

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRİKLİ ARAÇ HIZLI ŞARJ SİSTEMİ İÇİN ÜÇ FAZLI ÜÇ
SEVİYELİ YÜKSEK GÜÇ FAKTÖRLÜ DİYOT KENETLEMELİ AA/DA
DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Merve MOLLAHASANOĞLU

ŞUBAT 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ELEKTRİKLİ ARAÇ HIZLI ŞARJ SİSTEMİ İÇİN ÜÇ FAZLI ÜÇ
SEVİYELİ YÜKSEK GÜÇ FAKTÖRLÜ DİYOT KENETLEMELİ AA/DA
DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ**

Merve MOLLAHASANOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 / 01 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 02 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, elektrikli araç hızlı şarj sistemi için üç fazlı üç seviyeli yüksek güç faktörlü diyot kenetlemeli AA/DA dönüştürücünün geliştirilmesine odaklanılmaktadır. Ayrıca bu sistem için yeni bir modülasyon tekniği önerilmektedir.

Bu tez, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından “1002–Hızlı Destek Programı” kapsamında 123E050 numaralı proje kodu desteklenmiştir.

Doktora tez danışmanlığımı üstlenerek bana her aşamada yardımcı olan, fikirleri ve yönlendirmeleriyle çalışmalarına katkı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’a teşekkürlerimi saygı ve minnetle sunarım. Tez çalışmam süresince yaptıkları değerli katkılardan ve önerilerden ötürü tez jüri üyelerim Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ ve Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında, fikirleriyle bana katkı sağlayan, en zorlandığım anlarda bana destek olan her türlü bilgiyi ve tecrübesini aktaran kıymetli hocam Doç. Dr. Emre ÖZKOP’a teşekkürlerimi en içten dileklerle sunarım.

Tüm eğitim ve öğretim hayatım boyunca bana destek olan ve beni bu günlere getiren canım annem Asiye AYDIN’a ve canım babam Hayri AYDIN’a sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam süresince, motivasyon kaynağım ablam Nihal Aydın ÖREMİŞ’e, sayısal işaret işleyiciler konusunda bana her türlü desteği sağlayan biricik abim Halil İbrahim AYDIN’a çok teşekkür ederim. En zor zamanlarımda daima yanımda olan ablam Zeliha Aydın KASAP’a ve arkadaşım Hatice OKUMUŞ’a sonsuz minnettarım.

Son olarak, doktora çalışmalarım boyunca yanımda olan büyük bir hoşgörü ve sabırla bana katlanan, hiçbir zaman desteğini benden esirgemeyen, hayat arkadaşım, meslektaşım sevgili eşim Hakkı MOLLAHASANOĞLU’na, eşimin annesi Emine Anneme ve babası Faik MOLLAHASANOĞLU’na teşekkürlerimi en kalbi duygularıyla sunarım. Bu süreci büyük bir sabırla tamamlamamı bekleyen neşe kaynağım, kızım Nihal’imden ondan ayrı kaldığım zamanlar için özür dilerim.

Bu tez çalışmasını, hayatım boyunca bana inancı tam olan, ilham kaynağım, evladı olmaktan gurur duyduğum, meslektaşım babam Hayri AYDIN’a ithaf ediyorum.

Merve MOLLAHASANOĞLU

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Elektrikli Araç Hızlı Şarj Sistemi için Üç Fazlı Üç Seviyeli Yüksek Güç Faktörlü Diyot Kenetlemeli AA/DA Dönüştürücünün Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’ un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/02/2024

Merve MOLLAHASANOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Motivasyonu, Amacı, Çözüm Yaklaşımı, Organizasyonu ve Katkısı	7
1.3. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	10
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE HIZLI ŞARJ SİSTEMLERİ.....	19
2.1. Hızlı Şarj Sistemi İçin DA-DA Dönüştürücüler.....	27
2.1.1. İzolesiz DA-DA Dönüştürücüler	27
2.1.2. İzoleli DA-DA Dönüştürücüler.....	30
2.2. Hızlı Şarj Sistemi İçin AA/DA Dönüştürücüler.....	32
2.3. Tez Kapsamında Değerlendirilen Hızlı Şarj Sistemi için Üç Fazlı Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli AA/DA Güç Faktörü Düzenleyici	35
3. ÇOK SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE MODÜLASYON YÖNTEMLERİ	39
3.1. Uzay Vektör Modülasyonu	41
3.2. Darbe Genişlik Modülasyon Yöntemi.....	45
3.2.1. Taşıyıcı Tabanlı Düşük Frekanslı Modülasyon	46
3.2.2. Taşıyıcı Tabanlı Yüksek Frekanslı Modülasyon	47
3.2.3. Taşıyıcı Tabanlı Hibrit Frekanslı Modülasyon	50
3.3. Tez Kapsamında Değerlendirilen Yeni Taşıyıcı Tabanlı Hibrit Frekanslı SK-DGM Tekniği.....	52
4. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	54
4.1. Benzetim Çalışmaları	54

4.1.1.	EA Hızlı Şarj Cihazı İçin İzoleli DA-DA Dönüştürücülerde Gerçekleştirilen Üç Fazlı Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli GFD Doğrultucunun Değerlendirilmesi.....	54
4.1.2.	Üç Fazlı Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Doğrultucu İçin Yeni DGM Tekniği.....	63
4.1.3.	EA Hızlı Şarj Cihazlarında Uygulanması Düşünülen Üç Fazlı Diyot Kenetlemeli Doğrultucu İçin Yeni Taşıyıcı Tabanlı Seviye Kaydırmalı DGM Kontrolü.....	74
4.2.	Deneysel Çalışmalar.....	86
4.2.1.	F28379D DSP Uygulama Geliştirme Kartı ile Yeni Modifiyeli DGM Tekniği İçin Yazılım Geliştirilmesi	86
4.2.2.	Üç Fazlı Üç Seviyeli 3L-SkiiP28MLI07E3V1 SEMİKRON Güç Modülü	89
4.2.3.	Yeni Seviyeli Kaydırmalı Modifiye Edilmiş DGM Yönteminin Üç Fazlı Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Doğrultucu İçin Doğrulanması	93
5.	SONUÇLAR.....	100
6.	ÖNERİLER.....	102
7.	KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

ELEKTRİKLİ ARAÇ HIZLI ŞARJ SİSTEMİ İÇİN ÜÇ FAZLI ÜÇ SEVİYELİ YÜKSEK GÜÇ FAKTÖRLÜ DİYOT KENETLEMELİ AA/DA DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

Merve MOLLAHASANOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ
2024, 111 Sayfa, 2 Ek Sayfa

Elektrikli araç kullanıcıları, araçların şarj süreleri ve gidebilecekleri menzil konusunda endişeli olduklarından, araştırmacılar şarj altyapısını iyileştirmeye yönelmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında ilk olarak hızlı şarj istasyonları için ele alınan çok seviyeli dönüştürücü topolojileri ve modülasyon teknikleri için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Daha sonra üç seviyeli diyot kenetlemeli güç faktörü düzenleyici topoloji çeşitli hibrit frekanslı modülasyon teknikleri ile 300 kW gücündeki hızlı şarj sistemi için benzetim çalışmaları ile tartışılmıştır. Hızlı şarj istasyonlarında uygulanması düşünülen diyot kenetlemeli doğrultucunun çıkış akım ve gerilim dalgalanmasının IEEE standartlarında olması, doğrultucunun nötr nokta gerilim dengesini koruması, şebekeden çekilen akım harmoniğinin %5'in altında olması, güç faktörünün 1 olması ve doğrultucunun verimli çalışması çok önemlidir. Bu doğrultuda, bu çalışmada ele alınan doğrultucunun standartlara uygun çalışabilmesi için yeni bir modifiye edilmiş taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı DGM yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem için TMS320F28379D sayısal işaret işleyicisi kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem düşük güçte üç fazlı üç seviyeli 3L-SKiiP28MLI07E3V1 güç modülü üzerinde test edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda modifiye edilmiş seviye kaydırmalı hibrit frekanslı DGM yönteminin geçerliliği ve esnekliği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Taşıyıcı tabanlı modülasyon, Güç faktörü düzenleyiciler, Üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu, Güç kalitesi

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF THREE-PHASE THREE-LEVEL HIGH POWER FACTOR DIODE CLAMPED AC/DC CONVERTER FOR ELECTRIC VEHICLE FAST CHARGING SYSTEM

Merve MOLLAHASANOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Halil Ibrahim OKUMUS
2024, 111 Pages, 2 Appendix Pages

As electric vehicle users are concerned about the charging time and range of their vehicles, researchers are turning their attention to improving the charging infrastructure. This thesis first presents a comprehensive literature review of the multilevel converter topologies and modulation techniques considered for fast charging stations. Then, a three-level diode clamped power factor regulator topology with various hybrid frequency modulation techniques is discussed with simulation studies for a 300 kW fast charging system. It is very important that the output current and voltage ripple of the diode clamped rectifier considered for application in fast charging stations are within IEEE standards, the rectifier maintains the neutral point voltage balance, the current harmonic drawn from the grid is below 5%, the power factor is 1 and the rectifier operates efficiently. Accordingly, a new modified carrier-based hybrid frequency DGM method is proposed for the rectifier considered in this study to operate in accordance with the standards. A software has been developed for the proposed method using the TMS320F28379D digital signal processor. The proposed method is tested on a low power three-phase three-level 3L-SKiiP28MLI07E3V1 power module. The validity and flexibility of the modified level-shifted hybrid frequency DGM method are emphasized.

Key Words: Electric vehicles, Carrier-based modulation, Power factor correction, Three-level diode clamped rectifier, Power quality

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. EA'ların dahili ve harici şarj sistemleri.....	2
Şekil 2. a) Tek aşamalı EA şarj sistemi genel blok diyagramı b) İki aşamalı GFD dönüştürücüsüne sahip EA şarj sistemi genel blok diyagramı	2
Şekil 3. DA Hızlı şarj topolojisi genel diyagramı	3
Şekil 4. Akım ve gerilimin zamanla değişimi	5
Şekil 5. Tez kapsamında incelenen üç fazlı diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için irdelenen çıktıların sembolik gösterimi	8
Şekil 6. Tasarlanan sistemin genel blok şeması	8
Şekil 7. Tezin planlaması.....	9
Şekil 8. Güç kalitesi iyileştirilmiş AA/DA dönüştürücüler	11
Şekil 9. EA hızlı şarj altyapısında yer alan devre topolojilerinin sınıflandırılması.....	14
Şekil 10. EA şarj yöntemlerinin sınıflandırılması.	20
Şekil 11. Araç içi ve araç dışı şarj sistemi.....	21
Şekil 12. DA hızlı şarj istasyonu blok şeması a) yalıtımsız DA-DA dönüştürücüye sahip hızlı şarj cihazı blok şeması b) yalıtımlı DA-DA ile yapılandırılmış hızlı şarj cihazı blok şeması.....	25
Şekil 13. Hızlı şarj cihazları için ele alınan bazı yalıtımsız DA-DA dönüştürücüler a) yarım köprü artıran dönüştürücü b) kademeli artıran dönüştürücü c) tek yönlü üç seviyeli artıran dönüştürücü d) çift yönlü üç seviyeli artıran dönüştürücü e) üç seviyeli uçan kapasitörlü dönüştürücü.....	28
Şekil 14. Hızlı şarj için izoleli DA-DA topolojileri a) FKTK dönüştürücü b) LLC dönüştürücü c) ÇAK dönüştürücü d) CLLC dönüştürücü.....	30
Şekil 15. EA hızlı şarj uygulamalarında kullanılan AA/DA dönüştürücü topolojileri a) Üç faz-iki seviyeli doğrultucu b) Üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu c) Üç faz Vienna doğrultucu	33
Şekil 16. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun devre şeması.....	35
Şekil 17. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazı için üç çalışma modu	38
Şekil 18. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazı için gösterilen anahtarlama sinyalleri.....	38
Şekil 19. Çok seviyeli dönüştürücülerde modülasyon yöntemleri	40
Şekil 20. Çok seviyeli dönüştürücüler için modülasyon tekniklerinin özeti	41
Şekil 21. Diyot kenetlemeli doğrultucu için klasik UVM kontrol blok şeması	42

Şekil 22. a) 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için uzay vektördeki tüm anahtarlama durumları b) 1. sektördeki referans vektör.....	44
Şekil 23. Sinüzoidal DGM tekniği sonucu anahtarlama işaretleri.....	46
Şekil 24. Faz yer değiştirmeli SK-DGM yöntemleri.....	47
Şekil 25. SK-DGM sonucu anahtarlama işaretleri a) $M_i = 0.9$ b) $M_i = 0.3$	48
Şekil 26. FK-DGM sonucu anahtarlama işaretleri a) $M_i = 0.9$ b) $M_i = 0.3$	49
Şekil 27. Asimetrik kaskad (a) ve hibrit topolojiler (b) için karışık frekans modülasyonu	50
Şekil 28. Taşıyıcı sinyal (TS) formları	51
Şekil 29. Yeni taşıyıcı sinyalin elde edilmesi.....	52
Şekil 30. Önerilen taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı SK_DGM tekniği ve anahtarlama işaretleri.....	53
Şekil 31. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu, izoleli DA-DA dönüştürücüler	55
Şekil 32. EA hızlı şarj sistemi genel tasarımı	55
Şekil 33. FKTK ve ÇAK dönüştürücüler için doğrultucu giriş terminal gerilimi ve şebeke akımı	57
Şekil 34. Benzetim arayüzünde güç faktörü hesabı.....	58
Şekil 35. ÇAK dönüştürücü için 800 Volt ve 125 Amper dalgalanmaları (%).....	59
Şekil 36. FKTK (a) ve ÇAK (b) dönüştürücüler için doğrultucu çıkışındaki C1 ve C2 gerilim dalga formları	59
Şekil 37. ÇAK dönüştürücü ile tasarlanan hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazının harmonik spektrumu (%THB)	60
Şekil 38. FKTK ile kurulan hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazının harmonik spektrumu (%THB).....	61
Şekil 39. Yük gücü değişimiyle birlikte giriş güç faktörü değişimi.....	61
Şekil 40. Yük gücüne bağlı 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun veriminin değişimi	62
Şekil 41. Anahtarlama frekansına karşılık gelen giriş akımı %harmonigi	62
Şekil 42. Sistemin genel tasarımı ve 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun d-q dönüşümüne dayalı kontrol yöntemi	64
Şekil 43. a) Klasik taşıyıcı tabanlı SK-DGM tekniği ve anahtarlama işaretleri b) Önerilen değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı SK-DGM tekniği ve anahtarlama işaretleri.....	66
Şekil 44. 350 kW 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için gerilim ve akım dalgalanmaları: a) klasik bir üçgen SK-DGM b) önerilen değiştirilmiş hibrit frekanslı SK-DGM.....	68

Şekil 45. DGM tekniklerine dayalı olarak her iki taşıyıcı için doğrultucu çıkış dalgalanmalarının 75 kW-350 kW arasındaki değişimi a) gerilim dalgalanması b) akım dalgalanması.....	69
Şekil 46. a) Önerilen DGM tekniği ile 350 kW gücündeki sistemin doğrultucu terminal girişleri b) Giriş terminal gerilimi (Van) ve şebeke akımı (Ian)	69
Şekil 47. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun yük gücü değişimiyle birlikte giriş güç faktörü değişimi	70
Şekil 48. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun her iki DGM tekniği için güç-verim değişimi	71
Şekil 49. GFD doğrultucunun yük gücüne bağlı AA terminal akımının THB'sinin değişimi	71
Şekil 50. 350 kW gücündeki doğrultucunun AA terminal akımının FFT'leri. a) klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi b) önerilen değiştirilmiş hibrit frekanslı SK-DGM yöntemi	72
Şekil 51. Klasik taşıyıcı tabanlı ve modifiyeli taşıyıcı tabanlı DGM tekniğine göre kontrol edilen 350 kW gücündeki doğrultucunun kapasite dengesi: a) klasik DGM yöntemi b) önerilen modifiyeli SK-DGM yöntemi	73
Şekil 52. EA hızlı şarj cihazı için değerlendirilen 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için ele alınan taşıyıcı sinyal formları	77
Şekil 53. Sistemin genel tasarımı ve 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun d-q dönüşümüne dayalı kontrol yöntemi	78
Şekil 54. 300 kW EA hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun gerilim ve akım dalgalanmaları.....	80
Şekil 55. 50-300 kW arasındaki hızlı şarj sistemi için değerlendirilen doğrultucunun çıkış dalgalanmalarının farklı taşıyıcı sinyaller için değişimi a) gerilim dalgalanması b) akım dalgalanması.....	80
Şekil 56. a) TS4 tabanlı SK-DGM tekniği ile ele alınan 300 kW gücündeki hızlı şarj sistemi için doğrultucu terminal girişleri b) giriş terminal gerilimi (Van) ve şebeke akımı (Ian).	81
Şekil 57. Hızlı şarj sisteminin gücüne bağlı olarak güç faktörü değişimi	82
Şekil 58. GFD doğrultucunun farklı taşıyıcılı modülasyonlar için verim-güç grafiği	82
Şekil 59. 300 kW gücündeki TS4 tabanlı modülasyon tekniği ile tasarlanan sistemin AA terminal akımının FFT'leri.....	83
Şekil 60. Farklı TS tabanlı modülasyon teknikleri ile gerçekleştirilen doğrultucunun 50 kW-300kW arasındaki güç değerlerine bağlı olarak AA terminal akımının THB'sinin değişimi.....	83
Şekil 61. Tüm taşıyıcı tabanlı DGM teknikleri için kapasite gerilim dengesi: a) TS1, b) TS2, c) TS3, d) TS4, e) TS5 ve f) TS6.	84
Şekil 62. TMS320F28379D DSP kontrol kartı ve kullanılan çıkış pinleri.....	87

Şekil 63. Deneysel çalışmada kullanılan 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun anahtarlama işaretlerinin elde edilmesi için tasarlanan uygulama arayüzü.....	88
Şekil 64. Anahtarların yeni modifiyeli seviye kaydırmalı DGM yöntemi ile oluşturulmuş işaretlerinin 8 kanallı lojik analizör ile elde edilen görüntüsü	88
Şekil 65. Üç fazlı üç seviyeli 3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMIKRON güç modülü	89
Şekil 66. 3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMIKRON güç modülünün bir fazına ait blok şeması	90
Şekil 67. a) IGBT tetikleme uçlarına iletilen anahtarlama işaretlerine ait görüntü b) Ta1 ve Ta3 anahtarlarının işaretleri arasındaki ölü zaman gösterimi.....	91
Şekil 68. Güç modülü sürücü kartı	92
Şekil 69. DSP-tabanlı 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultuculu sistemin genel blok diyagramı.....	93
Şekil 70. a) Gerilim bölücü sensör devresi, b) Sensör devresi giriş çıkış sinyalleri	94
Şekil 71. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu deney düzeneği	96
Şekil 72. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun faz-faz arasında meydana gelen üç seviye	96
Şekil 73. Nötr nokta kilitlemeli devrenin üst kapasite ve alt kapasite gerilimleri a) önerilen TS4 taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi b) klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi.....	97
Şekil 74. Her iki modülasyon tekniği ile giriş gerilimine karşılık çıkış gerilim değişimi	98
Şekil 75. Giriş gerilimine karşılık kapasite uçlarında meydana gelen gerilim farkı	98

TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Üç fazlı AA/DA GFD dönüştürücülerinin karşılaştırılması.....	13
Tablo 2. Araç içi ve araç dışı şarj sistemlerinin karşılaştırılması.....	19
Tablo 3. Şarj gücü seviyelerine bağlı olarak şarj istasyonlarının sınıflandırılması.....	22
Tablo 4. DA hızlı şarj sistemleri için farklı standartlar	23
Tablo 5. Piyasada var olan bazı DA hızlı şarj cihazlarının teknik özellikleri	23
Tablo 6. Piyasadaki bazı elektrikli araçların şarj özellikleri	24
Tablo 7. Yalıtımsız DA-DA topolojilerinin karşılaştırmalı analizi.....	29
Tablo 8. DA hızlı şarj cihazları için farklı izoleli DA-DA dönüştürücülerin karşılaştırılması	32
Tablo 9. Hızlı şarj cihazları için ele alınan doğrultucuların ayrıntılı analizi.....	34
Tablo 10. Hızlı şarj için ele alınan 2-seviyeli ve 3-seviyeli GFD topolojilerinin karşılaştırmalı analizi.....	34
Tablo 11. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun anahtarlama durumları ve çıkışta buna karşılık gelen gerilim değerleri	37
Tablo 12. İki farklı izoleli DA-DA dönüştürücü ile farklı kapasite değerleri için % dalgalanma faktörü	57
Tablo 13. 100 kW'lık hızlı şarj sisteminde 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için benzetim çalışmalarındaki sistem parametreleri	57
Tablo 14. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için sistem parametreleri.....	67
Tablo 15. EA hızlı şarj sisteminin benzetim parametreleri	79
Tablo 16. EA hızlı şarj cihazı için 300 kW 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için sayısal gözlem sonuçları.....	85
Tablo 17. 3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMIKRON güç modülünün teknik özellikler.....	91
Tablo 18. 40 pinli kontrol arayüzünün tez kapsamında kullanılan 16 adet pini.....	92

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a, b, c	Üç faz eksen takımı
d, q	Referans eksen takımı
$f_{anahtarlama}$	Anahtarlama frekansı
i_a, i_b, i_c	3-faz hat akımları
m_i	Modülasyon indeksi
t_{on}	Anahtarın açılma zamanı
t_{off}	Anahtarın kapanma zamanı
t_s	Örnekleme zamanı
V_a, V_b, V_c	3-faz terminal gerilimleri
V_{cr}	Taşıyıcı sinyal genliği
η	Verim
3Ø-2S	Üç fazlı-iki seviyeli
3Ø-3S	Üç fazlı-üç seviyeli
AA	Alternatif Akım
AG	Alçak Gerilim
AKFYD	Alternatif Karşılıklı Faz Yer Değiştirmeli
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
ÇAK	Çift- Taraflı Aktif Köprü
DA	Doğru Akım
DGK	Direk Güç Kontrolü
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
DSP	Digital Signal Processor (Digital Sinyal İşlemci)
EA	Elektrikli Araç
EMI	Electro-Magnetic Interface
FKD	Faz Kilitlemeli Döngü
FK-DGM	Faz Kaydırmalı Darbe Genişlik Modülasyonu
FKTK	Faz Kaydırmalı Tam Köprü
FYD	Faz Yer Değiştirmeli
GaN	Galyum Nitrür
GF	Güç Faktörü

GFD	Güç Faktörü Düzenleyici
Hz	Hertz
KFYD	Karşılıklı Faz Yer Değiştirmeli
MPC	Modeli Öngörülü Kontrol
OG	Orta Gerilim
SDGM	Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
SiC	Silisyum Karbür
SHE	Seçici Harmonik Eliminasyonu
SHM	Seçici Harmonik Azaltma
SK-DGM	Seviye Kaydırmalı Darbe Genişlik Modülasyonu
THB	Toplam Harmonik Bozulma
TS	Taşıyıcı Sinyal
UVM	Uzay Vektör Modülasyonu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Artan hava kirliliği sorunu, otomotiv sektöründe temiz ve verimli yakıta dayalı araştırmaları beraberinde getirdiği için elektrikli araçlara olan ilgi giderek artmaktadır. Ancak elektrikli araçların şarj süreleri ve gidebilecekleri menziller kullanıcı tarafından endişe oluşturmaktadır. Elektrikli araçların geniş çapta benimsenmesi için yüksek güçlü, düşük maliyetli güvenilir şarj çözümlerini geliştirmek gerekir. Bu durum araştırmacıları hızlı şarj istasyonlarındaki şarj alt yapısını geliştirmeye yönlendirmektedir. Şarj alt yapısını kuvvetlendirmek için ise güç elektroniği dönüştürücülerinin araştırılması ve geliştirilmesi gerekir.

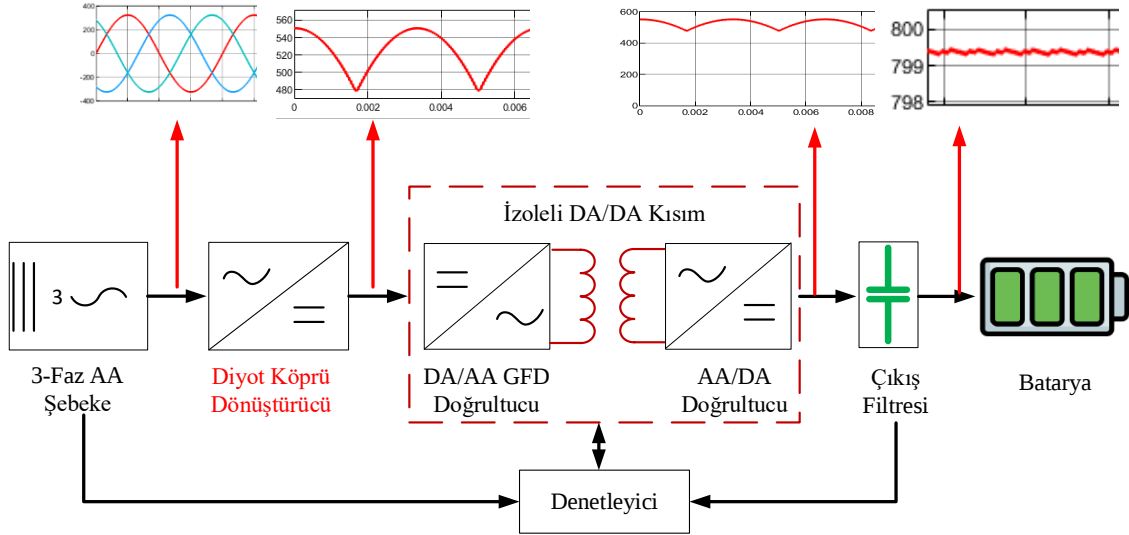
Elektrik enerjisi, doğrudan aküye uygulanacak bir formda değildir. Elektrikli araçlar (EA) için mevcut şarj cihazları, enerjiyi yüksek gerilimli alternatif akım veya doğru akım formunda elektrikli araçlara iletir. Alternatif akım şarj cihazları elektrikli aracın dâhili şarj ünitesine alternatif akım sağlar. Aracın içerisindeki şarj altyapısı sayesinde akü şarj edilir. Dâhili (on-board) şarj cihazları araç içerisinde ekstra bir donanım gerektirir ve düşük akımlarda çalıştığı için yavaştır. Ancak herhangi bir elektrik prizinden şarj olanağı sağlanabilir. Doğru akım şarj cihazları, alternatif akımı harici dönüştürür ve elektrikli aracın içinde AA/DA şarj alt yapısı gerektirmeden doğrudan araç bataryasına güç sağlar. Elektrikli araç aküsü yüksek akımlarda şarj edildiğinden işlem oldukça hızlı gerçekleşmektedir. Hızlı şarj istasyonları uzun süre aracın şarjını beklemek gereksinimini ortadan kaldırır ancak yüksek güç çıkışı sağladığından altyapı maliyetleri fazladır. Bu nedenle hızlı şarj ticari amaçlarla kurulan şarj istasyonlarında sunulmaktadır (Khaligh & D'Antonio 2019; Monteiro vd. 2020). Şekil 1, dahili ve harici şarj sistemlerini göstermektedir.

AA/DA GFD aşaması hem AA şebeke geriliminin düzeltilmesini hem de güç faktörünün 1 olmasını sağlarken DA-DA dönüştürücü aşaması çıkış gerilimini düzenlemek ve bir arıza durumunda bataryanın zarar görmesini önlemek için izolasyon sağlamaktadır. Bu yapının kontrolü anahtar sayısının daha fazla olması nedeniyle tek aşamalı yapıya göre daha karmaşıktır. Ancak bu topoloji, esnek giriş-çıkış gerilim aralıkları ve yüksek güç seviyelerinde yüksek verimlilik sağladığından harici şarj cihazları için uygundur (Upputuri & Subudhi 2023).



Şekil 1. EA'ların dahili ve harici şarj sistemleri

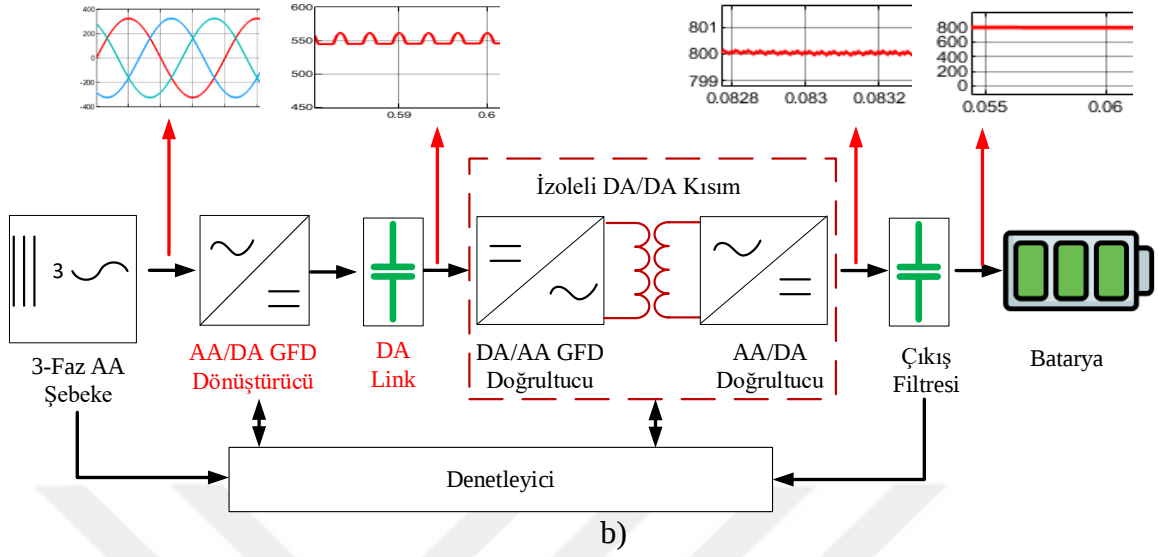
EA şarj cihazları güç dönüşüm özelliklerine göre tek aşamalı ve iki aşamalı yapı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Tek aşamalı şarj cihazı Şekil 2.a' da görüldüğü gibi bir diyot köprü doğrultucusu ve izole edilmiş bir DA-DA dönüştürücünden oluşur. Yalıtılmış DA-DA dönüştürücü güç faktörünün 1 olması açısından ve çıkış gerilimindeki dalgalanmayı azaltmak için önemlidir. Bu topoloji, düşük güçlü uygulamalarda yüksek verim sağlar ancak yüksek güçlü uygulamalarda yetersiz kalır (Acharige vd. 2023).



a)

Şekil 2. a) Tek aşamalı EA şarj sistemi genel blok diyagramı b) İki aşamalı GFD dönüştürücüsüne sahip EA şarj sistemi genel blok diyagramı

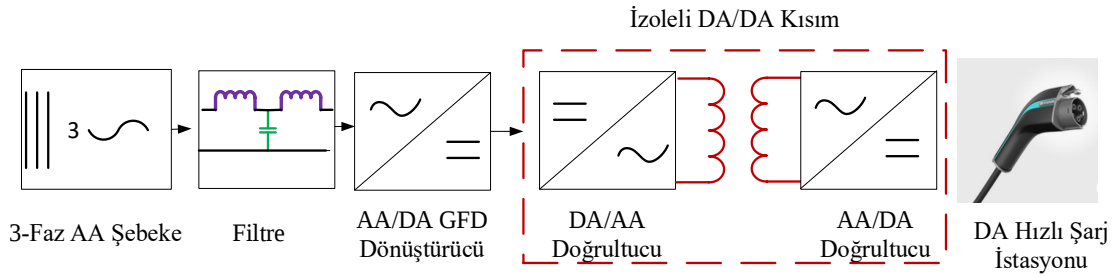
Şekil 2'nin devamı



İki aşamalı EA şarj yapısının basit blok diyagramı Şekil 2.b'de gösterilmektedir. İki aşamalı şarj yapısı bir AA/DA Güç Faktörü Düzenleyici (GFD) dönüştürücü ve yüksek frekanslı izolasyon transformatörüne sahip bir DA-DA dönüştürücünden oluşur.

