1

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery model for most popular battery types. Temperature and aging (due to cycling) effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

Parameters Discharge

Type: Lithium-Ion

Temperature

☐ Simulate temperature effects

Aging

☐ Simulate aging effects

Nominal voltage (V) 360

Rated capacity (Ah) 180

Initial state-of-charge (%) 50

Battery response time (s) 1

OK Cancel Help Apply

Şekil 9. 1. Batarya Verisi 1

Block Parameters: Battery1

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery model for most popular battery types. Temperature and aging (due to cycling) effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

Parameters Discharge

☒ Determined from the nominal parameters of the battery

Maximum capacity (Ah) 180

Cut-off Voltage (V) 270

Fully charged voltage (V) 419.0354

Nominal discharge current (A) 78.2609

Internal resistance (Ohms) 0.02

Capacity (Ah) at nominal voltage 162.7826

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)] 38.9389 8.843478

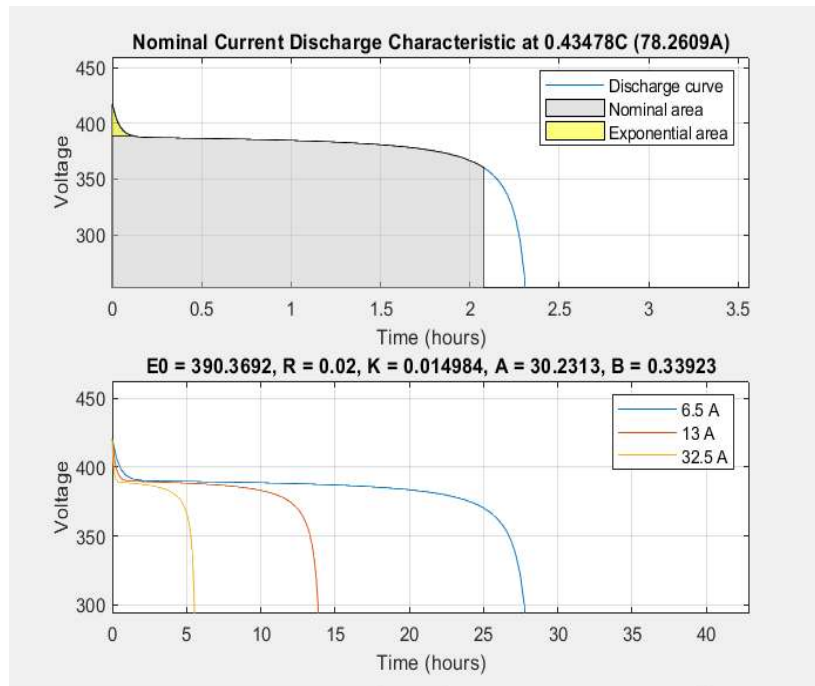
Display characteristics

Discharge current [i1, i2, i3,...] (A) [6.5 13 32.5]

Units Time Plot

OK Cancel Help Apply

Şekil 9. 2. Batarya Verisi 2



Şekil 9. 3. Batarya Verisi 3

9.2. Köprüsüz Kutuplu GFD Yöntemi ile DA Bara Geriliminin Modellenmesi

Simülasyon ortamına aktarılabacak olan yerleşik şarj cihazı topolojilerinden, iki yönlü şarj yöntemi ve çift aktif köprülü şarj yöntemi incelendiğinde, sistem girişlerinde birbiri ile aynı yapıda olan AA-DA doğrultucu bloğun kullanıldığı görülmektedir. Bu iki yaklaşımda da kontrollü doğrultma işlemi ve GFD işlemi için bölüm 8.3.1.4'te incelenen köprüsüz kutuplu GFD topolojisi kullanılmaktadır. Bu bağlamda köprüsüz kutuplu GFD yapısı, iki yönlü şarj devresi ve çift aktif köprülü şarj devresinin girişlerinde kullanılmak üzere Matlab/Simulink ortamına aktarılmıştır. Bu yöntemde yarı iletken anahtarlama elemanlarının kontrolü için histerezis akım kontrol algoritması seçilmiştir.

- DA Bara Gerilimi: 800V DA.
- Şebeke Gerilimi: 220V AA (V_{efektif})
- Anahtarlama Elemanı: IGBT
- Anahtarlama Yöntemi: Histerezis-Akım Kontrolü Yöntemi

9.2.1. Devre Bileşenlerinin Belirlenmesi

Giriş Dalgalanma Akımının Hesaplanması:

$$I_{\text{efektif}} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{V_{\text{efektif}}} \rightarrow \frac{2900}{310} = 9.3\text{A}$$

$$I_{\text{dalgalanma, \%30}} \rightarrow I_{\text{dalgalanma}} = I_{\text{efektif}} \frac{30}{100} = 9.3 \frac{30}{100} \rightarrow 2,79\text{A}$$

Giriş Bobin Hesabı:

$$L = \frac{V_{\text{çıkış}}}{4 \cdot I_{\text{dalgalanma}} \cdot f_{\text{SW}}} \quad (9.1)$$

$$L > \frac{800}{4 \cdot 2,79 \cdot 30 \cdot 10^3} = 2.3\text{mH}$$

- Bobin Seçimi;

Hammond Manufacturing- 195E20, 2.5mH, 20A, 22 mΩ, Tolerans ±15%

Çıkış Dalgalanma Geriliminin Hesaplanması:

$$V_{\text{dalgalanma, \%1}} \rightarrow V_{\text{dalgalanma}} = V_{\text{efektif}} \frac{1}{100} = 800 \frac{1}{100} \rightarrow 8\text{V}$$

$$\text{Çıkış Kondansatör Hesabı: } C_{\text{giriş}} \geq \frac{\frac{P_{\text{çıkış}}}{V_{\text{çıkış}}}}{4 \cdot \pi \cdot f_{\text{şebeke}} \cdot V_{\text{dalgalanma}}} \quad (9.2)$$

$$f_L = 50\text{Hz}$$

$$C_{\text{giriş}} \geq \frac{\frac{2900}{800}}{4 \cdot \pi \cdot 50.8} = 725\mu\text{F}$$

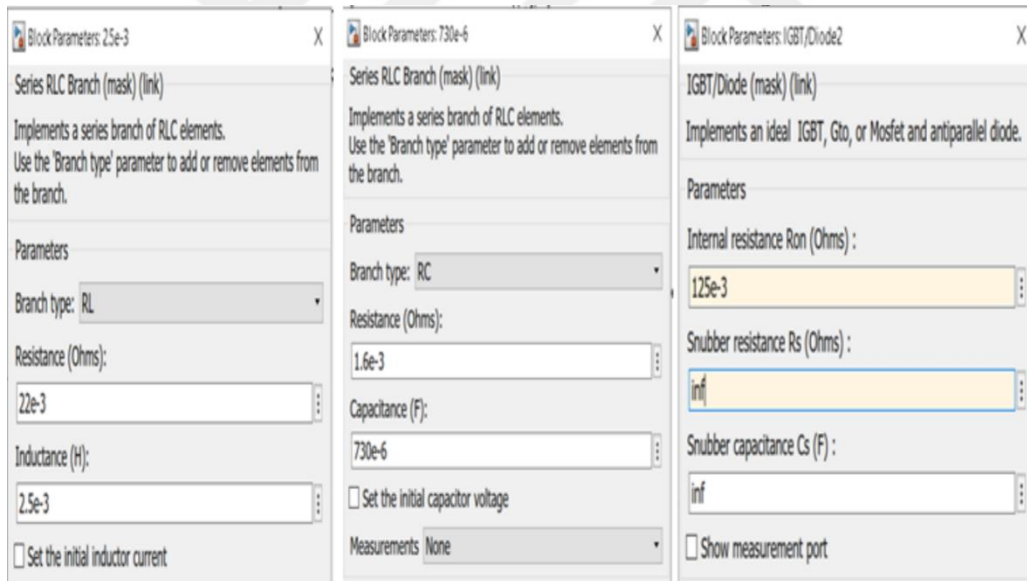
- Kondansatör Seçimi;

EPCOS - TDK Electronics, B25690A0737K901, 730uF, 900V, 1,6 mΩ, Tolerans ±10%

- IGBT Seçimi;

IXYS, IXGH10N100U1, VCE: 1000V, ICMAX:20A, Td (açık/kapalı) @ 25°C 100ns/550ns, Test Verileri 800V, 10A, 150Ohm, 15V, R_{açık} = VCE -Ic grafiğinden yaklaşık 125mΩ hesaplanmıştır.

Seçilen bobin kondansatör ve IGBT değerleri simülasyon ortamına aktarılmıştır. IGBT için harici bastırıcı devre kullanılmamıştır. Şekil 9.4'te simülasyon ortamına aktarılan veriler gösterilmektedir.



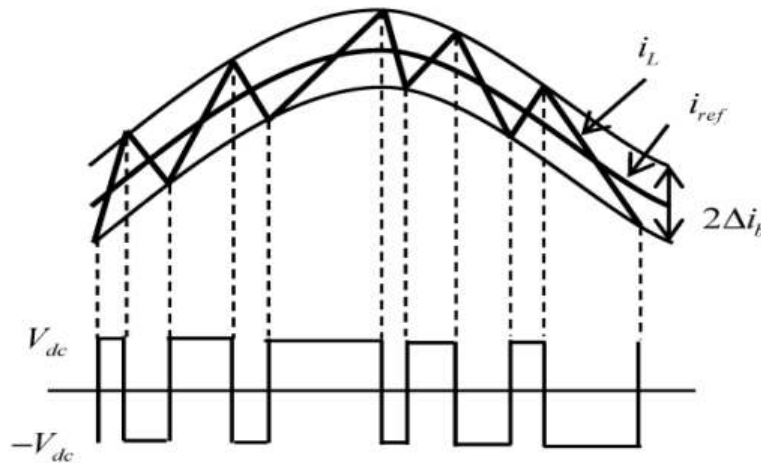
Şekil 9. 4. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu Bobin, Kondansatör ve IGBT Modeli

9.2.2. Histerezis Akım Kontrolü Yöntemi

Histerezis akım kontrol yöntemi, doğrusal olmayan akım kontrol yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, hızlı dinamik cevabı ve uygulama basitliği nedeniyle tercih edilmektedir. Klasik histerezis kontrol yönteminde sabit bir histerezis bant kullanılır. Ölçülen akım değeri ile referans akım değeri karşılaştırılır. Anahtarlama sinyali bu karşılaştırmanın sonucuna göre çıkartılmaktadır. Anahtarlama frekansının ve gürültü seviyesinin değişken olması, sayısal

olarak gerçekleştirme zorluğu gibi durumlar histerezis akım kontrol yönteminin dezavantajları olarak değerlendirilebilir. Histerezis akım kontrolünün analog olarak gerçekleştirilmesi oldukça kolaydır. Fakat sayısal gerçekleştirilmesi durumunda sürekli karşılaştırma ihtiyacından dolayı işlemcinin yükü artmakta ve gürültü problemleri nedeniyle uygulamada sorun oluşmaktadır. Histerezis akım kontrol yönteminin analog olarak gerçekleştirilmesi değişken anahtarlama frekansına sebep olduğundan uygulamalarda tercih edilmesini zorlaştırmaktadır (Dudak ve Bakan, 2018).

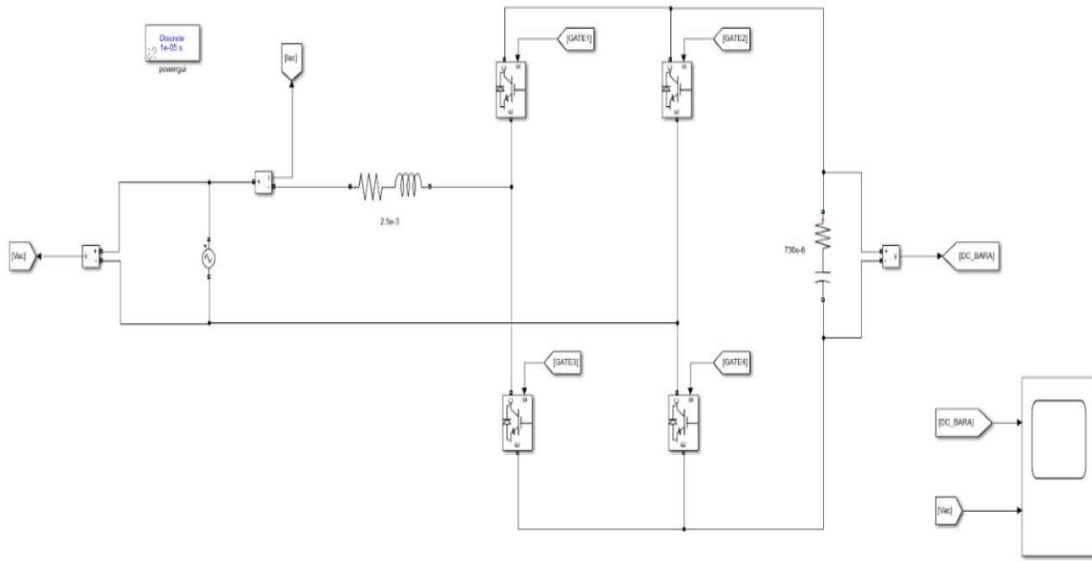
Bu yöntemde ölçülen akım değeri referans akım değeri ile karşılaştırılarak akım hatası elde edilir ve Şekil 9.5'te görüleceği üzere, yapılan anahtarlama, hatanın histerezis bandı içerisinde kalmasını sağlar. Histerezis akım kontrol yönteminde çıkış akımı histerezis bandın üst ve alt sınırı içerisinde hareket etmektedir. Hata artıp histerezis bandının üst sınırına geldiğinde akımın azalması için kontrol anahtarı kesim durumuna geçer. Akım azaldığında, akım hatasının bandın alt sınırına gelmesi ile birlikte kontrol anahtarı iletim durumuna geçer ve böylece akım hatası histerezis bandı içinde tutulmuş olur. Bu çalışmada tam dalga doğrultucunun çıkışındaki gerilimin istenen çıkış gerilimi ile farkı alınarak akım hatası bulunur ve bu sinyal PI kontrolörden geçirilir. Elde edilen çıkış sinyali giriş gerilimin belli bir katsayıdaki değeri ile çarpılarak sinüzoidale dönüştürülür ve giriş akımı ile farkı alınır. Son aşama olarak histerezis kontrolden geçirilerek anahtarlama elemanı için gerekli çıkış sinyali elde edilir (Tarlak, 2018).



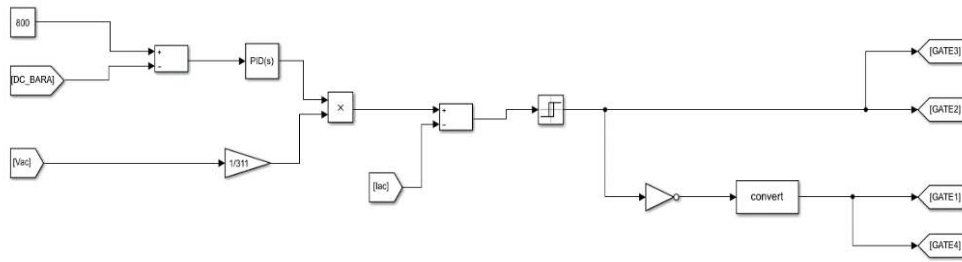
Şekil 9. 5. Örnek Histerezis Akım Kontrolü Anahtarlama Sinyali

9.2.3. Modelleme Çıktıları

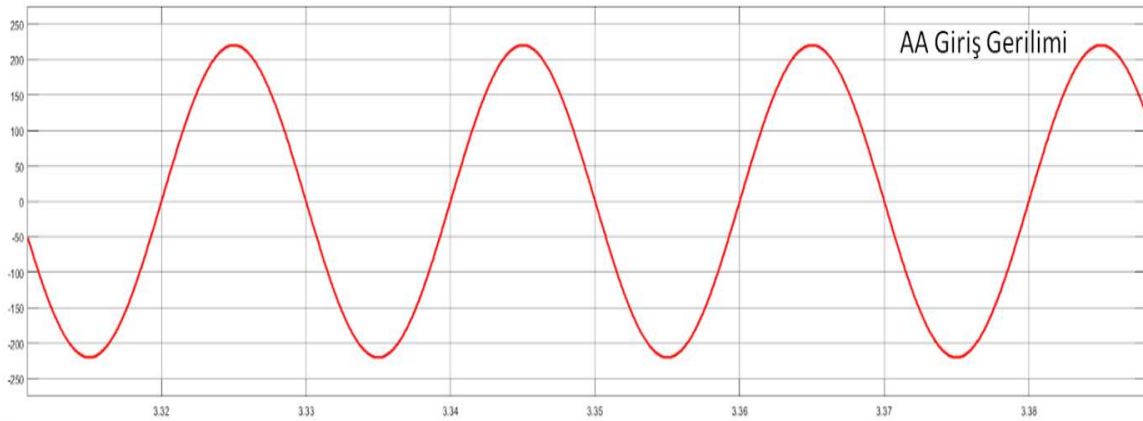
Köprüsüz kutuplu GFD yöntemi simülasyon ortamında modellenmiştir. Şekil 9.6 ve Şekil 9.7'de simülasyon ortamında modellenen devre şemaları gösterilmektedir.



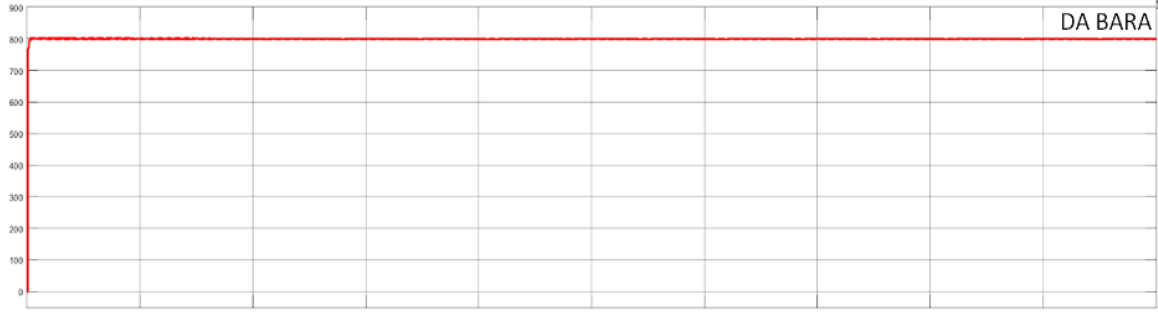
Şekil 9. 6. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu



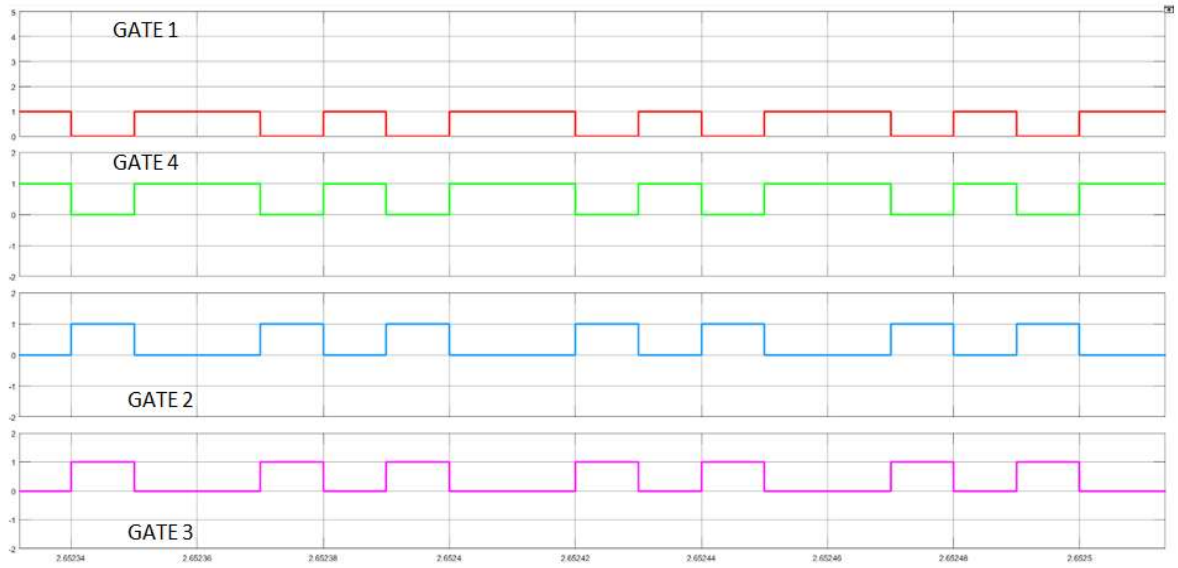
Şekil 9. 7. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu Histerrezis Akım Kontrol Bloğu



Şekil 9. 8. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu AA Giriş Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği)



Şekil 9. 9. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu 800V DA Bara Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği)



Şekil 9. 10. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultucu IGBT Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)

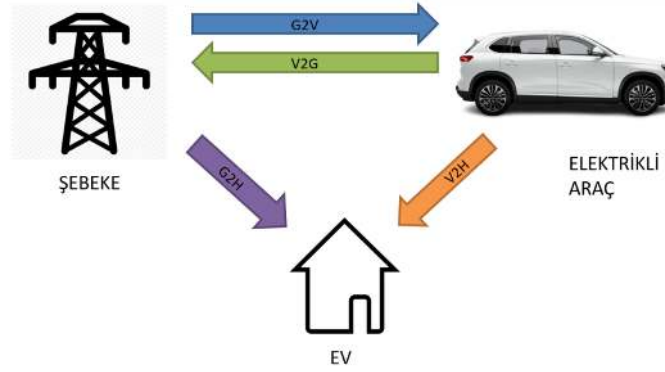
Şekil 9.8, Şekil 9.9 ve 9.10’da modelleme sonucunda alınan giriş, çıkış ve anahtarlama sinyallerinin grafikleri gösterilmektedir.