Geleneksel elektrikli araç hızlı şarj cihazları iki aşamalı bir yapıya sahiptir. Bu şarj cihazları güç faktörü düzenleyiciye sahip bir AA/DA dönüştürücü ve izole edilmiş bir DA-DA dönüştürücünden oluşur.

Şekil 3, geleneksel bir hızlı şarj topolojisini göstermektedir.



Şekil 3. DA Hızlı şarj topolojisi genel diyagramı

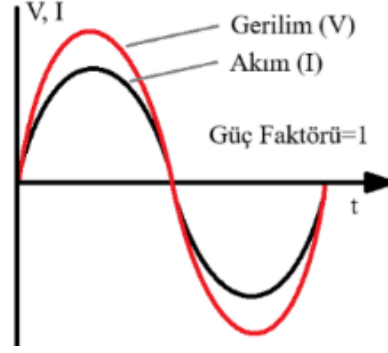
Harici DA şarj cihazları yüksek güçlü uygulamalar olduğundan genellikle üç fazlı AA beslemelidirler. Bir filtre bileşeni ve bir AA'dan DA'ya dönüşüm aşaması ile birlikte GFD işlevi gören bir dönüştürücü vardır. Ayrıca elektrikli araca takılan fişten önce şarj cihazının içinde izole edilmiş bir DA-DA dönüştürücü bulunmaktadır. Şarj cihazı doğrudan elektrikli

aracın aküsüne bağlanır. Şarj işlemini ve güvenlik prosedürlerini kontrol etmek için şarj cihazı ile batarya yönetim sistemi arasında bir iletişim bağlantısı vardır. Elektrikli araçların hızlı şarjı için değerlendirilen AA/DA GFD devresi verimli, yüksek güç faktörlü, düşük akım harmoniğine sahip, çıkış uçlarındaki DA gerilim dalgalanması en az düzeyde olmalıdır (Aretxabaleta vd. 2021).

AA/DA GFD dönüştürücünün ilk önemli görevi birlik güç faktörünü (GF) 1 yapmaktır. GF, aktif gücün, aktif ve reaktif gücün toplamı olan görünen güce oranı olarak tanımlanır. (1) numaralı denklemdeki gibi hesaplanır.

$$\text{Güç Faktörü (GF)} = \frac{\text{Aktif Güç (kW)}}{\text{Görünür Güç (kVA)}} \quad (1)$$

Görünür güç, şebekeden çekilen akımın etkin değeri ile şebeke geriliminin etkin değerinin çarpılmasıyla hesaplanır. Aktif güç, yüke iletilen gerçek güç miktarını temsil eder. Kullanılabilir enerji miktarı olarak da bilinir. Şebekeden çekilen görünür güç, aktif güce eşitse ve yükün tamamen rezistif olması durumunda reaktif güç sıfıra eşittir. Ayrıca aktif güç ile görünen gücün eşit olmaması durumunda reaktif güç, endüktif ve kapasitif elemanlar tarafından tüketilir. Böyle bir durumda çekilen gücün tamamı yüke aktarılmıyor demektir. İdeal bir güç faktörü düzenleyen devreden, şebekeden çekilen gücün tamamını yüke aktarması beklenir. Bu ancak şebekeden çekilen akım ile gerilimin aynı fazda olması durumunda mümkündür. Aralarında faz farkı oluştuğunda şebekeden çekilen gücün bir kısmı reaktif olarak tüketilir. Güç faktörü, giriş gerilim sinyali ile akım sinyali arasındaki faz farkına dayanmaktadır, 0 ile 1 arasında değişir ve 1'e yakın olması beklenir. Güç faktörünün 1 olarak korunması arzu edilirken, yük özellikleri, sistem tasarımı ve çalışma koşulları, buna her zaman izin vermeyebilir. IEEE Standardı 1547-2018'e göre güç elektroniği devrelerinde endüstriyel sistemlerin güç faktörü en az 0.95, ticari sistemler 0.9, konut sistemleri ise 0.8 güç faktörüne sahip olmalıdır. GF'nin 1 olması, Şekil 4 'te gösterildiği gibi akım ve gerilimin aynı faza getirilmesiyle sağlanır.



Şekil 4. Akım ve gerilimin zamanla değişimi

Hızlı şarj cihazlarında yer alan güç elektroniği devreleri şebekeden çekilen akımın dalga biçimlerinin normal sinüzoidal dalga biçiminde olmamasına neden olabilir. Bu durum toplam harmonik bozulma (THB) olayı olarak kabul edilir. AA/DA GFD dönüştürücünün bir diğer önemli görevi, uluslararası standartları karşılayacak minimum toplam harmonik bozulmayı sağlamaktır. THB değeri dönüştürücünün yüküne ve performansına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Ancak bu değerlerin şebeke güvenliği standartlarında (IEC61000-3-2) izin verilen sınırları aşmaması gerekmektedir. AA/DA dönüşümü sırasında yük ve dönüştürücü nedeniyle şebekeden çekilen akım ve gerilimde harmonik bozulmalar meydana gelir. Harmoniklerin şebeke üzerinde bozucu etkileri bulunmaktadır. En basit tanımıyla THB, sinyalin temel olmayan bileşeninin etkin değerlerinin temel bileşenin etkin değerine oranı olarak bilinmektedir. Herhangi bir sinyalin THB değeri denklem (2)' de ki gibi hesaplanabilir:

$$THB_V = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}{V_1^2}} \quad (2)$$

$$THB_I = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2}}$$

Hızlı şarj için değerlendirilecek AA/DA GFD dönüştürücülerinin geliştirilmesi için dönüştürücünün verimli çalışması ve düşük çıkış gerilim dalgalanmasına sahip olması gerekmektedir. Doğrultucu verimi (3) numaralı ifadedeki gibidir.

$$\eta = \frac{\text{Çıkış Gücü (W)}}{\text{Giriş Gücü (W)}} * 100 \quad (3)$$

Doğrultucunun gerilim regülasyonu, çıkış geriliminin nominal çıkış gerilimine göre ne kadar dalgalandığıyla ölçülür. Genellikle bu dalgalanma, yük değişiklikleri veya giriş gerilim dalgalanmaları ile değişir. Düşük gerilim dalgalanamsı yüksek güç uygulamaları için çok önemlidir. (4) numaralı ifade ile hesaplanabilmektedir. IEEE Standardı 1100-2018'de elektronik bir devreyi besleyen güç kaynakları yani AA/DA GFD gibi bir devre için DA çıkış gerilim dalgalanması, nominal geriliminin maksimum %5'i ile sınırlıdır. IEEE Standardı 519-2014'te, motor performansı üzerindeki olumsuz etkileri önlemek için DA motor sürücüler için gerilim dalgalanmasının %1'den az olması tavsiye edilir.

$$V_{ripple} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{nominal}} * 100 \quad (4)$$

İzoleli DA-DA dönüştürücüler hızlı şarj istasyonundan gelen yüksek gerilim DA gücünü aracın aküsünün ihtiyaç duyduğu uygun gerilim seviyelerine dönüştürmek için güvenli ve verimli bir yol sağlarlar. Bununla birlikte, akü gerilim seviyesi aracın markasına ve modeline bağlı olarak değişiklik gösterebilir; bu, hızlı şarj cihazının farklı elektrikli araçlara uyum sağlamak için farklı gerilim seviyeleri sağlayabilmesi gerektiği anlamına gelir. İzole edilmiş DA-DA dönüştürücüler bu bağlamda önemlidir çünkü hızlı şarj istasyonu ile elektrikli araç aküsü arasında elektriksel yalıtım sağlarlar, bu da elektrik çarpmalarını önleyerek, yangın veya patlama riskini azaltarak güvenliğini artırır. Ayrıca şarj istasyonundaki yüksek gerilimi, minimum enerji kaybıyla bataryanın ihtiyaç duyduğu daha düşük gerilim seviyelerine düşürerek verimli güç dönüşümü sağlarlar. Bu durum şarj süresinin azaltılmasına, güç kalitesi ve kararlılıkla ilgili sorunların çözümüne ve genel verimliliğin artırılmasına yardımcı olur.

Güç elektroniği devrelerinde modülasyon dönüştürücünün kalbidir. Dönüştürücülerin doğru ve verimli bir şekilde çalışmalarını sağlamak kritik öneme sahiptir. Doğru modülasyon teknikleri kullanılarak, enerji verimliliği artırılabilir, sistem stabilizesi sağlanabilir ve yüklerin istenilen şekilde kontrol edilmesi mümkün olur. Bu nedenle hızlı şarj istasyonu için değerlendirilen güç elektroniği devreleri için uygun kontrol algoritmaları ve modülasyon teknikleri geliştirmek enerji verimliliği açısından önemli bir yere sahiptir.

Bu tez çalışmasında, hızlı şarj istasyonu için ele alınan AA/DA GFD dönüştürücüsü verim, THB, çıkış gerilim dalgalanması ve güç faktörü parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Literatüre dayanarak ele alınan üç fazlı diyot kenetlemeli AA/DA GFD

doğrultucu için bu parametreler yeni bir modülasyon tekniği ile iyileştirilmiştir. Ayrıca doğrultucu çıkışındaki kapasite dengesi önerilen yeni modülasyon yöntemi ile dengeye gelmektedir.

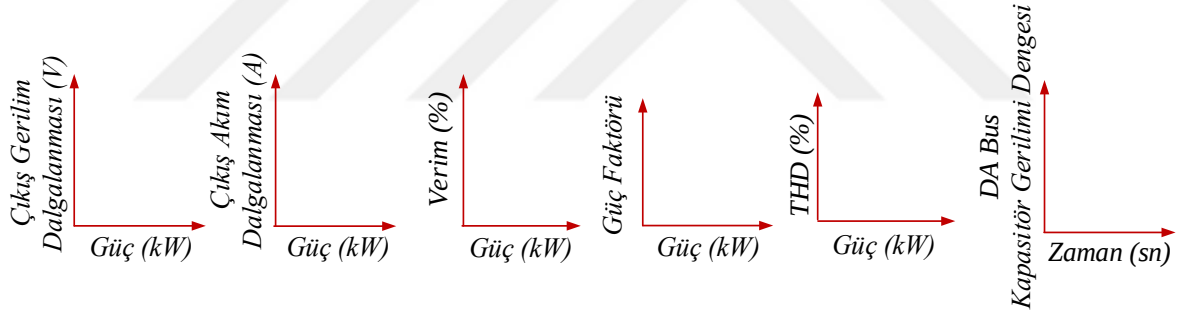
1.2. Tezin Motivasyonu, Amacı, Çözüm Yaklaşımı, Organizasyonu ve Katkısı

Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre elektrikli araç hızlı şarj cihazlarının sayısı 2019 yılında bir önceki yıla göre %60 artmıştır. 2020 yılında hızlı şarj istasyon sayısı bir önceki yıla göre %43 artarken, 2021 yılında hızlı şarj cihazı kurulumundaki artış ise %48 olmuştur. 2021'den sonra Avrupa'daki hızlı şarj cihazlarının sayısı %30'un üzerinde artmıştır. Elektrikli araç satışlarının önümüzdeki birkaç yılda hızla artacağı ve 2020'de 3,1 milyondan 2025'te 14 milyona çıkacağı tahmin edilmektedir (URL-1, 2023). DA hızlı ve ultra hızlı şarj altyapısının geliştirilmesiyle, elektrikli araç sürüş menzili de arttığı için elektrikli araç hızlı şarj istasyonlarının altyapısını iyileştirmek araştırmacılar için bir motivasyon olmaktadır.

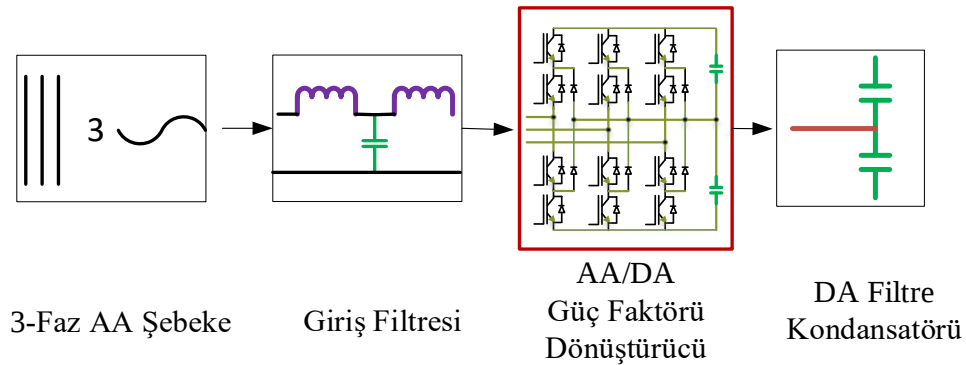
Yüksek güçlü hızlı şarj cihazları, elektrikli araçların yaygınlaşmasına ve günlük kullanıma teşvik etmek için kritik bir faktördür. Daha hızlı, daha verimli ve daha çevre dostu şarj teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması çevresel sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada daha hızlı bir şarj cihazı için daha yüksek güçlü bir doğrultucu geliştirmek amaçlanmaktadır. Elektrikli araçların hızlı şarj altyapısını ve elektrikli araç bataryalarını geliştirmek şarj sürelerinin kısılması için çok önemlidir. EA teknolojileri şarj problemleri için cazip çözümler sunmaktadır ancak araç menzilini sınırlayan batarya performansını bataryanın kullanım şekli ve şarj kalitesi de büyük ölçüde etkilemektedir. Ayrıca birçok elektrikli aracın aynı anda şarj edilmesi sırasında şebekede aşırı yüklenme meydana gelmektedir. Bu nedenle, EA şarj cihazının performansını artırmak, şebeke üzerindeki stresi en aza indirmek ve giriş akımı harmoniklerini uluslararası standartları karşılayacak şekilde sınırlamak çok önemlidir. Bu doğrultuda, “Elektrikli Araçların Hızlı Şarj Sistemi için Üç Fazlı Yüksek Güç Faktörlü Diyot Kenetlemeli AA/DA Dönüştürücünün Geliştirilmesi” adlı tez çalışmasının amacı elektrikli araçların yaygınlaşmasını teşvik etmek, çevre dostu bir ulaşım için enerji verimliliğini artırmak olarak özetlenebilir.

EA şarj cihazlarının çıkışı volt, amper ve güç (kW) olarak derecelendirildiği için bu tez kapsamında doğrultucu çıkışından yüksek akım çekebilmek amaçlanmaktadır. Daha sonra üç fazlı diyot kenetlemeli doğrultucu literatüre dayanarak EA hızlı şarj cihazları için önerilmektedir. Önerilen doğrultucunun 350 kW için IEEE standartlarına uygun çalışması sağlanmaktadır. Bu doğrultucunun yüksek güçlerde çalışması için kontrol stratejileri ve modülasyon teknikleri birlikte değerlendirilerek 300 kW gücündeki hızlı şarj cihazları için benzetimleri gerçekleştirilmektedir. Söz konusu doğrultucunun standartlara uygun çalışması için modülasyon tekniğini geliştirmek tez kapsamında bir çözüm yaklaşımı olmaktadır.

Bu tez kapsamında hızlı şarj için değerlendirilen AA/DA dönüştürücü üç faz diyot kenetlemeli GFD doğrultucusudur. Bahsedilen doğrultucunun güç faktörü düzeltimi yapması, şebekeden çekilen akımın harmoniğinin düşük olmasını sağlaması, doğrultucu çıkışındaki akım ve gerilim dalgalanmalarını düşük miktarda sunması, nötr nokta dengesini sağlaması ve verimli olması başlıca hedefler arasındadır. Söz konusu yüksek güçlü doğrultucu için Şekil 5'te sembolik olarak gösterilen gözlemler bu tez kapsamında incelenmektedir.



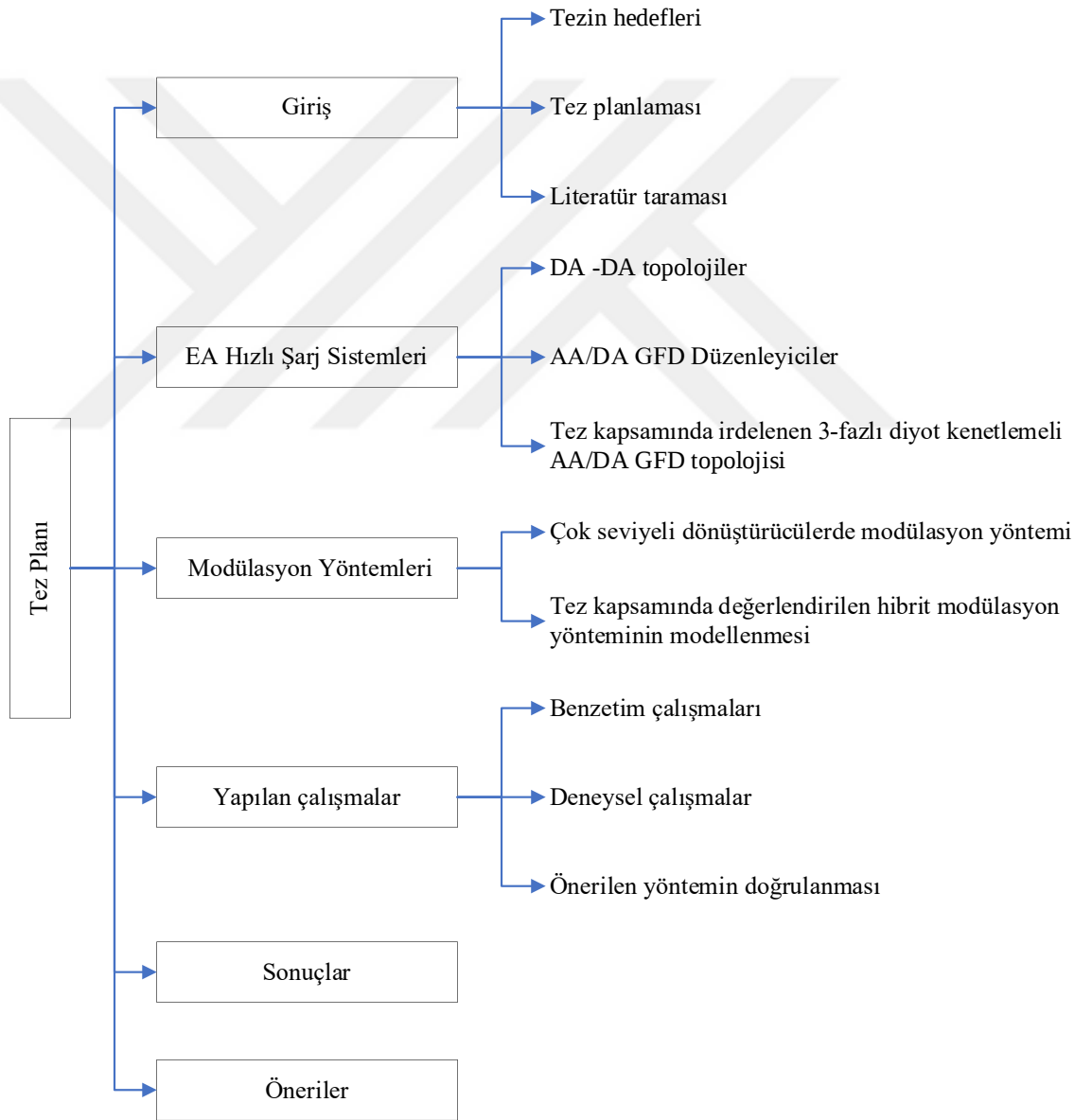
Şekil 5. Tez kapsamında incelenen üç fazlı diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için irdelenen çıktıların sembolik gösterimi



Şekil 6. Tasarlanan sistemin genel blok şeması

Şekil 6’da tez kapsamında gerçekleştirilen sistemin blok şeması sunulmaktadır. Önerilen modülasyon tekniği açık çevrim kontrol yöntemi kullanılarak üç fazlı diyot kenetlemeli AA/DA GFD için Şekil 5’ te ki gözlemler, IEEE standartlarına uygun hale getirilmektedir.

Tezin birinci bölümünde, hızlı şarj için hangi faktörlerin önemli olduğundan, tezin amaç ve hedeflerinden, organizasyonundan bahsedilmektedir. Şekil 7’de tez planlaması açıkça gösterilmektedir.



Şekil 7. Tezin planlaması

Bu bölümde literatür taramasına yer verilmektedir. EA hızlı şarj istasyonları için değerlendirilen güç kalitesi iyileştirilmiş AA/DA GFD doğrultuculara ait topolojiler literatüre dayanarak değerlendirilmiştir. Üç fazlı diyot kenetlemeli AA/DA GFD topolojisinin hızlı şarj için değerlendirilmesine karar verilmiştir. Bu topoloji için literatürde ele alınan modülasyon teknikleri ve kontrol yöntemleri ayrıntılı incelenmektedir.

Tezin ikinci bölümünde elektrikli araçlar ve hızlı şarj sistemlerinden bahsedilmektedir. Bu kısımda hızlı şarj cihazlarının alt yapıları incelenmektedir. Üç fazlı diyot kenetlemeli AA/DA GFD topolojisine ait tanımlar ve matematiksel ifadeler bu bölümde verilmektedir.

Tezin üçüncü bölümünde çok seviyeli dönüştürücülere ait modülasyon teknikleri anlatılmaktadır. Tez kapsamında irdelenen hibrit modülasyon teknikleri bu kısımda ayrıntılı verilmektedir.

Tezin dördüncü bölümünde hızlı şarj için değerlendirilen doğrultucunun benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve deneysel kurulumu sağlanmıştır. Yapılan testler sonucunda önerilen Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) tekniğinin geçerliliği, tasarım hesapları ve dönüştürücünün performansı incelenmiştir. Önerilen yöntem için TMS320F28379D sayısal işaret işleyicisi kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Düşük güçte üç fazlı üç seviyeli 3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMIKRON güç modülü üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda modifiye edilmiş seviye kaydırmalı hibrit frekanslı DGM yönteminin geçerliliği ve esnekliği vurgulanmıştır.

Tezin beşinci bölümünde tezin bulguları ve altıncı bölümde bir sonraki çalışmalara ait öneriler verilmiştir. Ayrıca tez çalışmasının geleceğe yönelik perspektifleri tartışılmıştır.

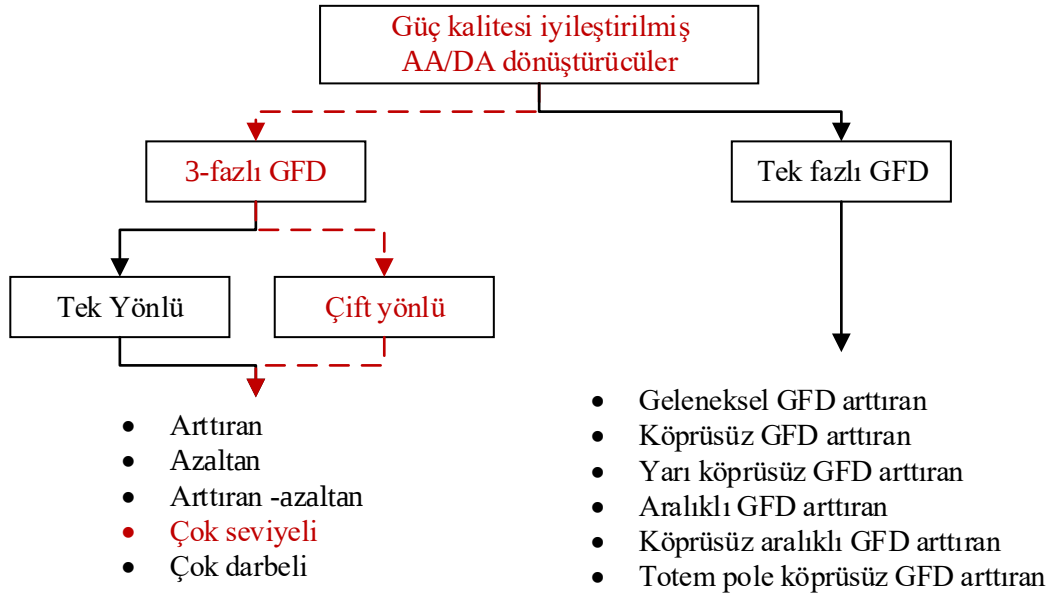
1.3. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

AA/DA doğrultucular, EA hızlı şarj cihazlarının önemli bir bileşenidir. Şebekeden gelen AA gücünü, elektrikli aracın aküsünü şarj etmek için kullanılabilecek DA gücüne dönüştürmekten sorumludurlar. Araç dışı hızlı şarj cihazları bağlamında, bu doğrultucular tipik olarak kısa bir süre içinde aracın aküsüne birkaç yüz kilovatlık güç sağlayabilen yüksek güçlü, yüksek gerilimli ünitelerdir.

Hızlı şarj cihazlarında kullanılabilecek, diyot doğrultucular, tristör doğrultucular ve aktif doğrultucular dahil olmak üzere birkaç farklı AA/DA doğrultucu türü vardır. Her türün verimlilik, maliyet ve karmaşıklık açısından kendi avantaj ve dezavantajları vardır. EA hızlı şarj altyapısında diyot doğrultucular kontrol edilemediği için tercih edilmemektedir. Güç

faktörü düzeltme yeteneğine sahip değildir. Öte yandan tristörlü doğrultucular gerilim dalgalanmalarını düzeltemez ve çıkış gerilim kontrolünü optimize edememektedirler. Ayrıca tristörler yüksek güçlü uygulamalarda ısınma sorunlarına neden olabilmektedirler. Bu, hızlı şarj istasyonlarında güvenlik riskleri oluşturabilir. Hızlı şarj istasyonlarında aktif güç faktörü düzenleyici teknolojileri daha esnek ve duyarlıdır. Bu nedenle hassas kontrol gerektiren çıkış gerilimi ve akımını sağlamak için tercih edilmektedirler. Aktif güç faktörü düzenleyiciler daha karmaşık kontrol devrelerine sahip olmalarına rağmen güç faktörü düzeltme yeteneklerinden dolayı özellikle yüksek güçlü uygulamalarda daha verimlidirler. Kullanılan hızlı şarj cihazlarındaki AA/DA türü ne olursa olsun, bunların temel işlevi şebekeden gelen AA gücünü elektrikli aracın aküsüyle uyumlu bir forma dönüştürmektir. Bu, hızlı şarj sürecinde çok önemli bir adımdır çünkü aracın aküsünün, aküye veya şarj cihazına zarar vermeden hızlı ve verimli bir şekilde şarj edilmesini sağlar.

Üç fazlı güç kalitesi iyileştirilmiş GFD AA/DA dönüştürücüler olarak karşımıza çıkan topolojiler, ayarlanabilir hızlı sürücüler, kesintisiz güç kaynakları (UPS'ler), yüksek gerilim DA iletimi (HVDC), yenilenebilir enerji sistemleri, batarya yönetim sistemleri ve EA hızlı şarj cihazları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bhat & Agarwal 2008). Literatürde bu dönüştürücüler Şekil 8'de ayrıntılı olarak sunulmaktadır.



Şekil 8. Güç kalitesi iyileştirilmiş AA/DA dönüştürücüler

Şekil 8’de gösterildiği gibi, bu tez kapsamında 3-fazlı GFD dönüştürücülerden çift yönlü çok seviyeli topoloji üzerine odaklanılmıştır.

Üç fazlı şebekeden beslenen AA/DA dönüştürücüler, yüksek güçlü uygulamalarda kontrollü-kontrolsüz ve tek yönlü çift yönlü DA güç sağlamak amacıyla diyotlar, tristörler ve kontrollü anahtarlar kullanılarak geliştirilmektedir. Akım harmonikleri nedeniyle dönüştürücüde güç kalitesi sorunları ve yük ucunda dalgalı DA çıkışı meydana gelmektedir. Bu nedenle uluslararası standartlar önemlidir. Literatüre bakıldığında üç fazlı çok seviyeli AA/DA GFD dönüştürücülerin verimlilikleri nedeniyle ve güç faktörünü 1 yapmak için ekstra bir devre gerektirmediklerinden hızlı şarj cihazlarında kullanıldığını görmekteyiz (Khaligh & Dusmez 2012; Sagar vd. 2023).

Hızlı şarj altyapısı bir güç sistemi akışına sahiptir ve güç elektroniği dönüştürücüleri bu sistemde oluşan harmonikleri ve reaktif gücü etkilemektedir. AA/DA dönüştürücüler, güç kalitesi sorunları nedeniyle pasif, aktif ve hibrit filtrelerle birlikte kullanılmaktadır (Sah & Rizvi 2021). Ancak filtreler oldukça maliyetlidir, hantaldır ve kayıpları vardır. Bunlar AA/DA dönüştürücülerin verimini azaltır. EA şarjı için seçilen dönüştürücüler güç kalitesi, THB, azaltılmış dalgalı DA çıkışı ve kontrol yaklaşımları açısından çok önemlidir (Praneeth & Williamson 2018; Kushwaha vd. 2024).

Günümüzde geliştirilmiş güç kalitesine sahip AA/DA dönüştürücüler, MOSFET'ler, IGBT'ler, GTO'lar vb. anahtarlama elemanları tarafından kontrol edilmektedir (Elrajoubi vd. 2019). Araç içi ve araç dışı şarj topolojileri, (Kushwaha & Singh 2020)'te olduğu gibi AA/DA GFD bölümüne dâhil edilmektedir. Bu çalışmada amaç hızlı şarj istasyonu için AA/DA doğrultucu yapısını iyileştirmek olduğu için üç fazlı AA/DA GFD dönüştürücüleri ayrıntılı incelenmektedir.

Çok seviyeli üç fazlı AA/DA GFD topolojileri; yüksek güç kalitesi, azaltılmış toplam harmonik bozulma, yüksek güç faktörü, elektromanyetik gürültüde azalma, daha yüksek düzenlenmiş DA çıkış gerilimi sunmaktadır (Habib vd. 2018).