9.3. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu İki Yönlü Şarj Devresi

Köprüsüz kutuplu GFD doğrultuculu iki yönlü şarj devreleri, bir elektrikli aracın yalnızca şarj edilmesini değil, aynı zamanda bataryalarında depolanan enerjinin tekrardan şebekeye geri iletilmesini sağlayan bir teknolojiyi ifade etmektedir. Bu sistemler, elektrikli araç bataryasının hem enerji alıcı (şarj eden) hem de enerji verici (deşarj eden) bir cihaz olarak kullanılmasını mümkün kılar.

İki yönlü şarj devresi ile çalışan araçların depoladıkları enerjiyi araç dışı kullanımlar için dışarıya aktarması mümkündür. Bu noktada Şekil 9.11’de görüldüğü gibi güç akışı bakımından elektrikli araçların şarj sistemlerinde şebekeden araca (G2V), araçtan şebekeye

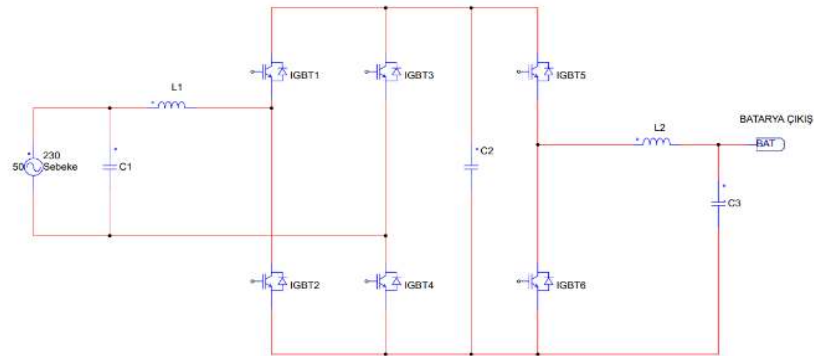
(V2G) ve araçtan eve (V2H) şeklinde üç farklı çalışma modu olduğu görülmektedir. Şebekeden eve (G2H) enerji akışı ise 4. çalışma modudur. Bu mod araçtan bağımsız olarak eve şebeke üzerinden enerji aktarılması durumunu ifade etmektedir (İşen ve Tarlak, 2018).



Şekil 9. 11. İki Yönlü Yerleşik Şarj Cihazı Güç Akışı Şeması

Yapılan tez çalışmasının konusu, evden bataryaya enerji aktarımı olduğundan yalnızca (G2V) modu, simülasyon ortamında incelenmiştir.

9.3.1. Topolojinin Çalışma Prensibi



Şekil 9. 12. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu İki Yönlü DA-DA Dönüştürücü, Devre Şeması

Şekil 9.12’de, görüldüğü üzere devre iki farklı modda çalışabilmektedir. Bunlardan ilki batarya şarj modu, ikincisi batarya deşarj modudur. Aracın V2H modunda çalışması durumunda bataryalardan şebekeye enerji aktarımı gerçekleşmektedir. Bu durumda, AA gerilimi doğrultmak için kullanılan IGBT yapısı tersine çalışarak DA bara gerilimini AA gerilime dönüştürmektedir.

Devre batarya şarj modunda çalışırken şebekeden DA barasına, DA barasından bataryaya olmak üzere iki noktada gerilim dönüşümü olmaktadır. İlk gerilim dönüşümü olan

AA-DA doğrultma işlemi için Bölüm 9.2’de modellenen köprüsüz kutuplu GFD yapısı kullanılmış ve 800V DA bara gerilimi elde edilmiştir.

AA gerilim doğrultulduktan ve yükseltildikten sonra DA bara gerilimi belirlenen batarya şarj gücü doğrultusunda düşürülmektedir. Şekil 9.12’de de gösterilen iki yönlü şarj devresini incelendiğinde IGBT5, IGBT6, L2 ve C3 elemanları ile gerilim düşürme işlemi gerçekleştirilmektedir. Devrenin bu bölümü şarj modunda ve düşürücü tip DA-DA dönüştürücü topolojisinde çalışmaktadır. IGBT5 e görev döngü oranı kadar PWM sinyali uygulanırken IGBT6’ya tersi PWM sinyali uygulanır.

Devre, batarya deşarj modunda çalışırken bataryadan DA barasına, DA barasından şebekeye olmak üzere, şarj modunda olduğu gibi iki farklı noktada gerilim dönüşümü olmaktadır. Bunlardan ilki batarya geriliminin DA bara gerilimine yükseltilmesidir. Şekil 9.12’de gösterilen iki yönlü şarj devresine yeniden dönülecek olunursa, IGBT5, IGBT6, L2 ve C2 elemanları kullanılarak gerilim yükseltme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu durumda devre yükseltici tip DA-DA dönüştürücü modunda çalışacaktır. Devrenin yükseltici tip DA-DA dönüştürücü modunda çalışması durumunda IGBT6’ya görev döngü oranı kadar PWM sinyali uygulanırken, IGBT5’e tersi sinyal uygulanmaktadır.

Araç bataryaları yeterli şarjda ve sistem üzerinden V2H modunda şebekeye enerji aktarımı yapılmak isteniyorsa DA bara geriliminin yeniden AA gerilimine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışma modunda, köprüsüz kutuplu GFD yapısında bulunan anahtarlama elemanlarına uygun anahtarlama sinyali verilerek DA bara geriliminden sinüzoidal AA gerilim üretilmektedir. Gerilim dönüşümü sırasında anahtarlama elemanlarının kontrolü için yaygın olarak SPWM benzeri algoritmaları kullanılmaktadır.

9.3.2. Devre Bileşenlerinin Belirlenmesi

- DA Bara Gerilimi: 800V
- Batarya Nominal Gerilimi: 360V
- Batarya Maksimum Gerilimi: 420V
- Gerilimi Dalgalanması: ($< \%1 = 4.2V$)
- Maksimum Çıkış Akımı: $2900W / 420V = 6.9A$
- Akım Dalgalanması: ($< \%5 = 0.35A$)
- Batarya Kapasitesi: 75.6kWh
- Şarj Oranı: 2.9kW

- Anahtarlama Elemanı: IGBT
- IGBT Seçimi:

IXYS, IXGH10N100U1, VCE: 1000V, ICMAX:20A, Td (açık/kapalı) @ 25°C 100ns/550ns, Test Verileri 800V, 10A, 150Ω, 15V, R_{açık} = VCE -Ic grafiğinden yaklaşık 125mΩ hesaplanmıştır.

- Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü Anahtarlama Algoritması: PI Kontrol Yöntemi

Düşürücü tip DA-DA dönüştürücü tarafında yapılacak olan kontrolde referans akımı takip edilerek çıkış akımının istenilen C değerine sabitlenmesi yeterli olacaktır. Bu nedenle yapılacak olan simülasyonda özel bir algoritma ihtiyacı bulunmamaktadır. Şekil 9.12’de gösterilen devrede IGBT5 ve IGBT6’nın tetiklenmesi için PI kontrolcü kullanılacaktır. Batarya akımı referans akımından çıkartılacak, sonuç PI denetleyiciden geçirilerek referans akımı için gerekli tetik sinyali üretilecektir.

- Anahtarlama Frekansı: 30KHz

Anahtarlama frekansı seçerken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Yüksek anahtarlama frekansı çıkışınızda düşük dalgalanma oranında gerilim elde etmenizi sağlar. Böylece çıkış kondansatörlerinizin değerini küçültmenize, maliyet ve alan tasarrufu sağlamanıza olanak tanır. Yüksek frekansta anahtarlamanın avantajları olduğu dezavantajları da bulunmaktadır. Transistörlerde önemli güç kayıpları, sadece açık ve sadece kapalı olması durumu arasındaki ara bölgede meydana gelir. Eğer bir transistör, çok sık açılıp kapanırsa, daha fazla güç harcanır ve verim düşer. Tüm bunlar değerlendirildiğinde kullanılacak olan yarı iletkenin veri sayfasından da yararlanılarak en optimal anahtarlama frekansı bulunmalıdır. Özellikle batarya şarjı gibi işlemlerde bu tip yapılardan beklenen yüksek verimdir. Son olarak kullanılacak olan transistor tipi de anahtarlama frekansını belirlemede önemli bir parametredir. Bu tasarımlarımda anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmaktadır. IGBT’ler ortalama 20kHz ile 50kHz aralığında çalışmaktadır. Tüm bu bilgilerden yola çıkılarak sistem anahtarlama frekansı, ortalama bir değer seçilerek 30kHz olarak belirlenmiştir.

- Bobin Hesabı:

$$\text{Denklem 8.6, } V_{\text{çıkış}} = V_{\text{giriş}} * D \rightarrow D = \frac{420}{800} = 0.525$$

$$\text{Denklem 8.3, } L \geq \frac{V_{\text{Giriş}}(1-D)D}{\text{dalgalanma akımı} * f} \rightarrow \frac{800(1-0.525)0.525}{0,35.30000} = 19mH$$

- Bobin Seçimi:
Hammond Manufacturing, 195M10, Sabit Bobin, 20mH, 10A, 13 mΩ
- Kondansatör Hesabı:

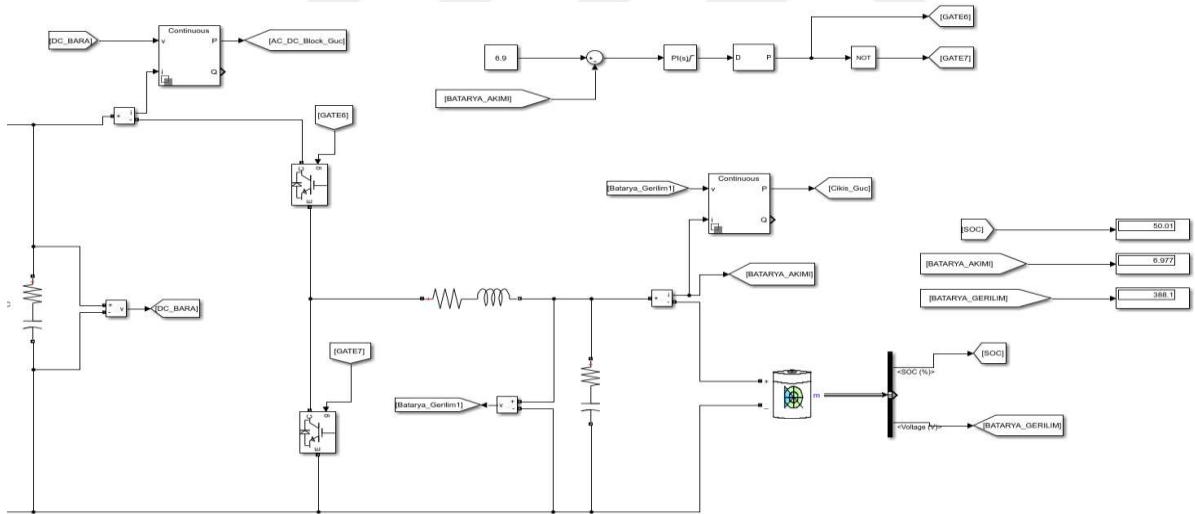
$$\text{Denklem 8.5, } C \geq \frac{V_{giriş}(1-D)D}{8Lf^2 \text{ dalgalanma gerilimi}} \rightarrow \frac{800(1-0,525)0,525}{8.20.10^{-3}.30000^2.4,2} = 320nF$$

- Kondansatör Seçimi:
KEMET, C4AULBU4330M1WK, CAP FILM, 3.3uF, Tolerans 10%, 500VDA, 17.2 mΩ

Seçilen bobin, kondansatör ve IGBT değerleri simülasyon ortamına aktarılmıştır.

9.3.3. Modelleme Çıktıları

Sistem batarya şarj modunda çalışırken DA-DA dönüştürücü blok düşürücü tip DA-DA dönüştürücü topolojisinde çalışmaktadır. Bu kapsamda DA-DA dönüşüm bloğu ve PI kontrol bloğu simülasyon ortamına aktarılmış, giriş 800V DA bara çıkışına bağlanmıştır. Şekil 9.13'te iki yönlü şarj devresi için simülasyon ortamında modellenen devre şeması gösterilmektedir.



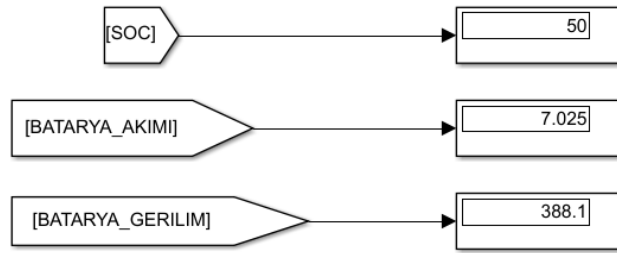
Şekil 9.13. İki Yönlü Şarj Devresi ve PI Kontrol Bloğu

Bataryalar bölümünde değinildiği üzere lityum iyon bataryaların 3 aşamada şarj edilmesi önerilmektedir. Bu aşamalar sabit akım şarjı, sabit gerilim şarjı ve sonlandırma şarjı aşamalarıdır. Sabit akım şarjı aşamasında batarya kapasitesi %80 seviyeye kadar artırılır ve sabit gerilim aşamasına geçilir. Sabit akım şarjı sırasında batarya şarj akımının 0.5C seviyelerinde olması önerilir. Bu durum yerleşik şarj sistemlerinde çok mümkün değildir. Sebebi 0.5C oranının yüksek güç aktarımı gerektirmesidir.

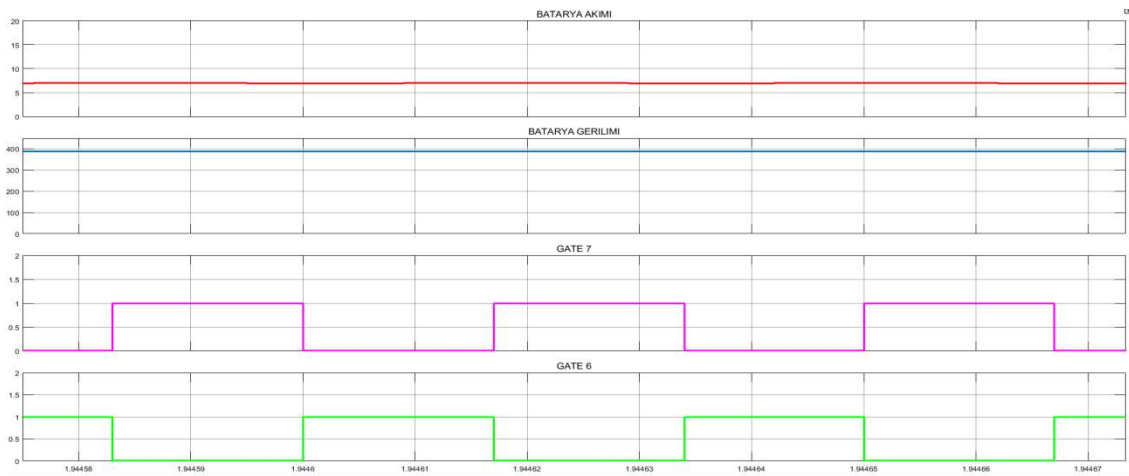
Tasarım sırasında batarya kapasitesi toplam 180mAh olarak belirlenmiştir. 0.5C aktarım durumunda DA barasından 90A akım çekilmesi gerekecek, batarya maksimum seviyeye yaklaştığında ihtiyaç duyulan güç yaklaşık, $90A \times 420V = 37800W$ olacaktır. Yerleşik şarj cihazlarında bu kadar yüksek seviyede güç aktarımı mümkün değildir.

Tez çalışmasında Seviye 1 Şarj için ortalama 2900W güç aktarımı yapılmaktadır. Bu durumda maksimum şarj oranı yaklaşık 0.083C seviyesinde olacaktır. Lityum iyon bataryalar tepe gerilimine kadar bu oranda güvenli bir şekilde şarj edilebilir. Batarya grubu 420V olan tepe gerilimine ulaştığında batarya kontrol algoritmaları ile şarj akımı kontrol edilmeli, oran 0,002C – 0,007C seviyelerine gerilediğinde şarj sonlandırılmalıdır.

Yapılan çalışmada batarya doluluk oranı %50'ye sabitlenmiştir ve şarj işlemi başlatılmıştır. Şekil 9.14'te batarya akımı, şarj durumu ve batarya gerilimi için durum ekranları gösterilmektedir.



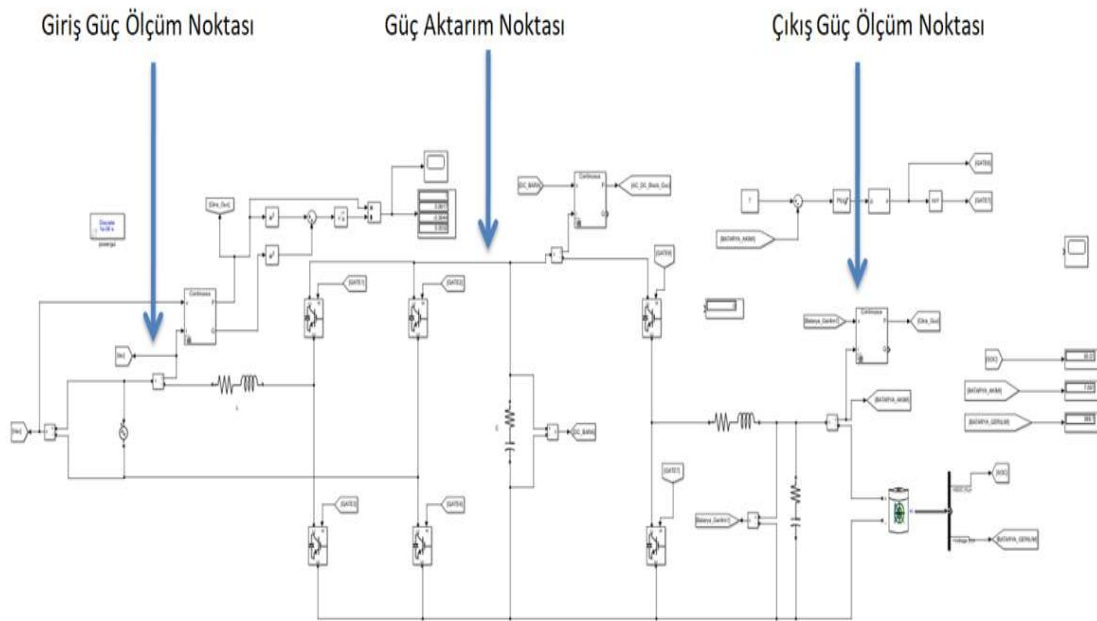
Şekil 9. 14. İki Yönlü Şarj Devresi için Batarya Durum Göstergesi



Şekil 9. 15. İki Yönlü Şarj Devresi için Batarya Akımı, Batarya Gerilimi, Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücü Anahtarlama Sinyali (Gerilim, Akım-Zaman Grafiği)

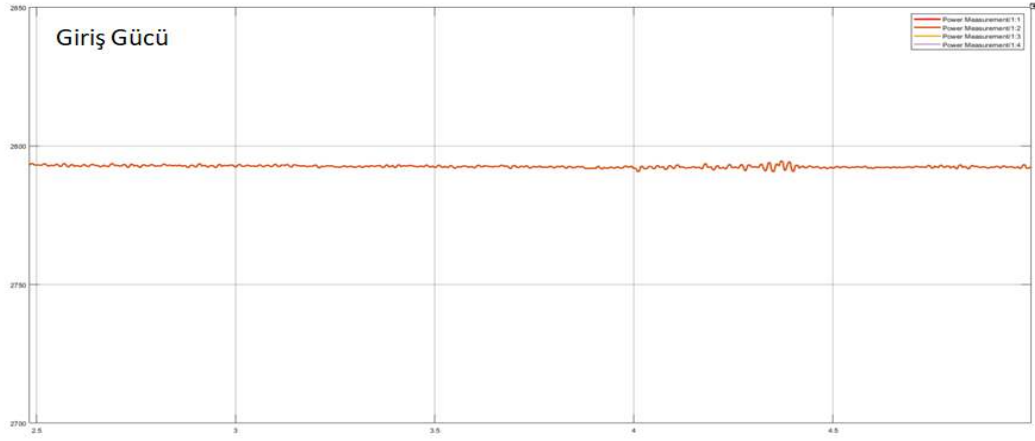
Şekil 9.15'te yaklaşık 2900W güç aktarımı sırasında anahtarlama sinyali, batarya gerilimi ve batarya akımı gösterilmektedir.

Devrede 3 farklı noktada aktif güç ölçümü yapılmaktadır. İlk ölçüm noktası giriş güç ölçüm noktasıdır. Bu nokta sistemin girişidir ve henüz kayıplara uğramamış aktif gücü ölçülmektedir. İkinci nokta güç aktarım noktası olarak isimlendirilmiştir. Güç aktarım noktası, köprüsüz kutuplu GFD çıkışıdır. Bu noktada ölçülen güç ile giriş gücü ölçüm noktasında ölçülen güç arasındaki fark, GFD işlemi için kullanılan bobin, kondansatör ve anahtarlama elemanlarının sebep olduğu kayıpların bilgisini vermektedir. Üçüncü ve son nokta ise düşürücü tip DA-DA dönüştürücü çıkışı veya batarya girişini ifade eden çıkış gücünün ölçüm noktasıdır. Bu noktada yapılan ölçüm ile güç aktarım noktasında yapılan ölçüm arasındaki fark, gerilim düşürme işlemi sırasında kullanılan bobin, kondansatör ve anahtarlama elemanlarının sebep olduğu güç kayıplarının bilgisini içermektedir. Şekil 9.16'da devrenin tam şeması üzerinde ölçüm noktaları belirtilmiştir.

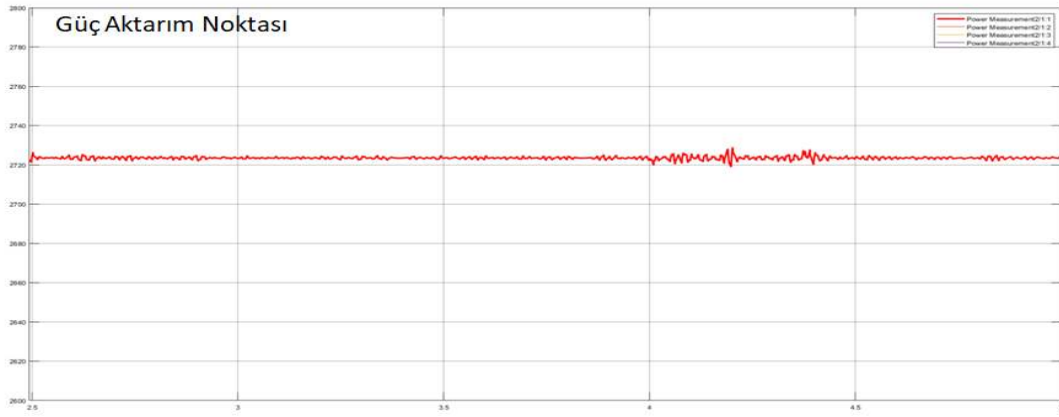


Şekil 9. 16. İki Yönlü Şarj Devresi Güç Ölçüm Noktaları

Şekil 9.17'de giriş noktasında ölçülen gücün grafiği görülmektedir. Bu noktadaki ölçüm şebekeden çekilen aktif güç miktarını ifade etmektedir. Grafikte görüldüğü üzere %50 dolu bataryayı yaklaşık ortalama 6.9A akım ile şarj etmek için şebekeden çekilen aktif güç ortalama 2790W miktarındadır.

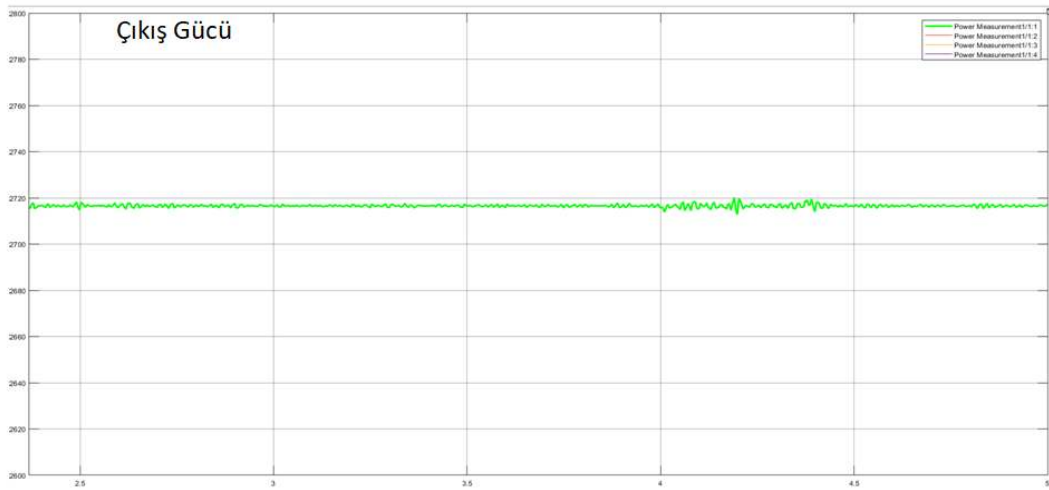


Şekil 9. 17. İki Yönlü Şarj Devresi Giriş Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği)



Şekil 9. 18. İki Yönlü Şarj Devresi Güç Aktarım Noktası (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

Şekil 9.18’de güç aktarım noktasında ölçülen gücün grafiği görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere bu noktada ölçülen güç ortalama 2725W miktarındadır.



Şekil 9. 19. İki Yönlü Şarj Devresi Çıkış Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

Şekil 9.19'da çıkış güç ölçüm noktasının grafiği görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere bu noktada ölçülen güç ortalama 2715W miktarındadır.

Sistemde toplam aktif güç kaybı, giriş güç ölçüm noktasında ölçülen aktif güç ile çıkış güç ölçüm noktasından ölçülen aktif güç arasındaki fark kadardır.

$$\text{Toplam Aktif Güç Kaybı: } 2795\text{W} - 2715\text{W} = 80\text{W}$$

$$\text{AA-DA Düşürücü Bloğu Kayıpları: } 2795\text{W} - 2725\text{W} = 70\text{W}$$

$$\text{DA-DA Düşürücü Bloğu Kayıpları: } 2725\text{W} - 2715\text{W} = 10\text{W}$$

Hesaplamalar sonucunda AA-DA bloğunda enerji kayıplarının DA-DA bloğundan çok daha fazla olduğunu görülmektedir. Bu durumun birden fazla nedeni bulunmaktadır. İlk neden AA-DA bloğunda bulunan bobinin iç direnci DA-DA bloğunda bulunan bobinin iç direncinden yaklaşık 2 katı oranında fazladır.

İkinci ve en önemli sebebi anahtarlama elemanlarının fazlalığı ve anahtarlama gerilimidir. DA-DA bloğunda bir noktada anahtarlama yapılmıyorken AA-DA bloğunda dört noktada anahtarlama yapılmaktadır. Ayrıca AA-DA bloğunda bulunan anahtarlar üzerindeki gerilim stresi DA-DA bloğunda bulunan anahtar üzerindeki gerilim stresinin yaklaşık iki katı kadardır. Bu durumlar AA-DA bloğundaki anahtarlama kayıplarının DA-DA bloğuna kıyasla çok daha fazla artmasına neden olmaktadır.

Son olarak Şekil 9.20'de sistemde ölçülen güç katsayısının $\cos\phi = 0.9917$ olduğu görülmektedir. Ölçülen değer doğrultusunda görünür güç;

$$S = 2795\text{W} / 0,9917 = 2815\text{VA} \text{ olarak hesaplanmaktadır.}$$



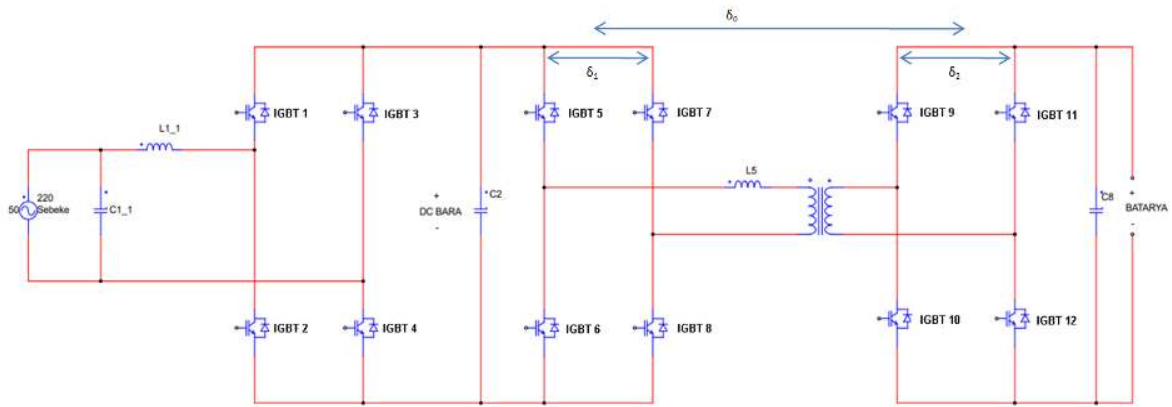
Şekil 9. 20. İki Yönlü Şarj Devresi için Güç Faktörü

9.4. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu Çift Aktif KöprülÜ Şarj Devresi

Köprüsüz kutuplu GFD doğrultuculu çift aktif köprülÜ dönüştürücü, yüksek verimli ve çift yönlü DA-DA dönüştürücüsüdür ve yüksek frekansta bir transformatör ile izole edilmiştir. Birçok DA-DA dönüştürücü ile karşılaştırıldığında, yüksek güç yoğunluğu, basit uygulama, düşük sayıda pasif bileşen (endüktans, kapasite) ve sıfır voltaj anahtarlama (ZVS) özellik gibi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajları özellikle yüksek güç uygulamaları için yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Bu bağlamda çift aktif köprülÜ dönüştürücü topolojisi, bu özelliklerinden dolayı yerleşik şarj cihazında da sıklıkla tercih edilmektedirler.

9.4.1. Topolojinin Çalışma Prensibi

İki yönlü çift aktif köprü DA-DA dönüştürücünün temel çalışma prensibi, dönüştürücünün birincil ve ikincil köprüsünde bulunan IGBT/MOSFET'lerin anahtarlama sinyallerinin, bir kontrol sistemi ile kontrol edilerek çift yönlü çalıştırılmasına dayanmaktadır (Öztürk vd., 2022). İki yönlü çift aktif köprü DA-DA dönüştürücü devre şeması Şekil 9.21'de gösterilmiştir. İki yönlü aktif köprülÜ dönüştürücüler izoleli ve izolesiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İzolesiz dönüştürücülerin giriş ve çıkışları doğrudan birbirlerine bağlıdır. İzoleli dönüştürücülerin giriş ve çıkışları arasında transformatör gibi izole yapılar bulunmaktadır. Devrede belirtilen L_5 , transformatörde bulunan kaçak endüktansı ifade etmektedir. Bu devrelere, L_5 bobin değeri yeterli olmadığı takdirde ek bir şok endüktansı eklenebilir.



Şekil 9. 21. Köprüsüz Kutuplu GFD Doğrultuculu Çift Aktif KöprülÜ DA-DA Dönüştürücü Devre Şeması

Devrenin çalışması incelenecek olursa, transformatörün birincil sargı tarafında bulunan IGBT5, IGBT6, IGBT7, IGBT8, transistörleri ile DA barasından alınan gerilim

transformatörün girişinde AA gerilimine dönüştürülür. Devamında ikincil sargı tarafında bulunan IGBT9, IGBT10, IGBT11, IGBT12 transistörleri ile transformatörün çıkışında oluşan AA gerilim doğrultularak bataryalara aktarılır. Devrede bulunan transistörler faz kaydırma modülasyonu ile anahtarlanmaktadır. Faz kaydırma modülasyonu için, tek fazlı kaydırma (SPS), iki faz kaydırma (DPS), genişletilmiş faz kaydırma (EPS) ve üç faz kaydırma (TPS) yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Öztürk vd., 2022).

9.4.1.1. Tek Fazlı Kaydırma Yöntemi (SPS Modulation)

Bu yöntemde, Şekil 9.21’de gösterilen devre için transformatörün sol ve sağ tarafında bulunan ve birbirlerine çapraz bağlı anahtar çiftleri aynı fazda ve %50 oranda açılırlar. Böylece birbirlerine çapraz bağlı anahtarlar aynı zamanda, birbirlerine seri bağlı anahtarlar tümleyici zamanda anahtarlanmış olur. SPS modülasyonunda kontrol büyüklüğü olarak, sadece köprüler arası faz farkı (δ_0) kullanılır.

9.4.1.2. Genişletilmiş Faz Kaydırmalı Modülasyon (EPS Modulation)

EPS kontrol yöntemi, SPS yönteminin geliştirilmiş halidir. Şekil 9.21’de gösterilen devrede, transformatörün sol ve sağ tarafında bulunan köprü içi çapraz bağlı anahtar çiftleri %50 oranda açılırlar. SPS yönteminden farklı olarak sol veya sağ tarafta bulunan anahtarlama sinyalleri arasına faz farkı yerleştirilir (δ_1 veya δ_2). Bu faz farkı, ikinci kontrol büyüklüğü olarak sisteme ilave edilir.

9.4.1.3. İkili Faz Kaydırmalı Modülasyon (DPS Modulation)

DSP kontrol yönteminde, Şekil 9.21’de gösterilen devrenin her iki tarafında bulunan çapraz bağlı anahtar çiftleri %50 oranda açılırlar. Bu yöntemde transformatörün solunda ve sağında bulunan anahtar çiftlerinin arasına eşit değerde ($\delta_1 = \delta_2$) faz farkı eklenir. SPS yönteminde olduğu gibi ikinci kontrol büyüklüğü sisteme eklenmiş olur.

9.4.1.4. Üçlü Faz Kaydırmalı Modülasyon (TPS Modulation)

TPS kontrol yönteminde, Şekil 9.21’de gösterilen devrenin her iki tarafında bulunan çapraz bağlı anahtar %50 oranda açılırlar. Bu yöntemde transformatörün solunda ve sağında bulunan anahtar çiftlerinin arasına DSP yönteminde olduğu gibi faz farkı eklenir fakat iki tarafın faz farkı birbirine eşit değildir ($\delta_1 \neq \delta_2$). Her iki köprüde oluşturulan faz farkı

birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmektedir. Böylece diğer yöntemlerden farklı olarak TPS yönteminde toplam kontrol büyüklüğü sayısı üç adettir (Demirel, 2019).

Simülasyon çalışmasında ikili faz kaydırmalı modülasyon (DPS) kullanılacaktır. Bu yöntem doğrultusunda, Şekil 9.22’de belirtilen faz kaydırmalı anahtarlama senaryosu devreye uygulanacaktır. Girişte bulunan IGBT5-IGBT8, IGBT6-IGBT7 transistörlerine eşit, %50 oranda ve faz kaydırılmış anahtarlama sinyali verilmektedir.

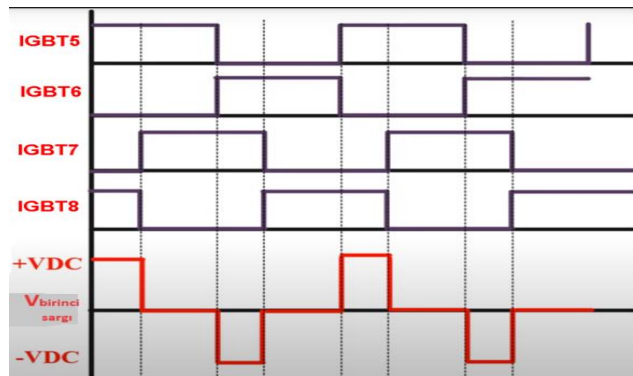
Bu durumda ilk olarak, Şekil 9.21’te görüldüğü üzere IGBT5 ve IGBT8 açık duruma gelecek, transformatörün gerilimi DA bara gerilimine eşit olacaktır.

İkinci olarak IGBT5 ve IGBT7 açık durum geçecek, transformatörün birincil sargı uçları kısa devre olacak ve üzerindeki gerilim sıfırlanacaktır.

Üçüncü durumda IGBT6 ve IGBT7 transistörleri aynı anda açılacak bu nedenle transformatör girişindeki gerilim DA bara gerilimine eşit olacaktır.

Son durumda ise IGBT7 ve IGBT8 transistörleri aynı anda açılacak, transformatörün birincil sargı tarafı yeniden kısa devre olacak ve üzerine düşen gerilim sıfırlanacaktır.

IGBT5 ve IGBT7 arasındaki faz kaydırma oranını ayarlayarak (δ_1) transformatörün birincil sargısına düşen gerilim değeri değiştirilebilir. Bu durumda transformatörün ikincil sargı geriliminin de değişeceğinden çıkış geriliminin δ_1 ile orantılı değiştiği sonucuna ulaşılır.



Şekil 9. 22. Çift Aktif Köprülü DA-DA Dönüştürücü Faz Kaydırma Modülasyonu

Şekil 9.22’de transformatörün birincil sargı tarafında oluşacak değişken gerilimin görülmektedir. Zamanla yönü ve büyüklüğü değişen bu gerilim, transformatörün ikincil sargı tarafında yine zamanla yönü ve büyüklüğü değişen başka bir gerilim meydana getirecektir. Transformatörün ikincil sargı tarafında bulunan transistörler DPS yönteminde belirtildiği üzere, $\delta_1 = \delta_2$ olacak şekilde girişteki transistörler ile aynı fazda tetiklenmekte, böylece ikinci sargı uçlarında oluşan AA gerilimi DA gerilime dönüştürmektedir.

9.4.2. Devre Bileşenlerinin Belirlenmesi

Devre Bileşenlerinin Hesaplanması:

- DA Bara Gerilimi: 800V
- Batarya Nominal Gerilimi: 360V
- Batarya Maksimum Gerilimi: 420V
- Gerilimi Dalgalanması: ($< \%1 = 4.2V$)
- Maksimum Çıkış Akımı: $2900W / 420V = 6.9A$
- Akım Dalgalanması: ($< \%5, 0.35A$)
- Batarya Kapasitesi: 75.6kWh
- Şarj Oranı: 2.9kW
- Anahtarlama Yöntemi: İkili Faz Kaydırmalı Modülasyon
- Anahtarlama Elemanı: IGBT
- Anahtarlama Frekansı: 30KHz
- IGBT Seçimi:

IXYS, IXGH10N100U1, V_{CE} : 1000V, $I_{C_{MAX}}$: 20A, T_d (açık/kapalı) @ 25°C 100ns/550ns, Test Verileri 800V, 10A, 150Ω, 15V, $V_{CE}-I_c$ grafiğinden R_{on} direnci yaklaşık 125mΩ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 9.21’de gösterilen devreye ek olarak batarya üzerine akan akımı filtrelemek için, çıkışa seri filtre bobini eklenebilir.