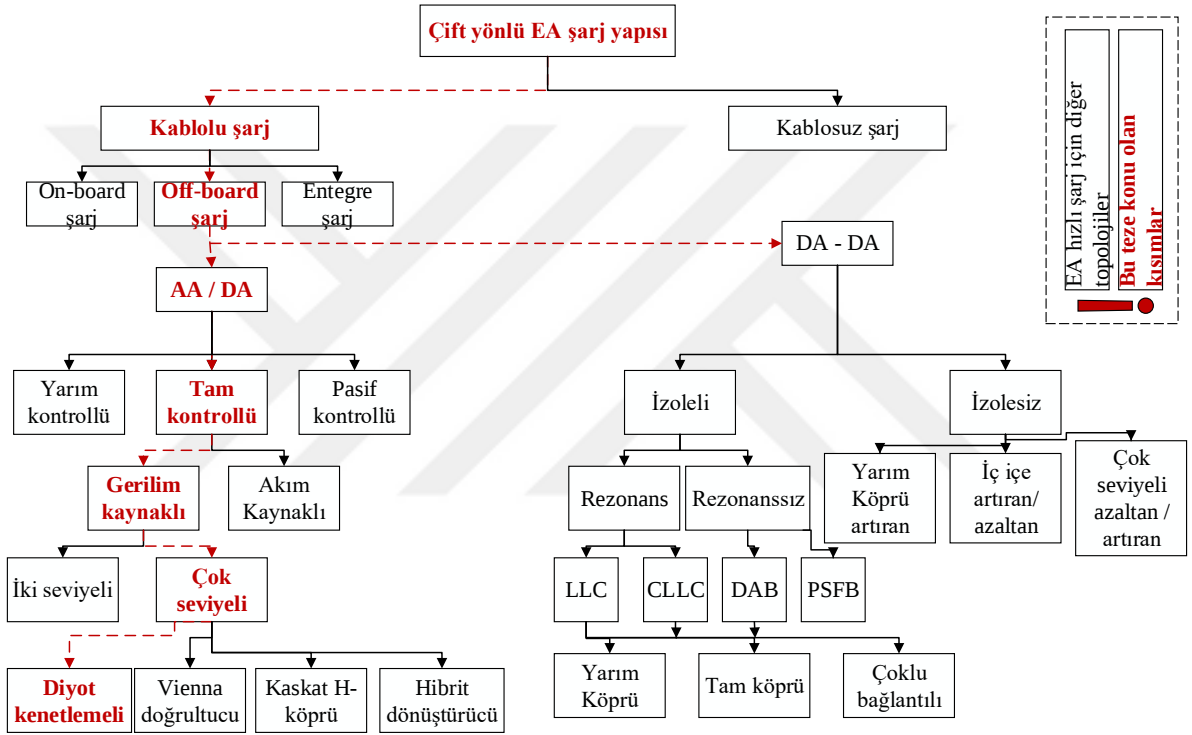
Tablo 1’de üç fazlı AA/DA GFD dönüştürücülerinin karşılaştırılması özet olarak verilmektedir (Mollahasanoğlu & Okumuş 2021). Tablo 1 incelendiğinde çok seviyeli üç fazlı AA/DA GFD topolojileri doğrultma ve güç faktörü düzenleyici etkiyi birlikte gösterdiği için, devre elemanları üzerindeki gerilim stresini azaltacak yapıda oldukları için ve THB bakımından oldukça verimli, performans açısından çok iyi olduklarından tercih edilmektedirler.

Tablo 1. Üç fazlı AA/DA GFD dönüştürücülerinin karşılaştırılması

Özellik	Artıran Dönüştürücü	Azaltan Dönüştürücü	Azaltan-artıran Dönüştürücü	Çok Seviyeli Dönüştürücü
Boyut, ağırlık ve hacim	Fazladır, ama yumuşak anahtarlama ile azaltılabilir	Fazladır, ama yumuşak anahtarlama ile azaltılabilir	Yumuşak anahtarlama ile azaltılabilir	Azalı
Anahtar sayısı	İki aşamalı topolojilerde fazla olmasına rağmen tek aşamalı topolojilerde azdır	İki aşamalı topolojilerde fazla olmasına rağmen tek aşamalı topolojilerde azdır	Az	Fazla
Anahtarlar Üzerindeki Stres	Sürekli iletim durumunda fazladır	Azdır, Yumuşak anahtarlama ile daha da azaltılabilir	Azdır, Yumuşak anahtarlama ile daha da azaltılabilir	En az
EMI	Yumuşak anahtarlama ile azaltılabilir	Az	Az	Azdır, Yumuşak anahtarlama ile daha da azaltılabilir
Güç seviyesi	Sürekli iletim durumunda düşüktür	Genellikle düşüktür,	Orta	Yüksek
Verim	İyi	Oldukça iyi	Oldukça iyi	Çok yüksek
Performans	Daha iyi	Daha iyi	İyi	Mükemmel
Maliyet	Az	Az	Az	Fazla (Anahtar sayısı)

Üç fazlı çok seviyeli AA/DA GFD doğrultucular, literatürde karşımıza diyot kenetlemeli, uçan kapasitörlü, kaskat H-köprü ve hibrit dönüştürücüler olarak çıkmaktadır. Araç dışı (off-board) hızlı şarj cihazı için iki seviyeli artıran doğrultucu, üç seviyeli diyot kenetlemeli dönüştürücü ve Viyana doğrultucu yaygın olarak kullanılmaktadır (Rubino vd. 2017). İki seviyeli AA/DA GFD dönüştürücüsü üç seviyeli diyot kenetlemeli GFD yapısı ile karşılaştırıldığında üç faz diyot kenetlemeli yapının DA çıkışında daha küçük dalgalanma göstermektedir (Mallik & Khaligh 2015). Benzer şekilde (Yilmaz & Krein 2013), seviye 3 hızlı şarj uygulamaları için üç seviyeli diyot kenetlemeli AA/DA GFD yapısının daha düşük anahtarlama stresi gösterdiğini ifade etmektedir. Diyot kenetlemeli çok seviyeli dönüştürücülerin kontrolü reaktif güç akışı açısından daha kolaydır. Ancak daha fazla kenetleme diyotuna ihtiyaç duyarlar. Uçan kapasiteli çok seviyeli dönüştürücülerin dezavantajı, seviye sayısından dolayı çok sayıda kapasitenin gerekli olmasıdır; bu, sistemi

daha az güvenilir ve daha hantal hale getirir. Kaskad çok seviyeli dönüştürücülerin en büyük dezavantajı ayrı DA kaynaklarına ihtiyaç duymalarıdır. Dolayısıyla uygulama açısından kullanıcıyı sınırlandırmaktadır (Cui & Ge 2018). Üç fazlı iki seviyeli doğrultucu altı kontrollü anahtardan oluşur. Bu güç dönüştürücü, düşük toplam harmonik akım bozulması üretir, çift yönlü güç akışı sağlamaktadır, verimlidir ve kolay kontrol edilebilir. Ayrıca 1'e yakın güç faktörü sağlayabilir. Ancak diğer üç seviyeli topolojilere kıyasla bu doğrultucuda daha düşük THB için büyük bir filtre gereklidir (Barth vd. 2020).



Şekil 9. EA hızlı şarj altyapısında yer alan devre topolojilerinin sınıflandırılması

Şekil 9’da hızlı şarj altyapısında yer alan AA/DA ve DA-DA topolojilerinin isimleri verilmektedir (Mollahasanoğlu & Okumuş 2021; Safayatullah vd. 2022; Mateen vd. 2023; Zhang vd. 2023; Zhou vd. 2023). AA/DA GFD aşaması için verilen topolojilerden üç seviyeli diyot kenetlemeli AA/DA GFD dönüştürücüsü doğrultmanın yanı sıra yüksek güç faktörü ve düşük THB sağlamaktadır. İlaveten bir güç faktörü düzenleyen devreye gerek duymamaktadır. Devre elemanları üzerine düşen gerilim stresi daha az olduğundan anahtarlama kayıpları da daha azdır (Kim vd. 2023; Lee vd. 2023; Liu vd. 2023). Elektrikli araçların hızlı şarjı için yüksek güç çıkışı önemlidir. Tüm bunlar göz önüne alınarak bu tez

çalışmasında üç seviyeli diyot kenetlemeli AA/DA GFD dönüştürücüsünün çalışması iyileştirilmektedir.

Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu topolojisi 12 kontrollü anahtara ve altı paralel diyota sahiptir, çift yönlü güç akışı sunar. Bu topoloji, filtre indüktörünü daha da azaltabilen daha düşük bir toplam harmonik bozulmaya sahiptir (Saadaoui vd. 2023). Ayrıca, bu topoloji, şarj sistemlerinin çıkış gücünü artırabilen iki DA-DA dönüştürücünün seri seri veya seri paralel konfigürasyonda kademeli olarak bağlanmasını sağlayan iki kutuplu bir DA veri yolu sunar. Ancak bu topoloji daha fazla sayıda güç yarı iletkeni gerektirir, kontrol sistemi karmaşıktır ve yüksek maliyetlidir (Tan vd. 2016; Deb vd. 2021). Ultra hızlı şarj cihazları, elektrikli bir aracın yalnızca şarj olduğu süre boyunca ara sıra şarj edilmesi için tasarlanır. Bu nedenle, çift yönlü enerji akışına gerek kalmamaktadır. Tek yönlü EA hızlı şarj için Viyana doğrultucu en iyi çözümdür. Azaltılmış sayıda kontrollü anahtar sayesinde 1'e yakın güç faktörü, daha düşük toplam harmonik akım bozulması, yüksek güç yoğunluğu ve iyi bir ekonomi sunmaktadır (Yan vd. 2020). Burada, güç elektroniği için en popüler simülasyon ortamlarını (PSIM, PLECS/SpeedFit ve MATLAB/Simulink) kullanmaktadır, daha önce tartışılan AA/DA dönüştürücü topolojilerinin bir karşılaştırmasını göstermektedir. Bu karşılaştırmaya göre Viyana doğrultucu en iyi AA/DA'dır. Ancak şarj istasyonlarında fotovoltaik sistemlerin ve akümülatörlerin ortaya çıkışı, çift yönlü doğrultucuları gerektirmektedir. Bu nedenle üç seviyeli diyot kenetlemeli AA/DA GFD yapısı en iyi alternatiftir. Üç faz diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun evirici ayağındaki nötr noktası anahtarlama cihazları üzerindeki gerilim stresini azaltmak için kullanılır ve nötr nokta potansiyelinin dengesi çok önemlidir (Sharma vd. 2018). Daha küçük filtre bileşenine ihtiyaç duyar ve güç yoğunluğu yani verimi daha fazladır (Upputuri & Subudhi 2023). Dönüşüm kısmına ilaveten yumuşak anahtarlama kısmına da GFD ile yer verilmektedir (Patel vd. 2023). Özetle, tez kapsamında ele alınan diyot kenetlemeli doğrultucu yapısı çok seviyeli bir yapıdır, bileşenler arasında yüksek gerilim paylaşır. Bu durum, anahtarlama kayıplarını azaltmaktadır. Çok seviyeli yapı, birden fazla gerilim seviyesinin üretilmesine olanak tanır ve daha düşük harmoniklere sahip bir akım dalga biçiminin elde edilmesine yardımcı olur. Böylece şarj cihazının güç kalitesi artar.

Doğrultucu bileşenlerinin anahtarlama durumlarının ayarlanması, çıkış gerilim seviyelerinin hassas şekilde kontrol edilmesini sağlar. Bu, sürekli ve düzenlenmiş bir çıkış gerilimi sağlar. Hızlı şarj istasyonları gibi yüksek güçlü uygulamalar için istikrarlı güç sağlamak önemlidir. Bu nedenle hızlı şarj için değerlendirilen çok seviyeli dönüştürücülerin

kontrol yöntemlerini irdelemek çok önemlidir. Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli yapının DGM kontrolü için birçok kontrol tekniği vardır. Uzak vektör darbe genişliği modülasyonu (UV-DGM) ve sinüzoidal DGM (SDGM) teknikleri bu dönüştürücülerin kontrolünde iyi performans gösterir (Manoj vd. 2023).

Yüksek GF için kontrol stratejisi çok önemlidir. Eviriciler için geliştirilen SDGM, UVDGM gibi tüm modülasyon teknikleri bu doğrultucularda da kullanılabilmektedir. Üç fazlı AA/DA GFD dönüştürücülerin DA bağlantı geriliminin kontrol edilmesi, bir geri besleme kontrol döngüsü gerektirir. DA çıkış gerilimi AA/DA GFD dönüştürücü çıkışıdır. PI kontrolör, PID kontrolör ve kayan kipli kontrol gibi çeşitli kontrol tekniklerinde geri besleme olarak kullanılmaktadır (Poursafar vd. 2023). Dönüştürücüler kontrol edilirken doğrultucudaki DA çıkış gerilimi referans gerilimiyle karşılaştırılarak hata sinyali bulunur. Bu hata, şebekeyle aynı frekansa sahip örnek bir sinüzoidal dalga biçimi oluşturmak için kullanılır. Bu örnek dalga formu, doğrultucudaki anahtarları kontrol etmek için PWM oluşturur. Anahtarlama sinyalleri, gerilim kaynağı akım kontrollü veya gerilim kontrollü PWM doğrultucu olarak kontrol edilir. Akım kontrolörü giriş akımı için kullanılırken, gerilim kontrolörü gerilim büyüklüğü ve fazı için kullanılır.

Diyot kenetlemeli doğrultu için kontrol yöntemleri tipik olarak (Tan vd. 2016)'de olduğu gibi yüksek güç faktörü, düşük THB ve hızlı geçici yanıt elde etmeye odaklanır. Tez kapsamında değerlendirilen GFD doğrultucu için kullanılan yaygın kontrol yöntemleri, histerezis akım kontrolü (Suhara & Nandakumar 2015), DGM kontrolü (Jung vd. 2019), Model öngörülü kontrol (MPC) (Zhang vd. 2020), Doğrudan güç kontrolü (DGK) (Lahooti Eshkevari & Arasteh 2017)'dir. Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucunun histerezis akımı kontrol edilirken çıkış akımının hedef değeri belirlenir. Histerezis bandı hedef akım değerinin üstünde ve altında belli bir bölgededir. Kontrol sistemi bu bölgede çalışır. İstenilen akım değeri histerezis bandının dışında ise kontrol sistemi çalışır. Kontrol sistemi çalıştığında diyot kenetlemeli doğrultucunun anahtarlama frekansı değiştirilebilir, kondansatör gerilimi ayarlanabilir. Bu doğrultucu için DGM kontrolünde referans çıkış gerilimi, çıkış gerilimi ile karşılaştırılır. Anahtarlar, kontrol algoritması sonucu üretilen PWM sinyalleriyle kontrol edilir. Üç faz üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu için MPC kontrolü sistemin matematiksel modeli kullanılarak uygulanır. Sistem davranışı tahmin edilir. Bu tahmine dayanarak yeni bir sistem modeli gerçekleştirilmektedir. Hedefler ve kısıtlar belirlenerek tahmin edilen modele göre optimizasyon yapılır. Bu doğrultucu için DGK, akım ve güç kontrol döngüleri aracılığıyla çıkış gücünü doğrudan kontrol etmek için

kullanılır. DGK, hedeflenen çıkış gücüne yaklaşmak için açma ve kapama zamanını ayarlar. Bu sayede belirtilen doğrultucu istenilen çıkış gücünü hızlı ve doğru bir şekilde elde eder. Ancak DGK, belirli uygulamalara bağlı olarak kontrol algoritmaları ve parametre ayarlamaları gerektirebilir (Maheshwari vd. t.y.). Bu çalışmada DGM kontrolü benzetim çalışmalarında yapılmıştır. Bu yöntem, çıkış gerilimin ve akımını düzenlemek için doğrultucunun anahtarlama sinyalinin görev döngüsünü ayarlar. Önerilen DGM yöntemi yüksek verimlilik, düşük THB ve düşük gerilim regülasyonu sağlar. Ayrıca kapasitör gerilim dengesi açısından da iyi sonuç vermektedir.

Genellikle çok seviyeli evirici ve doğrultucularda uygulanan modülasyon tekniğinin temeli, referans sinüs dalgası ile taşıyıcı sinyalin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Anahtarlama sinyali, temel üçgen taşıyıcının farklılaşmasına göre farklılık gösterir. Temel üçgen taşıyıcı sinyalin farklılaştırılmasıyla oluşturulan yeni taşıyıcı sinyali içeren modülasyon tekniğine modifiyeli modülasyon tekniği denir. Literatürde bu teknikler faz kaydırmalı taşıyıcı tabanlı darbe genişlik modülasyonu (FK-DGM), seviye kaydırmalı DGM (SK-DGM), modifiyeli SK-DGM, modifiyeli FK-DGM hem FK hem de SK DGM, ters FK-DGM, asimetrik ters FK-DGM ve bunlardan türeyen DGM yöntemleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Vijayakumar vd. t.y.). DGM kontrolünü uygulamak için kullanılabilecek farklı modülasyon yöntemleri vardır. Uzak vektör DGM, taşıyıcı tabanlı DGM'nin daha popüler şeklidir. Literatürde uzak vektörünün optimize edilmesiyle daha verimli bir kontrol sağlanmaktadır (Kefeng vd. 2023). Geleneksel taşıyıcı tabanlı DGM'den daha düşük THB sağlar (Kumar & Srikanth 2013). Bu çalışmada ele alınan doğrultucu için Uzak Vektör Modülasyonu (UVM) yöntemi dikkate alınmamıştır. Çünkü bu çalışmada vurgulanan şey, değiştirilmiş SDGM türlerinin performansının değerlendirilmesidir. Ayrıca SHE (Seçici Harmonik Eliminasyon) ve SHM (Seçici Harmonik Azaltma) modülasyon yöntemleri de vardır. Güç elektroniği sistemlerinde harmoniklerin azaltılması veya ortadan kaldırılması için SHE ve SHM DGM yöntemleri kullanılmaktadır. SHE, birden fazla anahtarlama frekansının kullanımına izin verdiği ve daha geniş bir güç elektroniği sistemlerine uygulanabildiği için SHM'den daha esnek bir tekniktir (Pulikanti vd. 2013; Dahidah vd. 2015). Hibrit modülasyon DGM, (Ahmed vd. 2023) ve (Montero-Robina vd. 2023)'de açıklandığı gibi AA/DA ve DA-DA dönüştürücüler gibi güç elektroniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemin verimliliğin artmasına ve elektromanyetik girişimin (EMI) azalmasına yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, EA Hızlı şarj istasyonlarında uygulanması düşünülen üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli GFD doğrultucudaki

anahtarlama durumlarının daha doğru kontrolünü sağlamak için taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı DGM modülasyon tekniği optimize edilmektedir. Literatürde mevcut olan farklı taşıyıcı tabanlı DGM teknikleri de bu çalışmada değerlendirilmektedir. Yeni değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı SK-DGM tekniği, klasik üçgen taşıyıcılı DGM ile karşılaştırıldığında, yeni tekniğin özellikle yüksek güçlü şarj cihazları için umut verici bir alternatif olduğu görülmektedir.

İzoleli DA-DA dönüştürücüler EA hızlı şarjında önemlidir çünkü şarj istasyonundan gelen yüksek gerilimli DA gücünü aracın aküsünün ihtiyaç duyduğu uygun gerilim seviyelerine dönüştürmek için güvenli ve verimli bir yol sağlarlar. Bununla birlikte, EA akü gerilim seviyesi aracın markasına ve modeline bağlı olarak değişiklik gösterebilir; bu, hızlı şarj cihazının farklı EV'lere uyum sağlamak için bir dizi gerilim seviyesi sağlayabilmesi gerektiği anlamına gelir (Tu vd. 2019). İzole edilmiş DA-DA dönüştürücüler bu bağlamda önemlidir çünkü hızlı şarj istasyonu ile EA aküsü arasında elektriksel izolasyon sağlarlar, bu da elektrik çarpmalarını önleyerek ve yangın veya patlama riskini azaltarak güvenliğini artırır. Ayrıca şarj istasyonundaki yüksek gerilimi, minimum enerji kaybıyla bataryanın ihtiyaç duyduğu daha düşük gerilim seviyelerine düşürerek verimli güç dönüşümü sağlarlar, bu da şarj süresinin azaltılmasına ve genel verimliliğin artırılmasına yardımcı olur. Ayrıca izoleli DA-DA dönüştürücüler, güç kalitesi ve kararlılıkla ilgili sorunların çözümüne de yardımcı olabilir. Örneğin, aynı elektrik şebekesine birden fazla şarj istasyonu bağlandığında oluşabilecek gerilim dalgalanmalarının ve harmoniklerin etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilirler (Rathore vd. 2022; Sagar vd. 2023). Bu çalışma DA hızlı şarj istasyonu için üç seviyeli GFD doğrultucu performansını arttırmayı amaçladığından, ele alınan doğrultucu, literatürde mevcut olan herhangi bir izole DA-DA dönüştürücü ile birlikte değerlendirilmektedir.

Özetlemek gerekirse DA hızlı şarj istasyonları için düşünülen üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için bu çalışmada verim, THB, güç faktörü, kapasite dengesi ve akım-gerilim çıkış değerlerinin dalgalanma faktörleri dikkate alınmaktadır. Modülasyon dönüştürücünün kalbidir. Optimum modülasyon stratejisini bulmak güç kalitesini artırır. Bu çalışma için önerilen doğrultucu yüksek anahtarlama frekansında anahtarlama kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle anahtarlama frekansını değiştirmeden doluluk boşluk oranını değiştirerek optimum DGM tekniğini bulmak ve yüksek güçlerde standartlara uygun çalışabilmek tezin çıkış noktası olmaktadır.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE HIZLI ŞARJ SİSTEMLERİ

Elektrik motorları içten yanmalı motorlara göre çevre dostudur. Daha düşük enerji maliyetlerine sahiptir, daha az bakım gerektirir ve daha verimlidir. Elektrikli motorlar, sessiz çalışırlar ve hızlı ivmelenme için anında tork sağlarlar. Elektrikli motorların bu avantajları elektrikli ulaşım geçişi hızlandırmaktadır. Literatürde çeşitli elektrikli araç şarj yöntemleri önerilmiştir ve bunların sınıflandırmaları Şekil 10'da görülmektedir (Islam vd. 2023). Bu çalışmanın odak noktası Şekil 10'da da görüldüğü gibi araç dışı olarak gerçekleştirilen Seviye 3 şarj cihazlarıdır. Şarj cihazları, gücü aktarma biçimlerine (iletken, endüktif ve batarya değiştirme), aktarılan güç türüne (AA veya DA), konumlarına (yerleşik veya araç dışı) ve güç akışının yönüne (tek yönlü veya çift yönlü) göre sınıflandırılabilir (Shareef vd. 2016; Mastoi vd. 2022).

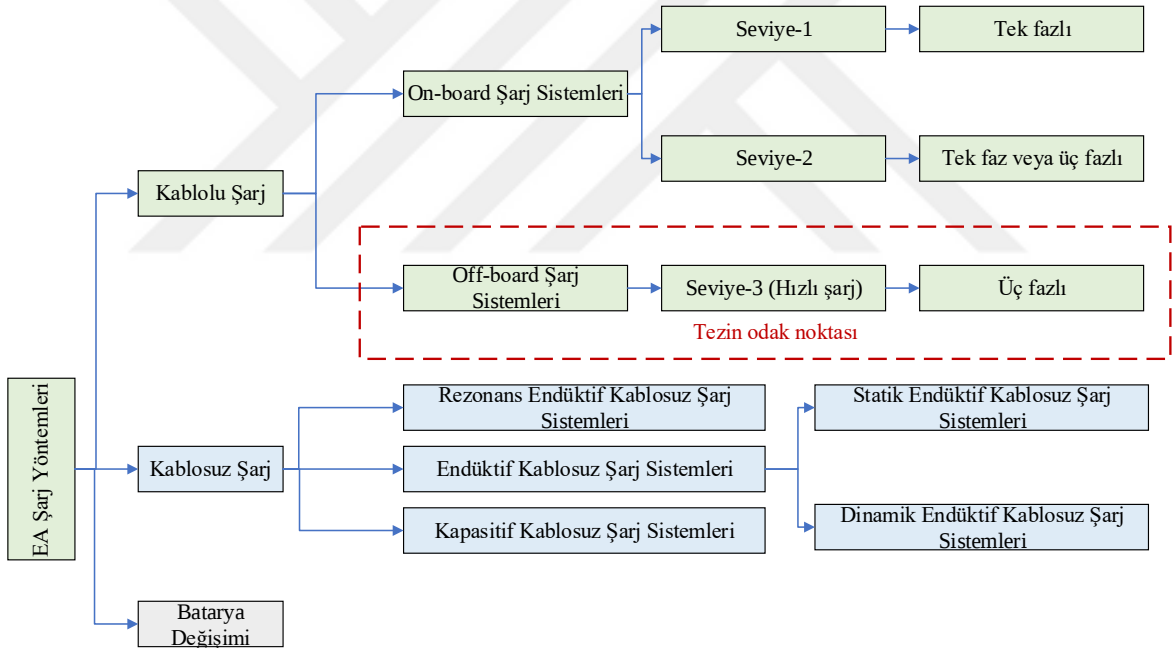
Araç dışı şarj cihazları yalnızca akaryakıt istasyonları gibi istasyonlarda bulunur. Bu şarj cihazları hızlı şarj olanağı sağlasa da şarj işlemi sırasında aküden geçen çok yüksek akımlar nedeniyle aküde aşırı ısınmaya ve akülerin daha çabuk bozulmasına neden olurlar. Bu nedenle hızlı şarj istasyonlarının standartlara uygun tasarımı batarya teknolojisindeki gelişmeleri de beraberinde getirir. Elektrikli araçların harici ve dâhili şarj cihazlarının özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Araç içi ve araç dışı şarj sistemlerinin karşılaştırılması

Araç içi (Dahili)	Araç Dışı (Harici)
Düşük güç aralığı	Yüksek güç aralığı
Basit batarya yönetim sistemleri	Kompleks batarya yönetim sistemleri
Batarya ısınma sorunu yoktur	Batarya ısınması sorunu vardır
EA üzerine ağırlık eklenir	EA üzerindeki ağırlık kalkar
Düşük güç seviyelerinde (Seviye 1 – Seviye 2) şarj edilir	Yüksek güç seviyelerinde (Seviye 3) DA şarj edilir

Dünyada hızlı şarj kavramı ülkelere göre farklılık göstermektedir. California, elektrikli araçların hızlı şarjını, aracın 100 mil seyir menzilini yani yaklaşık 160 km'yi 10 dakikalık bir şarj ile gidebilmesi olarak tanımlar. Çin Bilgi Teknolojileri Bakanlığı, hızlı şarjı, aküyü 30 dakikalık bir şarj etme süresi boyunca aküye giren ortalama akımın 3 A'dan büyük veya buna eşit olması olarak tanımlar. ABD Gelişmiş Pil Konsorsiyumu'na (USABC) göre, hızlı şarj, bir bataryanın %40'ını 15 dakika içinde şarj etmek demektir. Bununla birlikte,

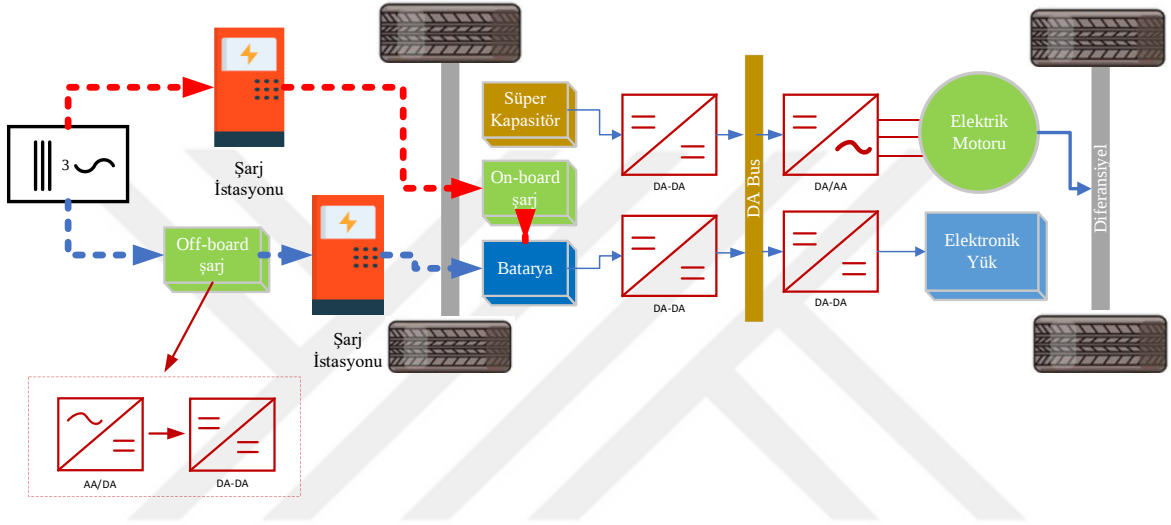
bataryanın işlevselliğinin ve kullanım senaryolarının artması ile farklı hızlı şarj standartları ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, 2 saatten fazla şarj edilebilen elektrikli araçlara yavaş şarjlı, 30-120 dakika arası şarj edilebilen elektrikli araçlar hızlı şarjlı ve 10 dakikadan daha az sürede şarj edilebilmesi mümkün olan elektrikli araçlara ise aşırı hızlı şarj edilebilir denmektedir. Gelecekteki hızlı şarj, batarya şarjının birkaç dakika içinde tamamlanmasını hedeflemektedir. Bu nedenle, Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'na göre 400 kW'a ulaşmak için büyük şarj gücüne ihtiyaç duyan lityum piller gelecek için oldukça önemlidir. ABD'ye göre pilin %60'ı kadar elde edilen şarj miktarı 6 dakikada tamamlanabiliyorsa bu aşırı hızlı şarjdır. Bu da enerji depolama sistemine giren ortalama akım miktarının yaklaşık 675 A'dan büyük veya buna eşit olması anlamına gelmektedir (Zhu vd. 2019; Kilicoglu & Tricoli 2023). Ancak günümüzde aşırı hızlı şarj sisteminin altyapı sorunları tam olarak çözülmüş değildir.



Şekil 10. EA şarj yöntemlerinin sınıflandırılması.

Elektrikli araçların şarj istasyonu, konut garajlarında, halka açık park alanlarında bulunan elektrik şebekesinin bir kısmıdır. EA şarj cihazlarının çıkışı volt, amper ve güç (kW) olarak derecelendirilmektedir. Şarj işlemi hem AA hem de DA şarj türünde olabilir. Genel olarak elektrikli araçların içinde kendi yerleşik AA şarj cihazı bulunur. Araç dışı DA hızlı şarj cihazları, Şekil 11'de gösterildiği gibi yerleşik şarj cihazını atlayarak doğrudan elektrikli aracın aküsüne bağlanır. Yüksek güç akışı nedeniyle aracın ağırlığının ve hacminin

azaltılabilmesi için DA şarj cihazları dışarıya yerleştirilmektedir. Batarya ömrü ve şarj süresi elektrikli araçların şarj cihazlarıyla ilgilidir ve bu nedenle şarj cihazları geliştirilmelidir. DA hızlı şarj altyapısı kurulurken verimli olması, yüksek güç yoğunluğu, yüksek güvenilirlik, düşük maliyet, düşük ağırlık ve küçük hacimde olması bir şarj cihazının arzu edilen özellikleridir. Ayrıca, güç kalitesi sorunlarını azaltmak için THB çok düşük ($<5\%$) olması ve gerçek gücün maksimum kullanılabilirliğinin sağlanması için şebeke akımının yüksek güç faktöründe çekilmesi gerekir.