Çıkış Bobin Hesabı:

Denklem 8.7, $L = \frac{V_L D T_s}{I_{dalgalanma\ akımı}}$

$$D = \frac{1}{2} * \frac{V_{çıkış}}{V_{çıkış\ maks}} \rightarrow D = \frac{1}{2} * \frac{300}{420} = 0,35$$

$$T_s = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{30000} = 3,3.10^{-5}$$

Transformatör çıkışı maksimumda ve batarya gerilimi minimum değerinde iken bobin üzerine düşen gerilim;

$$V_L = 420V - 300V = 120V$$

$$L \geq \frac{V_L D T_s}{I_{dalgalanma}} \rightarrow 120 \frac{0,35 \cdot 3,3 \cdot 10^{-5}}{0,35} \approx 4mH$$

- Çıkış Bobin Seçimi:

Hammond Manufacturing, 195J10, Sabit Bobin, 10mH, 10A, 70 mΩ

Çıkış Kondansatör Hesabı:

$$C_{\text{çıkış}} \geq I_{dalgalanma} \frac{D T_s}{V_{dalgalanma}} \quad (9.3)$$

$$C_{\text{çıkış}} \geq 0,35 \frac{0,35 \cdot 3,3 \cdot 10^{-5}}{4,2} \approx 1\mu F$$

- Çıkış Kondansatör Seçimi:

EPCOS - TDK Electronics, B32674D8225K000, 2.2 μF Film Kondansatör 875V, ESR: 10.3 mΩ

- Transformatör Oranı:

$$V_{\text{birincil sargı}}: \frac{800}{\sqrt{2}} = 565VAC$$

$$V_{\text{ikincil sargı}}: \frac{420}{\sqrt{2}} = 297VAC$$

- Transformatör Oranı: 297/565 = 0,525

Çift aktif köprülü şarj yönteminde kullanılan transformatörler yüksek frekansta çalışabilme özelliğine sahip olmalıdırlar. Piyasada bulunan transformatörler genelde 50Hz-60Hz aralığında çalışırlar ve bu iş için uygun değildirler. Yüksek frekanslı transformatörler, elektrikli araç yerleşik şarj cihazları gibi uygulamalar için özel olarak üretilir. Bu kapsamda (Murata Innovator in Electronics, 2023) katalogta paylaşılan Murata markasının yüksek frekans, yüksek güç transformatörleri bu uygulama için referans olarak kullanılmaktadır. Bu transformatörler elektrikli araç şarj sistemleri uygulamaları için özel olarak üretilmektedirler. Ürün kataloğu incelendiğinde transformatörlerin giriş gerilimleri 50V - 1100V arasında seçilebilmektedir. Ayrıca çıkış oranları 1:1 ila 10:1 seçilebilirken 6kV'a kadar giriş çıkış izolasyonu sağlanmaktadır. Ürün kataloğunda sarım direnci ve endüktansı hakkında bilgi verilmemiştir fakat çalışma verimleri %99.5 olarak belirtilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada transformatörün sarım direnci ve endüktans parametreleri simülasyon sırasında kayıp oluşturmayacak değere ayarlanmıştır. Bu kapsamda transformatör için rezistif kayıplar, dielektrik kayıpları ve demir kayıpları katalogta belirtildiği gibi %0.5 olarak

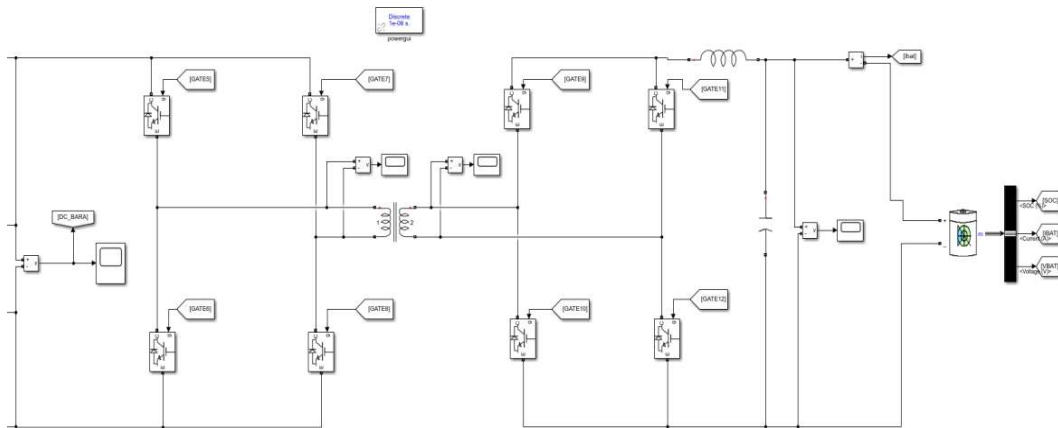
değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda seçilen, bobin, kondansatör, IGBT ve transformatör verileri simülasyon ortamına aktarılmıştır.

9.4.3. Modelleme Çıktıları

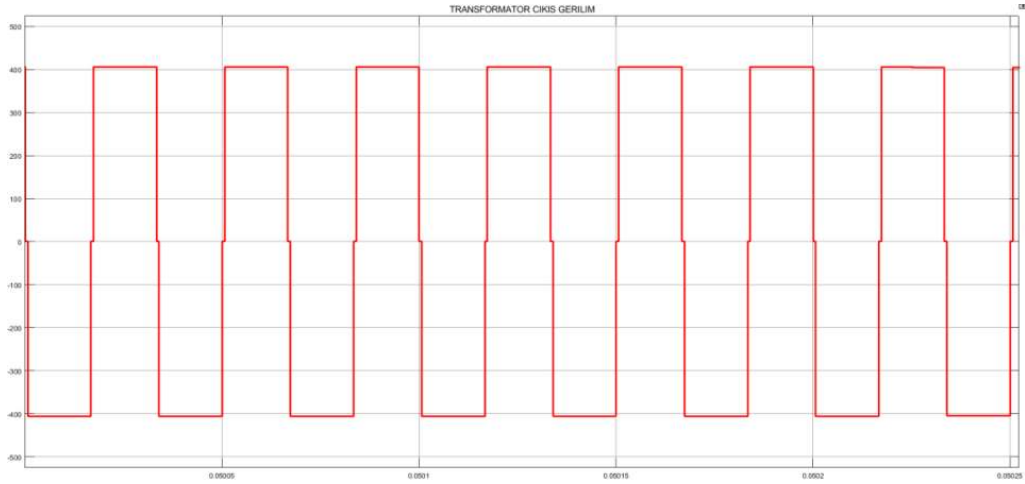
Tasarım iki yönlü şarj sisteminde olduğu gibi batarya %50 dolulukta iken ortalama 6.9Ah enerji transferi olacak şekilde simülasyon ortamına aktarılmıştır. Bu durumda şebekeden bataryaya yaklaşık 2900W güç aktarımı sağlanması hedeflenmektedir. Transformatör girişinde AA gerilimi oluşturmak ve sonrasında çıkışında bu gerilimi doğrultmak için faz kaydırmalı modülasyon (DPS) yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntemin uygulamasında ilk olarak ölçülen batarya gerilimi referans gerilimden çıkartılır ve sonuç PI denetleyicisinden geçirilir. Çıkan sonuç, belirlenen çıkış akımının maksimum ve minimum değerleri aralığında sınırlandırılır ve batarya akımından çıkartılır. Buradan elde edilen çıkış sinyali yine bir PI denetleyiciden geçirilir. Son aşamada, PI denetleyiciden geçirilen bu sinyal, maksimum faz kayması olan 0° – 180° aralığında sınırlandırılır.

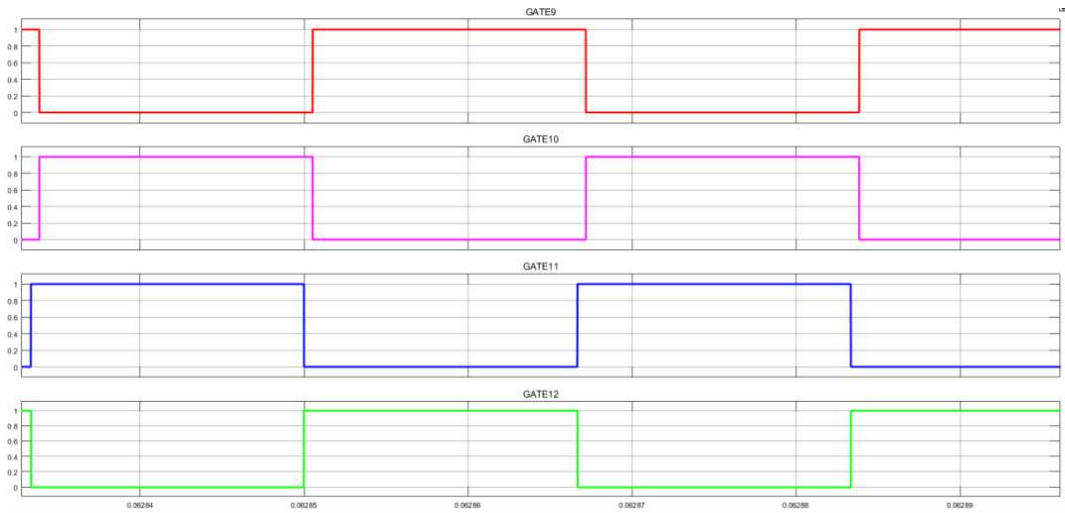
Bu işlemler sonucunda istenilen çıkış akım seviyesi için gerekli olan faz kayması ile birlikte, 30kHz frekansta IGBT'ler anahtarlanmaktadır. Anahtarlama için gerekli PWM sinyali bir fonksiyon bloğu tarafından üretilmektedir. Bloğa girdi olarak verilen anahtarlama frekansını ve kayma miktarını kullanarak istenilen frekans ve kayma oranında 2 adet sinyal çıkartacak şekilde kodlanmıştır. Devre girişi daha önce tasarımı yapılan 800V DA bara gerilimine bağlanmıştır. Şekil 9.23 ve Şekil 9.24'te çift aktif köprülü şarj devresi için simülasyon ortamında modellenen devre şeması gösterilmektedir.



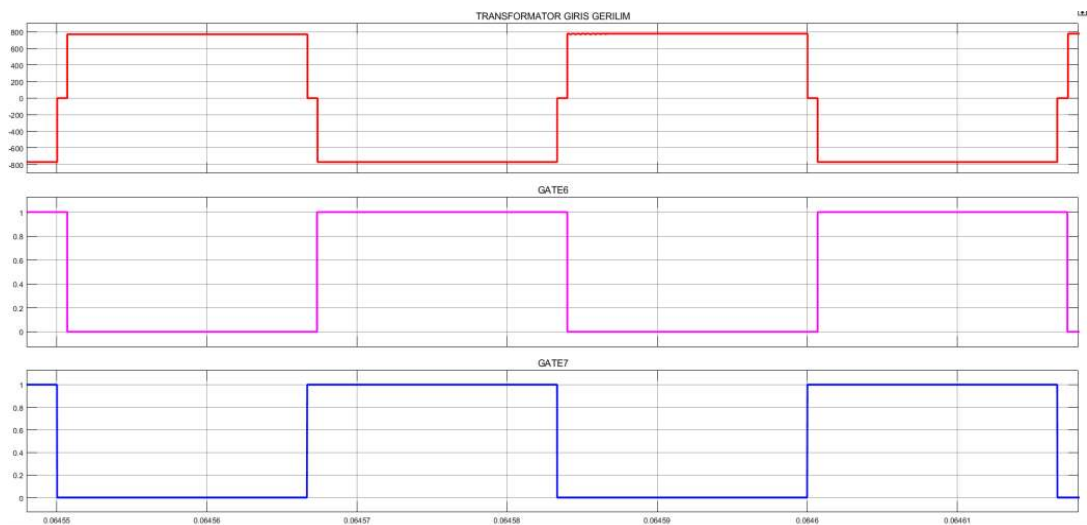
Şekil 9. 23. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi



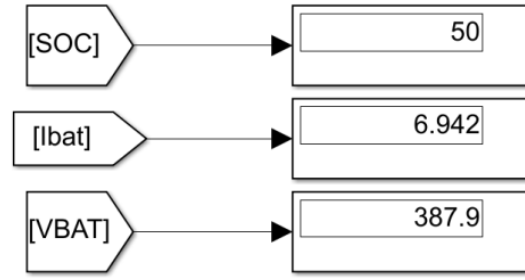
Şekil 9. 27. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Transformör Çıkış Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği)



Şekil 9. 28. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Çıkış Köprüsü Faz Kaydırılmış Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)



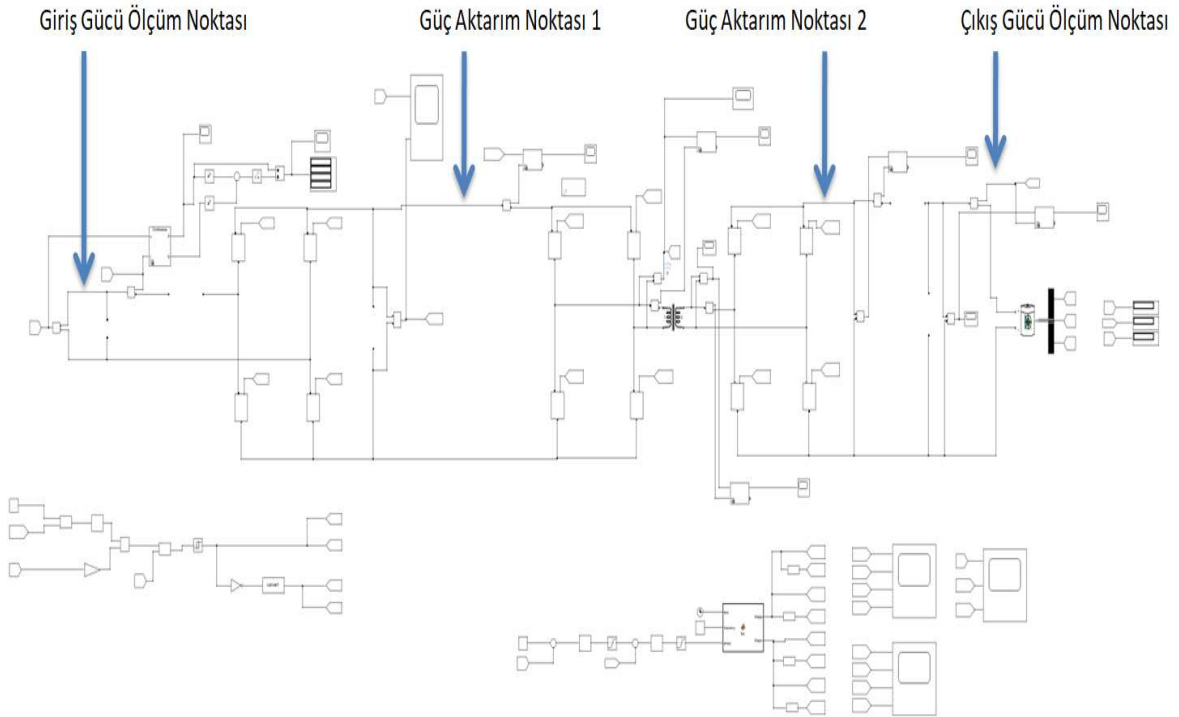
Şekil 9. 29. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Transformör Giriş Gerilimi – Faz Kaydırılmış Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)



Şekil 9.30. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Batarya Durum Göstergesi

Şekil 9.25, Şekil 9.26, Şekil 9.27, Şekil 2.28 ve Şekil 9.29’da modelleme sonucunda alınan giriş ve çıkış grafikleri gösterilmektedir. Şekil 9.30’da ise batarya akımı, şarj durumu ve batarya gerilimi için durum ekranları gösterilmektedir.

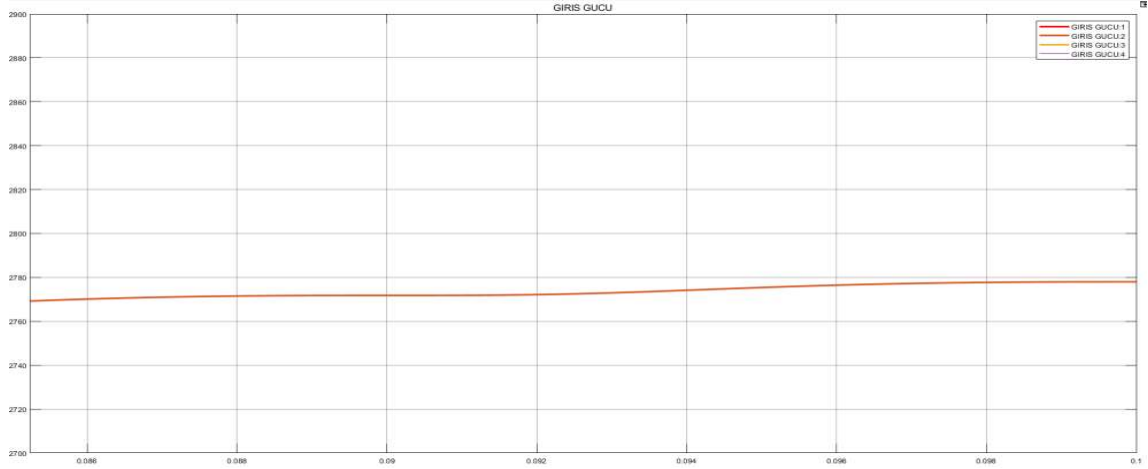
Verilen grafikler incelendiğinde topolojinin istenildiği gibi çalıştığı görülmektedir. Bu kapsamda verim analizi için 4 noktada aktif güç ölçümü yapılmaktadır. Şekil 9.31’de devrenin tam şeması üzerinden ölçüm yapılan noktalar belirtilmiştir.



Şekil 9.31. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Güç Ölçüm Noktaları

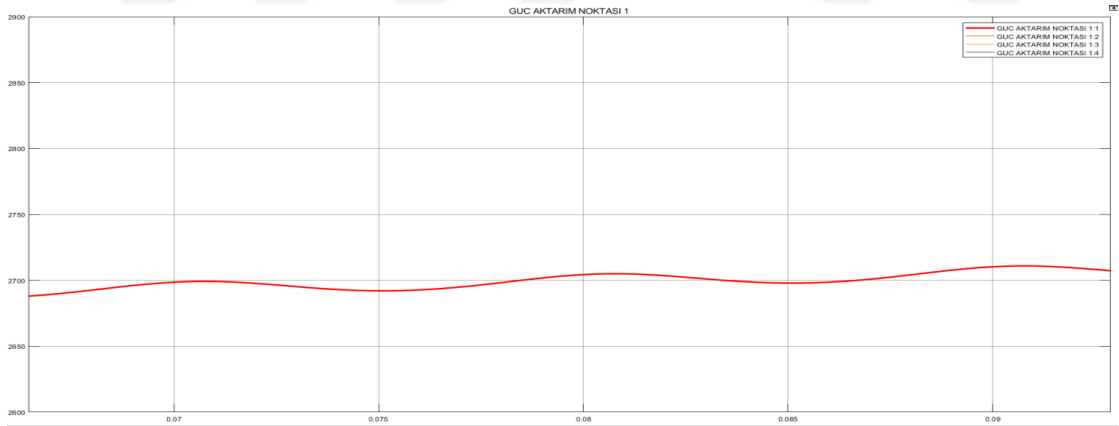
Ölçüm yapılan ilk nokta AA uygulanan giriş noktasıdır. Bu noktadan yapılan ölçüm batarya paketine ortalama 6.9Ah enerji aktarımı için gerekli şebekeden çekilen aktif güç miktarını ifade etmektedir.

Şekil 9.32’de giriş noktasından ölçülen aktif güç - zaman grafiği gösterilmiştir. Bu noktada ölçülen aktif güç ortalama 2770W’dır.



Şekil 9. 32. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Giriş Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

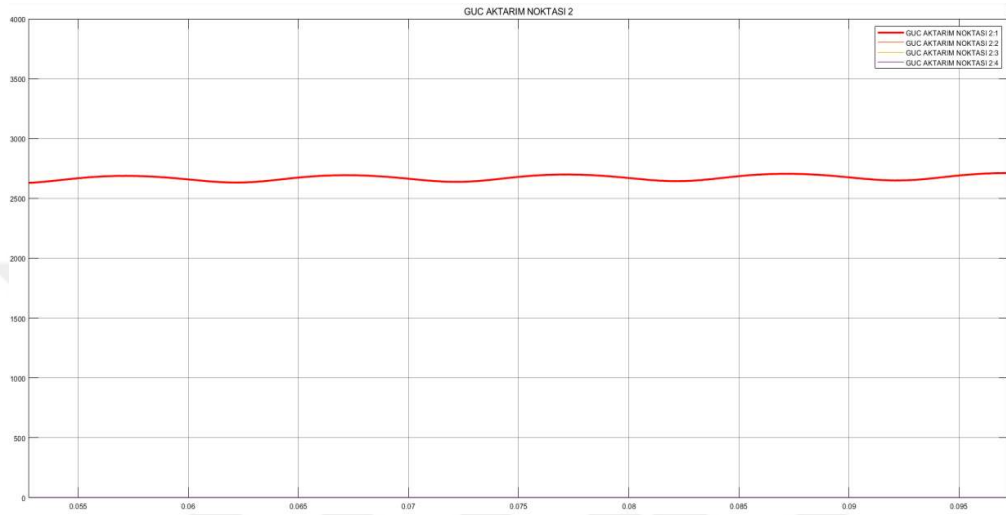
İkinci nokta güç aktarım noktası 1 olarak isimlendirilmiştir. 800V DA bara geriliminin oluşturulduğu noktadır. Bu noktada ölçülen güç ile girişte ölçülen güç arasındaki fark, GFD devresinden kaynaklı meydana gelen omik ve anahtarlama kayıplarını ifade etmektedir. Şekil 9.33’te güç aktarım noktası 1 için güç grafiği gösterilmiştir. Ölçülen aktif güç ortalama 2700W’dır.



Şekil 9. 33. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Güç Aktarım Noktası 1 (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

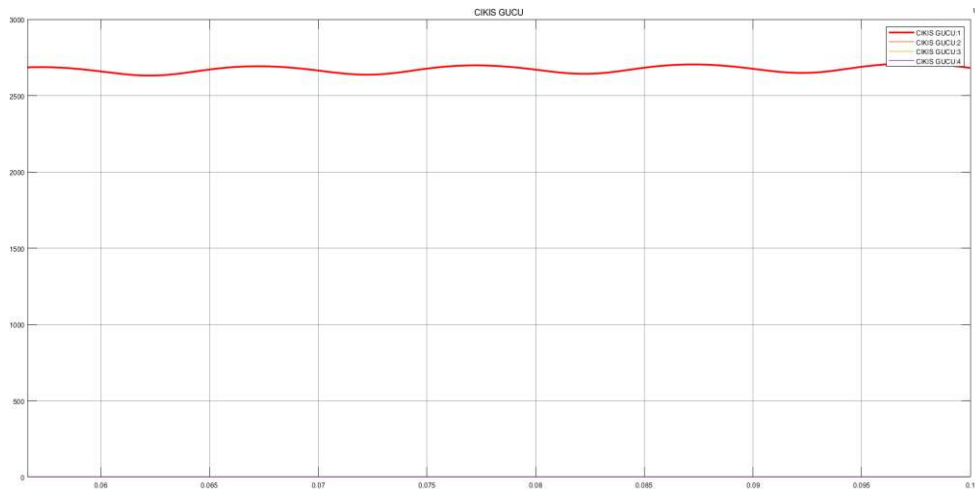
Üçüncü nokta ölçülen güç, güç aktarım noktası 2 olarak isimlendirilmiştir. Transformatör çıkışında oluşan AA geriliminin doğrultulduğu noktadır. Bu noktada ölçülen güç ile güç aktarım noktası 1’de ölçülen güç arasındaki fark DA bara geriliminin AA gerilime dönüştürülmesi ve tekrardan doğrultulması sırasında oluşan anahtarlama kayıplarını ifade etmektedir. Bu kayıplara ek olarak, bu iki nokta arasında transformatör kayıpları bulunmaktadır. Transformatör seçimi bölümünde bahsedildiği üzere transformatör

parametreleri kayıp oluşturmayacak değerlere ayarlamıştır. Seçilen transformatörün verileri doğrultusunda transformatör kayıpları %0.5 olarak verildiğinden bu noktada oluşan aktif güç kaybına, %0.5 transformatör kayıpları eklenecektir. Şekil 9.34’ de güç aktarım noktası 2 için aktif güç - zaman grafiği gösterilmiştir. Grafiğe göre ölçülen aktif güç ortalama 2675W’dır. Ölçülen güç üzerinden transformatör kayıpları, $2675W * \%0,5 = 13,4W$ olarak hesaplanmaktadır. Bu değer çıkış gücünden çıkartılacaktır.



Şekil 9. 34. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Güç Aktarım Noktası 2 (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

Son ölçüm noktası çıkış noktasıdır. Çıkış noktası batarya şarj girişinin ölçüldüğü noktadır. Bu noktada ölçülen güç ile güç aktarım noktası 2’de ölçülen güç arasındaki fark batarya akım ve gerilimini filtrelemek için kullanılan bobin ve kondansatör kaynaklı kayıpları ifade etmektedir. Şekil 9.35’te çıkış noktası için aktif güç - zaman grafiği gösterilmiştir. Grafiğe göre ölçülen aktif güç ortalama 2670W’dır.



Şekil 9. 35. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi Çıkış Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

Sistemde toplam aktif güç kaybı, giriş noktasından ölçülen güç ile çıkış noktasından ölçülen güç arasındaki farka %0,5 trafo kayıpları olan 13,4W değerinin eklenmesi ile bulunur.

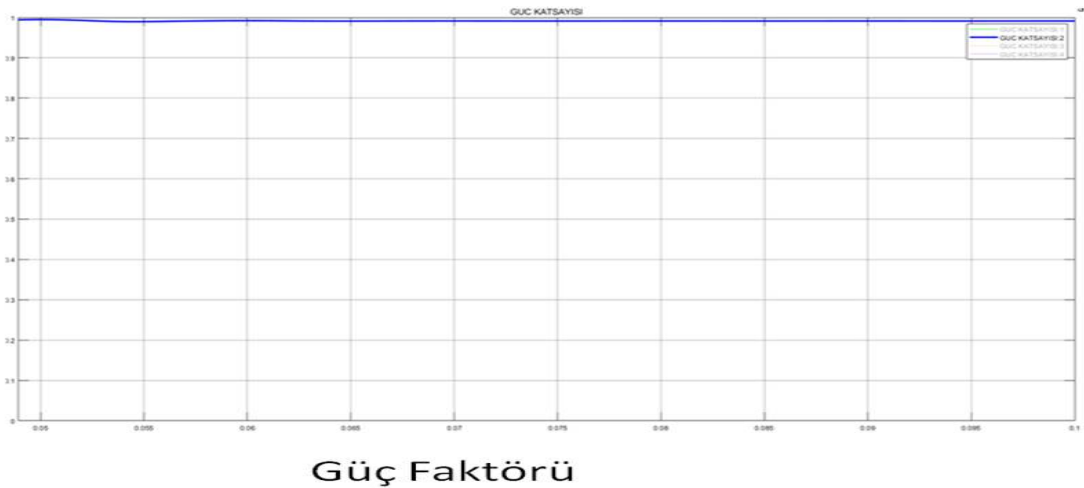
$$\text{Toplam Aktif Güç Kaybı: } (2770\text{W} - 2670\text{W}) + 13,4\text{W} = 113,4\text{W}$$

$$\text{AA-DA Dönüştürücü Blok Kayıpları: } 2770\text{W} - 2700\text{W} = 70\text{W}$$

$$\text{DA-AA, AA-DA Blok + Transformatör Kayıpları: } 2700\text{W} - 2675\text{W} + 13,4\text{W} = 38,4\text{W}$$

$$\text{Çıkış Filtresi: } 2675\text{W} - 2670\text{W} = 5\text{W}$$

Hesaplamalar sonucunda en fazla kayıp miktarının iki yönlü şarj devresinde olduğu gibi GFD bloğunda olduğu görülmektedir. Burada yine bobin iç direnci ve anahtarlama kaynaklı kayıplar diğer bloklara kıyasla daha fazladır. Faz kaydırma yönteminde birden fazla noktada anahtarlama yapılıyor olmasına rağmen anahtarlama kayıplarının düşük olduğunu ve eleman sayısına göre verimli bir sistem olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 9. 36. Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi için Güç Katsayısı

Son olarak Şekil 9.36'da sistemde ölçülen güç katsayısı grafiği gösterilmektedir. Grafiğe göre ölçülen güç katsayısı 0.994 değerindedir. Ölçüm doğrultusunda görünür güç;

$$S = 2770\text{W} / 0,994 = 2794\text{VA} \text{ olarak hesaplanmaktadır.}$$

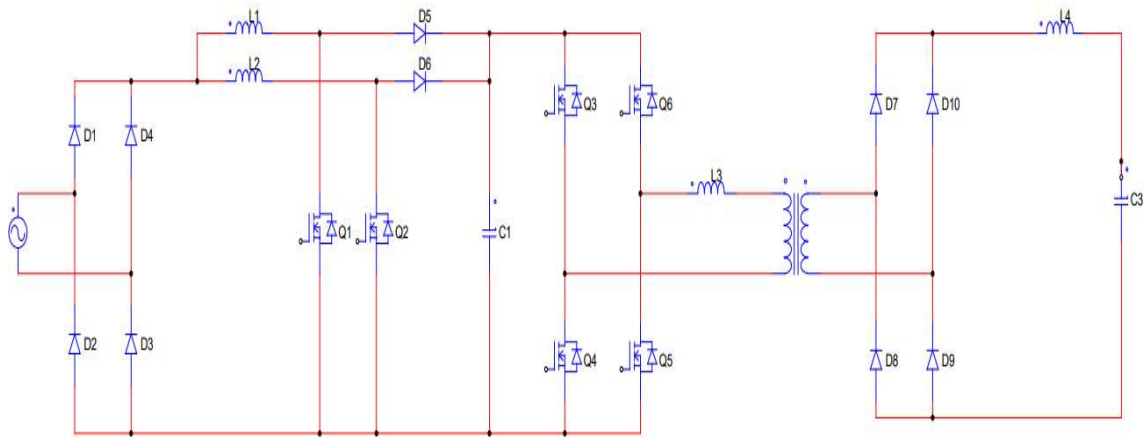
9.5.Dönüşümlü Yükseltici Tipi Güç Faktörü Düzenleyicili İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü

Dönüşümlü yükseltici tip güç faktörü düzenleyicili izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü, elektrikli araçların ve şarj edilebilir hibrit elektrikli araçların yerleşik şarj

cihazlarında yaygın kullanılan bir güç elektroniği topolojisidir. Bu yaklaşımda girişte bulunan dönüşümlü yükseltici tipi güç faktörü düzenleyici sayesinde reaktif güç kayıpları minimize edilmiş olup yüksek verimli enerji aktarımı sağlanmaktadır. Aynı şekilde izole transformatör girişinde sıfır voltaj anahtarlama (ZVS) yapısı kullanılması topolojinin verimini artırmaktadır. Verimli çalışmaları ve az sayıda pasif bileşen içermeleri, yerleşik şarj cihazlarında ve farklı alanlarda kullanılan yüksek güç uygulamalarında tercih sebebi olmalarını sağlamıştır.

9.5.1. Topolojinin Çalışma Prensibi

Dönüşümlü yükseltici tipi güç faktörü düzenleyicili ve izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü yaklaşımı, şebekeden alınan AA gerilimi kullanılarak yüksek verim ile bataryaları şarj etmeyi amaçlamaktadır. Bu işlemin ilk ayağı kontrolsüz doğrultma işlemidir. Şekil 9.37’de görüleceği üzere D1, D2, D3 ve D4 diyotları kontrolsüz doğrultma işlemi için kullanılmaktadır.

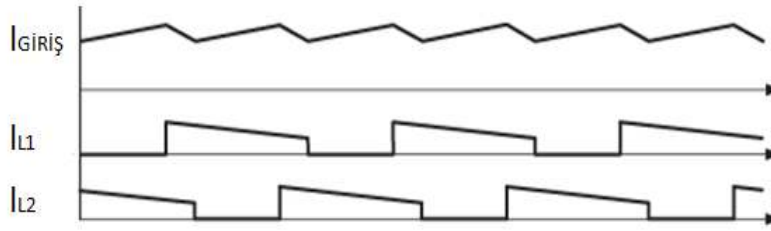


Şekil 9. 37. Dönüşümlü Yükseltici GFD’li ve İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devre Şeması

Doğrultulan şebeke gerilimi daha sonra dönüşümlü yükseltici tip GFD devresinden geçer, GFD devresi iki adet sürekli iletken modda çalışan yükseltici tip DA-DA dönüştürücüden oluşmaktadır. Bu dönüştürücüler 180° faz farkı ile anahtarlanmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmasında GFD anahtarlama elemanlarının tetiklenmesi için SPWM yöntemi kullanılmıştır.

Giriş akımı Şekil 9.38’de görüleceği üzere L1 ve L2 bobinlerinin üzerinden geçen akımın toplamıdır. Devrede bobin dalgalanmaları fazla olmadığından birbirlerini iptal etme eğilimindedirler ve bu durum giriş dalgalanma akımını azaltmaktadır (Gautam vd., 2012).

Bu yöntemin en önemli avantajı EMI performansı ve akım dalgalanma oranının düşük olmasıdır.



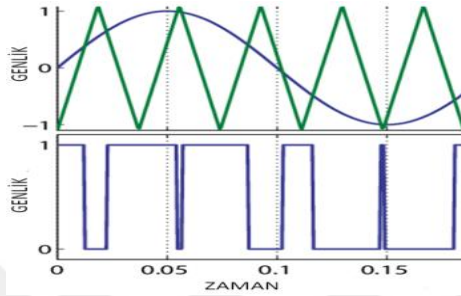
Şekil 9.38. Dönüşümlü Yükseltici GFD Giriş Akımı ve Bobin Akımı Durumları

Şarj işleminin üçüncü ayağı, transformatör giriş uçlarında AA gerilimin oluşturulmasıdır. Bu işlem için çift aktif köprülü şarj devresinde olduğu gibi transformatör girişinde dört adet köprü şeklinde bağlanmış anahtarlama elemanı bulunmaktadır. Anahtarlama elemanlarına yine çift aktif köprülü şarj devresindeki benzer şekilde faz kaydırma modülasyonu ile işaret uygulanır ve transformatörün giriş-çıkış gerilimleri kontrol edilmektedir. Burada en büyük fark kontrol büyüklüğünün tek bir tane olmasıdır. Dönüşümlü GFD’li ve izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücülerinde transformatör çıkışında kontrolsüz köprü tipi doğrultucu bulunmaktadır. Çıkış gerilimi doğrultma işlemi kontrolsüz olduğundan çift aktif köprülü şarj devresinde yapıldığı gibi giriş anahtarlama ile çıkış anahtarlama arasında faz farkı oluşturmak mümkün değildir. Bu nedenle tek fazlı kaydırma (SPS), iki faz kaydırma (DPS), genişletilmiş faz kaydırma (EPS) ve üç faz kaydırma (TPS) gibi yöntemler dönüşümlü GFD’li ve izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücülerinde kullanılamaz. Bunun yerine birbirine çapraz bağlı anahtar çiftleri (Şekil 9.37, Q3, Q5 – Q4, Q6) arasında faz farkı oluşturularak transformatör girişindeki gerilim kontrol edilmektedir.

Topolojinin dördüncü ve son ayağı transformatör çıkışının doğrultulması işlemidir. Transformatör çıkışındaki AA gerilim, Şekil 9.37’de gösterilen D7, D8, D9, D10 diyotları ile oluşturulan tam köprü yapısı ile doğrultulmaktadır. Topolojiye ek olarak, doğrultucu çıkışında köprü yapısında bulunan diyotların bağlantı kapasitansından kaynaklanan gerilim dalgalanmaları ve transformatörün sızıntı indüktansı sebebiyle ortaya çıkabilecek dalgalanmaları bastırması amacı ile direnç, kondansatör ve diyottan oluşan sönümleme devresi eklenebilir (Gautam vd., 2012). Topolojinin yapısında son olarak çıkış akımını filtreleme amacı ile filtre bobini, (Şekil 9.37, L4) çıkış gerilim dalgalanmalarını düzenlemek için ise filtre kondansatörü kullanılmaktadır.

9.5.1.1. Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu (Sinusoidal Pulse Width Modulation SPWM)

SPWM yöntemi en basit modülasyon yöntemlerindendir. Sisteme referans olarak girilen üçgen (testere) işaret ile sinüzoidal işaretin karşılaştırılması ile elde edilmektedir. Çıkışta elde edilmek istenen sinüzoidal işaret ile frekansı, güç devresindeki anahtarlama frekansına eşit bir üçgen dalga karşılaştırılarak kesişme noktalarında darbe üretilmektedir. Şekil 9.39’ da örnek bir SPWM uygulamasının çıktısı gösterilmiştir.



Şekil 9. 39. SPWM Yöntemi için Örnek Referans-Çıkış Sinyali

9.5.2. Devre Bileşenlerinin Belirlenmesi

Devre Bileşenlerinin Hesaplanması:

- DA Bara Gerilimi: 800V
- Batarya Nominal Gerilimi: 360V
- Batarya Maksimum Gerilimi: 420V
- Gerilimi Dalgalanması: ($< \%1 = 4.2V$)
- Maksimum Çıkış Akımı: $2900W / 420V = 6.9A$
- Akım Dalgalanması: ($< \%5, 0.35A$)
- Batarya Kapasitesi: 75.6kWh
- Şarj Oranı: 2.9kW
- Anahtarlama Yöntemi: Faz Kaydırmalı Modülasyon
- Anahtarlama Elemanı: IGBT
- Anahtarlama Frekansı: 30kHz
- Anahtarlama Elemanı (GFD): MOSFET
- Anahtarlama Frekansı (GFD): 250kHz
- Anahtarlama Yöntemi (GFD): SPWM
- IGBT Seçimi:

IXYS, IXGH10N100U1, V_{CE} : 1000V, $I_{C_{MAX}}$:20A, T_d (açık/kapalı) @ 25°C
 100ns/550ns, Test Verileri 800V, 10A, 150Ohm, 15V, $R_{Açık} = V_{CE} - I_c$ grafiğinden
 yaklaşık 125mΩ hesaplanmıştır.

- Transformatör Seçimi:

$$V_{\text{birinci sargı}}: \frac{800}{\sqrt{2}} = 565VAC$$

$$V_{\text{ikinci sargı}}: \frac{420}{\sqrt{2}} = 297VAA$$

$$\text{Transformatör Oranı: } 297/565 = 0,525$$

Devre girdi ve çıktıları aynı olduğundan çift aktif köprülü şarj yönteminde kullanılan
 Murata Marka %99.5 verimli transformatör kullanılmıştır.

- Giriş Köprü Diyot Seçimi:(Şekil 9.37, D1, D2, D3, D4)

Vishay General Semiconductor , 20ETS08S-ND, GEN 800V 20A,

$$V_f = 1.1V, R_t = 10.4 \text{ m}\Omega$$

Seçilen diyotun akım-gerilim değerlerinin topoloji için yüksek olduğu görülmektedir.

Uygulamada bu diyotun kullanılmasının sebebi, diyot eşik geriliminin (V_f) geriliminin
 istenilen özelliklerdeki muadillerine göre düşük olmasıdır.