Şekil 11. Araç içi ve araç dışı şarj sistemi

EA şarj cihazlarının AA şarj ve DA şarj olmak üzere iki farklı tipi mevcuttur ve güç seviyelerine göre Seviye-1, Seviye-2 ve Seviye-3 olmak üzere üç farklı kategoriye ayrılmaktadır. Alternatif akım şarj cihazları yavaş şarj olanağı sunduğu için şarj süresi uzundur. Doğru akım şarj cihazları kurulum maliyeti, altyapı maliyeti ve bakım maliyeti gerektirdiğinden genellikle ticari amaçlı şarj istasyonlarında sunulmaktadır. DA Seviye-3 şarj cihazları hızlı şarj imkânı sunmaktadır (Xu vd. 2020).

EA şarj cihazları, tek yönlü ve çift yönlü güç akışına sahip dahili ve harici tiplere ayrılabilir. Harici güç modülü genellikle şebeke ile EA arasında yüksek güç akışı sağlayacak şekilde tasarlanmış olup hızlı ve ultra hızlı şarjı desteklerken, araç içi şarj cihazı düşük AA gücüne dayalı Seviye-1 ve Seviye-2 şarjına izin verir. Dahili şarj cihazları için Seviye-1 ve Seviye-2 şarjını belirtirken DA şarj cihazları Seviye-3 şarjı olarak kabul edilir. Seviye-1 şarjı, en düşük güç seviyesini desteklediğinden en yavaş şarjdır. Genellikle konut binalarına kurulur. Seviye-1 AA şarj cihazı giriş gerilimi olarak 120V/230V gerilim değerlerindedir. Yaklaşık 1,92 kW güç sağlar. Bağlantı, elektrikli aracın AA bağlantı noktasına standart bir

SAE J1772 konektörü kullanarak yapılır. SAE (URL-2) elektrikli araçların şarjı için standartları belirleyen Kuzey Amerika'da bir kuruluştur. SAE J1772 standardı, elektrikli araçların şarj edilmesi için kullanılan konektör ve iletişim protokollerini tanımlamaktadır. Bu standarda göre şarj ucu konektör tipi beş pimlidir. Alternatif akım gücü için iki pim, topraklama için bir pim ve sinyal iletişimi için iki pim bulundurulur. Tasarım, doğru bağlantı yapılmadığı sürece gücün akmamasını sağlayarak elektrik çarpmasını önler. Bu standardın temel amacı, farklı otomobil üreticileri tarafından üretilen elektrikli araçların aynı şarj istasyonlarını kullanabilmesini sağlamaktır. SAE J1772, birbirine uyumlu şarj konektörlerini ve iletişim protokollerini belirler. Seviye-2 AA şarj cihazları 20 kW'a kadar güç sağlar ve çoğunlukla alışveriş merkezleri gibi ticari sitelerde kullanılır. Günümüzün Seviye-2 şarj tesisleri 208 VAA veya 240VAA giriş gerilim değerindedir. ABD'de Seviye-2 şarj konektörü SAEJ1772 Tip-1 veya tescilli Tesla fişidir. Avrupa'da ise Seviye-2 AA şarjı için IEC62196-2 Tip-2 fişi dikkate alınır. Yerleşik Seviye-1 ve Seviye-2 AA şarj cihazlarının sınırlı güç değeri ve daha uzun şarj süresi, 50 kW ile 300 kW aralığındaki gücü sağlayabilen Seviye-3 DA hızlı şarj cihazlarının büyümesini teşvik etmektedir (Piasecki vd. 2021). Güç seviyelerine göre kategorize edilen şarj istasyonları Tablo 3'te özetlenmektedir.

Tablo 3. Şarj gücü seviyelerine bağlı olarak şarj istasyonlarının sınıflandırılması

Şarj istasyonu tipi	Şarj lokasyonu	Güç kaynağı	Şarj güç seviyesi (kW)	Şarj süresi
Seviye-1 (AA)	Dahili	120/230 V 12-16 A	1,44-1,92	11-36 saat (16-50 kWh)
Seviye-2 (AA)	Dahili	208/240 V 15-80 A	3,1-19,2	2-6 saat (16-30 kWh)
Seviye-3 (DA hızlı)	Harici	300-600 V <400 A	50-350	30 dk < (16-30 kWh)
DA ultra hızlı	Harici	800 V < 400A <	400 <	~10 dk < (20-50 kWh)

Hızlı şarj cihazları 300V'dan 800V'a kadar yüksek DA gerilimi sağlayabilir (URL-2, 2017). Ticari DA hızlı şarj cihazları uyumluluğu sağlamak için mevcut beş DA hızlı şarj sisteminden birini veya daha fazlasını desteklemelidir. IEC 62196-3 Standardı (CODE & PRIX t.y.), hızlı şarj için farklı araç kuplörü konfigürasyonları tanımlamaktadır. CHAdeMO küresel olarak kullanılmaktadır. CCS Tip 1 Amerika Birleşik Devletleri'nde, CCS Tip 2 Avrupa Birliği'nde, GB/T Çin'de ve Tesla süper şarj cihazı küresel olarak kullanılır (URL-

2, 2023). Ayrıca Tesla tarafından geliştirilen ve yalnızca Tesla araçları için kullanılan tescilli bir sistem de bulunmaktadır. Kullanılan beş standart DA hızlı şarj sistemi Tablo 4'te listelenmektedir.

Tablo 4. DA hızlı şarj sistemleri için farklı standartlar

	IEEE 2030.1.1 IEC 62196-3	GB/T 20234.3 IEC 62196-3	SAE J1772 IEC 62196-3	IEC 62196-3	Tesla
Şarj girişi					
Maks. Gerilim	1000 V	1000 V	600 V	100 V	410 V
Maks. Akım	400 A	250 A	200 A	200 A	330 A
Ortalama Güç	400 kW	120 kW	150 kW	175 kW	135 kW

Tablo 5'te mevcut bazı DA hızlı şarj cihazlarının özellikleri gösterilmektedir. Ticari olarak temin edilebilen ünitelerin büyük çoğunluğu 50 kW olarak derecelendirilmiştir ve üç fazlı bir alçak gerilim dağıtım şebekesinden güç almaktadır.

Tablo 5. Piyasada var olan bazı DA hızlı şarj cihazlarının teknik özellikleri

Üretici ve Model	ABB Terra 53	Tritium Veefil-RT	Tesla Süperşarj	EVTEC Esp&charge	ABB Terra HP
Güç	50 kW	50 kW	135 kW	150 kW	350 kW
Desteklediği Standart	CCS Tip 1 CHAdemo 1.0	CCS Tip 1, 2 CHAdemo 1.0	Süperşarj	SAE Combo1 CHAdemo1.0	SAE Combo 1 CHAdemo 1.2
Giriş gerilimi	480 VAC	380-480 VAC	200-480 VAC	400 VAC	400 VAC
Çıkış gerilimi (DA)	200-500 V 50-500 V	200-500 V 50-500 V	50-410 V	170-500 V	150-920 V
Çıkış akımı (DA)	120 A	125 A	330 A	300 A	375 A
Verim	%94	>%92	%92	%93	%95
Hacim	758 L	495 L	1047 L	1581 L	1894 L
Ağırlık	400 kg	165 kg	600 kg	400 kg	1340 kg

50 kW bir hızlı şarj cihazı aracın 200 mil yol kat edebilmesi için 1 saatten fazla bir şarj süresine ihtiyacı varken, 135 kW Tesla süper şarj cihazının yalnızca 27 dakikaya ihtiyacı vardır. Yakın zamanda önerilen 350 kW DA ultra hızlı şarj cihazları, 200 mil menzili yaklaşık 10 dakikada sağlamaktadır. EA şarj gücünün artması, tasarlanması ve inşa edilmesiyle birlikte, bu kadar yüksek güç sağlayabilecek bir sistem giderek daha zorlu ve maliyetli hale gelmektedir.

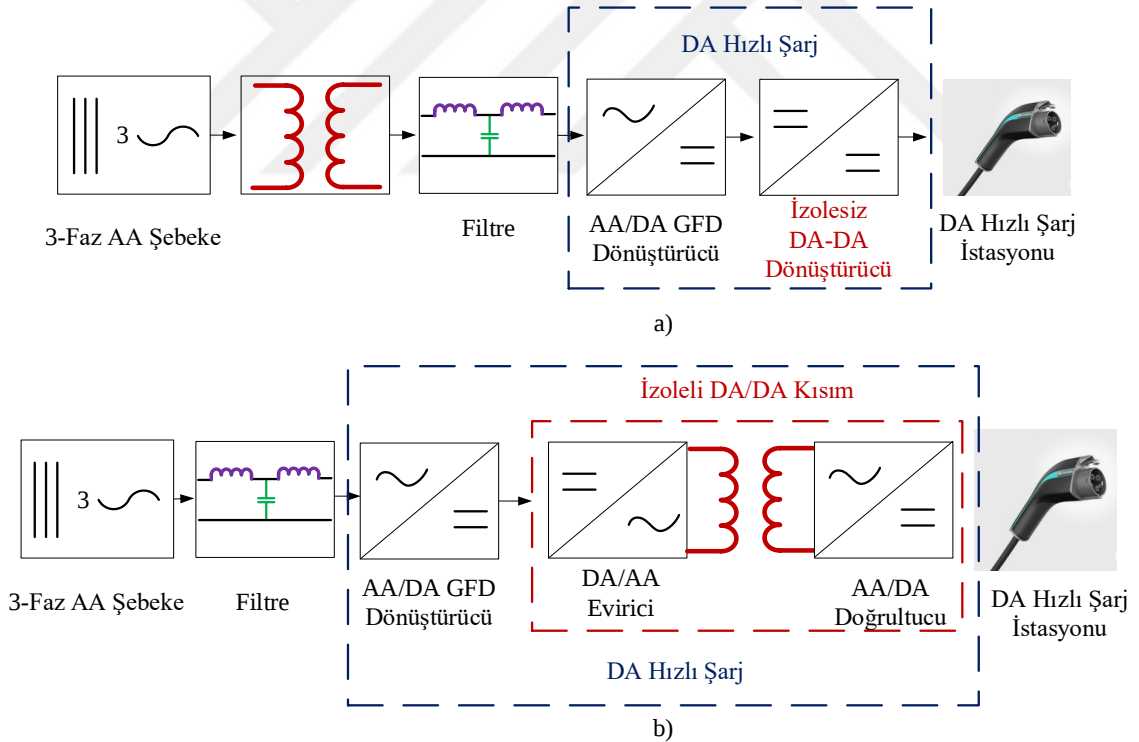
Tablo 6, piyasadaki en çok satan elektrikli araçlardan bazılarının pil kapasitesini, sürüş menzilini göstermektedir (Safayatullah vd. 2022). Araç menzili birçok sürüş senaryosuna göre değişmektedir.

Tablo 6. Piyasadaki bazı elektrikli araçların şarj özellikleri

EA Model	Batarya Kapasitesi (kWh)	Batarya Gerilimi (V)	Menzil (mil)	50 kW için Şarj süresi (dk)	Konnektör tipi	Şarj Gücü: AA 1-faz/AA 3-faz/DA hızlı
Honda e2020	35.5	-	138	40	CCS, Tip-2	6.6/6.6/56
Nissan Leaf	40	350	168	60	CHAdEMO, Tip-2	3.6/3.6-50
BMW I3	42.2	352	191	50	CCS, Tip-2	7.4/11/155
Renault Zoe R110 Ze50	52	400	245	50	CCS, Tip-2	7.4/22/46
Lexus UX 300e	54.3	-	196	40	CHAdEMO, Tip-2	6.6/6.6/50
Tesla model 3	55-82	350	278-360	40-60	Süperşarj	7.4/11/250
SKODA enyaq iV	62	-	256	50	CCS, Tip-2	7.2/11/100
Kia Niro EV	64	327	283	75	CCS, Tip-2	7.2/7.2/77
Mercedes EQA	66.5	405	263	50	CCS, Tip-2	7.4/11/100
Tesla model S	75-100	350	283-388	60	Süperşarj	7.4/16.5/100-200
Porsche Taycan	79.2	800	254	60	CCS, Tip-2	7.4/11/225
Volkswagen ID4	82	365	310	60	CCS, Tip-2	7.4/11/125
Audi E-tron	95	400	249	60	CCS, Tip-2	7.4/11/115
Tesla model X	100	350	233-315	60	Süperşarj	7.4/16.5/100-200

Yüksek şarj akımı, aşırı ısınmayı önlemek için daha büyük çaplı kablolar gerektirir. 50 kW'lık son teknoloji hızlı şarj cihazlarının kablo ağırlığı yaklaşık 9 kg'dır. Akü gerilimi 400 V seviyesinde kalırsa, 200 kW şarj için kablo ağırlığı tek kişi için güvenli kaldırma sınırını aşabilir. Kablo ağırlığını azaltmanın ve araca daha fazla güç sağlamanın bir yolu, gücü daha yüksek gerilim seviyelerinde aktarmaktır. 800 V gerilim seviyesi için kablo ağırlığı, şarj gücünü 350 kW'ın altında olacak şekilde sınırlamaktadır (Burnham vd. 2017).

Şebeke ile EA bataryası arasındaki galvanik izolasyon iki yöntemden biriyle sağlanabilir. İlk seçenek, şebekeden izolasyon sağlamak için Şekil 12.a'da görüldüğü gibi AA/DA aşamasından önce Orta Gerilim (OG) hattına bağlı bir transformatör kullanmaktır. Ardından gelen DA-DA aşaması yalıtımsız bir dönüştürücüdür. İkinci seçenek, Şekil 12.b'de görüldüğü gibi Alçak Gerilim (AG) hattına bağlı bir hızlı şarj cihazıdır. Yalıtım sağlamak için izole edilmiş bir DA-DA dönüştürücünün içindeki yüksek frekanslı bir transformatörden yararlanılmaktadır.



Şekil 12. DA hızlı şarj istasyonu blok şeması a) yalıtımsız DA-DA dönüştürücüye sahip hızlı şarj cihazı blok şeması b) yalıtımlı DA-DA ile yapılandırılmış hızlı şarj cihazı blok şeması

Şekil 12.b tez kapsamında değerlendirilen hızlı şarj blok şemasıdır. İlk aşama AA/DA dönüşümünü sağlar ve güç faktörünün 1 olmasını garanti eder. İkinci aşama DA-DA

dönüşümünü sağlar ve hızlı şarj cihazının gerilimi akünün gerilimine uyarlar. Bu gerilim, akünün şarj durumuna göre değişir. İkinci aşama, güvenlik amacıyla bir transformatör kullanılarak galvanik olarak izole edilmiştir. OG/AG trafosu ile galvanik izolasyon sağlanıyorsa izolasyonsuz DA-DA dönüştürücü kullanılabilir. Araç içi şarj cihazlarının sınırlı kapasitesi nedeniyle 50-350 kW arası güç seviyelerinde olan DA hızlı şarj cihazları günümüzde yaygın hale gelmektedir. Tez kapsamında değerlendirilen bu şarj cihazları, aracın dışında bulunan izole edilmiş bir güç dönüştürücü aracılığıyla araç aküsüne DA güç sağlar ve kullanıcıya benzinli bir arabaya yakıt koyuyormuş gibi benzer bir deneyim sunmaktadır. Galvanik izolasyon, aracı şebekeden ayırır ve aynı zamanda şarj cihazının çıkış kademelerinin paralel olarak kolayca bağlanmasını sağlar. Geleneksel bir DA hızlı şarj cihazı, dönüştürme ve GFD işlevlerini uygulamak için tipik olarak aktif darbe genişliği modülasyonuna sahip doğrultucu kullanır. AA/DA aşamasından önce bir giriş filtresi eklenerek harmonik standartlar karşılanır. Aktif DGM doğrultucu genellikle motor sürücülerinde kullanılan, tipik olarak ters iletken yalıtımlı kapılı bipolar transistörlere dayanan ve 10 kHz'den yüksek olmayan anahtarlama frekanslarında çalışan dönüştürücü modüllere dayanır. Daha kompakt ve verimli dönüştürücü, toplam güç kayıplarını önemli ölçüde azaltan ve birkaç on kilohertzlik anahtarlama frekanslarında çalışan silisyum karbür (SiC) güç MOSFET'leri ile elde edilebilir (Srdic & Lukic 2019). İkinci aşama, şebeke ile elektrikli aracın bataryası arasında DA düzenlemesi ve galvanik izolasyon sağlayan izole bir DA-DA dönüştürücüdür. Araç aküsü topraklanmadığından, izole edilmiş DA-DA dönüştürücü kademesi, araç aküsünün ve DA-DA dönüştürücünün ikincil tarafının izolasyonunu korur. Şarj sistemi, sistem izolasyonunu koruyarak araç aküsü için tasarlanan koruma şemasını sağlamlaştırır.

Her durumda şarj işlemi, şarj protokolü tarafından tanımlanan bir dizi olayı takip eder. Şarj işlemi tipik olarak sinyal anlaşması, yalıtım testi ve araç ile şarj cihazı arasında maksimum şarj parametrelerinin paylaşılmasıyla başlar. Gerekli kriterlerin tümü karşılanırsa araç DA kontaktörünü kapatır ve şarj işlemi başlar. Şarj işlemi sırasında araç ve şarj cihazı, istenen akım ve gerilim referansına ilişkin bilgi alışverişinde bulunur. Buna ek olarak, araç batarya yönetim sistemi, şarj cihazını, akü şarj durumu ve bilgisayar ara yüzünde görüntülenebilecek diğer sistem parametreleri konusunda günceller. Akü önceden ayarlanmış belirli bir şarj durumuna ulaştığında araç, şarj akımını sıfıra düşürerek şarjı sonlandırması için şarj cihazına sinyal gönderir. Araç daha sonra DA kontaktörünü açarak şarj cihazından bağlantısını keser.

Tipik olarak şarj profili, çoğu lityum iyon pil çeşidinin şarj edilmesinde yaygın olarak kullanılan, iyi bilinen sabit akım, sabit gerilim profilini takip eder. Akü sabit akım bölgesinde şarj olurken akü gerilimi artar. Daha sonra sabit akım bölgesinde gücü yavaş yavaş artar. Şarj profili sabit gerilim fazına geçtiğinde, akü terminallerinde gerilimi korumak için şarj akımı azaldığından aküye verilen güç azalır. Türkiye için daha çok yeni olan elektrikli yerli otomobil TOGG, yüksek enerjili Lityum-iyon pil teknolojisi ile %100 şarj ile yola çıkınca 300-500 km aralıksız yolculuk sunmaktadır. Trugo hızlı şarj alt istasyonları sayesinde 30 dakikadan daha kısa sürede %80 pil doluluk seviyesine ulaşmaktadır. Trugo DA hızlı şarj istasyonları günümüzde 180 kW olarak hizmet vermektedir (URL-3).

Elektrikli araç şarj cihazları tek yönlü ve çift yönlü güç akışı seçenekleriyle tasarlanabilmektedir. Tek yönlü şarj cihazı; düşük donanım gerektirir pil bozulmalarına karşı daha etkileyici bir çözümdür. Çift yönlü akü şarj cihazı, akü sağlığının arka planda, ağ güvenliğinin ön planda olduğu şebekeden araca ve araçtan şebekeye enerji aktarımı sağlar. Çift yönlü şarj cihazları, pilin bozulmasına neden olabilir. Bu çalışmada çift yönlü güç akışına izin veren AA/DA diyot kenetlemeli GFD doğrultucu tek yönlü olarak çalıştırılmıştır. Deneysel olarak 300 kW gücündeki hızlı şarj sistemi laboratuvar ortamında sağlanamadığından sistemin düşük güçlü uygulaması yeni seviye kaydırmalı hibrit frekanslı modifiye edilmiş taşıyıcı tabanlı modülasyon tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu için uygulanabilir olduğu gösterilmektedir.

2.1. Hızlı Şarj Sistemi İçin DA-DA Dönüştürücüler

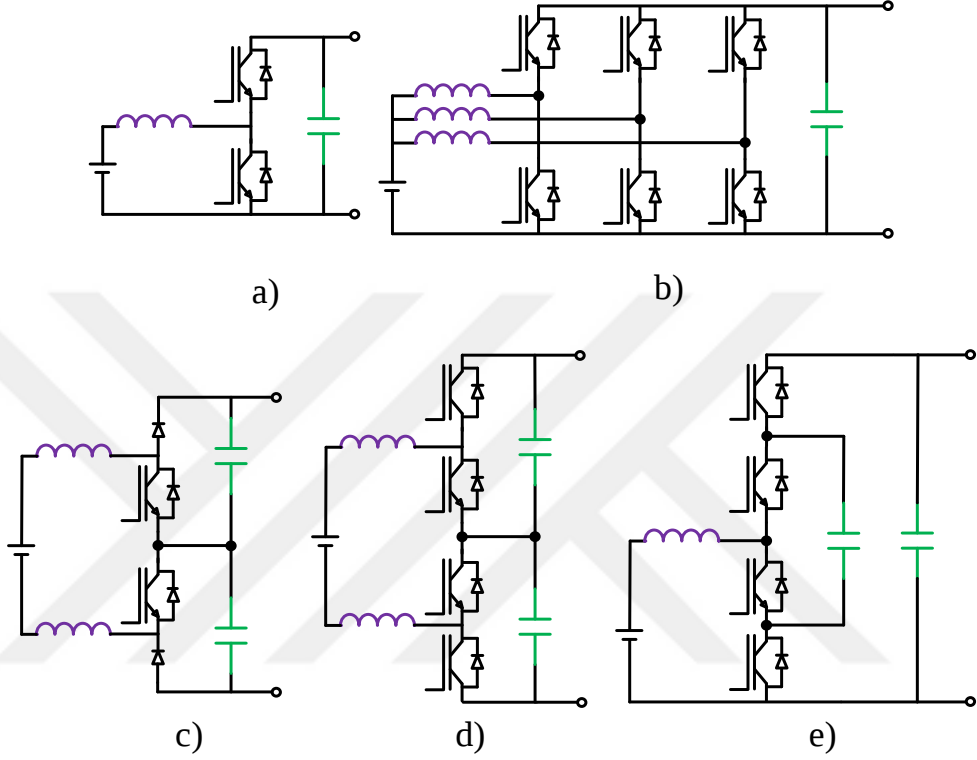
AA/DA dönüştürücünün çıkış geriliminin akü gerilimine uyarlanması ikinci aşama olan DA-DA dönüştürücü ile sağlanır. Bu aşama, elektrikli aracın belirli bir şarj yöntemine göre şarj edilmesinden ve aynı zamanda Batarya Yönetim Sistemi (BYS) ile iletişim kurarak akünün güvenli çalışmasının sağlanmasından sorumludur.

2.1.1. İzolesiz DA-DA Dönüştürücüler

Hızlı şarj istasyonlarında güç transformatörü tarafından galvanik izolasyon sağlanıyorsa, ikinci aşama olarak yalıtımsız bir DA-DA dönüştürücü kullanılabilir. Yani

AA/DA kısmından önceki hat frekansı transformatörü tarafından sağlanan izolasyondan yararlanılıyorsa şarj cihazı tasarımında yalıtımsız bir DA/DA dönüştürücü faydalı olabilir.

Genellikle EA batarya gerilimi AA/DA ön ucunun çıkış geriliminden daha düşüktür. Şekil 13'te hızlı şarj kapsamında değerlendirilen yalıtımsız topolojiler ele alınmaktadır.



Şekil 13. Hızlı şarj cihazları için ele alınan bazı yalıtımsız DA-DA dönüştürücüler a) yarı köprü artıran dönüştürücü b) kademeli artıran dönüştürücü c) tek yönlü üç seviyeli artıran dönüştürücü d) çift yönlü üç seviyeli artıran dönüştürücü e) üç seviyeli uçan kapasitörlü dönüştürücü

Şekil 13.a'da akım tek bir anahtar tarafından taşındığından bu dönüştürücünün güç değeri sınırlıdır. Ayrıca akım dalgalanmasının küçük olması gerektiğinden empedans boyutu büyük olabilir. Akım taşıma kapasitesini arttırmak ve batarya tarafından görülen akım dalgalanmasını azaltmak için, iki veya daha fazla faz ayağı, çok fazlı serpiştirilmiş bir takviye dönüştürücü oluşturulabilir. Şekil 13.b'de, üç fazlı ayakları olan aralıklı bir yükseltici dönüştürücüyü göstermektedir. Basit yapısı, iyi performansı ve yüksek güce ölçeklenebilirliği nedeniyle bu topoloji, EA şarj uygulaması için literatürde geniş çapta araştırılmıştır (Garcia vd. 2006; Kang vd. 2012; Christen vd. 2015). Şekil 13.c ve 13.d daha iyi harmonik performans sunar. Hızlı şarj cihazları için bir başka potansiyel üç seviyeli

topoloji, Şekil 13.e'de gösterilen uçan kapasitör dönüştürücüsüdür. Bu üç seviyeli topoloji, yükseltici dönüştürücüden daha küçük bir indüktörün kullanılmasına olanak tanır. Ek olarak, dönüştürücünün güç değeri, çok fazlı bacakların paralelleştirilmesi ve serpiştirilmesiyle kolayca artırılabilir. Ancak, uçan kapasitörün varlığı nedeniyle kısa devre koruma tasarımı zordur. Bununla birlikte, literatüre dayanarak bildiğimiz kadarıyla şu anda önerilen veya uygulanan hiçbir DA hızlı şarj cihazı, uçan kapasitör dönüştürücüyü kullanmamaktadır (Zhou & Preindl 2023). (Upputuri & Subudhi 2023)'te 3 kW'a kadar analiz edilen yalıtımsız DA-DA dönüştürücüler içerisinde en az verimli olan dönüştürücü kademeli artıran izolesiz DA-DA dönüştürücüdür.

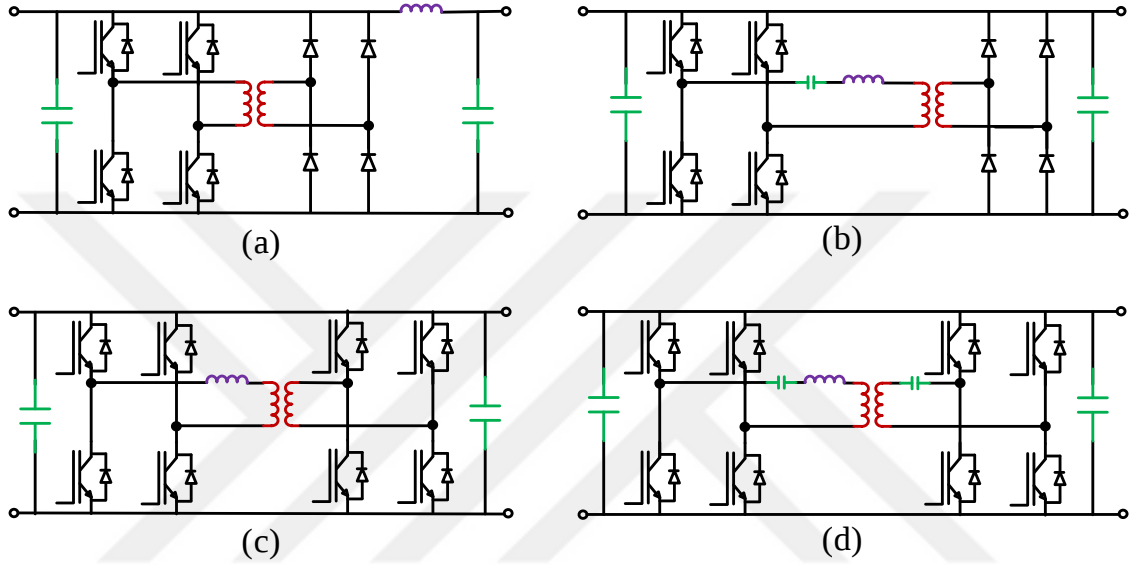
Yalıtımsız DA-DA dönüştürücü topolojilerinin karşılaştırmalı analizi Tablo 7'de listelenmektedir.

Tablo 7. Yalıtımsız DA-DA topolojilerinin karşılaştırmalı analizi

Parametre	Yarım-köprü arttıran dönüştürücü	Kademeli artıran dönüştürücü	Üç seviyeli artıran dönüştürücü	Üç seviyeli uçan kapasitörlü dönüştürücü
Verim	Orta	Düşük	Yüksek	Yüksek
Anahtar / diyot	2/0	6/0	4/0	4/0
Güç derecesi	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Giriş ve çıkış kapasitör etkin akımı	Yüksek	Düşük	Orta	Orta
Çalışma modu	Çift yönlü	Çift yönlü	Çift yönlü	Çift yönlü
İletim kayıpları	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
Anahtarlama kayıpları	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Denetim	Kolay	Normal	Normal	Normal
Akü ve sabit bara gerilimi	Sınırlı	Sınırlı	Sınırlı	Sınırlı
Anahtarlama frekansı	Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Akım dalgalanması	Düşük	Orta	Çok düşük	Çok düşük

2.1.2. İzoleli DA-DA Dönüştürücüler

Hızlı şarj istasyonlarında güç transformatörü tarafından galvanik izolasyon sağlanmıyorsa, ikinci aşama olarak yalıtımlı bir DA-DA dönüştürücü kullanılabilir. EA şarj cihazları için uygun izole edilmiş DA/DA dönüştürücü topolojileri Şekil 14'te sunulmaktadır.



Şekil 14. Hızlı şarj için izoleli DA-DA topolojileri a) FKTK dönüştürücü b) LLC dönüştürücü c) ÇAK dönüştürücü d) CLLC dönüştürücü

Şekil 14.a da ve 14.b de gösterilen izoleli DA/DA dönüştürücüler tek yönlü yalıtımlı DA/DA dönüştürücülerdir. Şekil 14.a'da gösterilen faz kaydırmalı tam köprü (FKTK) dönüştürücüdür. Bu topolojinin ana dezavantajları, diyot tarafında meydana gelen ters ön gerilimli parazit streslerdir. Bu stresleri azaltmak için, aktif (Sabate vd. 1991) veya pasif (Cho vd. 1999) bastırıcı devreler, sistemi hantallaştırması pahasına uygulanabilir.

DA hızlı şarj için başka bir tek yönlü izole edilmiş DA-DA dönüştürücü, Şekil 14.b' de gösterilen LLC rezonans dönüştürücüsüdür. Dönüştürücü çıkış gerilimi, rezonans empedans oranını eşdeğer yüke ayarlamak için anahtarlama frekansı değiştirilerek düzenlenir. LLC dönüştürücü, giriş-çıkış gerilim oranının küçük olması durumunda çok yüksek verim elde edebilir (Huber vd. 2018). Geniş bir çıkış gerilim aralığı ve performansı artırmak için birden fazla yaklaşım önerilmektedir. Çıkış aralığını genişletmek ve çalışma frekansı aralığını daraltmak için taşıyıcı tabanlı DGM teknikleri, faz kaydırma, seviye

kaydırmalı DGM teknikleri ve diğer hibrit modülasyon şemaları dahil olmak üzere çeşitli kontrol yöntemleri önerilmektedir (Wang vd. 2014; Lee 2016; Pahlevani vd. 2016) Bu kontrol yöntemlerinde, değişken bir DA gerilimi, EA akü gerilimi ile eşleşecek şekilde AA/DA dönüştürücü tarafından DA gerilimi düzenlenir ve böylece LLC dönüştürücünün maksimum verimlilikle rezonans frekansı etrafında çalışması sağlanır. Bu yöntem ekstra donanım gerektirmeden basit ve etkili olmasına rağmen DA gerilim değişimi şebeke gerilimi ve anahtar gerilimi değeri ile sınırlı olduğundan geniş bir çıkış gerilimi aralığı garanti edilmez. LLC dönüştürücü için diğer bir sorun, rezonans kapasitörünün yüksek güçte yüksek gerilim stresine dayanması gerektiğidir. Bu da bileşen seçimini zorlaştırır. Güç oranını arttırmak ve anahtarlama cihazları ve rezonans bileşenleri üzerindeki stresi azaltmak için, çok seviyeli bir LLC dönüştürücü (Coccia vd. 2007), üç fazlı bir LLC dönüştürücü (Nakakohara vd. 2016) ve paralel modüllere sahip bir LLC dönüştürücü (Yoon vd. 2013) kullanılabilir.

Yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimliliği nedeniyle EA şarj uygulamaları için çift- taraflı aktif köprü (ÇAK) dönüştürücü Şekil 14.c'de gösterilmiştir. Son zamanlarda, ÇAK dönüştürücü, yeni SiC ve GaN tabanlı güç yarı iletken cihazlarının yetenekleri ve dönüştürücü verimliliği nedeniyle ilgi görmektedir (Akagi vd. 2015). ÇAK dönüştürücüde, güç akışı, güç aktarım elemanı olarak görev yapan transformatör kaçak endüktansı ile birincil ve ikincil gerilim arasındaki faz kaymasının ayarlanmasıyla kontrol edilir. Basit yapısı nedeniyle ÇAK dönüştürücü, izole edilmiş çift yönlü DA-DA dönüşüm uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Gou vd. 2023; Naik vd. 2023). Geniş bir çalışma aralığında performansı artırmak için çeşitli modülasyon şemaları önerilmektedir. Literatürde önerilen tüm kontrol stratejilerinin doğası gereği uygulanması zor olabilen ve parametre değişimine karşı o kadar dayanıklı olmayabilen karmaşık modülasyon şemaları vardır. ÇAK dönüştürücü için diğer bir endişe ise ÇAK dönüştürücü işleminin doğasında olan reaktif güçten kaynaklanan yüksek frekanslı şarj dalgalanmasıdır (Xue vd. 2015). Çift yönlü DA-DA dönüştürücünün diğer bir çeşidi, Şekil 14.d (Chen vd. 2010), (Zahid vd. 2015)'da gösterilen CLLC dönüştürücüdür. Simetrik devresi nedeniyle CLLC dönüştürücü, her iki güç akışı yönünde de aynı gerilim kazancı karakteristiğini sağlar, bu da kontrol karmaşıklığını azaltır ve güç düzenlemesini kolaylaştırır. ÇAK dönüştürücüyle karşılaştırıldığında CLLC rezonans için gereken kaçak endüktans çok daha küçüktür. Sonuç olarak dönüştürücüde dolaşan reaktif güç de daha küçüktür. Ayrıca, CLLC dönüştürücünün

sinüzoidal rezonans akımı, yüksek frekanslı transformatör üzerinde ÇAK dönüştürücüsüne göre daha küçük bir gerilim uygular (Zhao vd. 2018).

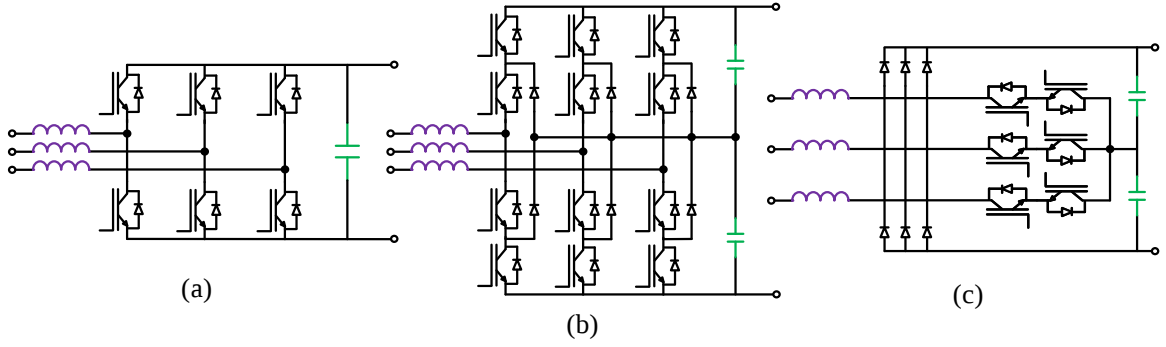
Bu topolojilerin özellikleri Tablo 8'de özetlenmektedir. Yalıtılmış DA/DA dönüştürücülerin daha kapsamlı bir incelemesi (Du vd. 2011) ve (He & Khaligh 2017)'de de verilmiştir.

Tablo 8. DA hızlı şarj cihazları için farklı izoleli DA-DA dönüştürücülerin karşılaştırılması

Dönüştürücü	Anahtar / diyot	Çift-yön	Başlıca avantajlar ve dezavantajlar
FKTK (Şekil 14-a)	4 / 4	Hayır	- Basit kontrol, geniş çıkış aralığı - Primer taraftaki anahtarlarda ve çıkış diyotlarında yüksek anahtarlama kayıpları
LLC (Şekil 14-b)	4 / 4	Hayır	- Düşük reaktif akım - Sınırlı kontrol, yüksek verimliliğin sağlanması zor
ÇAK (Şekil 14-c)	8 / 0	Evet	Geniş ulaşılabilir çıkış aralığı
CLLC (Şekil 14-d)	8 / 0	Evet	Ekstra filtre bileşeni

2.2. Hızlı Şarj Sistemi İçin AA/DA Dönüştürücüler

AA/DA aşamasında, üç fazlı iki seviyeli doğrultucu, NPC dönüştürücü ve Viyana doğrultucu, araç dışı ultra hızlı şarj için yaygın olarak kullanılmaktadır (Rubino vd. 2017). Özellikleri elektrikli araç şarj endüstrisine uygun, iyi geliştirilmiş dönüştürücülerdir. Şekil 15'te gösterilen hızlı şarj için AA/DA topolojileri arasından Şekil 15.a' da belirtilen üç fazlı iki seviyeli doğrultucu (3Ø-2S) altı kontrollü anahtardan oluşur. Bu güç dönüştürücü, düşük toplam harmonik akım bozulması üretir, çift yönlü güç akışı sağlar ve iyi verimlilik ve kolay kontrol ile birliğe yakın bir güç faktörü elde eder (Tu vd. 2019). Bununla birlikte, THB'yi düşük değerlere ayarlamak için diğer üç seviyeli topolojilere kıyasla bu doğrultucuda daha büyük filtre gerekli olabilir (Kolar & Friedli 2011; Friedli vd. 2014; Barth vd. 2020).



Şekil 15. EA hızlı şarj uygulamalarında kullanılan AA/DA dönüştürücü topolojileri a) Üç faz-iki seviyeli doğrultucu b) Üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu c) Üç faz Vienna doğrultucu

Şekil 15.b hızlı şarj sistemi için dikkate alınan 30-3S nötr nokta kenetlemeli GFD topolojisini göstermektedir. Bu diyot kenetlemeli doğrultucu 12 kontrollü anahtara ve altı paralel diyota sahiptir ve çift yönlü güç akışı sunmaktadır. Bu topolojinin avantajı daha az anahtarlama stresine sahip olması, daha küçük filtre yapısına ihtiyaç duyması ve daha düşük THB sergilemesidir. Şekil 15.c hızlı şarj kapsamında değerlendirilen Vienna doğrultuyu göstermektedir. Literatürde hızlı şarj için ele alınan doğrultuculardan olan Swiss doğrultucu Vienna doğrultucudan türetilmiştir (Jeyapradha vd. 2023). Bu doğrultucuların dezavantajı çift yönlü güç akışına izin vermemesidir. Araçtan şebekeye bir güç akışı sağlamamaktadırlar. Yine literatürde var olan azaltan tip doğrultucu ve ekstra anahtar kullanılarak gerçekleştirilen yumuşak anahtarlama doğrultucu topolojileri üç fazlı iki seviyeli 6 anahtarlı yapıdan türemektedir. Azaltan tip doğrultucu hızlı şarj kapsamında daha az verimli olmakla beraber, yumuşak anahtarlama türevleri ise anahtarlama kayıplarında başarılı olsa da yüksek verim sağlayamamaktadırlar (Safayatullah vd. 2022).

Tablo 9, güç elektroniği için en popüler simülasyon ortamlarını (PSIM, PLECS/SpeedFit ve MATLAB/Simulink) kullanan, daha önce hızlı şarj için tartışılan dönüştürücü topolojilerinin bir karşılaştırmasını göstermektedir (Kilicoglu & Tricoli 2023). Bu karşılaştırmaya göre yüksek kaliteli çıkış gerilimleri ve giriş akımları açısından Viyana doğrultucu en iyi AA/DA dönüştürücüsüdür (Yan vd. 2020). Ancak şarj istasyonlarında fotovoltaik sistemlerin ve akümülatörlerin ortaya çıkışı, çift yönlü doğrultucuları gerektirmektedir. Bu nedenle 30-3S diyot kenetlemeli GFD dönüştürücü en iyi alternatiftir.

Tablo 9. Hızlı şarj cihazları için ele alınan doğrultucuların ayrıntılı analizi

Performans ve Kalite		Topoloji		
		30-2L	NPC	Vienna
Performans	Verim (%)	97.87	98.20	97.14
	Toplam kayıp (W)	1062	1896	1428
Giriş kalitesi	GF (%)	99.933	99.999	99.992
	THD_i (%)	4.04	1.20	1.25
Çıkış kalitesi	Gerilim dalgalanması (V)	3.40	4.81	1.99
Performans	Verim (%)	98.86	98.96	98.95
	Toplam kayıp (W)	256.48	351.81	237.16

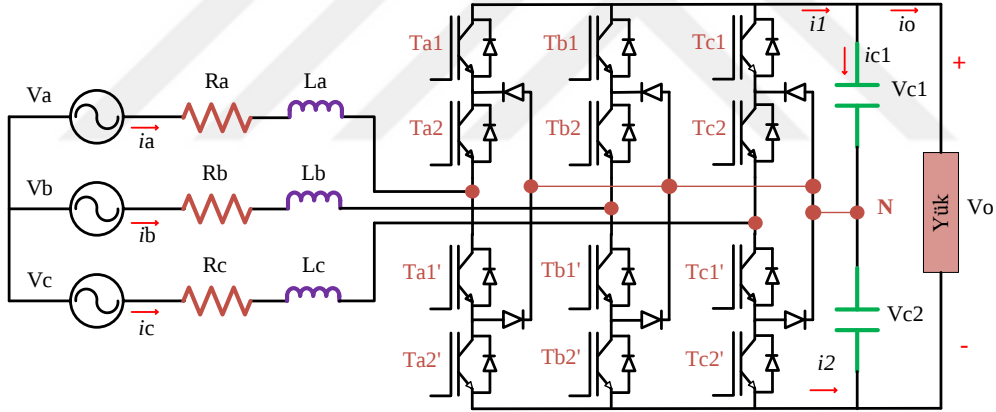
30-3S diyot kenetlemeli GFD topoloji, şarj sistemlerinin çıkış gücünü artırabilen iki DA-DA dönüştürücünün seri-seri veya seri-paralel konfigürasyonda (Deb vd. 2021) ve (Tan vd. 2016)' de kademeli olarak bağlanmasını sağlayan iki kutuplu bir DA veri yolu sunar. Ancak bu topoloji daha fazla sayıda güç yarı iletkeni gerektirir ve bu da daha yüksek maliyete neden olur. Ultra hızlı şarj cihazları, elektrikli bir aracın yalnızca şarj olduğu süre boyunca ara sıra şarj edilmesi için tasarlandığından, çift yönlü enerji akışına gerek kalmamaktadır. Bu nedenle Viyana doğrultucu en iyi çözüm gibi görünse de gelişen teknoloji çift yönlü güç akışı sağlayan dönüştürücüleri iyileştirmeyi gerektirmektedir. Tablo 10 hızlı şarj için değerlendirilen 2-seviyeli ve 3-seviyeli AA/DA GFD topolojilerini karşılaştırmaktadır. 30-3S diyot kenetlemeli GFD topoloji anahtarlama cihazlarındaki stresleri ve giriş akımı THB' i azaltmaktadır. Daha yüksek güç faktörüne sahip olması nedeniyle bu topoloji ayrıntılı olarak incelenmektedir. Çünkü incelenen üç fazlı iç seviyeli diyot kenetlemeli güç faktörü düzelten doğrultucusu umut verici görünmektedir.

Tablo 10. Hızlı şarj için ele alınan 2-seviyeli ve 3-seviyeli GFD topolojilerinin karşılaştırmalı analizi

Parametre	2-seviyeli	3-seviyeli diyot kenetlemeli
Durum	Çift-yönlü	Çift-yönlü
Anahtar / diyot	6 / 0	12 / 6
Anahtarlama kaybı	Yüksek	Düşük
İletim kaybı	Düşük	Yüksek
Verim	Düşük	Yüksek
THB (şebeke akımı)	Yüksek	Çok düşük
Şebeke empedans büyüklüğü	Büyük	Küçük
Anahtarlar üzerinde gerilimi stresi	Yüksek	Düşük
Güç yoğunluğu	Düşük	Orta
Kontrol	Kolay	Normal

2.3. Tez Kapsamında Değerlendirilen Hızlı Şarj Sistemi için Üç Fazlı Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli AA/DA Güç Faktörü Düzenleyici

Üç fazlı üç seviyeli (30-3S) diyot kenetlemeli AA/DA GFD doğrultucu yüksek güç faktörüne sahip olup, yüksek gerilimlerde güç kalitesinin iyileştirilmesi için uygun bir çözüm sunmaktadır. Bu doğrultucu ile değerlendirilen DA şarj cihazları, ihmal edilebilir harmonik akım, yük geriliminde ve yük akımında küçük dalgalanma faktörü göstermektedir. Bu doğrultucu devrenin şeması Şekil 16'da gösterilmektedir. Bu topolojide her anahtar gerilimi, tam DA bara gerilimi yerine yarım DA bara gerilimine eşittir. Bu nedenle yüksek gerilim uygulamalarında anahtarlar üzerinde daha az gerilim stresi oluşur. Bu durum anahtarlama kayıplarının daha az olmasını sağlamaktadır. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu yüksek güç faktörü sağlar ve yüksek gerilimlerde güç kalitesini arttırmak için oldukça etkili bir çözümdür. DA şarj cihazları bu doğrultucu kullanılarak değerlendirildiğinde, minimum harmonik akımın yanı sıra küçük bir yük gerilimi ve akım dalgalanma faktörü sergilerler.



Şekil 16. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun devre şeması

Doğrultucu giriş terminal gerilimleri V_a, V_b ve V_c 'dir. Üç fazlı gerilimler ve hat akımları (5) ve (6)'daki ifadelerde gibi verilmiştir. Burada ω açısal frekanstır.

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_m \cos(\omega t) \\
 V_b &= V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_c &= V_m \cos(\omega t + 2\pi/3)
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
i_a &= i_m \cos(\omega t) \\
i_b &= i_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta\right) \\
i_c &= i_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta\right)
\end{aligned} \tag{6}$$

Dönüştürücünün A ayağı için doğrultucu giriş terminallerindeki giriş gerilimi (7)'de ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
V_{a0} &= \frac{T_a^2}{2} \Delta V + \frac{T_a^2}{2} V_0 \\
V_{b0} &= \frac{T_b^2}{2} \Delta V + \frac{T_b^2}{2} V_0 \\
V_{c0} &= \frac{T_c^2}{2} \Delta V + \frac{T_c^2}{2} V_0
\end{aligned} \tag{7}$$

Burada T_a , A ayağının anahtarlama fonksiyonunu temsil ederken T_b ve T_c sırasıyla B ve C bacaklarının anahtarlama fonksiyonlarını temsil etmektedir. Şekil 16'da belirtilen T_{a1} anahtarı A fazındaki 1. anahtardır. T_{a2} A fazındaki 2. anahtardır. Örnek olarak T_{a1} ifadesi 1 ise anahtar iletimdedir, sıfır ise anahtar kesimdedir denebilir.

$\Delta V = V_{C1} - V_{C2}$ ve V_0 yük gerilimidir. DA bara kapasite gerilimleri V_{C1} ve V_{C2} Şekil 16'da belirtilmektedir. Yük gerilimi (8) numaralı denklem ile ifade edilmektedir.

$$V_0 = V_{C1} + V_{C2} \tag{8}$$

Anahtarlama fonksiyonları açısından i_1 ve i_2 'yi (9)'daki gibi yazabiliriz.

$$\begin{aligned}
i_1 &= \frac{T_a^2 + T_a}{2} i_a + \frac{T_b^2 + T_b}{2} i_b + \frac{T_c^2 + T_c}{2} i_c \\
i_2 &= \frac{T_a^2 - T_a}{2} i_a + \frac{T_b^2 - T_b}{2} i_b + \frac{T_c^2 - T_c}{2} i_c
\end{aligned} \tag{9}$$

C_1 ve C_2 kapasitelerinden geçen akım (10)'da ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
i_{c1} &= i_1 - i_0 \\
i_{c2} &= i_0 + i_2
\end{aligned} \tag{10}$$

Burada $i_0 = V_0/R_{load}$. Dolayısıyla i_{c1} ve i_{c2} 'yi (11)' de ki gibi ifade edebiliriz.

$$\begin{aligned} i_{c1} &= \frac{T_a^2 + T_a}{2} i_a + \frac{T_b^2 + T_b}{2} i_b + \frac{T_c^2 + T_c}{2} i_c - \frac{V_0}{R_0} \\ i_{c2} &= \frac{T_a^2 - T_a}{2} i_a + \frac{T_b^2 - T_b}{2} i_b + \frac{T_c^2 - T_c}{2} i_c - \frac{V_0}{R_0} \end{aligned} \quad (11)$$

Kondansatör gerilimleri (12)'de verilmektedir ve (13)' de ki gibi detaylandırılabilir.

$$\begin{aligned} V_{c1} &= \frac{1}{C_1} \int (i_{c1} - i_0) dt \\ V_{c2} &= \frac{1}{C_2} \int (i_{c2} - i_0) dt \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_{c1} &= \frac{1}{C_1} \int \left[\frac{T_a^2 + T_a}{2} i_a + \frac{T_b^2 + T_b}{2} i_b + \frac{T_c^2 + T_c}{2} i_c - \frac{V_0}{R_0} \right] dt \\ V_{c2} &= \frac{1}{C_2} \int \left[\frac{T_a^2 - T_a}{2} i_a + \frac{T_b^2 - T_b}{2} i_b + \frac{T_c^2 - T_c}{2} i_c - \frac{V_0}{R_0} \right] dt \end{aligned} \quad (13)$$

Bu konfigürasyonda, her bir anahtardaki gerilim, tam DA bara geriliminin aksine, bara geriliminin yalnızca yarısı kadardır. Anahtarlar üzerinde daha az gerilim stresinin olması yüksek gerilim senaryolarında faydalıdır. Tablo 11 değerlendirilen doğrultucunun her bir ayağı için anahtarlama durumlarını göstermektedir.

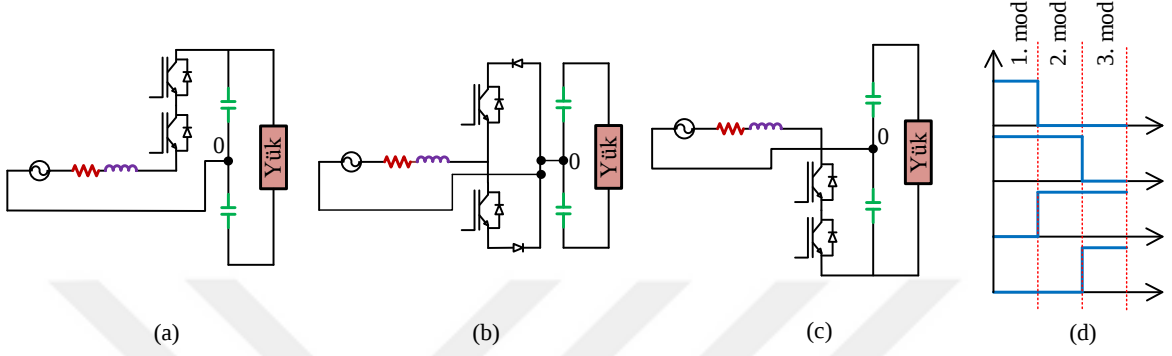
Tablo 11. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun anahtarlama durumları ve çıkışta buna karşılık gelen gerilim değerleri

s	T_{x1}	T_{x2}	$T_{x1'}$	$T_{x2'}$	V_{xn}
1	1	1	0	0	$V_1 = V_0/2$
0	0	1	1	0	0
-1	0	0	1	1	$V_2 = -V_0/2$

Şekil 17'de dönüştürücünün A ayağı için üç çalışma modu gösterilmektedir ve aynı durum B ve C aşamaları için de geçerlidir. Çıkış gerilimi üretimi M modülasyon indeksi ile

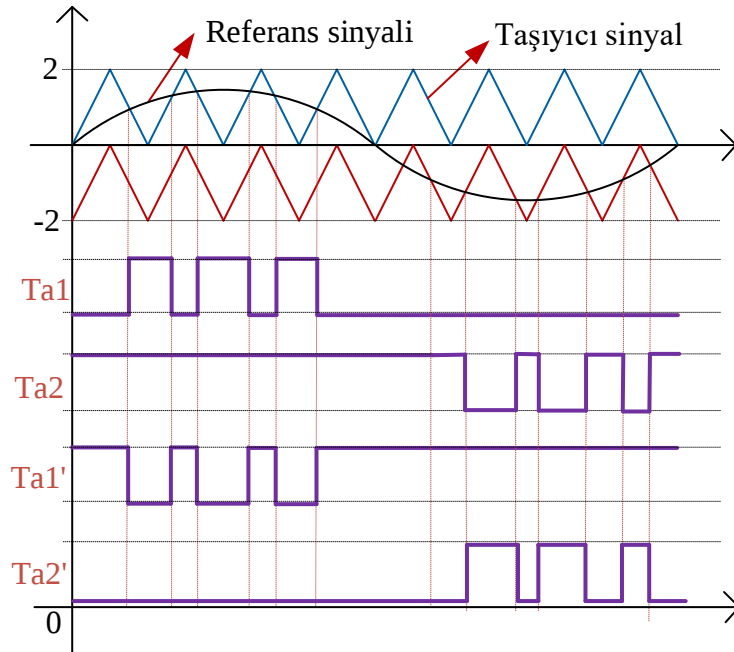
karakterize edilebilir. M ; 0 ile 1 arasında değişir. (14)'te ki gibi hesaplanmaktadır. Burada V_m giriş fazı gerilim genliğidir. V_{cr} ise taşıyıcı sinyalin genliğidir.

$$m_a = V_m / V_{cr} \quad (14)$$



Şekil 17. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazı için üç çalışma modu

30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun klasik üçgen taşıyıcı tabanlı SDGM yöntemi ile belirlenen anahtarlama sinyalleri Şekil 18'te gösterilmektedir. A fazı için belirlenen anahtarlama durumlarının benzeri B ve C fazı için de geçerlidir. B ve C fazları için referans sinüs işaretlerinde 120° faz farkı bulunmaktadır.



Şekil 18. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazı için gösterilen anahtarlama sinyalleri

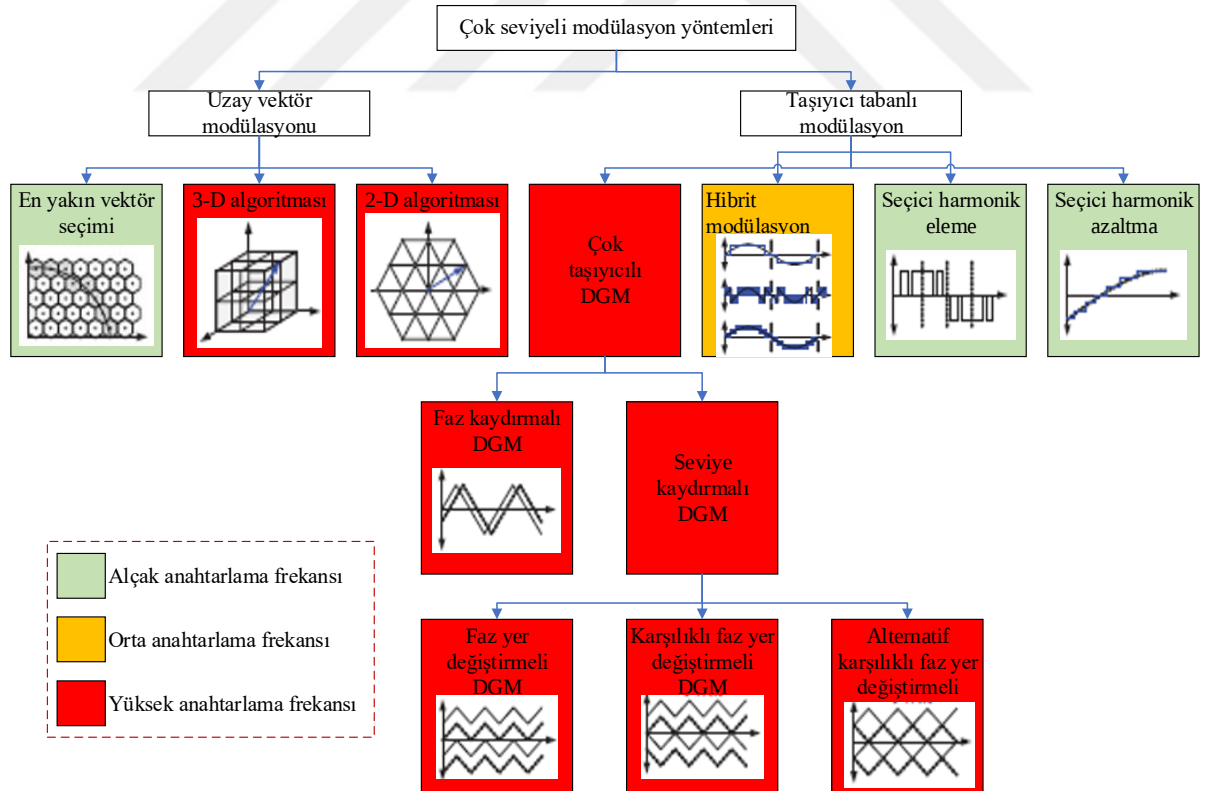
3. ÇOK SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE MODÜLASYON YÖNTEMLERİ

Çok seviyeli dönüştürücüler, birden fazla enerji seviyesine sahiptir. Birden fazla enerji seviyesi daha yüksek verimlilik, daha düşük harmonik içerik ve daha iyi performans sağlayabilir. Modülasyon stratejisi, çok seviyeli dönüştürücünün topolojisi ile bağlantılıdır ve sistem performansını büyük ölçüde belirler. Çok seviyeli dönüştürücülerde ele alınan modülasyon yöntemleri Şekil 19'da kategorize edilmektedir. Çok seviyeliler için modülasyon tekniklerinde iki ana grup vardır. Biri uzay vektör tabanlı DGM, diğeri ise taşıyıcı tabanlı DGM'dir. Uzay vektör tabanlı darbe genişlik modülasyon tekniğinin iki boyutlu ve üç boyutlu olanı vardır. Taşıyıcı tabanlı yöntemler için düşük frekanslı, yüksek frekanslı ve karışık frekanslı modülasyon yöntemleri bulunmaktadır. Yüksek frekanslı modülasyon yöntemleri ayrıca birkaç alt bölüme ayrılabilir. Farklı modülasyon yöntemleri, farklı topolojilere bağlı olarak farklı performanslar gösterebilir.

Modülasyon şemaları, çıkış geriliminin hem büyüklüğü hem de frekansı üzerinde önemlidir ve iyi bir çıkış gerilim kalitesi sağlar. Şekil 19'da sunulan çok seviyeli modülasyon yöntemleri DGM ailesine aittir. Her iki yöntem de birbirinden çok farklı gibi görünse de, birini diğerinden ayıracak kesin ve üstün performanslar kanıtlanmış değildir. Her iki yöntemin de kendine göre artıları ve eksileri vardır. UVM, DGM'nin yapamadığı ek anahtarlama durumları oluşturabilir, dolayısıyla daha yüksek bir serbestlik derecesi sağlayabilir.

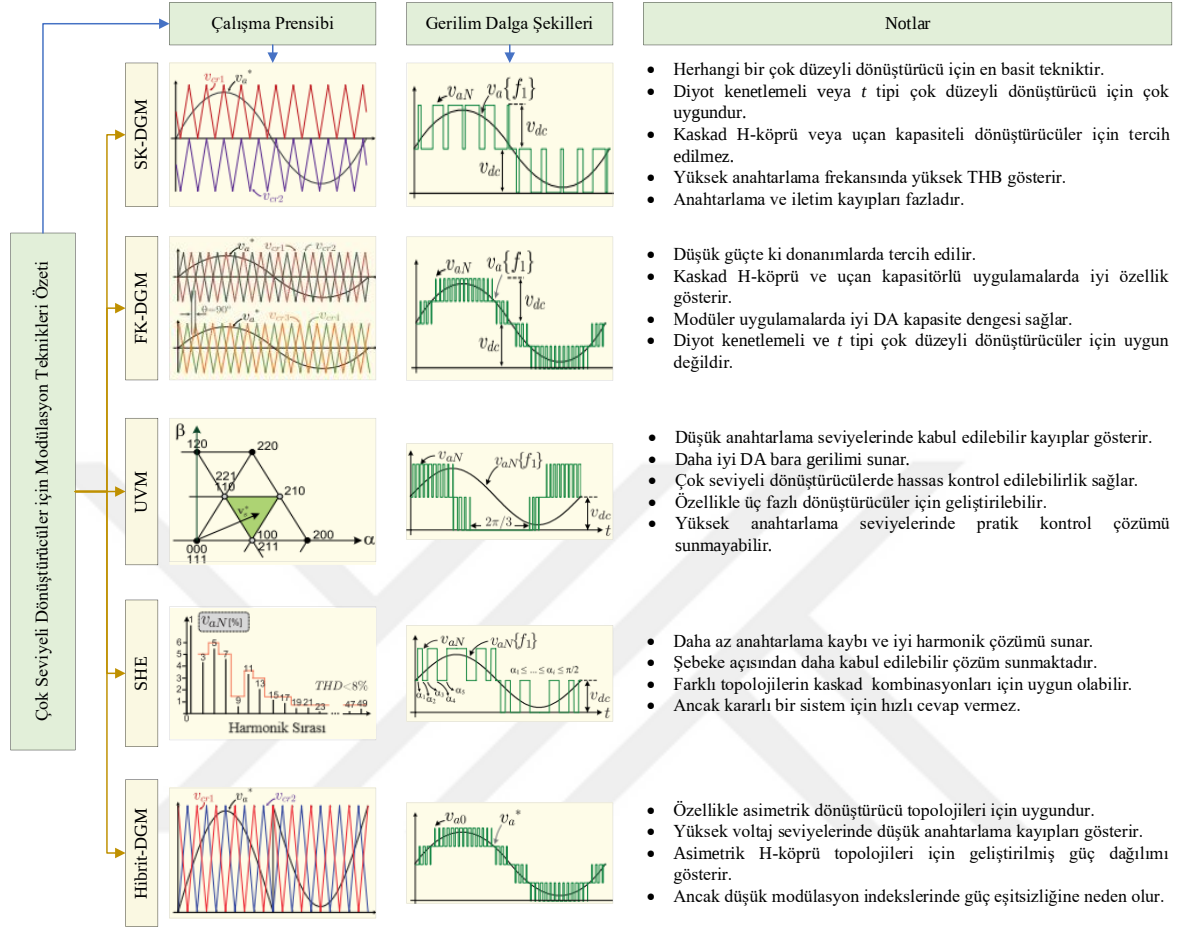
Uzay vektör modülasyonunda üç aşamalı bir süreç gerekmektedir. Vektör seçimi, görev döngüsü hesabı ve vektörlerin sırası bu modülasyonda önemlidir (Maswood & Tafti 2018). Ancak iki veya üç boyutlu UVM yöntemleri klasik UVM ile karşılaştırıldığında, klasik UVM çok boyutlulara göre daha düşük bir hesaplama maliyeti sunmaktadır. Klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi çok seviyeli dönüştürücüler için fazla taşıyıcı gerektirirken UVM yöntemi taşıyıcı sayısını artırmadan büyük ölçüde hesaplamalara bağlıdır. Ayrıca UVM, yüksek anahtarlama frekanslı işlemler gerektirdiğinden dolayı yüksek güçlü uygulamalarda ekstra anahtarlama kayıpları karşımıza çıkarabilir (Palanisamy vd. 2023). UVM yöntemlerini araştıran birçok araştırma çalışmasına rağmen taşıyıcı tabanlı modülasyon özellikle EA şarj topolojileri için sektörün favorisidir (G & K P 2023).