GFD Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Bobin Hesabı: (Şekil 9.37, L1, L2)

$$D_{\min} = 1 - \frac{\sqrt{2} \cdot V_{\text{giris}}}{V_{DC_{\text{bara}}}} \left(\sin \frac{\pi}{2} \right) \quad (9.4)$$

$$\rightarrow 1 - \frac{\sqrt{2} \cdot 220V}{800V} \left(\sin \frac{\pi}{2} \right) = 0.99$$

$$L_{1-2} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{\text{giris}} - \min D_{\min}}{f_s I_{\text{dalgalanma}}} \quad (9.5)$$

Giriş Akım Dalgalanma Oranı $\approx 1A, \approx \%10$

$$\rightarrow L_{1-2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220 \cdot 0,99}{250 \cdot 1000 \cdot 1} \approx 1.2mH$$

- GFD Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Bobin Seçimi:

Hammond Manufacturing, 197C5, 1.25 mH, 5A, 126mΩ

GFD Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Kondansatör Hesabı: (Şekil 9.37, C1)

T = Çıkış Kondansatörünün Yüğü Besleme Süresi

$$T = \frac{1}{4 \cdot 2 \cdot f_{\text{şebeke}}} \quad (9.6)$$

$$\rightarrow T = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2.50} = 2,5 \cdot 10^{-3}$$

$$C_1 = 1.1 \frac{2.P.T}{V_{DC_{barra}}^2 - V_{giriştepe}^2} \quad (9.7)$$

$$C_1 = \frac{2.2900.2,5 \cdot 10^{-3}}{800^2 - 310^2} \approx 27 \mu F$$

- GFD Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Kondansatör Seçimi:
Vishay Beyschlag/Draloric/BC Components, MKP1848C63090JP5, 30 μF Film
Kondansatör 900V, ESR, 4m Ω
- GFD Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Diyot Seçimi: (Şekil 9.37, D5, D6)
SMC Diode Solutions, 1200V, 5A, SIC SCHOTTKY, Vf: 1.8V, Bağlantı Kapasitansı
302pF
- Çıkış Köprü Diyot Seçimi: (Şekil 9.37, D7, D8, D9, D10)
Vishay General Semiconductor, 20ETS08S-ND, GEN 800V 20A, $V_f = 1.1V$, $R_t =$
10.4 m Ω
- GFD Anahtarlama MOSFET Seçimi:
IXYS, IXFR24N90P, N-Kanal 900 V 13A, $R_{DS-Açık} = 410 \text{ m}\Omega$, $t_{Açık} = 46 \text{ nS}$, $t_{Kapalı} = 68 \text{ nS}$
Çıkış Bobin Hesabı: (Şekil 9.37, L4)

Denklem 8.7, $L = \frac{V_L D T_s}{I_{dalgalanma}}$

$$D = \frac{1}{2} * \frac{V_{çıkış}}{V_{çıkış-maks}} \rightarrow D = \frac{1}{2} * \frac{300}{420} = 0,35$$

$$T_s = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{30000} = 3,3 \cdot 10^{-5}$$

Transformatör çıkışı maksimumda ve batarya gerilimi minimum değerinde iken bobin üzerine düşen gerilim;

$$V_L = 420V - 300V = 120V$$

$$L = \frac{V_L D T_s}{I_{dalgalanma}} \rightarrow 120 \frac{0,35.3,3 \cdot 10^{-5}}{0.35} \approx 4 \text{ mH}$$

- Çıkış Bobin Seçimi:
Hammond Manufacturing, 195J10, Sabit Bobin, 10mH, 10A, 70 m Ω
Çıkış Kondansatör Hesabı: (Şekil 9.37, C3)

Denklem 9.3, $C_{çıkış} \geq I_{dalgalanma} \frac{D T_s}{V_{dalgalanma}}$

$$C_{\text{Çıkış}} \geq 0.35 \frac{0,35.3.10^{-5}}{4.2} \approx 1\mu\text{F}$$

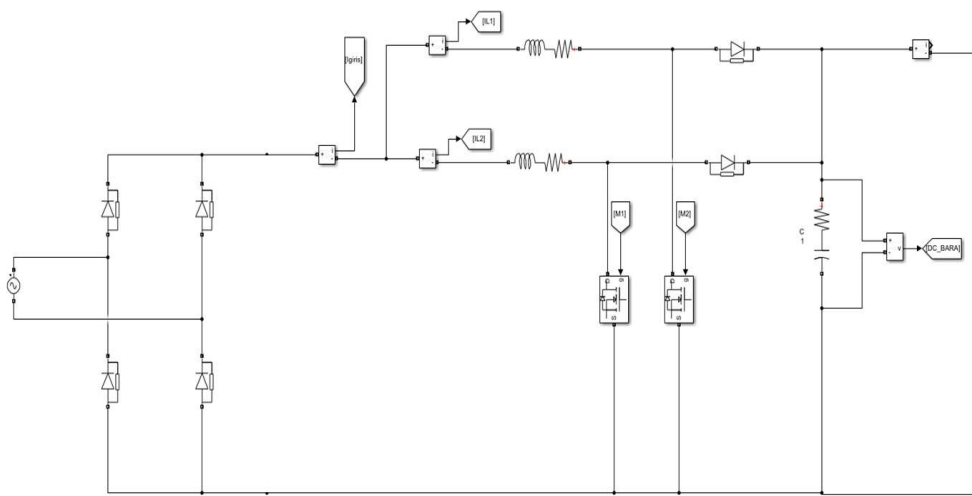
- Çıkış Kondansatör Seçimi:

EPCOS - TDK Electronics, B32674D8225K000, 2.2 μF Film Kondansatör 875V,
ESR: 10.3 m Ω

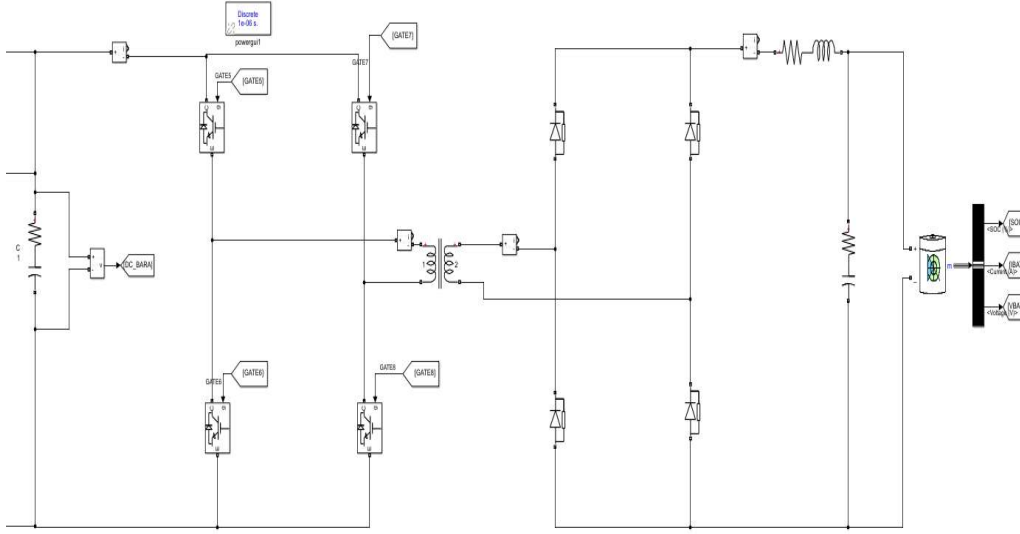
Yapılan hesaplamalar ve seçilen ürünler doğrultusunda tüm bileşenlerin verileri simülasyon ortamına aktarılmıştır.

9.5.3. Modelleme Çıktıları

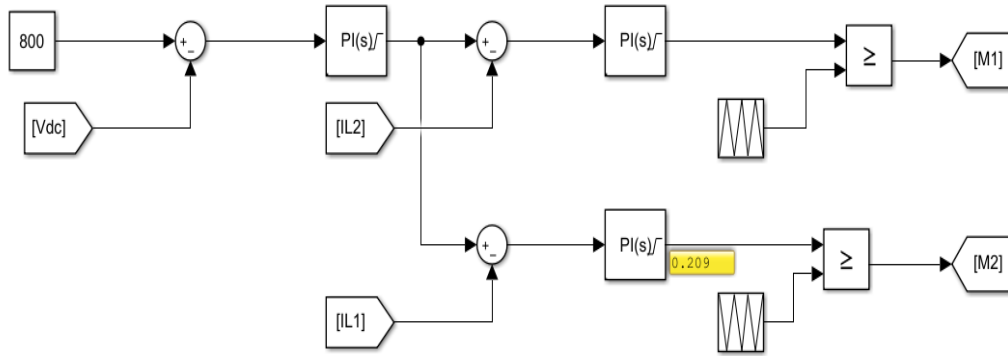
Tasarım ilk iki topolojide olduğu gibi batarya %50 dolulukta iken ortalama 6.9Ah enerji aktarımı olacak şekilde simülasyon ortamına aktarılmıştır. Bu durumda şebekeden bataryaya yaklaşık 2900W güç aktarımı sağlanması hedeflenmektedir. Dönüşümlü GFD devresinin kontrolü SPWM yöntemi ile yapılmaktadır. Kontrol yönteminde ilk olarak, belirlenen referans geriliminin çıkış gerilimi ve çıkış akımları ile ayrı ayrı farkları alınarak PI kontrolcülerden geçirilmiştir. Devamında kontrolcünün iki çıkışı, aralarında 180° faz farkı bulunan ve 250 kHz frekansa sahip testere sinyal ile karşılaştırılmıştır ve anahtarlama elemanları için gerekli işaret üretilmiştir. Transformatör girişinde bulunan kontrollü köprü yapısının, faz kaydırmalı olarak anahtarlama için iki yönlü şarj devresine uygulanan algoritmanın aynısı uygulanmıştır. Şekil 9.40 ve Şekil 9.41’de izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresi için simülasyon ortamında modellenen devre şeması gösterilmektedir. Şekil 9.42’de ise SPWM algoritması için oluşturulan devre bloğu görülmektedir.



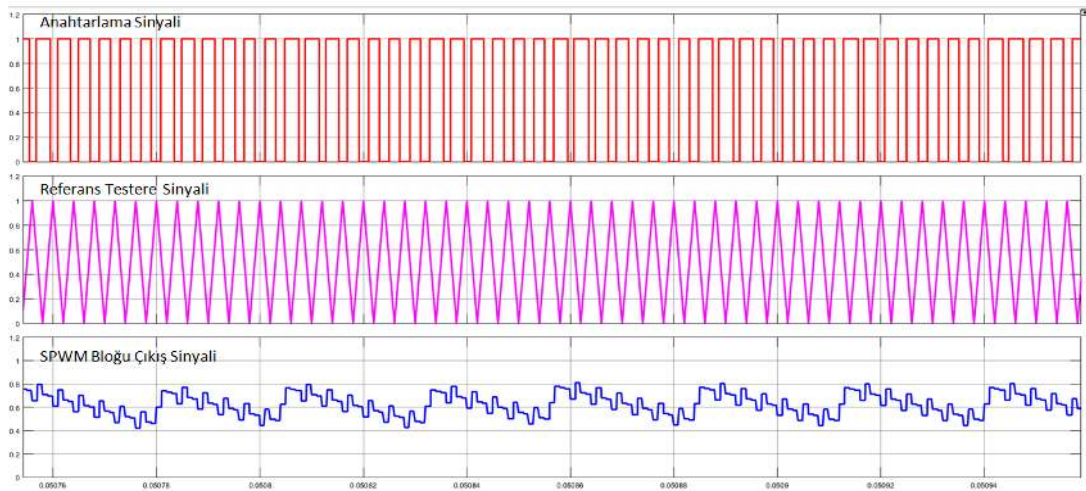
Şekil 9. 40. Dönüşümlü Yükseltici Tipi Güç Faktörü Düzenleyici Devresi



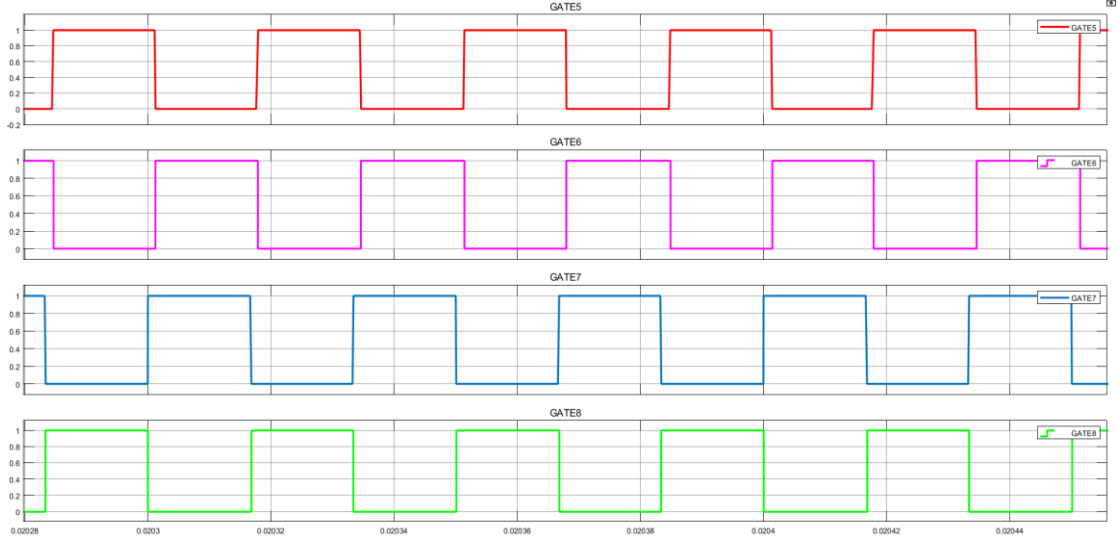
Şekil 9. 41. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi



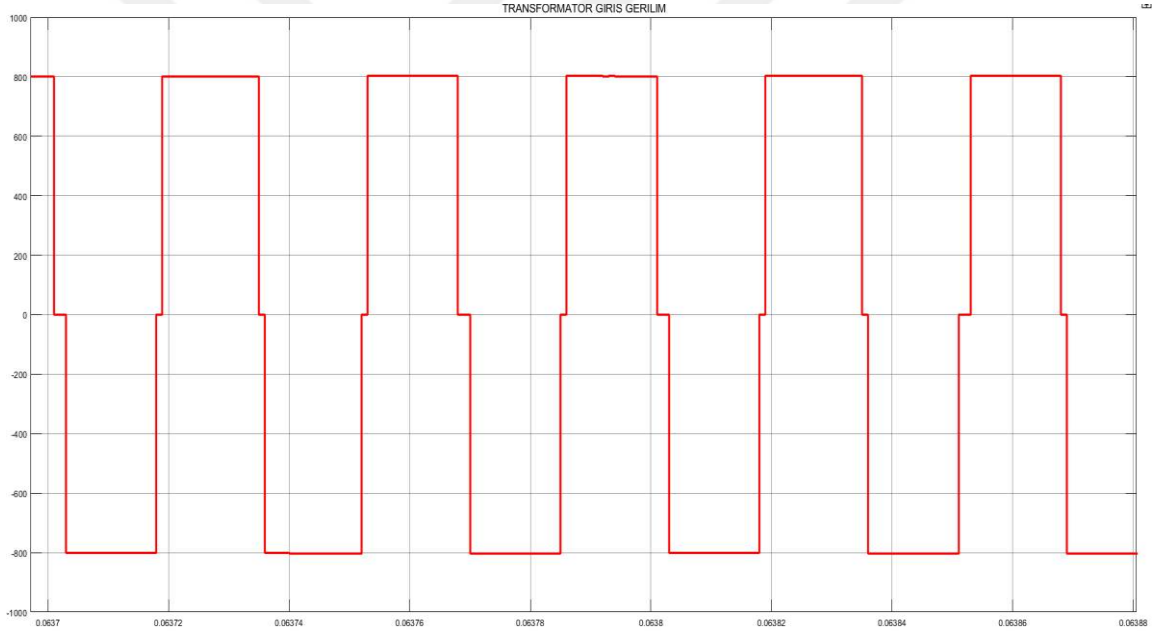
Şekil 9. 42. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi SPWM Kontrol Bloğu



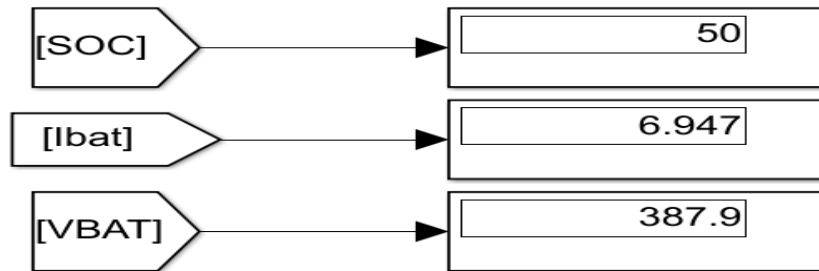
Şekil 9. 43. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Anahtarlama Sinyali, Referans Testere Sinyali, SPWM Bloğu Çıkış Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)



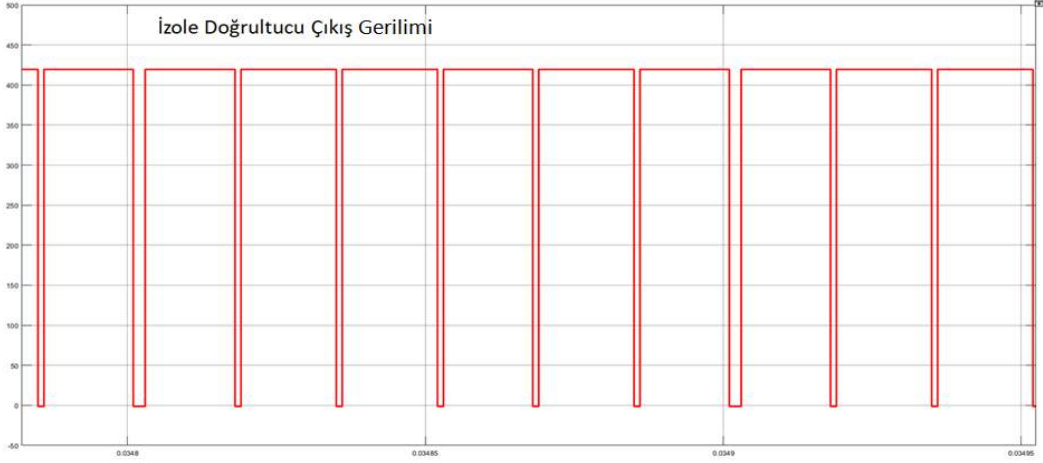
Şekil 9. 44. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Giriş Köprüsü Anahtarlama Sinyali (Gerilim-Zaman Grafiği)



Şekil 9. 45. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Transformatör Giriş Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği)



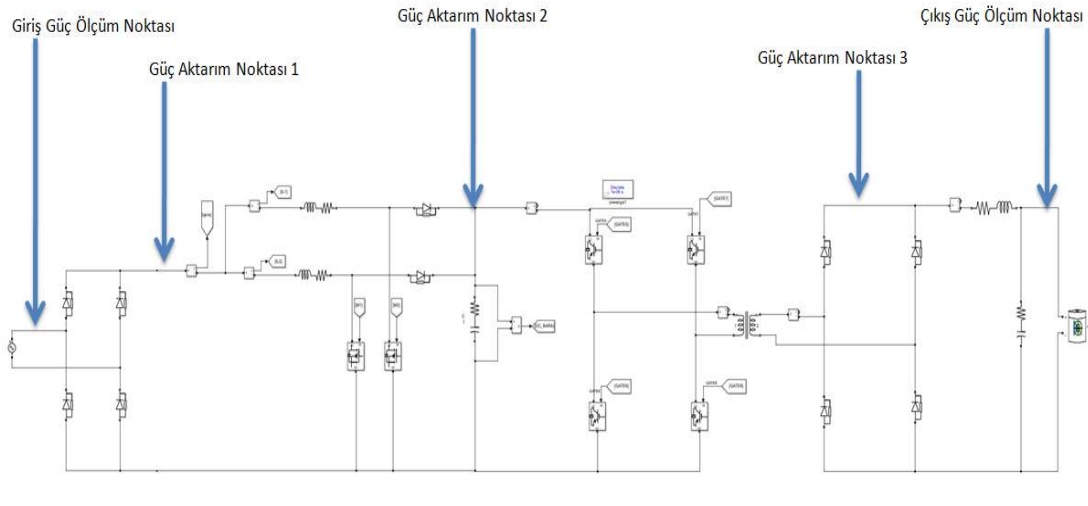
Şekil 9. 46. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Batarya Durum Göstergesi



Şekil 9. 47. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi İzole Doğrultucu Çıkış Gerilimi (Gerilim-Zaman Grafiği)

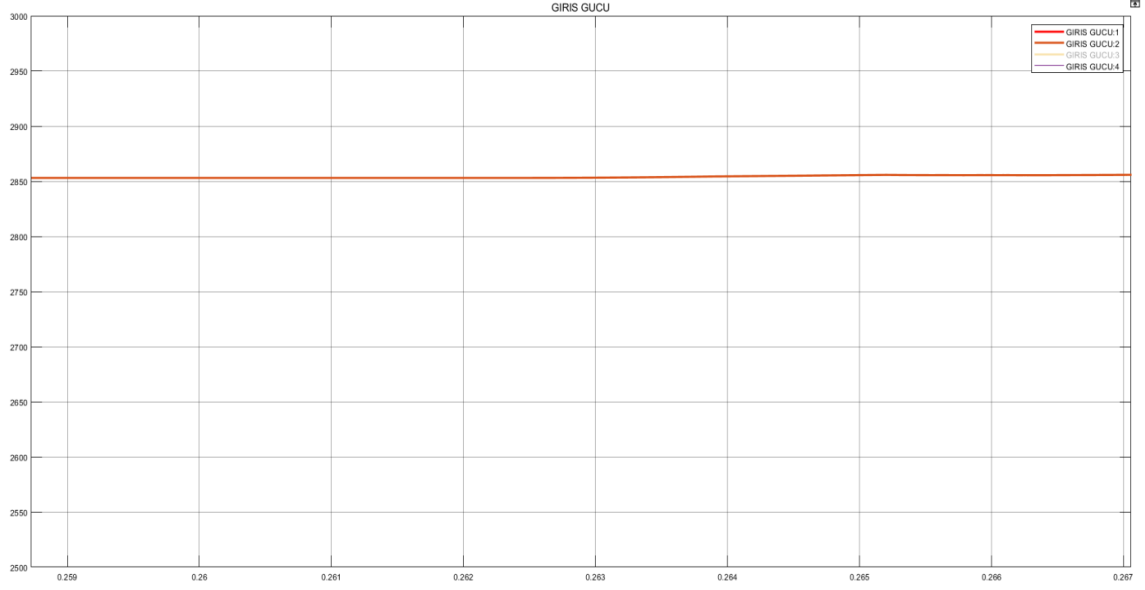
Şekil 9.43, Şekil 9.44, Şekil 9.45 ve Şekil 9.47’de modelleme sonucunda alınan giriş ve çıkış grafikleri gösterilmektedir. Şekil 9.46’da ise batarya akımı, şarj durumu ve batarya gerilimi için durum ekranları gösterilmektedir.

Verilen grafikleri incelendiğinde topolojinin istenildiği gibi çalıştığı görülmektedir. Bu kapsamda verim analizi için 5 noktada aktif güç ölçümü yapılmaktadır. Şekil 9.48’de devre şeması üzerinden ölçüm yapılan noktalar belirtilmiştir.



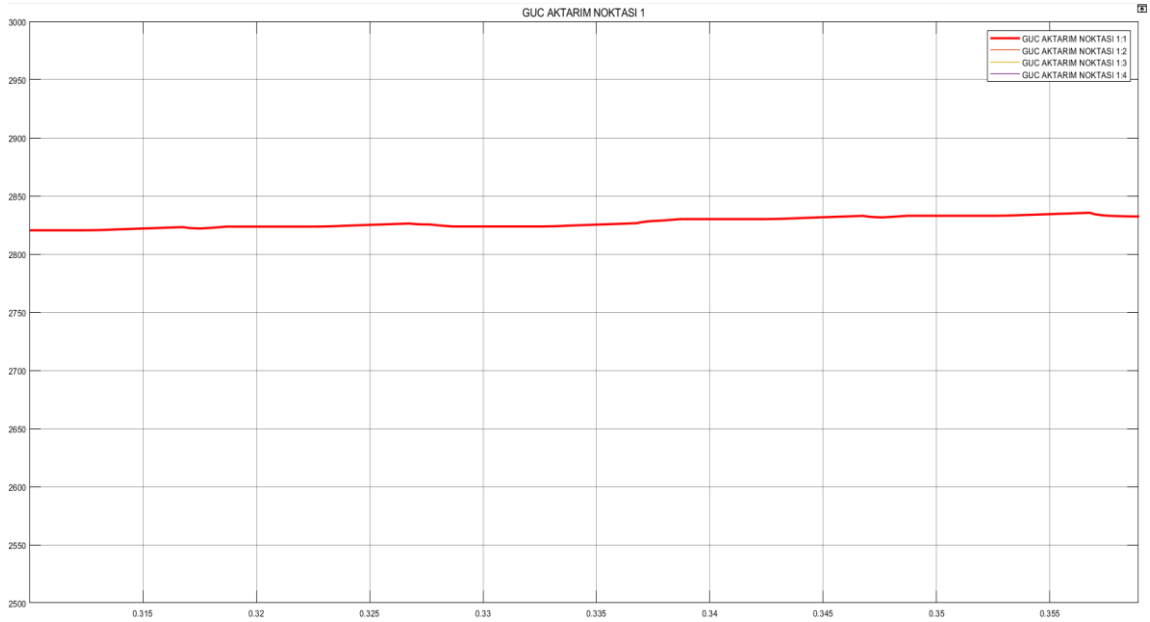
Şekil 9. 48. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Güç Ölçüm Noktaları

İlk nokta AA giriş noktasıdır. Bu noktadan yapılan ölçüm bataryaya ortalama 6.9Ah enerji aktarımı için şebekeden çekilen aktif güç miktarını ifade etmektedir. Şekil 9.49’da giriş noktasından ölçülen aktif güç - zaman grafiği gösterilmiştir. Bu noktada ölçülen aktif güç ortalama 2858W’dır.



Şekil 9. 49. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Giriş Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

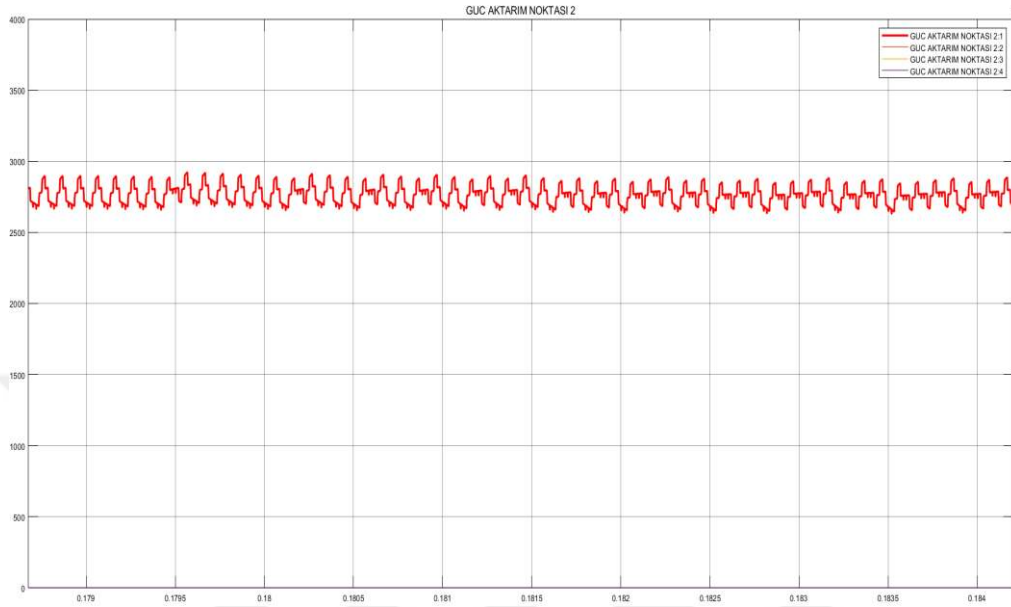
İkinci nokta güç aktarım noktası 1 olarak isimlendirilmiştir. AA geriliminin kontrolsüz doğrultucular ile doğrultulduğu noktadır. Bu noktada ölçülen güç ile girişte ölçülen güç arasındaki fark, köprü yapısında bulunan diyotlardan kaynaklanan kayıpları ifade etmektedir. Şekil 9.50’de güç aktarım noktası 1 için aktif güç - zaman grafiği gösterilmiştir. Ölçülen aktif güç ortalama 2835W’dır.



Şekil 9. 50. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Güç Aktarım Noktası 1 (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

Üçüncü nokta güç aktarım noktası 2 olarak isimlendirilmiştir. Doğrultulan gerilimin dönüşümlü GFD ile 800V DA bara gerilimine yükseltildiği noktadır. Bu noktada ölçülen güç

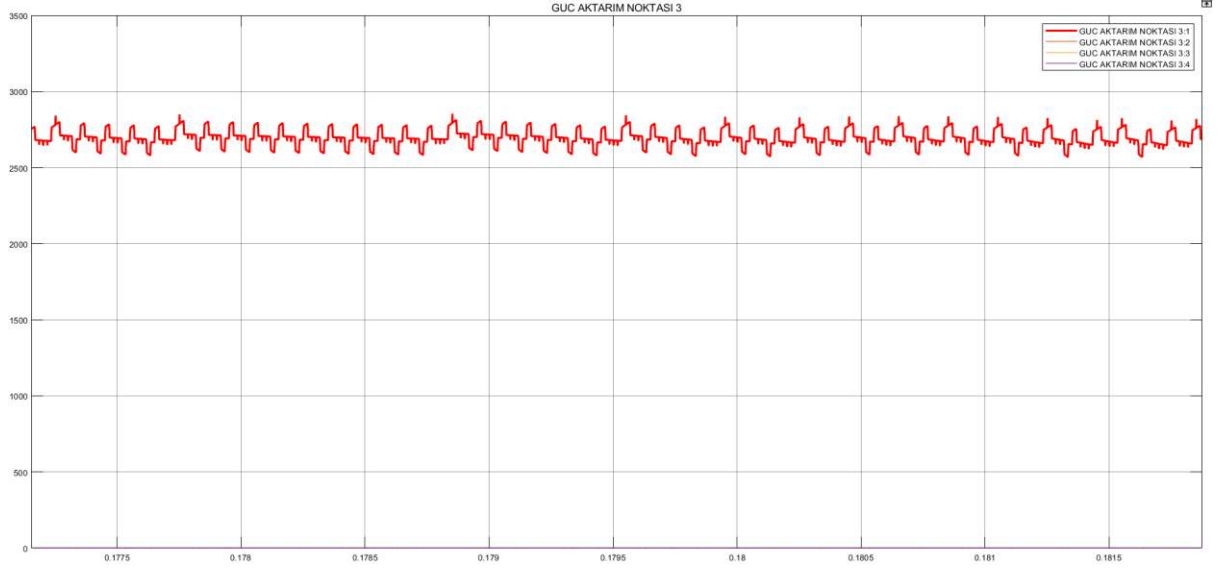
ile güç aktarım noktası 1’de ölçülen güç arasındaki fark, GFD yükselticisinin yapısında bulunan bobinlerin omik kayıpları ve MOSFET’lerin anahtarlama kayıplarından kaynaklanmaktadır. Şekil 9.51’de güç aktarım noktası 2 için aktif güç – zaman grafiği gösterilmiştir. Ölçülen aktif güç ortalama 2805W’dır.



Şekil 9. 51. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Güç Aktarım Noktası 2 (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

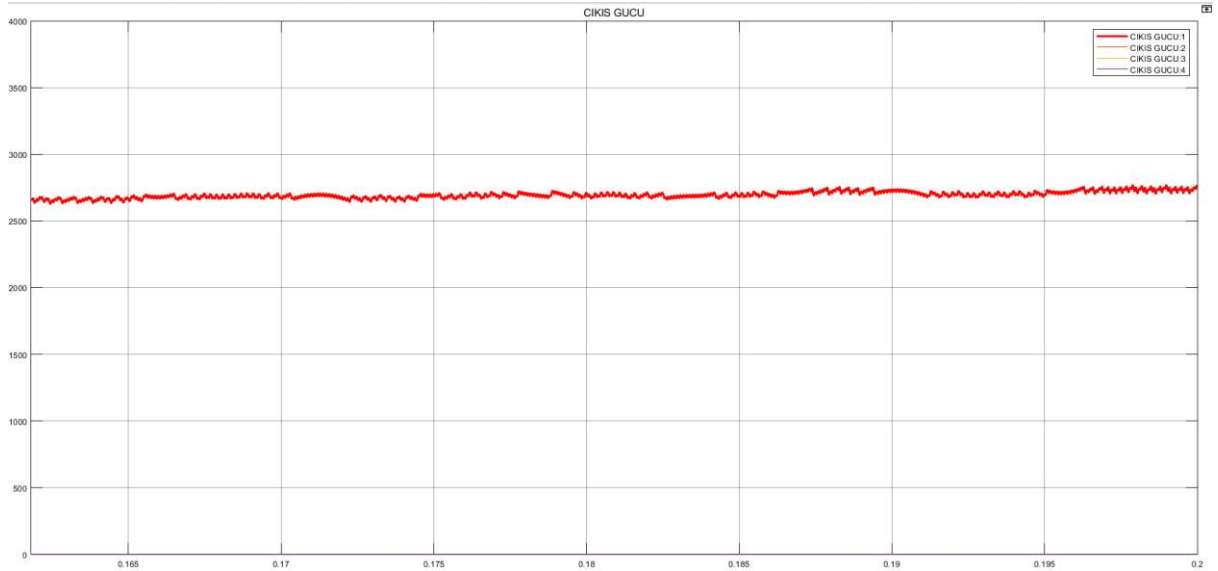
Dördüncü nokta ölçülen güç, güç aktarım noktası 3 olarak isimlendirilmiştir. Transformatör çıkışındaki AA gerilimin kontrolsüz doğrultucular ile doğrultulduğu noktadır. Bu noktada ölçülen güç ile güç aktarım noktası 2’de ölçülen güç arasındaki fark DA bara geriliminin AA gerilime dönüştürülmesi ile tekrardan doğrultulması sırasında oluşan anahtarlama kayıplarını ve diyot kayıplarını ifade etmektedir.

Bu kayıplara ek olarak, bu iki nokta arasında transformatör kayıpları bulunmaktadır. Transformatör seçimi bölümünde bahsedildiği üzere transformatör parametreleri kayıp oluşturmayacak değerlere ayarlanmıştır. Seçilen transformatörün verileri doğrultusunda transformatör kayıpları %0.5 olarak verildiğinden bu noktada oluşan aktif güç kaybına, %0.5 transformatör kayıpları eklenecektir. Şekil 9.52’de güç aktarım noktası 3 için aktif güç - zaman grafiği gösterilmiştir. Grafiğe göre ölçülen aktif güç ortalama 2750W’dır. Ölçülen güç üzerinden transformatör kayıpları, $2750W * \%0,5 = 13,75W$ olarak hesaplanmaktadır. Bu değer çıkış gücünden çıkartılmaktadır.



Şekil 9. 52. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Güç Aktarım Noktası 3 (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

Son ölçüm noktası çıkış noktası ise batarya şarj girişinin ölçüldüğü noktadır. Bu noktada ölçülen güç ile güç aktarım noktası 3'te ölçülen güç batarya akım ve gerilimini filtrelemek için kullanılan bobin ve kondansatör kaynaklı kayıpları ifade etmektedir. Şekil 9.53'te çıkış noktası için aktif güç - zaman grafiği gösterilmektedir. Grafiğe göre ölçülen aktif güç ortalama 2745W'dır.



Şekil 9. 53. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi Çıkış Gücü (Aktif Güç-Zaman Grafiği)

Sistemde toplam aktif güç kaybı, giriş noktasından ölçülen güç ile çıkış noktasından ölçülen güç arasındaki farka %0,5 trafo kayıpları olan 13,75W değerinin eklenmesi ile bulunmaktadır.

Toplam Aktif Güç Kaybı: $(2858W - 2745W) + 13,75W = 124,75W$

Kontrolsüz Doğrultucu Blok Kayıpları: $2858W - 2835W = 23W$

Dönüşümlü GFD Bloğu Kayıpları: $2835W - 2805 = 30W$

DA-AA, AA-DA Blok + Transformatör Kayıpları:

$2805W - 2750W + 13,75W = 68,75W$

Çıkış Filtresi Kayıpları: $2750W - 2745W = 5W$

Referans ölçüm noktaları değerlendirildiğinde kayıpların önemli bir bölümünü diyot kayıpları, anahtarlama kayıpları ve yarı iletken kayıpları oluşturmaktadır. Topolojide doğrultma işlemlerinin anahtarlama elemanı yerine diyotlar ile yapılıyor olması kayıpların bir miktar artmasına sebebiyet vermektedir. Bu yaklaşıma özellikle diyot kayıplarını aşağı çekmek için bastırma devreleri eklenebilmektedir. Yapılan çalışmada topolojide bulunan yarı iletken sayısı göz önünde bulundurulduğunda verimin iyi seviyede olduğu görülmektedir.



Şekil 9. 54. İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi için Güç Katsayısı

Son olarak Şekil 9.54'te sistemde ölçülen güç katsayısının grafiği gösterilmektedir. Grafiğe göre güç katsayısı 0,999 değerindedir. Ölçülen değer doğrultusunda görünür güç;

$S = 258W / 0,999 = 2855VA$ olarak hesaplanmaktadır.

10. Sonuç ve Öneriler

Bu tezde, elektrikli araçların yerleşik şarj cihazlarında yaygın olarak kullanılan topolojilerden üç tanesi Matlab/Simulink ortamında incelenmiştir. Köprüsüz kutuplu GFD’li iki yönlü şarj devresi, köprüsüz kutuplu GFD’li çift aktif köprülü şarj devresi ve dönüşümlü yükseltici tip GFD’li izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü şarj devresinin uygulamaları için gerekli hesaplamalar yapılmış ve hesaplanan değerlere uygun elektronik bileşenler seçilmiştir. Bu elektronik bileşenlerin katalogları incelenerek karakteristik özelliklerini belirten değerler, simülasyon ortamına aktarılmıştır. Bu sayede analizlerin gerçek uygulamalara yakın sonuç vermesi hedeflenmektedir. Çalışmanın ana amacı topolojilerin verimlerini, kontrol algoritmalarını, güvenilirlik durumlarını karşılaştırmaktır. Buna ek olarak hesaplamalar doğrultusunda seçilen elektronik bileşenlerin maliyetleri temel alınarak yaklaşık maliyet değerlendirmesi yapılmaktadır.

Yapılan simülasyonlar doğrultusunda ilk incelenen topoloji, köprüsüz kutuplu GFD’li iki yönlü şarj devresidir. Devre girişinde AA-DA doğrultma işlemi için köprü diyot grubu bulunmamaktadır. Doğrultma işlemi köprüsüz kutuplu GFD yapısı ile gerçekleştirilmektedir. Bu yapı ile; giriş gerilimi doğrultulması, DA bara geriliminin seviyesine yükseltilmesi ve güç katsayısının düzenlenmesi işlemleri, ek bir devre gerektirmeden tek bir blok üzerinde gerçekleştirilmektedir. DA barasından bataryaya enerji aktarımı sırasında iki yönlü DA-DA dönüştürücü topolojisi kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre devre, enerji akış yönüne göre düşürücü tip DA-DA dönüştürücü veya yükseltici tip DA-DA dönüştürücü modunda çalışabilmektedir. Çalışma sırasında yükseltici tip DA-DA dönüştürücü veya düşürücü tip DA-DA dönüştürücü topolojilerinde bulunan diyot yerine anahtarlama elemanı kullanılmaktadır.

Devre girişinde köprü tip diyot yapısının bulunmaması, güç katsayısı düzenleme işlemi için harici yükseltici devre kullanılmaması, GFD yapısının sıfır gerilim altında anahtarlama ve iki yönlü devrede kontrolsüz devre elemanı olan diyot yerine anahtarlama elemanları kullanılması, verimi pozitif yönde etkileyen faktörlerdir. Bu devrede her ne kadar sıfır gerilim ile anahtarlama gibi anahtarlama kayıplarını azaltan faktörler bulunsun da anahtarlama kayıplarının tamamen yok edildiğini söylemek mümkün değildir. Bu bağlamda meydana gelen enerji kayıpları, anahtarlama kayıpları, yarı iletken iletim kayıpları ve pasif eleman kayıpları olarak değerlendirilebilmektedir.

Simülasyon sonucunda, 2795W aktif güç aktarımı sırasında 80W aktif güç kaybının meydana geldiği görülmektedir ve güç katsayısı 0,9917 olarak ölçülmüştür. Bu durumda yapılan çalışmanın sonucuna göre topoloji, %97.15 verimde çalışmaktadır.

Bu yaklaşım için uygulanan kontrol yapısı değerlendirildiğinde giriş GFD işlemi için ve DA-DA dönüştürücü yapıları için iki farklı kontrol algoritması kullanılmaktadır.

Simülasyon ortamında incelenen ikinci topoloji köprüsüz kutuplu GFD'li çift aktif köprülü şarj devresidir. Çift aktif köprülü şarj devresi girişinde iki yönlü şarj devresinde olduğu gibi doğrultma işlemi için köprü diyot grubu bulunmamaktadır. AA geriliminin doğrultulması, DA bara gerilimine yükseltilmesi ve güç faktörünün düzenlenmesi işlemleri için köprüsüz kutuplu GFD yapısı kullanılmaktadır. Çift aktif köprülü şarj devresi yaklaşımında bataryalara enerji aktarımı izole transformatör ile gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşımda transformatör girişinde değişken gerilim oluşturabilmek için dört adet yarı iletken anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Transformatör çıkışının yeniden doğrultularak bataryalara aktarılması yine 4 adet anahtarlama elemanı kullanılarak yapılmaktadır.

Bu yaklaşımda anahtarlama elemanı sayısının fazla olması anahtarlama kaynaklı kayıpların artmasına sebep olacağından, seri bağlı anahtarların birbirinin eşleniği şeklinde çalışması ile transformatör gerilimi için ölü bölgeler oluşturarak sıfır gerilimde anahtarlama yapılmaktadır. Sıfır gerilimde anahtarlama ile anahtarlama kaynaklı kayıplar bir miktar düşürülüyor olsa da tamamen yok olduğunu söylemek mümkün değildir. Ayrıca enerji aktarımı sırasında transformatör kullanılması devrede ek olarak transformatör kayıplarına sebep olmaktadır. Bu kayıplara ek olarak filtre amaçlı kullanılan pasif bileşenlerin az da olsa kayıplara neden olduğu görülmektedir.