EA hızlı şarj topolojileri için ele alınan taşıyıcı tabanlı modülasyon tekniklerinde anahtarlama sinyalleri düşük maliyetli dijital işlemciler ile gerçekleştirilebilir. Hem UVM tabanlı modülasyon teknikleri hem de taşıyıcı tabanlı modülasyon tekniklerine ait karşılaştırmalı çalışmalar, diyot kenetlemeli dönüştürücü ve çok seviyeli H-köprü evirici için sırasıyla (Andler vd. 2009) ve (Kouro vd. 2008)'da değerlendirilmiştir. Literatürdeki sonuçlar, anahtarlama kayıplarının iki yöntem arasında karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir. Endüstriyel uygulamalar için UVM ve taşıyıcı tabanlı DGM arasında daha net bir seçim yapılabilmesi güç elektroniği dönüştürücülerine bağlıdır. Taşıyıcı tabanlı sinüzoidal DGM genellikle yüksek anahtarlama frekanslarında (1 kHz'in üzerinde) çalışsa da yüksek güç uygulama gereksinimlerini karşılamak için çok daha düşük bir anahtarlama frekansına (yaklaşık 500 Hz) gidebilir. Hibrit DGM yöntemleri birçok güç elektroniği devreleri için daha iyi performans ve güç kalitesi sağlamaktadır. Uygulanabilirliği deneysel olarak doğrulanan tez kapsamında önerilen hibrit DGM yöntemi bu kısımda ayrıntılı incelenmektedir.



Şekil 19. Çok seviyeli dönüştürücülerde modülasyon yöntemleri

Şekil 20, çok seviyeli dönüştürücüler için ele alınan modülasyon tekniklerinin genel özelliklerini özetlemektedir (Leon vd. 2017).



Şekil 20. Çok seviyeli dönüştürücüler için modülasyon tekniklerinin özeti

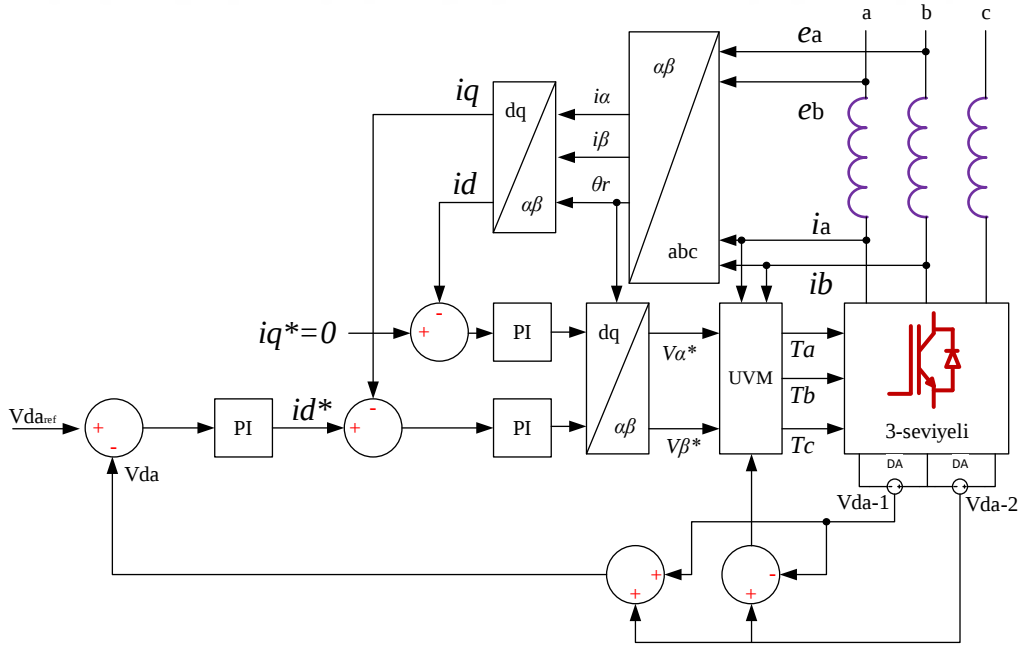
3.1. Uzak Vektör Modülasyonu

Uzak vektör modülasyonu üç fazlı sistemlerde sıklıkla görülmektedir. Üç fazlı çok seviyeli dönüştürücülerde farklı anahtarlama durumları hatlar arasındaki gerilim alanına eşlenebilir ve bunlar bir uzak vektör altıgeni oluşturur. Gerilim referansı ayrıca altıgenle eşleştirilebilir ve anahtarlama durumu tarafından çeşitli şekillerde sentezlenebilir. Bazı vektörler için, belirli kontrol hedeflerine ulaşmak için yedek anahtarlama durumları olabilir. Daha yüksek seviyeye sahip bir dönüştürücü için çok sayıda uzak vektörü olacaktır. Dönüştürücü için anahtarlama durumlarının sayısı seviye sayılarıyla doğrudan ilişkilidir. Daha yüksek seviye daha fazla yedek anahtarlama durumuna ve aynı zamanda referans geriliminin belirlenmesi ve çok sayıda vektör seçimi için daha yüksek hesaplamalara neden

olur. Bu nedenle UVM seviye yükseldiğinde uygulanması gerçekçi değildir. Ancak nötr nokta gerilim dengesini sağlamak için kontrol özgürlüğü olduğundan 3 seviyeli diyot kenetlemeli dönüştürücü topolojisi için uygun olabilir.

Üç fazlı güç sistemleri, genellikle iyi bilinen $\alpha\beta\gamma$ koordinatları veya dq çerçevesi kullanılarak geliştirilen yüksek performanslı kontrolörleri gerektirir. Dengeli güç sistemlerinde gerilimlerin γ bileşeni sıfırdır. Dönüştürücünün olası anahtarlama durumları $\alpha\beta$ çerçevesinde çizilir ve referans gerilimi, dönüştürücünün en yakın anahtarlama durumlarının ağırlıklı bir kombinasyonu olarak elde edilebilir. Uzay vektör modülasyon yöntemi geometrik bir problemin çözülmesiyle bir anahtarlama sırasının ve karşılık gelen görev döngülerinin belirlenmesine dayanmaktadır (Leon vd. 2016). UVM yöntemi başlangıçta iki seviyeli üç fazlı dönüştürücüler için geliştirilmiştir ancak çok seviyeli dönüştürücülere uyarlanmıştır. Durum vektörleri DA gerilim dengesini kontrol etmek, ortak mod gerilimini en aza indirmek, anahtarlama kayıplarını veya diğer yardımcı kontrol hedeflerini azaltmak için kullanılabilir.

Optimize edilmiş anahtarlama dizilerini kullanan diyot kenetlemeli doğrultucu için klasik UVM anahtarlama tekniği Şekil 21'de gösterilmektedir.



Şekil 21. Diyot kenetlemeli doğrultucu için klasik UVM kontrol blok şeması

Uzay vektör modülasyonunun temelinde üç fazlı gerilim ve akım değerlerini sabit referans çerçevesi için bir uzay vektörü olarak dönüştürmek vardır. Yani üç faz a , b ve c yapısı iki eksenli d ve q 'ya döndürülür. Şekil 21' de diyot kenetlemeli doğrultucu için ele alınan UVM tekniği ile gerçekleştirilmiş kontrol şemasında α - β -0 ve d - q dönüşümleri bloklar halinde gösterilmektedir. Bu dönüşümün gerilim değeri için matematiksel ifadeleri sırasıyla Denklem 15, 16 ve 17' de ki gibidir.

$$V = V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c \quad (15)$$

$$V = V_a + jV_\beta, \quad V_\alpha = \frac{2}{3} \left(V_a - \frac{1}{2} V_b - \frac{1}{2} V_c \right) \quad (16)$$

$$V_\beta = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_b - \frac{3}{2} V_c \right) \quad (17)$$

Benzer şekilde akım için dönüşüm formülleri Denklem 18 ve 19' da ki gibidir.

$$I = I_\alpha + jI_\beta, \quad I_\alpha = \frac{2}{3} \left(I_a - \frac{1}{2} I_b - \frac{1}{2} I_c \right) \quad (18)$$

$$I_\beta = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_b - \frac{3}{2} I_c \right) \quad (19)$$

Gerilim vektör denklemi ve dönen referans çerçevesinde (d - q) Denklem 20, 21, 22 ve 23'te ki gibi ifade edilir:

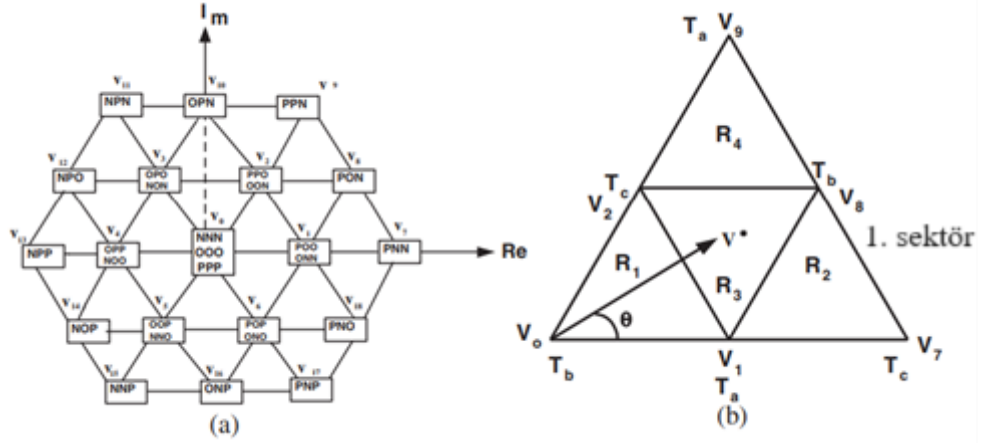
$$V_d = L \frac{di_d}{dt} + \omega L i_q + V'_d \quad (20)$$

$$V_q = 0 = L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + V'_q \quad (21)$$

$$V^*_d = L \frac{di_d}{dt} + \omega L i_q + V'_d - \omega L i_q \quad (22)$$

$$V^*_q = 0 = L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + V'_q - \omega L i_d \quad (23)$$

Burada ω üç fazlı gerilimin açısal frekansıdır, V_d , V^*_d , i_d ve V_q, V'_q, i_q sırasıyla d eksenini ve q ekseninde V , V' ve i 'nin bileşenleridir. Yani V^*_d ve V^*_q ayrıştırılmış gerilimlerdir.



Şekil 22. a) 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için uzay vektördeki tüm anahtarlama durumları b) 1. sektördeki referans vektör

Şekil 22 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için uzay vektörde yirmi yedi anahtarlama durumunun olduğu ve on dokuz vektöre sahip olduğu gösterilmektedir. Ayrıca bu vektörler yirmi dört bölgeye ayrılmıştır. Uzay vektörü, her sektörde dört bölge bulunan altı sektöre bölünmüştür. Bu altı vektör; sıfır vektör V_0 , küçük vektörler ($V_1 - V_6$), Orta vektörler ($V_8, V_{10}, V_{12}, V_{14}, V_{16}$ ve V_{18}), Büyük vektörler ($V_7, V_9, V_{11}, V_{13}, V_{15}$ ve V_{17}), olarak dört kategoriye ayrılmıştır. Şekil 22.b karmaşık (α - β) düzleminin 1. sektörünün 3. bölgesinde yer alan dönen bir referans vektörünü (V^* veya V_{ref}) gösterir. Bu dönen referans vektörünün Sektör 1'in R_3 bölgesinde olduğunu ve V_{ref} 'in Denklem 24 ve 25' te ki gibi oluşturulmaktadır. Burada V_1, V_8, V_2 Sektör 1'deki en yakın üç vektördür ve t_1, t_2 ve t_3 ilgili vektörlerin zaman aralıklarıdır ve t_s örnekleme zamanıdır.

$$V_1 t_1 + V_8 t_2 + V_2 t_3 = V^* \frac{t_s}{2} \quad (24)$$

$$t_1 + t_2 + t_3 = \frac{t_s}{2} \quad (25)$$

Her gerilim vektörü için zaman aralığı Denklem 26, 27 ve 28' de ki gibidir.

$$t_1 = T_s \left(2m \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) - 1 \right) \quad (26)$$

$$t_2 = T_s (1 - 2m \sin(-\theta)) \quad (27)$$

$$t_3 = T_s \left(1 - 2m \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) - \theta \right) \quad (28)$$

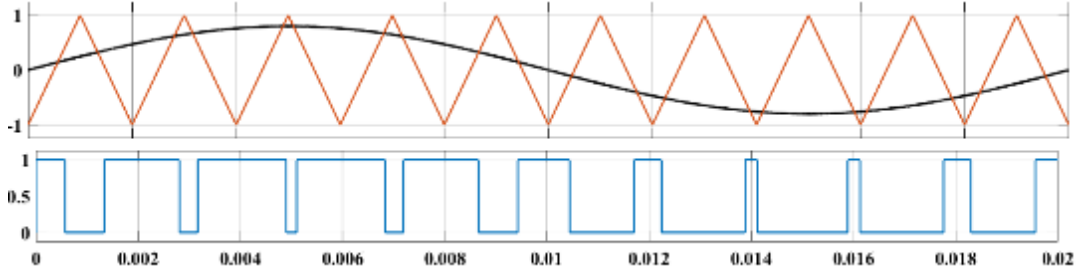
Referans vektörünün bulunduğu sektörde en yakın üç referans vektörü elde edildikten sonra, 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu seçilen anahtarlama darbesi süresiyle tetiklenir.

3.2. Darbe Genişlik Modülasyon Yöntemi

Bir güç dönüştürücüsünde bir modülasyon yöntemi geliştirmek için ana çözüm, anahtarlama sinyallerinin referans geriliminin yüksek frekanslı bir taşıyıcıyla (genellikle üçgen) karşılaştırılmasıyla oluşturulduğu darbe genişlik modülasyonudur. Çok seviyeli dönüştürücüler için modülasyon yöntemleri klasik DGM yöntemlerinin geliştirilmesiyle artmıştır. N seviyeli çok seviyeli dönüştürücüler için taşıyıcı tabanlı modülasyon yöntemleri, referans gerilimi $n-1$ üçgen taşıyıcılarla karşılaştırır. Taşıyıcıların nasıl dağıtıldığına bağlı olarak DGM yöntemleri gelişmeye devam etmektedir.

Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM), hem iki seviyeli dönüştürücülerde hem de çok seviyeli dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılır. Klasik SDGM yönteminde, sinüzoidal bir referans gerilimi yüksek frekanslı bir üçgen taşıyıcı dalgayla karşılaştırılır. Dönüştürücünün çıkış gerilimi genliği, genlik modülasyon indeksi (m_a) tarafından kontrol edilir. Taşıyıcı üçgen dalga genliği sabit olduğu için, çıkış gerilimi genliği referans geriliminin genliği değiştirilerek artırılabilir veya azaltılabilir. Ancak, modülasyon indeksi $0 \leq m_a \leq 1$ aralığında tutulmalıdır. Aksi takdirde, aşırı modülasyondan dönüştürücü standartlar dışında çalışabilir. Şekil 23 klasik SDGM tekniğini göstermektedir. Referans sinyali üçgen taşıyıcının genliğinden büyük olduğunda anahtarlama işareti “0” dır. Benzer şekilde referans sinyali taşıyıcı sinyalin genliğinden küçük olduğunda anahtarlama işareti “1” dir. Yani anahtar iletimdedir. Bu nedenle, anahtarlama darbesinin görev oranı, referans sinüzoidal sinyal $\sin(\omega t)$ 'ye göre değişir. Denklem 30, modülasyon süresi boyunca anahtarlama darbesinin durumunu ifade eder:

$$S_x(t) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \sin(\omega t) > tri(t) \\ 0 & \text{eğer } \sin(\omega t) < tri(t) \end{cases} \quad (30)$$



Şekil 23. Sinüzoidal DGM tekniği sonucu anahtarlama işaretleri

Çok seviyeli dönüştürücülerde çıkış seviyesini artırmak, taşıyıcı sayısının artmasıyla ilgilidir. Bu durum fazla seviyeler için ekstra anahtarlama elemanı gerektirir. Böyle bir durumda maliyet artar devre hacmi büyür (Buticchi vd. 2014).

3.2.1. Taşıyıcı Tabanlı Düşük Frekanslı Modülasyon

Megavat aralığındaki yüksek güçlü uygulamalar için, güç cihazlarının anahtarlama frekansı, anahtarlama kayıplarını azaltmak amacıyla çok sınırlıdır. Bu tür uygulamalarda neredeyse 1kHz'den daha az anahtarlama işareti uygulanmaktadır. Geleneksel taşıyıcı tabanlı DGM veya UVM teknikleri, anahtarlamalardan kaynaklanan harmonik bozulmaya neden olur. Bu nedenle standartları karşılamak için filtre boyutları büyümektedir.

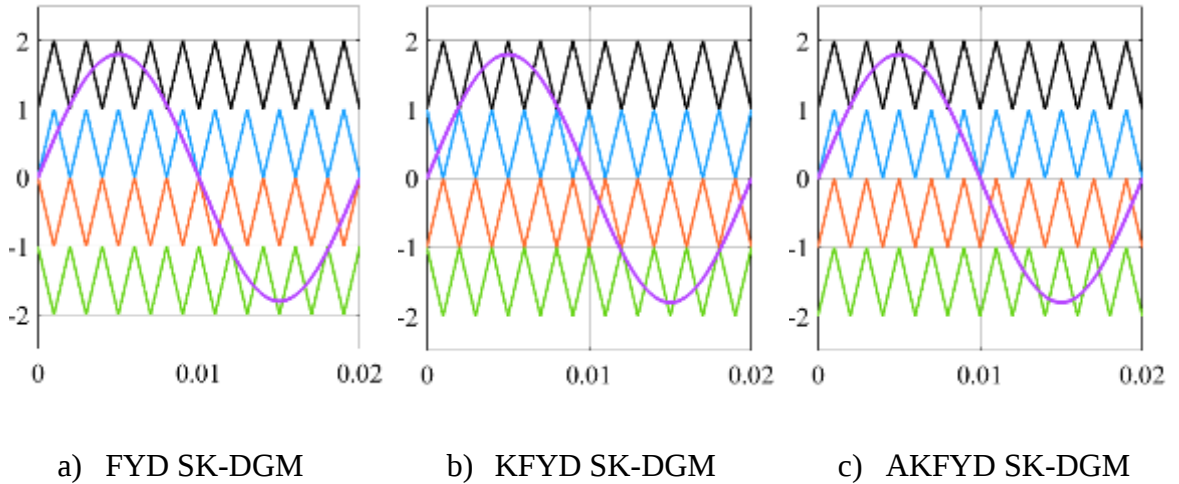
Çok seviyeli dönüştürücüler için yüksek güçlü uygulamalardaki yüksek frekanslı modülasyon teknikleri harmonik bozulmalar nedeniyle büyük filtreler gerektirdiğinden uygulamanın optimal tasarımı zorlaşır ve sistem hantallaşır gereksiz büyür. Bu sorunu azaltmak için değişken anahtarlama işaretlerine bağlı olarak çıkış gerilimi dalga biçimlerinin harmonik spektrumu belirlenir. Belirlenen harmonik sıranın harmonik içeriğine, modülasyon indeksine ve gerilim dalga biçiminin temel periyodunun dörtte birindeki gerilim geçişlerinin sayısına bağlı olarak bir analitik hesap yapılır. Seçici harmonik yok etme yöntemi (SHE), bu çalışmanın sonuçlarını kullanır ve bazı spesifik harmonik düzenlerin içeriğini sıfırlamaya çalışır (Yang vd. 2023). Bu yöntem iyi sonuçlar verir ancak yalnızca yüksek dinamik performans gerektirmeyen uygulamalara sahip çok seviyeli dönüştürücülere uygulanabilir ve bağımsız modda çalışır. Uygulamanın esas olarak kararlı durum koşullarında çalışarak çok kararlı olması gerekir.

Son yıllarda seçici harmonik azaltma yöntemleri (SHM'ler), harmonik içeriği çevrim içi olarak bulur ve SHE yöntemine göre elde edilen sonuçları iyileştirmektedir (Moeini vd. 2018).

SHM-DGM tekniği kullanılarak tek fazlı, iki köprülü bir H-köprü ve çok seviyeli evirici üzerinde bir analiz gerçekleştirilmektedir (Pourdashnia vd. t.y.). Amaç, tek fazlı çok seviyeli eviriciyi besleyen hem sabit hem de değişken iki izoleli DA kaynağı için çıkış geriliminin kalitesini arttırmaktır. Ek olarak, bağımsız modda SHE-DGM tekniğini kullanan tek fazlı 9 seviyeli dört tam köprüden oluşan H-köprü evirici için bir yöntem önerilmektedir. Bu öneri üçüncü, beşinci ve yedinci derece harmonikleri ortadan kaldırırken çıkış geriliminin temel bileşenini sabit tutmayı amaçlamaktadır (Vivert vd. 2022).

3.2.2. Taşıyıcı Tabanlı Yüksek Frekanslı Modülasyon

Çok seviyeli dönüştürücü topolojilerinde ele alınan SDGM yöntemleri çoklu taşıyıcılardan oluşur. Faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu (FK-DGM) ve seviye kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu (SK-DGM), çok taşıyıcılı DGM yöntemlerindendir. Ayrıca seviye kaydırmalı DGM tekniği Şekil 24' te ki gibi üç tip faz düzeni olan SK-DGM'den oluşmaktadır. Bunlar; üçgen taşıyıcı işaretinin yapısına göre, faz yer değiştirmeli (FYD), karşılıklı faz yer değiştirmeli (KFYD) ve alternatif karşılıklı faz yer değiştirmeli (AKFYD) olarak üç farklı şekildedir. Şekil 24 SK-DGM türlerinin taşıyıcı işaretlerinin yerleşimini göstermektedir.

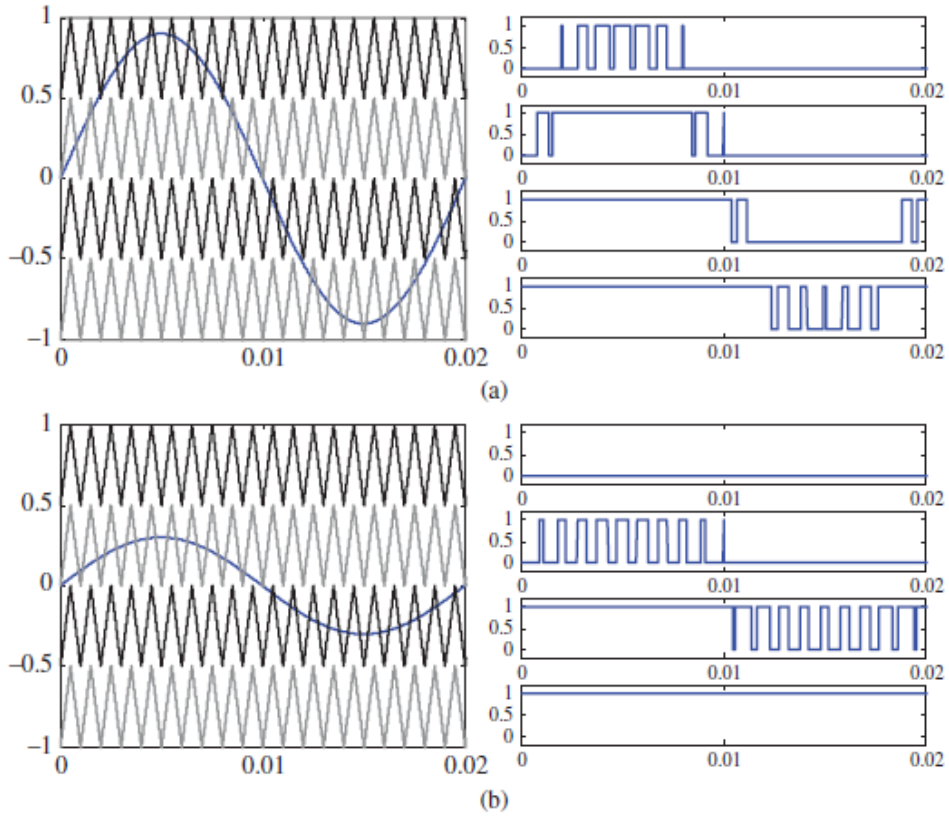


Şekil 24. Faz yer değiştirmeli SK-DGM yöntemleri

FYD-SK-DGM, KFYD-SK-DGM ve AKFYD-SK-DGM teknikleri (Carrara vd. 1992)'te ve (McGrath & Holmes 2002)' te çok seviyeli dönüştürücüler için değerlendirilmektedir. Klasik FYD-SK-DGM tekniği FK-DGM tekniğine göre harmonik performans açısından daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, SK-DGM bazen doğrudan popüler olarak uygulanan FYD-SK-DGM olarak bilinir.

SK-DGM her zaman aynı harmonik sırada THB'ye neden olabilir. FK-DGM ise taşıyıcı işaretlerin kaymasından kaynaklı harmoniği kaydırmaktadır. Bu durum THB'yi azaltabilir. EMI güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan 10 kHz ile 20 kHz arasındaki anahtarlama frekansı işlemiyle ilgilidir. Yüksek güç uygulamalarına uygulanan SK-DGM yöntemleri için yürütülen EMI büyük bir endişe kaynağı olmayacaktır. Dolayısıyla EA şarjı için değerlendirilen çok seviyeli topolojiler için SK-DGM tekniği mantıklıdır. SK-DGM yöntemi beş seviyeli çıkış fazı gerilimi için dört adet taşıyıcıya gereksinim duyar.

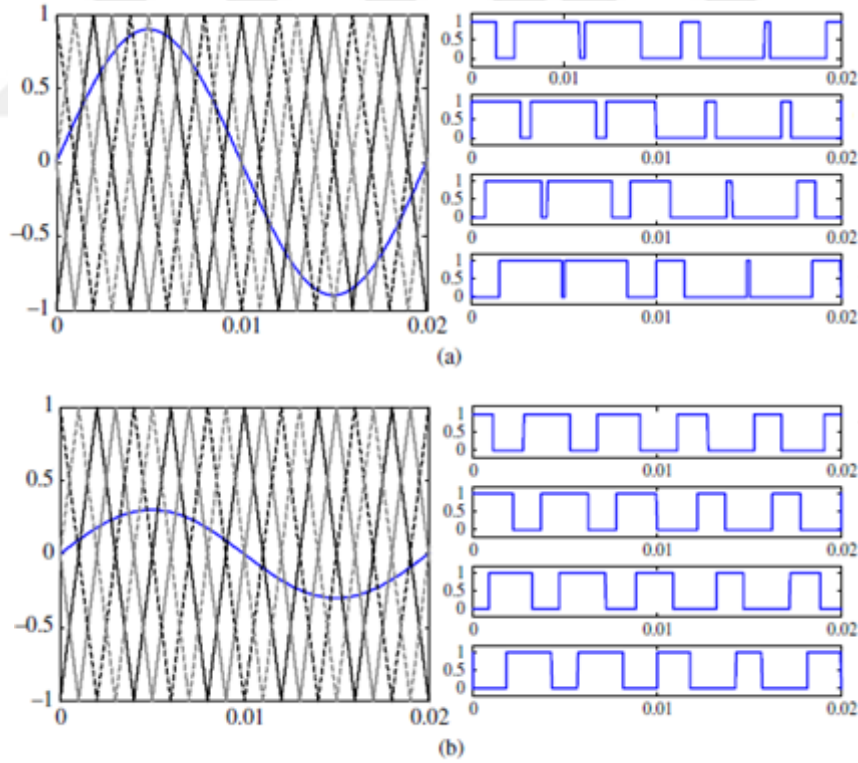
Şekil 25 beş seviyeli bir doğrultucunun tek faz ayağı için örnek olarak verilen anahtarlama işaretlerini göstermektedir.



Şekil 25. SK-DGM sonucu anahtarlama işaretleri a) $M_i = 0.9$ b) $M_i = 0.3$

Modülasyon indeksleri 0.9 ve 0.3 olan SK-DGM yöntemleri için iki ayrı anahtarlama işaretleri sunulmaktadır. Şekil 25.a için modülasyon indeksi 0.9'dur ve anahtarlama işaretleri gözlenirken, modülasyon indeksi 0.3 olan Şekil 25.b için bazı anahtarlar sürekli açık veya sürekli kapalı kalmaktadır. SK-DGM düşük modülasyon indeksi durumunda anahtarlara istenmeyen zararlar verecektir. Sonuç olarak elektronik cihazlar aşırı gerilim ve akım stresleri nedeniyle kolayca bozulacaktır. Bu durum, çok seviyeli dönüştürücülerin genel güvenilirliğini etkilemektedir.

Benzer şekilde Şekil 26'da düşük modülasyon indeksinde FK-DGM, SK-DGM ile aynı problemle karşılaşmayacaktır. Düşük modülasyon durumunda bile tüm anahtarlama sinyallerinin hala üretildiği gözlemlenebilmektedir. Böylece, bazı çok seviyeli dönüştürücüler için FK-DGM yöntemi, SK-DGM yöntemine göre daha yüksek güvenilirliğe ulaşabilmektedir. Ancak literatürde çok seviyeli diyot kenetlemeli dönüştürücüler için SK-DGM tabanlı yapılan modülasyonlar daha başarılıdır ve devrenin çıktıları bu modülasyonlar ile standartları sağlamaktadır (Guo vd. 2015). Bu nedenle SK-DGM tercih edilmektedir.