Simülasyon sonucunda, 2770W aktif güç aktarımı sırasında 113,4W aktif güç kaybı meydana gelmiştir ve güç katsayısı 0,994 olarak ölçülmüştür. Bu durumda yapılan çalışmanın sonucuna göre topoloji, %95.94 verimlilikle çalışmaktadır.

Bu yaklaşım için uygulanan kontrol yapısı değerlendirildiğinde giriş GFD işlemi, transformatör girişi köprü yapısı ve transformatör çıkışı köprü yapısı için 2 ayrı kontrol algoritması kullanılmaktadır.

Simülasyon ortamında incelenen son topoloji dönüşümlü yükseltici tip GFD'li izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresidir. Bu yaklaşımda AA geriliminin doğrultulması için köprü tipi kontrolsüz doğrultucu yöntemi kullanılmaktadır. Doğrultulan gerilim dönüşümlü

yükseltici tip GFD devresinden geçirilerek DA bara gerilimine yükseltilmektedir. GFD yapısında iki adet bobin, iki adet anahtarlama elemanı ve iki adet diyot bulunmaktadır. Bu topolojide, çift aktif köprülü şarj devresinde olduğu gibi bataryalara enerji aktarımı transformatör üzerinden yapılmaktadır. Transformatör giriş gerilimi dört adet anahtarlama elemanı ile oluşturulurken çıkış gerilimi köprü tipi kontrolsüz doğrultucular ile doğrultulmaktadır.

Bu yaklaşımda girişte ve transformatör çıkışında AA-DA doğrultma işlemi için kullanılan köprü yapıları, diyot kaynaklı kayıplara neden olmaktadır. Doğrultulan giriş geriliminin iki adet yükseltici tip DA-DA dönüştürücü yapısı ile yükseltilmesinin, devrede pasif eleman kayıplarını ve anahtarlama kayıplarını artırdığı söylenilebilmektedir. Ayrıca topolojide transformatör bulunması, ek olarak transformatör kayıplarına sebep olmaktadır. Transformatör girişinde meydana gelen anahtarlama kaynaklı kayıplar, çift aktif köprülü şarj devresinde olduğu gibi sıfır gerilimde anahtarlama yöntemi ile aşağı çekilmekte olsa da tamamen sıfıra düşmemektedir. Bu ve benzeri durumlar, devrede verimi olumsuz yönde etkileyen faktörler olarak değerlendirilebilmektedir.

Simülasyon sonucunda, 2858W aktif güç aktarımı sırasında 124,75W aktif güç kaybı meydana gelmiştir ve güç katsayısı 0,999 olarak ölçülmüştür. Bu durumda yapılan çalışmanın sonucuna göre topoloji, %95.65 verimle çalışmaktadır.

Bu yaklaşım için uygulanan kontrol yapısı değerlendirildiğinde girişte kullanılan yükseltici GFD yapısı ve transformatör girişi köprü yapısı için 2 ayrı kontrol algoritması kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre dönüşümlü yükseltici tip GFD yapısının köprüsüz kutuplu GFD yapısına göre daha az reaktif güç kaybına sebep olduğu görülmektedir. Bununla birlikte topolojilerde ölçülen güç faktörü, üç yaklaşım için de 0.99 değerinin üstündedir. NERC (North American Electric Reliability Corporation), CMC (California Mobility Center) ve WECC (Western Electricity Coordinating Council) çalışma gruplarının önerilerine göre EA yerleşik şarj cihazlarında güç faktörünün 0.985 değerinin üzerinde olması gerekmektedir (Ziyat vd., 2023). Bu durumda 3 yaklaşımda da ölçülen güç faktörünün önerilere uygun olduğu görülmektedir. Şebekeden çekilen reaktif güç miktarının düşük olmasından dolayı, her iki GFD yapısı için de enerji verimliliği ve tasarrufu konuları temelinde olumlu olarak değerlendirilebilmektedir.

Topolojiler verim odaklı karşılaştırıldığında yapılan tez için en verimli topolojinin iki yönlü şarj devresi olduğu görülmektedir. Yapısının basit olması ve az bileşen bulundurması diğer iki topolojiye göre daha az kayıpta çalışmasını sağlamaktadır. Çift aktif köprülü şarj devresi ile izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresinin verimlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum güç ölçüm noktaları üzerinden değerlendirildiğinde; çift aktif köprülü şarj devresinin izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresinden daha verimli olmasının sebebi, AA girişinde ve transformatör çıkışında doğrultma işlemleri için diyot yerine diyota göre kayıpları düşük olan anahtarlama elemanlarının kullanılmasıdır.

Üç yaklaşımın kontrol yapıları değerlendirildiğinde, iki yönlü şarj devresi için kullanılan kontrol algoritmalarının diğer iki devrenin kontrol algoritmalarına göre daha az karmaşık yapıya sahip olduğu söylenebilir. En karmaşık kontrol yapısının ise 3 farklı noktada toplam 12 anahtarlama elemanın kontrol edildiği, çift aktif köprülü şarj devresinde olduğu görülmektedir. Bu devrede transformatör giriş ve çıkışı için faz kaydırma modülasyonu kullanılmaktadır. Faz kaydırma modülasyonu için geliştirilen algoritmalarda kontrol büyüklüğü sayısı diğer algoritmalara göre fazladır. Bu durum kontrol yapısının daha karmaşık hale gelmesine neden olur. İzoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresinde ise çift aktif köprülü şarj devresinden farklı olarak, transformatör çıkışında anahtarlama elemanı bulunmamaktadır. Bu yapı da her ne kadar faz kaydırma modülasyonu ile kontrol ediliyor olsa da transformatör çıkışı kontrolsüz olduğundan algoritmanın kontrol büyüklüğü yalnızca bir tanedir. Bu nedenle devrenin kontrol yapısı çift aktif köprülü şarj devresine göre basittir. Diğer yandan GFD yapısında iki adet ayrı yükseltici devrenin kontrol ediliyor olmasından dolayı, iki yönlü şarj devresi ile karşılaştırıldığında daha karmaşık yapıda olduğu görülmektedir.

Çift aktif köprülü şarj devresi ve izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresinin, yapılarında bulunan transformatörün izole olmasından dolayı güvenli sistemler olduğu söylenilebilir. Öte yandan iki yönlü şarj devresinde DA bara gerilimi ile bataryalar arasında yalıtım mevcut değildir. Bu iki blok arasında yalnızca seri anahtarlama elemanı bulunmaktadır. Anahtarlama elemanın olası bir kısa devre arızası durumunda DA bara akımı doğrudan batarya üzerine akacağından tehlike arz etmektedir. Bu nedenle iki yönlü şarj devresi için ekstra güvenlik önlemleri gerekmektedir.

Topolojilerin maliyetleri kontrol mekanizmaları maliyet hesabına dahil edilmeden değerlendirilmiştir. Bu çalışma özelinde maliyetler yüksek, orta ve düşük olarak üç seviyede

ifade edilmektedir. Tablo 10.1’de görüleceği üzere iki yönlü şarj devresinin maliyeti diğer iki topolojiye göre daha düşüktür. Maliyeti düşüren en önemli parametre, yapısında yüksek güç-yüksek frekans transformatörü bulundurmamasıdır. Maliyeti düşüren bir diğer etken yarı iletken anahtarlama elemanı sayısının diğer iki topolojiye göre daha az olmasıdır. Öte yandan çift aktif köprülü şarj devresi ile izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresinin maliyetleri birbirlerine yakındır. Çift aktif köprülü şarj devresi, izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresi ile karşılaştırıldığında, yapısında, kontrollü anahtarlama elemanı sayısının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum her ne kadar maliyeti artıran bir sebep olsa da bu iki devrelerde birbirlerine kıyasla maliyeti artıran en önemli etken, yüksek endüktans ve akım değerine sahip bobinlerdir. Tasarım çalışmalarında çıkış dalgalanma akımı düşük tutulduğundan bobinlerin endüktans değerleri yüksek hesaplanmıştır. Bu kapsamda GFD topolojisi gereği yapısında daha fazla bobin bulunduran, izoleli tam köprü DA-DA dönüştürücü devresinin maliyeti çift aktif köprülü şarj devresine göre daha yüksek çıkmaktadır.

Tablo 10. 1. Topoloji Maliyet Tablosu

	Minimum Kondansatör Sayısı	Bobin Sayısı (Yüksek Maliyetli Bileşen)	Transformatör Sayısı (Yüksek Maliyetli Bileşen)	Yarı İletken Anahtarlama Elemanı Sayısı	Maliyet
İki Yönlü Şarj Devresi	2	2	0	6	DÜŞÜK
Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi	2	2	1	12	ORTA
İzoleli Tam Köprü DA-DA Dönüştürücü Devresi	1	3	1	14	YÜKSEK

Tablo 10. 2. Topoloji Karşılaştırma Tablosu

	VERİM	GÜÇ KATSAYISI	SİSTEM GÜVENİLİRLİĞİ	KONTROL ALGORİTMASI
İki Yönlü Şarj Devresi	%97.15	0,9917	EK GÜVENLİK ÖNLEMLERİ GEREKLİ	BASİT
Çift Aktif Köprülü Şarj Devresi	%95.94	0,994	GÜVENİLİR	KARMAŞIK
İzoleli Tam Köprü DA- DA Dönüştürücü Devresi	%95.65	0,999	GÜVENİLİR	ORTA DÜZEYDE KARMAŞIK

Tablo 10.2’de, alınan sonuçlar ışığında topolojilerin güç katsayıları, sistem güvenilirlik düzeyleri ve kontrol algoritmalarının karmaşıklık seviyeleri gösterilmektedir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda sistemlerin verimlerinin iyi seviyede olduğu söylenebilir. Üç yaklaşım için de verimlerin daha iyi seviyeye getirilebilmesi için kaynağı belli olan sistem kayıplarının düşürülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda üç yaklaşımda da ortak olan anahtarlama kayıplarının, bazı ek devreler kullanılarak aşağı çekilmesi için çalışmalar yapılması gerekmektedir. İncelenen üç yaklaşımda da ZVS yöntemi uygulanarak anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim stresi düşürülmektedir. Benzer şekilde sıfır akımda geçiş devreleri gibi yaklaşımlar kullanılarak, anahtarlama elemanları üzerindeki akım stresinin düşürülmesi için de çalışmalar yapılması uygun görülmektedir.

Devrelerde kayıplara sebep olan bir diğer elemanın diyotlar olduğu görülmektedir. Bu bağlamda İzole tam köprü DA-DA dönüştürücüde, diyot kayıplarını önlemek için bu köprü yapıları üzerine ek bastırma devreleri uygulanabilir. Yine dönüşümlü yükseltici tip GFD yapısında bulunan seri diyotlar yerine anahtarlama elemanları kullanılarak diyot kayıplarının önüne geçilebilir. Pasif bileşen seçimi yapılırken iç dirençleri, düşük bileşenleri tercih etmek verimi olumlu yönde etkileyecektir.

KAYNAKÇA

- Akgül, H.** (2022). *Elektrikli Araçlar İçin Empedans Tabanlı Alçaltıcı Dönüştürücü ile Yerleşik Şarj Cihazı Tasarımı* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Pamukkale Üniversitesi.
- Akgundogdu, A., Karadeniz, O., Şahin, U., İn, S., Tiryaki, H., Erdoğan, G., ... & Kocaarslan, İ.** (2017). *Elektrikli Araçlar İçin Batarya Paketi ve Batarya Yönetim Sisteminin Gerçeklenmesi. In World Electro Mobility Conference. Retrieved September* (Vol. 25, p. 2020).
- Akın, B.** (2012). *Elektrikli Arabalarda Kullanılan Li-ion Akülerin Tek Fazdan Hızlı ve Verimli Şarjı için Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselticilerin Karşılaştırması / Comparison of Single Phase Power Factor Correction Boost Converters for Fast and Efficient Charge of Li-ionBa. EMO Bilimsel Dergi, 2(4).*
- Balci, E., Gündüz, G., Altundağ, S., & Altın, S.** (2023). *Elektrikli Araç Teknolojisinde Kullanılan Kurşun Asit ve Li-iyon Bataryaların Galvanostatik Test Sonuçlarının Karşılaştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 35(2), 691-697.*
- BatteryUniversity.** (2021a). *Charging Nickel-Cadmium.* [Erişim: 18.08.2023, <https://batteryuniversity.com/article/bu-407-charging-nickel-cadmium>]
- BatteryUniversity.** (2021b). *Charging Lead Acid.* [Erişim: 19.08.2023, <https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid>]
- BatteryUniversity.** (2021c). *Charging Lithium-ion Batteries.* [Erişim: 22.08.2023, <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>]
- BatteryUniversity.** (2021d). *Charging Nickel-Metal-Hydrid.* [Erişim: 24.08.2023, <https://batteryuniversity.com/article/bu-408-charging-nickel-metal-hydride>]
- BatteryUniversity.** (2021e). *How to Prolong Lithium-Based Batteries.* [Erişim: 22.08.2023, <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>]
- BatteryUniversity.** (2021f). *Types of Lithium-ion.* [Erişim: 22.08.2023, <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>]
- Cem, Z. T.** (2023). *Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryaların Sağlık ve Şarj Durumlarının Makine Öğrenmesi ile Tahmini* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Düzce Üniversitesi.

Çetin, M. S., Karakaya, B., & Gençoğlu, M. (2021). *Elektrikli Araçlar İçin Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi*. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 755-763.

Çoruh, N., Erfidan, T., & Ürgün, S. *DA-DA Boost Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi / Design and Implementation of DC-DC Boost Converter*. Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Kocaeli Üniversitesi, Sivil Havacılık YO Kocaeli Üniversitesi.

Dantondji, E. A. (2021). *High-Power Density and High-Efficiency Isolated On-Board Battery Charger Design and Implementation for Electric Vehicles* (Yüksek Lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Demirel, O. (2019). *Üç Seviyeli T-Tipi İzole İki Yönlü DA-DA Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulaması / Three Level T-Type Isolated Bidirectional Dc-Dc Converter Design And Real-Time Application* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Doğan, M. (2019). *Katı Hal Enerji Depolama Cihazlarında Fosfat Esaslı Ucuz Çözüm Yaklaşımları* [Yayımlanmamış doktora tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Dudak, A. T., & Bakan, A. F. (2018). *Güç Elektroniği Dönüştürücüleri için Adaptif Histeresis Akım Kontrol Yönteminin Geliştirilmesi*. *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1), 51-60.

EMB (2010). *Lithium-ion Battery*. [Erişim: 22.08.2023, <https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAAItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>]

Gültek, E. & Altın, S. (2022). *LiFePO₄ Bataryalarda Güncel Çalışmalar*. *Turkish Journal of Engineering Research and Education*, 1(2).

Tran, V. L., Vu, H. N., Tran, D. D., & Choi, W. (2016). *Design And Implementation Of a High-Efficiency Multiple Output Charger Based On The Time-Division Multiple Control Technique*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), 1210-1219.

Hoffart, F. (2005) *Linear Chargerfor Nickel Cadmiumor Nickel Metal Hydride Batteries Minimizes Parts Count. Analog Devices*. [Erişim: 24.08.2023, <https://www.analog.com/en/technical-articles/linear-charger-for-nickel-cadmium-or-nickel-metal-hydride-batteries.html>]

İşen, E., & Tarlak, H. (2018). *Elektrikli Araçlar ve Akü Şarj Sistemleri*. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 124-141.

Karahan, İ., KAPLAN, Y., & ÜNALDI, G. G. (2022). *The Current Situation of the Development of Electric Vehicle Technology in Turkey*. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (36), 284-287.

Karsavuran, I. E., & Çilliyüz, Y. (2023). *Elektrikli Araçlarda Hızlı Şarj Teknolojilerinin Batarya Ömürlerine Etkileri* [Bildiri sunumu]. Düzce Üniversitesi | 11. Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu, Düzce.

Küçükdeveci, N. (2018). *Şarj Edilebilir Nikel-Metal Hidrür (Ni-Mh) Pillerinde Kullanılan Hidrojen Depolama Alaşımlarındaki Son Gelişmeler*. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 454-472.

Marzouk, M. (2015). *Developpement De Chargeurs Integres Pour Vehicules Hybrides Plug-In* [Doktora tezi, Universite Grenoble Alpes (ComUE)].

Meintz, A., Markel, T., Burton, E., Wang, L., Gonder, J., & Brooker, A. (2015). *Implementation Scenarios For Electric Vehicle Roadway Wireless Power Transfer*. *NREL (National Renewable Energy Laboratory) (No. NREL/PO-5400-64336)*. *National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States)*.

Moralı, U., & Salim, E. (2020). *18650 Lityum-İyon ve 6HR61 Nikel-Metal Hidrit Tekrar Şarj Edilebilir Pillerinin Elektrokimyasal Empedans Analizi*. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 297-310.

Murata Innovator in Electronics (2023). *High Power, High Frequency Transformers*. [Erişim: 07.06.2023, <https://www.murata.com/en-eu/products/transformers/highpower-highfrequency-transformers>]

Muratoğlu, Y., & Alkaya, A. (2016). *Elektrikli Araç Teknolojisi ve Pil Yönetim Sistemi-İnceleme*. *Elektrik Mühendisliği*, 458, 10-14.

Musavi, F., Craciun, M., Gautam, D. S., Eberle, W., & Dunford, W. G. (2013). *An LLC Resonant DC-DC Converter for Wide Output Voltage Range Battery Charging Applications*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5437-5445.

Nissan Global. (2024). *2018 LEAF First Responder's Guide*. [Erişim: 11.01.2024, <https://www.goodcar.co/hubfs/Nissan%20Leaf%20EV%202018-%20%20ERG.pdf>]

Özkan, Z., & Hava, A. M. (2012). *Güç Elektroniği Dönüřtürücülerinin Yarı İletken Veri Yapraklarına Dayalı Verim Hesaplama Yöntemi / Power Electronic Converter Efficiency Calculation Method Based On Semiconductor Datasheets* [Bildiri sunumu]. Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa.

Öztürk M., Kahveci H., & Kırıkcı1, F. M. (2022). *İki Yönlü Çift Aktif Köprülü DA-DA Dönüştürücünün Tasarımı ve Kontrolü / Design and Control Of Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converter* [Bildiri sunumu]. Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, Bursa

Pavlovic Z., Oliver J.A., Alou P., Garcia O. & Cobos A, J. (2012). *Bidirectional Dual Active Bridge Series Resonant Converter With Pulse Modulation* [Bildiri sunumu]. *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference And Exposition*, Madrid, Spain.

Restrepo, A. E. D. (2010). *Strategy To Electricify Public Transportation Systems In Colombia*.

Saft (2022). *Charging Your Lithium-ion Batteries: 5 Experttipsfor A Longer Lifespan*. [Erişim: 23.08.2023, <https://www.saft.com/energizing-iot/charging-your-lithium-ion-batteries-5-expert-tips-longer-lifespan>]

Sayın, A.A., & Yüksel, İ. (2011). *Elektrikli Renault Fluence Aracı, Lityum-iyon Bataryasının Modellenmesi ve Batarya Yönetimi, Mühendis ve Makine*, 52(616):75-82.

Sezer, K. C., & Basmacı, G. (2022). *şarj Edilebilir Pillere Genel Bakış. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 297-309.

şahin, Y., Aksoy, İ., & Tınę, N.S. (2014) *Dc-Dc Dönüştürücülerde Kullanılan Yumuşak Anahtarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması / The Comparison Of Methods Used In Soft Switching Dc-Dc Converters* [Bildiri sunumu]. Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, Bursa.

şen, G., Boynuegri A.R., & Uzunoglu M. (2011). *Elektrikli Araçların şarj Yöntemleri ve Araçların şebekeyle Bağlantısında Karşılaşılan Problemlere Yönelik Çözüm Önerileri, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Fırat Üniversitesi-Elazığ*.

Tarlak, H. (2018). *Elektrikli Araçlar için İki Yönlü Şarj Devresi Tasarımı* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Whitaker, B., Barkley, A., Cole, Z., Passmore, B., Martin, D., McNutt, T. R., Alexander, B. L., Jae, S. L., & Koji, S. (2014). *A High-Density, High-Efficiency, Isolated On-Board Vehicle Battery Charger Utilizing Silicon Carbide Power Devices. IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(5), 2606–2617.

Ziyat, I., Gola, A., Palmer, P. R., Makonin, S., & Popowich, F. (2023). *EV Charging Profiles and Waveforms Dataset (EV-CPW) and Associated Power Quality Analysis. IEEE Access*.