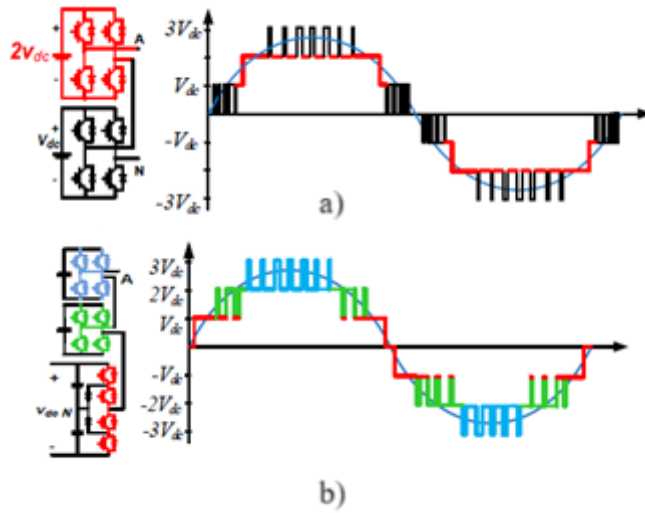


Şekil 26. FK-DGM sonucu anahtarlama işaretleri a) $M_i = 0.9$ b) $M_i = 0.3$

3.2.3. Taşıyıcı Tabanlı Hibrit Frekanslı Modülasyon

Geleneksel taşıyıcı tabanlı DGM yöntemleri herhangi çok düzeyli dönüştürücüye uygulanabilir. Ancak bazı çok seviyeli topolojiler, iyi bir performans elde etmek için özel modülasyon yöntemleri gerektirir. (Leon vd. 2017)’da asimetrik bir kaskad H-köprü dönüştürücüye (her H köprüsünde farklı DA gerilimleri olan) bir FK-DGM yöntemi uygulanmaktadır, elde edilen sonuçlara göre hücreler arasında güç kayıpları meydana gelmektedir. Başka bir örnek olarak, beş seviyeli diyot kenetlemeli dönüştürücü bir UVM yöntemi kullanılarak çalıştırılmaktadır ancak dönüştürücü topolojisinin asimetrik yapısı nedeniyle optimal olmayan anahtarlama kayıpları meydana gelmektedir. Bu durumlarda, güç dönüştürücünün anahtarlama kayıplarını en aza indirmek ve topolojinin modüler olması durumunda hücreler arasındaki güç dağılımını eşitlemek amacıyla hibrit frekanslı modülasyon yöntemlerinin geliştirilmesi yaygındır. Bazı güç cihazlarının yüksek gerilime dayanması gerekiyorsa, bunların komütasyonları düşük frekansla, hatta temel frekansla sınırlıdır. Bununla birlikte, düşük gerilime sahip cihazlar, yüksek kaliteli bir çıkış dalga formu elde eden yüksek frekanslı bir DGM yöntemi kullanılarak çalıştırılır. Ancak yüksek güçlü uygulamalar için karışık frekanslı modülasyon kullanmakla birlikte hem anahtarlama kayıplarının önüne geçilebilir hem de uygulama verimi artırılabilir (Monopoli vd. 2024).

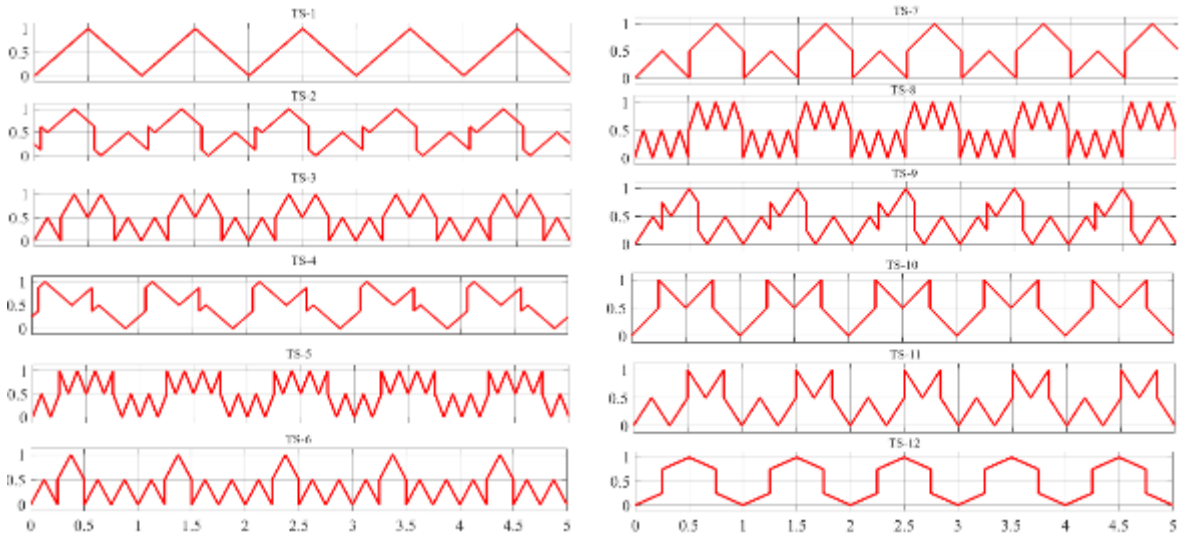
Şekil 27, asimetrik kaskad H-köprü ve hibrit nötr nokta kenetlemeli + kaskad H-köprü devresi için karışık frekans modülasyonu sonucu oluşan seviyeleri göstermektedir.



Şekil 27. Asimetrik kaskad (a) ve hibrit topolojiler (b) için karışık frekans modülasyonu

Şekil 27.a'daki 2 hücreli asimetrik kaskad H-köprü için, daha yüksek DA bağlantı gerilimine sahip üst hücre, anahtarlama kaybını azaltmak için düşük frekansta anahtarlanmaktadır. Daha düşük DA gerilimine sahip alt modül, THB'yi azaltmak için yüksek frekans anahtarlama yapmaktadır. Şekil 27.b'deki diyot kenetlemeli yapı ve kaskad H-köprü yapısına sahip hibrit topoloji için karışık frekans modülasyonu da uygulanabilir. Diyot kenetlemeli yapının faz ayağı aynı zamanda kaybı azaltmak için düşük frekansla modüle edilebilir. Ve değişken DA gerilimine sahip kaskad H-köprü kısmı, ekstra seviyeler sağlamak ve THB'yi azaltmak için yüksek frekansta anahtarlanabilir. Karışık frekans modülasyonu, iki örnekte de belirtildiği gibi asimetrik topoloji için uygun olmasına rağmen, simetrik kademeli yapıya da uygulanabilir. Bazı hücreler kaybı azaltmak için düşük frekansta geçiş yapabilir.

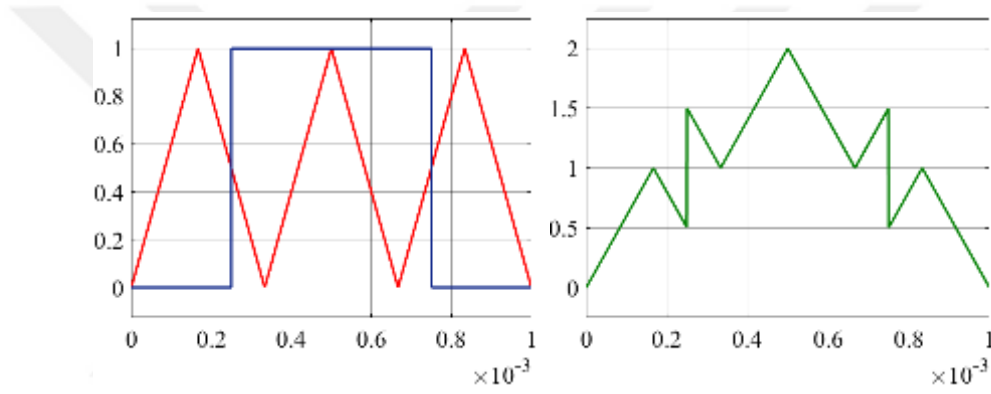
Literatürde hibrit frekanslı modülasyon yönteminin sağlamanın bir yolu da taşıyıcı işaretlerin formunu değiştirmektir. Klasik üçgen taşıyıcılar yerine farklı şekillerdeki taşıyıcılar kullanılarak karışık frekansta anahtarlama işaretleri elde edilebilir. Bu yöntem üçgen taşıyıcı formunu değiştirmekle yapıldığı gibi referans sinüs eğrisinin formunu değiştirmekle de yapılabilir. Tez kapsamında diyot kenetlemeli doğrultucu için farklı taşıyıcı türleri irdelenmektedir. Literatürde yer alan bazı taşıyıcı işaretleri Şekil 28'de verilmektedir (Zhao vd. 2010; Chitra & Valluvan 2020; Meraj vd. 2021; Özkop 2022; Mollahasanoglu vd. 2023; Singh & Mandal 2023).



Şekil 28. Taşıyıcı sinyal (TS) formları

3.3. Tez Kapsamında Değerlendirilen Yeni Taşıyıcı Tabanlı Hibrit Frekanslı SK-DGM Tekniği

Üç fazlı diyot kenetlemeli AA/DA dönüştürücü için geliştirilen yeni seviye kaydırmalı hibrit frekanslı PWM tekniği Şekil 29’ da verilmektedir. Önerilen taşıyıcı sinyal, benzetim çalışmalarında testere dişi sinyal ile kare sinyalin toplamı olarak oluşturulmaktadır. 1kHz’lik örnek bir taşıyıcı sinyal Şekil 29’da ki gibi sinyallerin toplamlarından oluşmaktadır. Mavi kare dalga ve kırmızı testere dişi sinyalinin toplamı olan yeni taşıyıcı sinyal benzetim çalışmalarında diyot kenetlemeli doğrultucu için IEEE standartlarında sonuçlar sağlamaktadır.

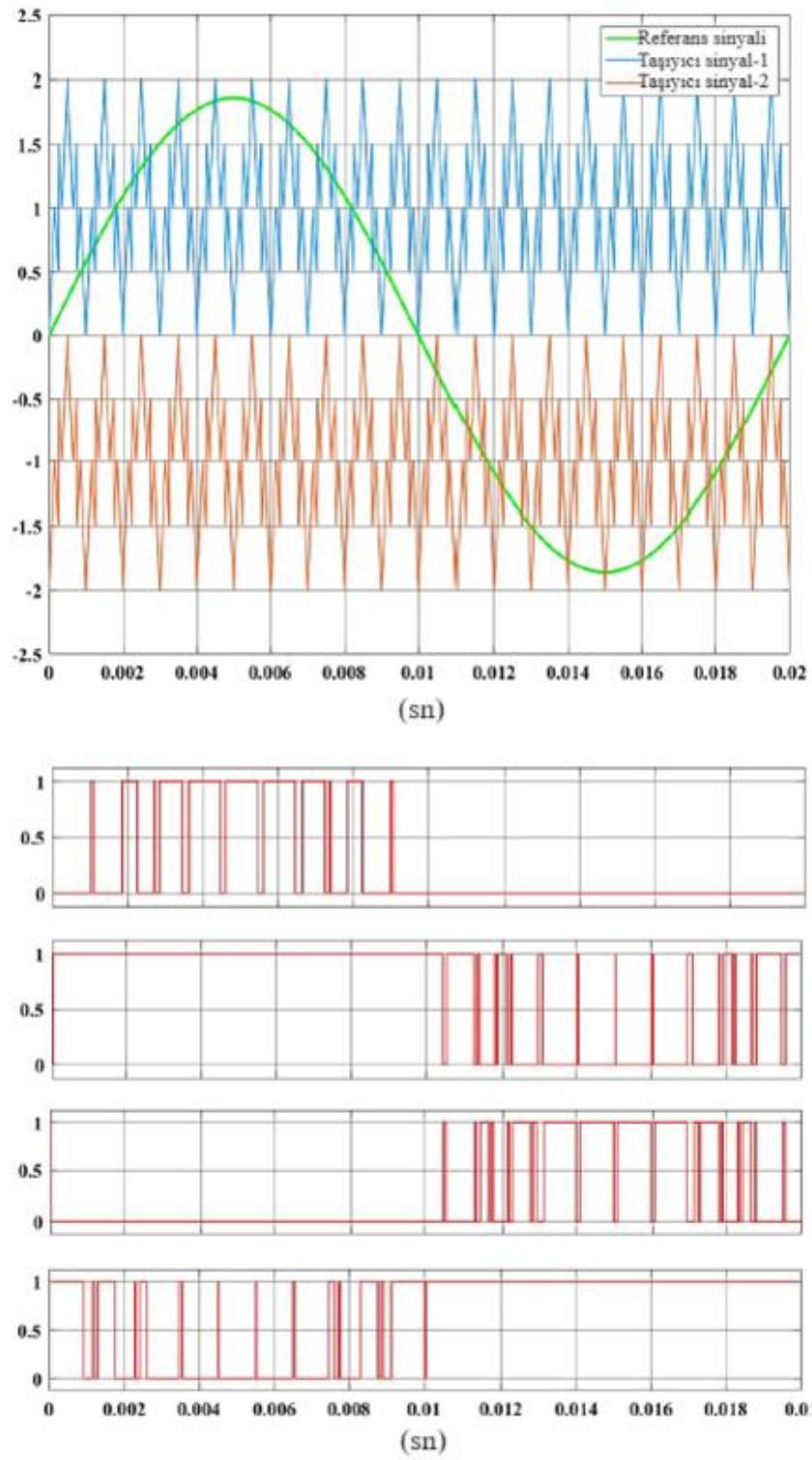


Şekil 29. Yeni taşıyıcı sinyalin elde edilmesi

Önerilen değiştirilmiş hibrit frekanslı yeni taşıyıcı sinyalin matematiksel ifadesi Denklem (32)’de verilmektedir.

$$CS(t) = \begin{cases} 0.66V_t & 0 \leq t < 1.5 \\ -0.5V_t + 1.75 & 1.5 \leq t < 2.5 \\ 100V_t - 250 & 2.5 \leq t < 2.51 \\ -0.5V_t + 2.77 & 2.51 \leq t < 3.5 \\ 0.66V_t - 1.33 & 3.5 \leq t < 5 \\ -0.66V_t + 5.33 & 5 \leq t < 6.5 \\ 0.5V_t - 2.25 & 6.5 \leq t < 7.5 \\ 00V_t - 750 & 7.5 \leq t < 7.51 \\ 0.5V_t - 3.3 & 7.51 \leq t < 8.5 \\ -0.66V_t + 6.66 & 8.5 \leq t < 10 \end{cases} \quad (32)$$

İstenilen DGM sonucu oluşan anahtarlama durumları, bu denklemde belirtilen yüksek frekanslı sinyalin 50 Hz sinüs dalgasıyla Şekil 30’da ki 1 kHz’lik taşıyıcının karşılaştırılması sonucunda elde edilmektedir.



Şekil 30. Önerilen taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı SK_DGM tekniği ve anahtarlama işaretleri

4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1. Benzetim Çalışmaları

Benzetim çalışmaları üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu, 100 kW'lık EA hızlı şarj cihazı için izoleli DA-DA dönüştürücülerle birlikte değerlendirilmektedir. İkinci kısımda yüksek güçlü uygulamalar için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu değerlendirilmektedir ve bu doğrultucu için yeni bir DGM tekniği önerilmektedir. Üçüncü kısımda ise EA hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu analizi yeni modifiye edilmiş seviye kaydırmalı darbe genişlik modülasyon tekniği ile değerlendirilmektedir. Farklı modifiyeli hibrit frekanslı modülasyon teknikleri de bu doğrultucu için değerlendirilerek yeni modifiye edilmiş hibrit frekanslı SK-DGM tekniğinin DA hızlı şarj cihazı için standartlara uygun sonuçlar verdiği görülmektedir.

4.1.1. EA Hızlı Şarj Cihazı İçin İzoleli DA-DA Dönüştürücülerde Gerçekleştirilen Üç Fazlı Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli GFD Doğrultucunun Değerlendirilmesi

EA hızlı şarj sağlamak için bir AA/DA dönüştürücü ve ardından izole edilmiş bir DA-DA dönüştürücü gereklidir. EA bataryasının şarj sisteminden etkilenmemesi için şebeke ile batarya arasındaki izolasyon önemlidir. Bu kısımda 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu ÇAK ve FKTK dönüştürücüler ile değerlendirilmektedir. Şekil 16'da verilen 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için Şekil 18'de ki klasik SK-DGM tekniği uygulanmaktadır. Doğrultucu analizi, izole edilmiş DA-DA dönüştürücülerle birlikte kapsamlı simülasyonlarla MATLAB/Simulink platformunda test edilmektedir. Bu doğrultucu, 100 kW'a kadar olan güç seviyelerinde derecelendirilen DA hızlı şarj cihazları için incelenmektedir.

Şekil 31'de, hızlı şarj için ele alınan, 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için yük olarak düşünülen izoleli DA-DA topolojileri gösterilmektedir. FKTK ve ÇAK dönüştürücüler için değerlendirilen doğrultucu analizi Şekil 5'te belirtilen sembolik olarak gösterilen çıktılarına bakılarak yapılmaktadır.

kontrol edilen sistem çıkışında d ve q eksenlerindeki gerilim referansları belirlenir. Bu referanslar SDGM tekniği için referans sinüs değerleridir. AA/DA GFD doğrultucunun her bir faz ayağı için 120° faz farkında gelen referans sinüs sinyalleri anahtarlamalar için taşıyıcı sinyallerle karşılaştırılmaktadır. Böylece oluşturulan DGM kontrolü sonucu çıkış gerilim kontrolü sağlanmaktadır.

Doğrultucu kısmındaki filtre ve DA bara kapasitelerinin değerlerinin belirlenmesi, şarj sistemi parametreleri açısından oldukça önemlidir. Bu değerler, AA kaynak geriliminin sinüzoidal formda olduğu, dönüştürücü anahtarların kayıpsız olduğu ve AA/DA ve DA-DA dönüştürücülerin doğrusal modülasyon modunda çalıştığı varsayılarak belirlenmektedir. AA/DA dönüştürücü 100 kW için tasarlanmaktadır. D sistem parametrelerine göre 0,593 olarak hesaplanır. Kaynak akımı maksimum dalgalanmasının %4 olduğu varsayılırsa, Δi 5 A olur. Anahtarın açılma zamanı (t_{on}) Denklem 33'teki gibidir.

$$t_{on} = \left(\frac{1}{f_s}\right) \left(\frac{V_0 + V_F - v_s}{V_0}\right) \quad (33)$$

Denklem 33'te V_F , anti paralel bağlı diyottaki gerilim düşüşüdür. A fazındaki ilk diyottaki gerilim düşümü 400 V'dir. t_{on} ise 0.33×10^{-4} saniyedir. L değeri Denklem 34'e göre 2.15 mH olarak hesaplanır. Denklem 35'e göre ise t_{off} 0.23×10^{-4} saniye olarak hesaplanmaktadır.

$$L = \frac{1}{\Delta i_s} v_s t_{on} \quad (34)$$

$$t_{off} = \frac{L \Delta i_s}{V_0 - |v_s|} v_s t_{on} \quad (35)$$

Tablo 12, farklı kapasite değerleri için V_{DA} dalgalanmalarını (ΔV_0) göstermektedir. Tablo 12'ye bakılarak C_1 ve C_2 kapasite değerleri 5200 μF olarak alınarak benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Tablo 12. İki farklı izoleli DA-DA dönüştürücü ile farklı kapasite değerleri için %dalgalanma faktörü

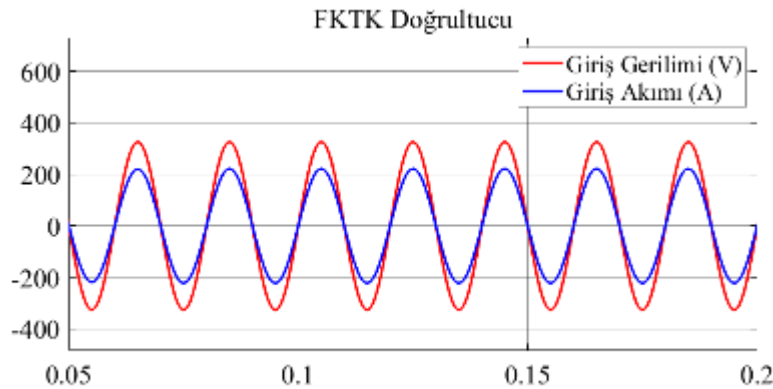
$C_{d1}, C_{d2} (\mu F)$	ΔV_0 (V%)-FKTK	ΔV_0 (V%)-ÇAK
1000	42	42
1500	22	24
2000	19	16
2500	17.6	10.8
3000	10.2	9.6
3500	7.1	7
4000	5	4.5
4500	3.5	3.5
5200	2.5	1.75
5500	2.6	1.75

Tablo 13'te hesaplamalarla belirlenen sistem parametreleri sunulmaktadır.

Tablo 13. 100 kW'lık hızlı şarj sisteminde 3Ø-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için benzetim çalışmalarındaki sistem parametreleri

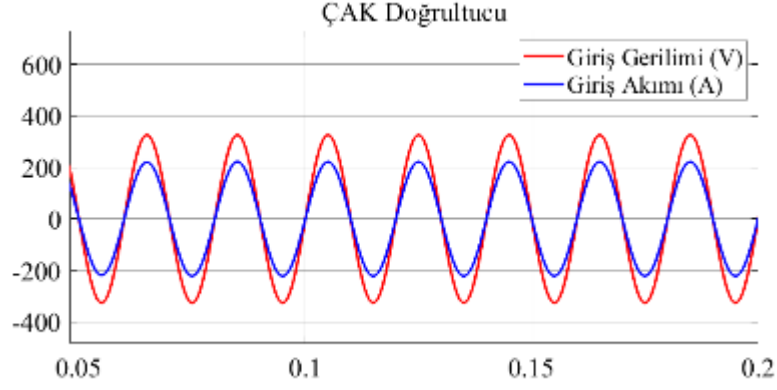
Kaynak tarafı	Yük tarafı
220 V, 50 Hz	ÇAK ve FKTK dönüştürücü
$L=2.15$ mH, $R=0.1 \Omega$	$C_{d1} = C_{d2} = 5200 \mu F$
DA referans gerilimi, $V_{DAref} = 800$ V	
Anahtarlama frekansı, $f_{anahtarlama} = 33$ kHz	

Şekil 33'te 3Ø-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun doğrultucu giriş terminal gerilimi, FKTK ve ÇAK dönüştürücüler için akım dalga formları gösterilir.

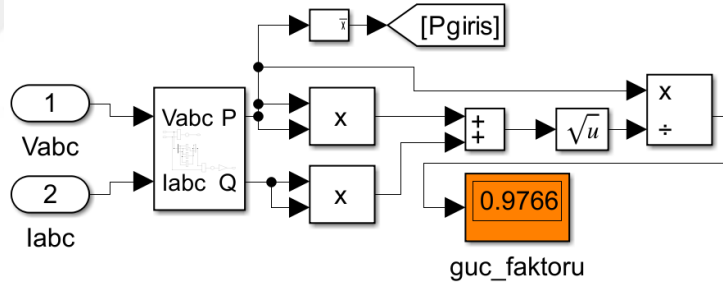


Şekil 33. FKTK ve ÇAK dönüştürücüler için doğrultucu giriş terminal gerilimi ve şebeke akımı

Şekil 33'ün devamı

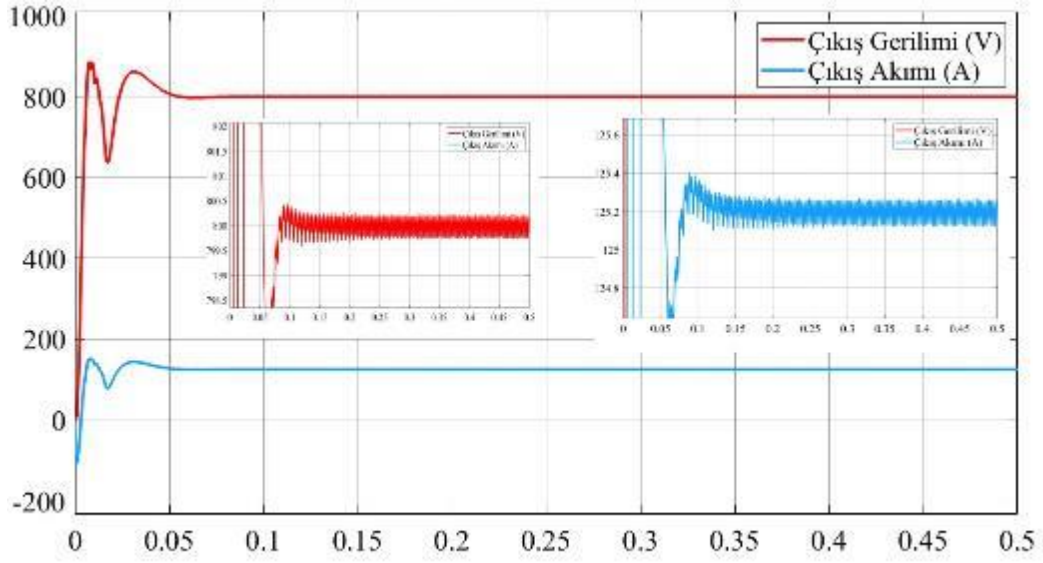


Her iki dönüştürücü için akım ve gerilim fazlarının senkron olduğu görülmektedir. Bu durumda güç faktörünün 1'e yakın olduğu tahmin edilebilir ancak tam olarak hesabı benzetim arayüzünde Şekil 34'te ki gibi yapılmaktadır.



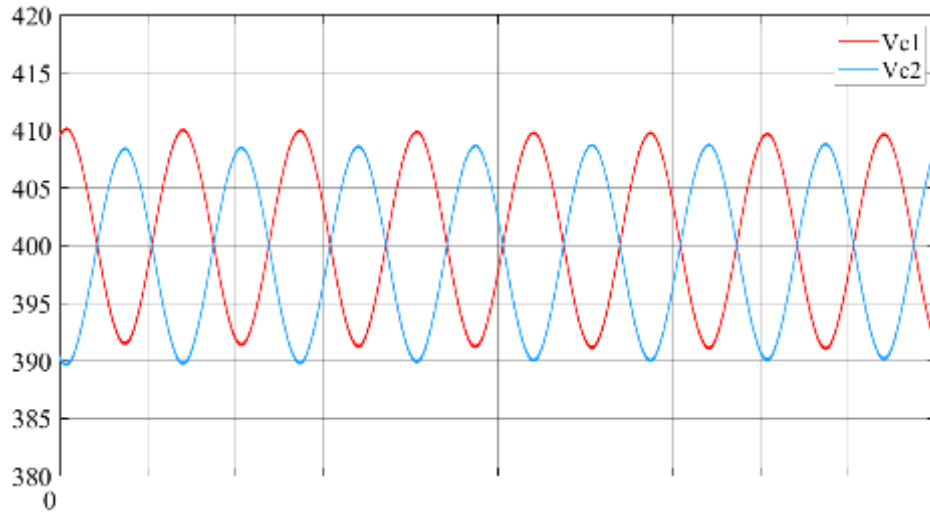
Şekil 34. Benzetim arayüzünde güç faktörü hesabı

Şekil 35'te sistem 100 kW'tayken doğrultucu çıkış gerilim-akım grafikleri görülmektedir. 800 Volt DA gerilim için gerilim dalgalanması %0,5'in altında olduğu, 125 Amper DA akım için ise akım dalgalanması %0,1'in altında olduğu görülmektedir. IEEE Standardı 1100-2018'de DA çıkış gerilim dalgalanması, nominal geriliminin maksimum %5'i ile sınırlıdır. Her iki DA-DA dönüştürücü ile hızlı şarj sistemine uyarlanan 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu standartlara uygun davranmaktadır.



Şekil 35. ÇAK dönüştürücü için 800 Volt ve 125 Amper dalgalanmaları (%)

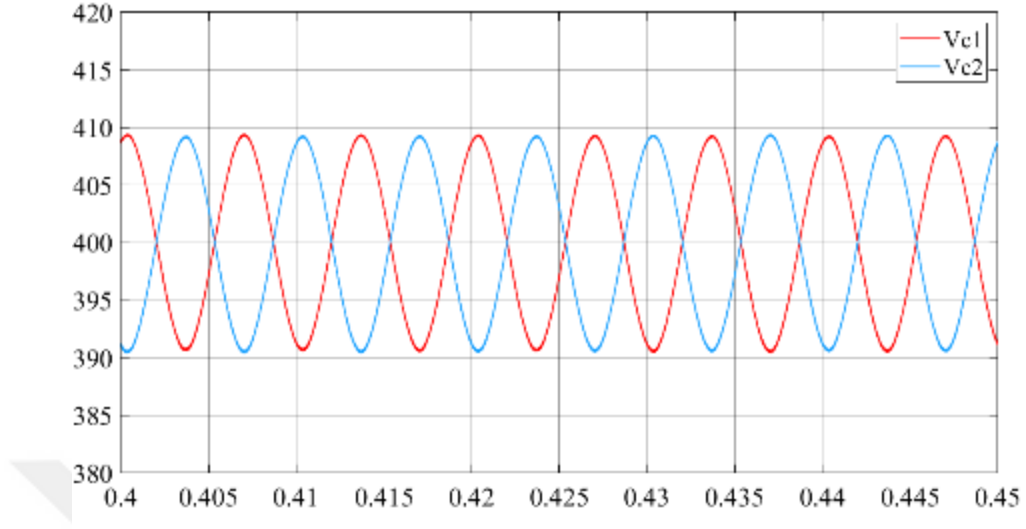
Şekil 36 her iki DA-DA dönüştürücünün kapasite dengesini göstermektedir. DA şarj cihazı bir FKTK dönüştürücü ile tasarlandığında, 800 Volt DA çıkış gerilimi için yaklaşık 20 Volt kadar bir dalgalanma vardır. ÇAK dönüştürücü için yaklaşık 10 Volt kadar bir dalgalanma vardır. Bu dalgalanma her iki şarj cihazı için de %2,5 ve %1,75 civarındadır.



a)

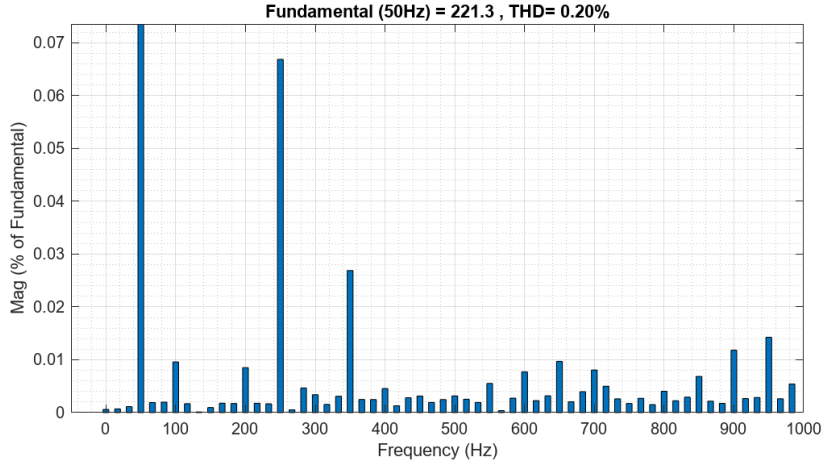
Şekil 36. FKTK (a) ve ÇAK (b) dönüştürücüler için doğrultucu çıkışındaki C_1 ve C_2 gerilim dalga formları

Şekil 36'nın devamı



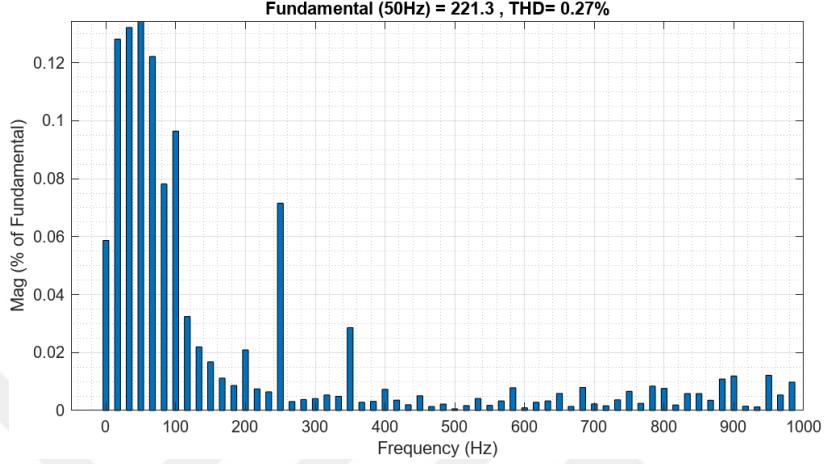
b)

DA şarj cihazı $L=2.15\text{mH}$ ile düşük THB sağlamaktadır. THB yüzdesi IEEE 519 standartlarına göre önerilen sınırın altındadır. Şekil 37'de ÇAK izoleli DA-DA dönüştürücü ile tasarlanan hızlı şarj cihazı için THB grafiği görülmektedir. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun optimum parametreleri belirlendikten sonra hızlı şarj için kapsamlı sonuçlar sunulmaktadır.



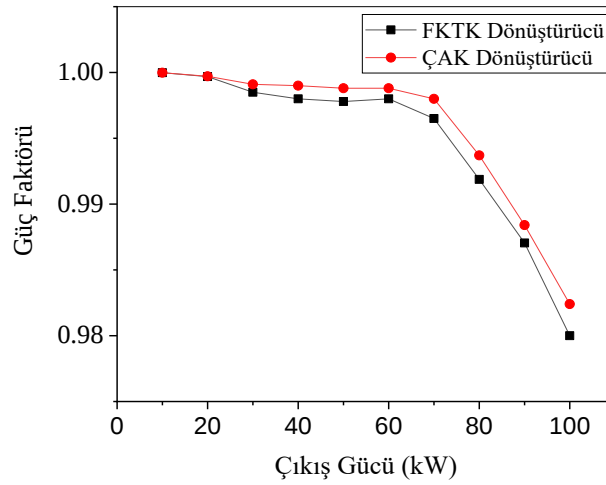
Şekil 37. ÇAK dönüştürücü ile tasarlanan hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazının harmonik spektrumu (%THB)

Şekil 38 ise FKTK izoleli doğrultucu ile tasarlanan hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazının harmonik spektrumunu göstermektedir. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu FKTK izoleli DA-DA dönüştürücüsü ile hızlı şarj için uygulandığında %0.25'in altında akım harmoniğine sahip olduğu görülmektedir.



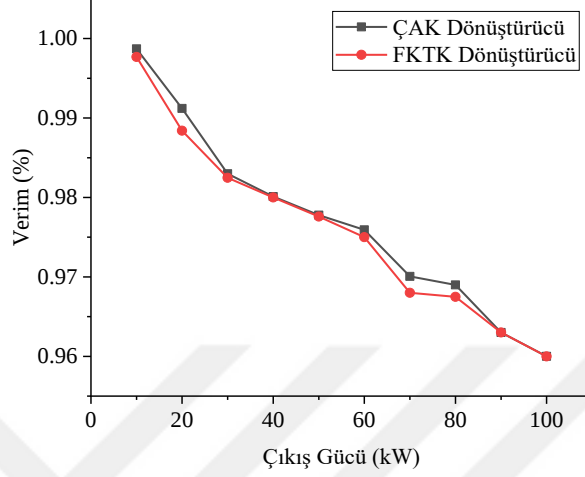
Şekil 38. FKTK ile kurulan hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazının harmonik spektrumu (%THB)

Şekil 39, FKTK ve ÇAK izoleli DA-DA dönüştürücüler için güç faktörü yük grafiğini göstermektedir. Farklı yükleme koşulları altında her iki DA-DA dönüştürücü için güç faktörü 0,98'den fazladır. 10kW-100kW arasında değerlendirilen sistem için ele alınan doğrultucunun giriş güç faktörü standartları karşılamaktadır.



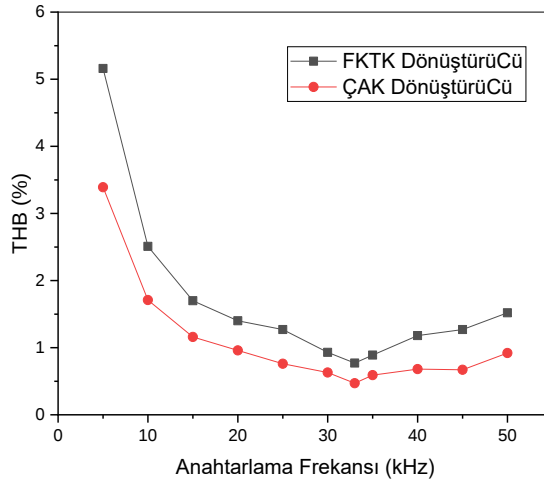
Şekil 39. Yük gücü değişimiyle birlikte giriş güç faktörü değişimi

Şekil 40 farklı güçlerdeki hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun verimini göstermektedir. Yük gücü arttıkça doğrultucu verimliliği azalmaktadır.



Şekil 40. Yük gücüne bağlı 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun veriminin değişimi

Şekil 41, ÇAK ve FKTK dönüştürücülerle tasarlanan hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için $THB-f_{anahtarlama}$ grafiğini göstermektedir. Doğrultucunun anahtarlama frekansı yaklaşık 33 kHz iken, şarj cihazı farklı yükleme koşullarında bile en düşük THB'ye sahiptir.



Şekil 41. Anahtarlama frekansına karşılık gelen giriş akımı %harmonigi

EA hızlı şarj için değerlendirilen 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu 100 kW'a kadar olan güç seviyelerinde derecelendirilen DA hızlı şarj cihazları için birlik giriş güç faktörü ve %96'nın üzerinde verimlilik sağlar. EA hızlı şarj cihazı izoleli DA-DA dönüştürücüyle birlikte değerlendirildiğinde 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun %1'den daha az THB'ye sahip olduğu görülmektedir. Bu çok seviyeli dönüştürücü, kapasitör gerilimi dengeleme açısından da oldukça verimlidir. Sistem basit bir kontrol yapısına sahiptir ve ekstra bir GFD devreye ihtiyaç duymaz. Dönüştürücünün çalışması ve tasarım hesaplamaları simülasyon çalışmaları ile sunulmaktadır. İzoleli DA-DA dönüştürücüler için değerlendirilen sistemin simülasyon sonuçları, EA hızlı şarj için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun geçerliliğini ve esnekliğini göstermektedir. Literatüre dayanarak bu doğrultucu üzerinde çalışmak ultra hızlı şarj cihazları için de umut verici olduğundan, bu doğrultucu üzerinde iyileştirmeler yapılmalıdır.

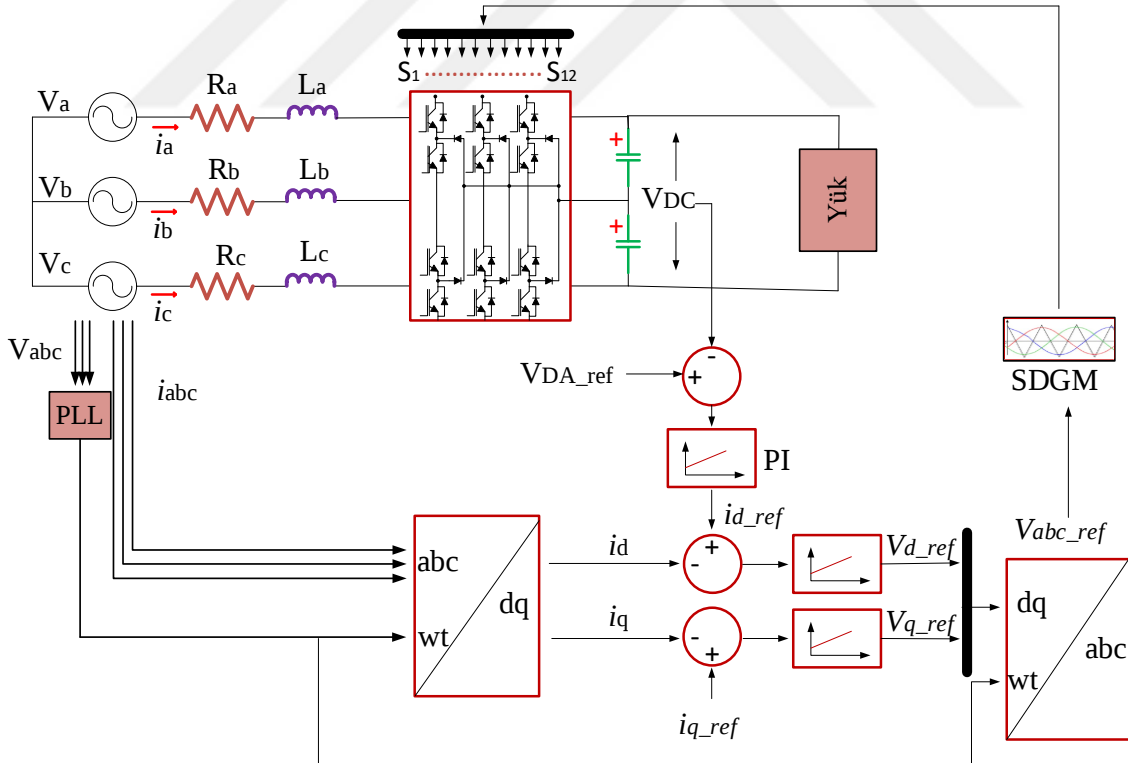
4.1.2. Üç Fazlı Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Doğrultucu İçin Yeni DGM Tekniği

Elektrikli araçların hızlı şarjında kullanılması için ele alınan 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu yüksek güçlerde IEEE standartlarına uygun çalışmalıdır. Bu nedenle bu kısımda doğrultucu analizi, yeni değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı darbe genişlik modülasyon tekniği kullanılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yeni modifiye edilmiş hibrit taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı DGM tekniğini kullanan 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu, klasik üçgen taşıyıcı tabanlı DGM tekniğini kullanan yine aynı doğrultucu ile analiz edilmektedir. Bu yeni DGM tekniği, düşük çıkış gerilimi dalgalanması, giriş akımı için düşük toplam harmonik bozulma, birim giriş güç faktörü, iyi düzenlenmiş bir DA bara gerilimi ve yüksek güçte uygulanması düşünülen doğrultucu için kapasitör gerilim dengesi sağlamaktadır. Önerilen değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı DGM tekniği, 75 ila 350 kW güç değerleri arasında derecelendirilen doğrultucu için oldukça başarılıdır. Bu kısımdaki sistemin simülasyon sonuçları, ultra hızlı şarj cihazları ve diğer yüksek güçlü uygulamalar için değerlendirilen doğrultucu için önerilen yeni taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı SK-DGM yönteminin geçerliliğini ve esnekliğini göstermektedir.

Yüksek güçlü uygulamalarda elektrik enerjisinin verimli ve güvenli kullanımı kritik öneme sahiptir. Bu uygulamalarda güç faktörünün iyileştirilmesi, güç kayıplarının azaltılması ve yüksek verimin sağlanması, güç dönüştürücülerinin optimum tasarımı ile

mümkündür. Kullanılan doğrultucunun türü ne olursa olsun, dönüştürücünün temel işlevi şebekeden gelen gücü yüke uygun bir forma dönüştürmektir. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu artan güç seviyeleriyle başa çıkabilmek için bileşenlerin stresini en aza indirmektedir. Güç kalitesinin optimize edilmesi, THB, azaltılmış DA çıkış gerilim-akım dalgalanması ve kontrol yaklaşımları, yüksek güç uygulamaları için düşünülen üç fazlı AA/DA dönüştürücüler için çok önemlidir. Bu nedenle bu kısımda 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun yüksek güçlerde optimum çalışması için yeni bir DGM tekniği önerilmektedir.

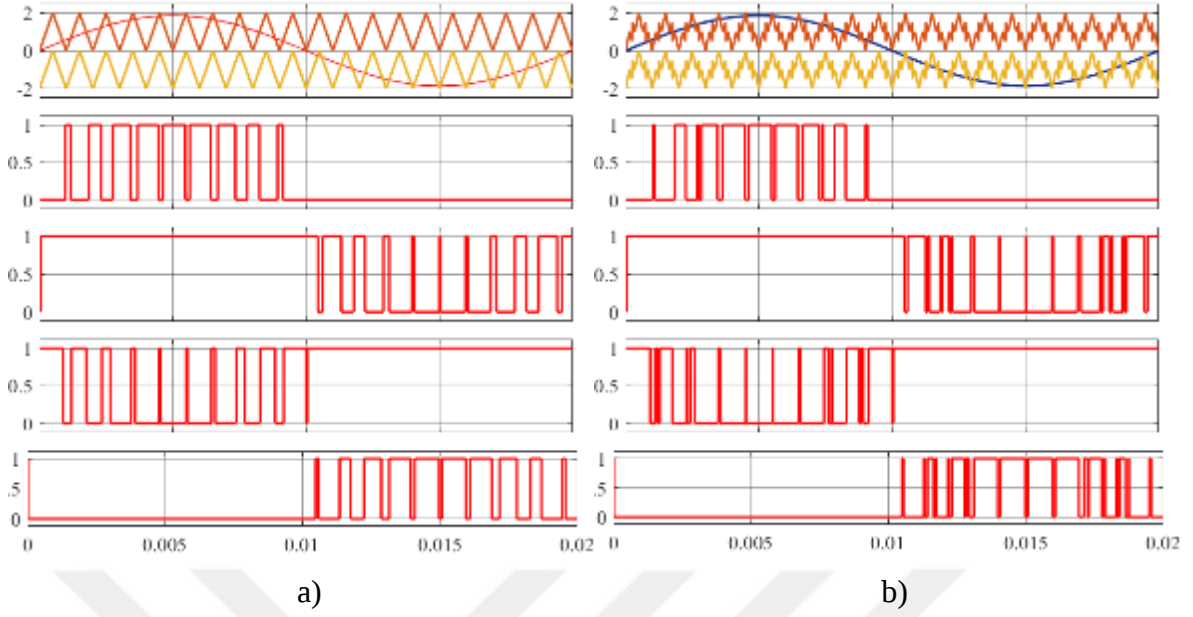
Bu çalışmada DGM kontrolü yapılmaktadır. Bu yöntem, doğrultucunun çıkış gerilimini ve akımını düzenlemek için anahtarlama sinyali görev döngüsünü ayarlar. Önerilen DGM kontrolü yüksek verimlilik, düşük THB ve düşük gerilim düzenlemesi sağlar. Ayrıca kapasite gerilim dengesinin sağlanmasında iyi performans sunar. 30-3S diyot kenetlemeli GFD dönüştürücü için değerlendirilen sistemin benzetim çalışmasının blok şeması Şekil 42’de gösterilmektedir.



Şekil 42. Sistemin genel tasarımı ve 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun d–q dönüşümüne dayalı kontrol yöntemi

30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun giriş terminalleri, R - L direnç-endüktans bağlantısı aracılığıyla üç fazlı kaynağa bağlanır. Denklem 20-21’de, V_d , V_d' , i_d ve V_q , V_q' , i_q bileşenleri d ve q eksenlerindeki akım-gerilim bileşenleridir. i_d ve i_q akımları, ayrılmış V_d ve V_q gerilimleri tarafından kontrol edilir. Bu doğrultucunun kontrol stratejisi, Şekil 42’de gösterilmektedir. Bu sistemde doğrultucu çıkış gerilimi optimum DGM sinyalleri sağlanarak kontrol edilir. PI denetleyici, Şekil 42’deki gibi AA/DA dönüştürücünün çıkış gerilimini kontrol etmek için kullanılır. Bu denetleyicinin çıkışı, i_{d_ref} , kontrol etmek için kullanılır, i_d dahili kapalı döngünün referansıdır. q eksen i_q üzerindeki akım, yüksek güç faktörü için $i_{q_ref} = 0$ referansına sahip benzer bir döngü tarafından kontrol edilir. d ve q eksenlerindeki V_{d_ref} ve V_{q_ref} referans gerilim değerleri sırasıyla akım kontrolörleri tarafından sağlanmaktadır. Üç fazlı giriş geriliminin d - q koordinat dönüşümü sırasında ωt açısı elde edilir. Bu açı, doğrultucunun her bir ayağında anahtarlama sinyallerinin üretilmesi için önemlidir. Tek kutuplu sinüzoidal DGM sinyalleri için referans olarak alınan birim sinüs sinyallerinin 120° faz farkıyla kontrol edilmesiyle uygun modülasyon tekniği elde edilir. Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu için kullanılan kontrol algoritmasının Matlab/Simulink arayüzü Ek-2’de verilmektedir.

30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun bir fazına ait çalışma modu ve ayrıntılı açıklamaları Şekil 17’de yapılmaktadır. Tablo 11 doğrultucunun her bir ayağı için anahtarlama durumlarını göstermektedir. Bu doğrultucu için uygulanan önerilen değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı DGM tekniği Şekil 30’da ayrıntılı gösterilmektedir. Matematiksel ifadesi ise Denklem 32’de ki gibidir. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazının önerilen değiştirilmiş ve klasik taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı SDGM modülasyon yönteminin anahtarlama sinyali Şekil 43’te gösterilmektedir. Bu çalışmada, yeni modifiye edilmiş taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı hibrit frekanslı DGM tekniği, klasik üçgen taşıyıcı tabanlı DGM ile karşılaştırılmıştır. Yeni teknik, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda kullanılacak doğrultucu için umut verici bir alternatif gibi görünmektedir.



Şekil 43. a) Klasik taşıyıcı tabanlı SK-DGM tekniği ve anahtarlama işaretleri b) Önerilen değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı SK-DGM tekniği ve anahtarlama işaretleri

Şekil 43'te ki anahtarlama işaretleri 75-350 kW'a kadar derecelendirilmiş 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu ile tasarlanmış uygulamalar için Matlab/Simulink platformunda denenmiştir. Önerilen yeni modifiyeli SK-DGM tekniği özellikle 350 kW'lık bir uygulama için standartlara uygun sonuç verdiği görülmektedir. Bunun nedeni, anahtarlama frekansının aynı olması ancak kullanılan taşıyıcı sinyalin türüne bağlı olarak bir anahtarın tam açık ve tam kapalı durum sayısının aynı anda fazla olmasıdır. Yüksek güçlü uygulamalarda anahtarlama kayıplarından dolayı yüksek frekanslarda çalışmak yerine düşük frekansta uygun çözüm bulmak mantıklıdır. Şekil 43.a ve 43.b karşılaştırıldığında modifiyeli SK-DGM yöntemi, klasik DGM yöntemine göre aynı frekansta daha fazla anahtarlama durumu gerçekleştirmektedir. Gerçekleştirilen DGM kontrol yöntemi ile doğrultucunun verimi artmış, çıkış akımının THB değeri azalmış, çıkış gerilimi ve akım dalgalanması azalmaktadır. Temel modülasyon indeks değeri (m_i), referans sinüs dalgası tepe değerinin taşıyıcı üçgen dalga tepe değerine oranıdır. Simülasyon sırasında taşıyıcıların frekansı 1 kHz olarak alınmaktadır, modülasyon indeksi ise 0,86'dır. Anahtarlama darbeleri, düşük frekanslı referans sinüs dalga formunun yüksek frekanslı bir taşıyıcı sinyalle karşılaştırılmasıyla oluşturulur. Referans sinüs dalga biçimi üçgen taşıyıcı dalgadan büyük olduğunda çıkış gerilimi (V_0), V_{DA} 'ya eşittir. Aksi takdirde çıkış gerilimi $-V_{DA}$ 'ya eşittir. Buna göre çıkış gerilimi Denklem 33' de ki gibi belirlenir.

$$V_0(t) = \begin{cases} +V_{DA}, & V_{referans} > V_{taşıyıcı} \\ -V_{DA}, & V_{referans} < V_{taşıyıcı} \end{cases} \quad (33)$$

Modülasyon, doğrultucunun kalbidir. Optimum modülasyon stratejisini bulmak güç kalitesini artırır. Bu nedenle bu çalışmada güç faktörü ve verim de değerlendirilmiştir. Benzetim çalışmalarında ele alınan sistem parametreleri Tablo 14'te ki gibidir.

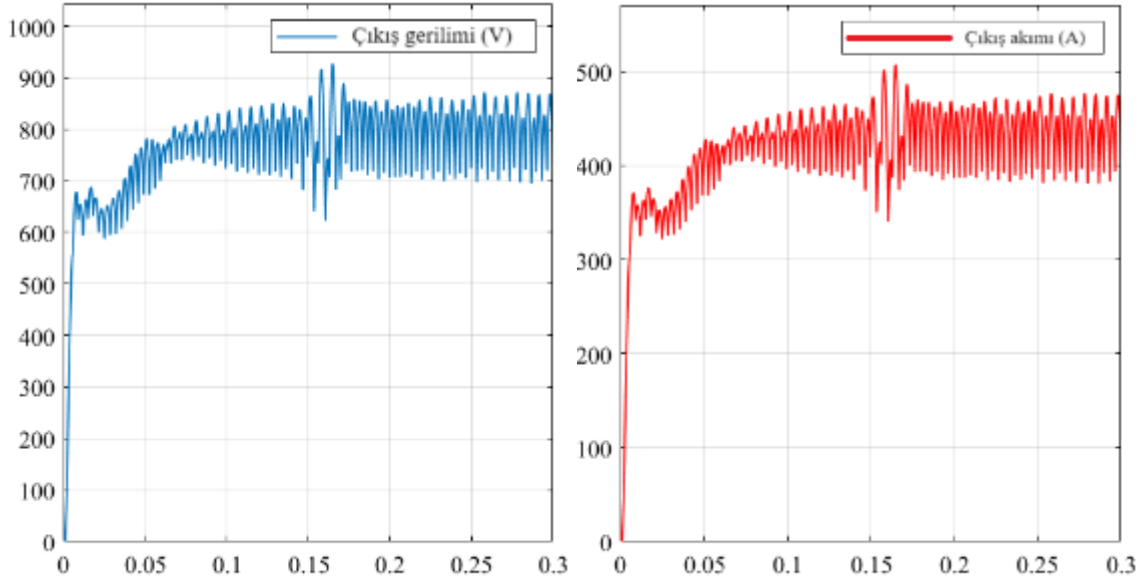
Tablo 14. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için sistem parametreleri

Parametre	Değer
Şebeke gerilimi	400 V
Şebeke frekansı	50 Hz
Doğrultucu çıkış gerilimi	800 V
Nominal güç	50-350 kW
Anahtarlama frekansı	5 kHz
Modülasyon indeksi	0.86
Giriş empedansı	1 mH
Giriş direnci	0.01 Ω
Çıkış kapasiteleri (C_1 ve C_2)	5200 μ F
Doğrultucu anahtarları (C3M0060065D – SiC MOSFET)	$V_{DSS} = 650$ V
	$R_{DS(on)} = 60$ m Ω
	$V_{SD} = 4.8$ V
Güç diyotları (APT15D60B)	$V_R = 600$ V
	$V_F = 1.9$ V
Kontrol parametreleri (Akım-gerilim döngüsü)	$K_p = 0.097$
	$K_i = 17.7$
Kontrol parametreleri (DA tarafı)	$K_p = 0.2$
	$K_i = 82$

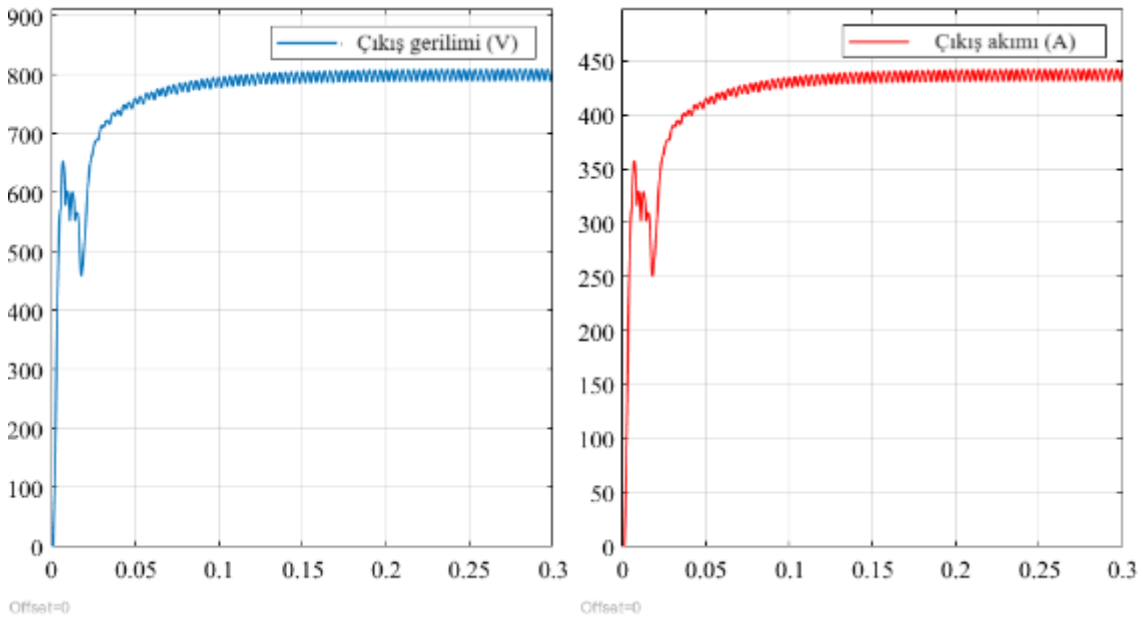
Sistem parametreleri, kaynak geriliminin sinüzoidal olduğu varsayılarak belirlenir. Amaç, yüksek güçlü bir uygulama için AA/DA aşamasının davranışını gözlemlemektir. Bu sistem ayrıca önerilen modülasyon tekniği ile anahtarlama kayıpları ve termal analizler yapılarak da geliştirilebilir.

Benzetim çalışmalarının sonuçları 0,2. saniyeye göre alınmaktadır. Doğrultucu dalgalanması 0,2 saniyede $V_{max} - V_{min}$ olarak hesaplanır. Şekil 44.a, 350 kW'ta klasik üçgen taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi için örnek olarak 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun çıkış gerilimi ve çıkış akımının dalgalanmalarını göstermektedir. Şekil 44.b'de sırasıyla çıkış gerilimi ve akım grafikleri gösterilmektedir. Grafiklere bakıldığında

önerilen modifiyeli SK-DGM yöntemi ile benzetimi gerçekleştirilen sistem için 350 kW'ta çıkış akımı ve gerilim dalgalanmalarının daha az olduğu görülmektedir.



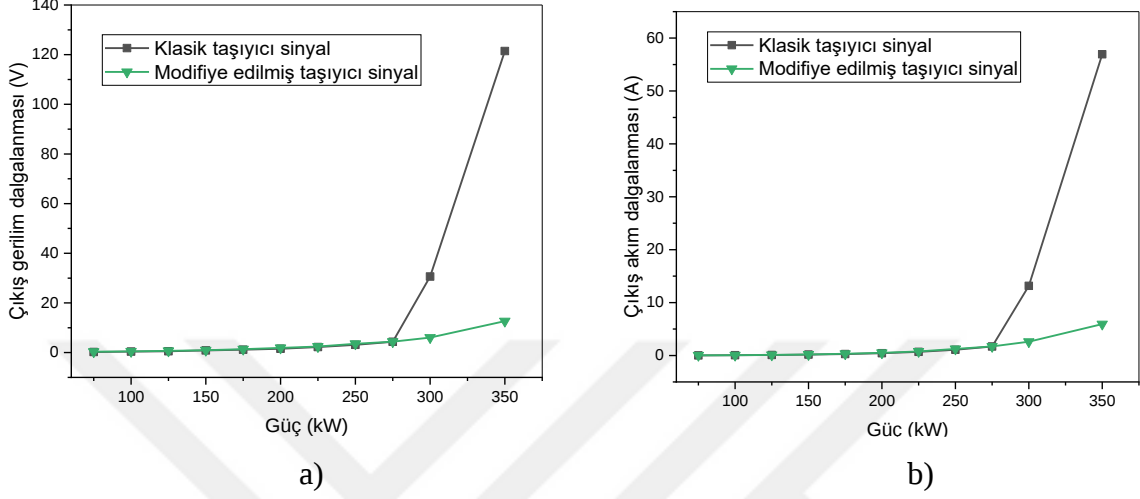
a)



b)

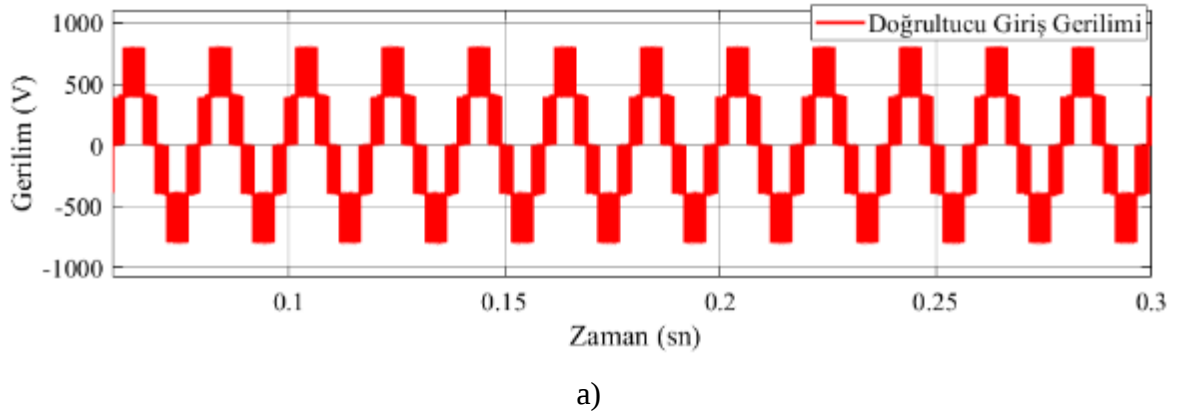
Şekil 44. 350 kW 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için gerilim ve akım dalgalanmaları: a) klasik bir üçgen SK-DGM b) önerilen değiştirilmiş hibrit frekanslı SK-DGM

Şekil 45.a ve 45.b, her iki DGM tekniği için farklı güç değerlerine yönelik gerilim ve akım dalgalanmalarını göstermektedir. Her ikisi de 75 ila 275 kW arasında hem gerilimde hem de akımda %1'den az dalgalanma gösterir.



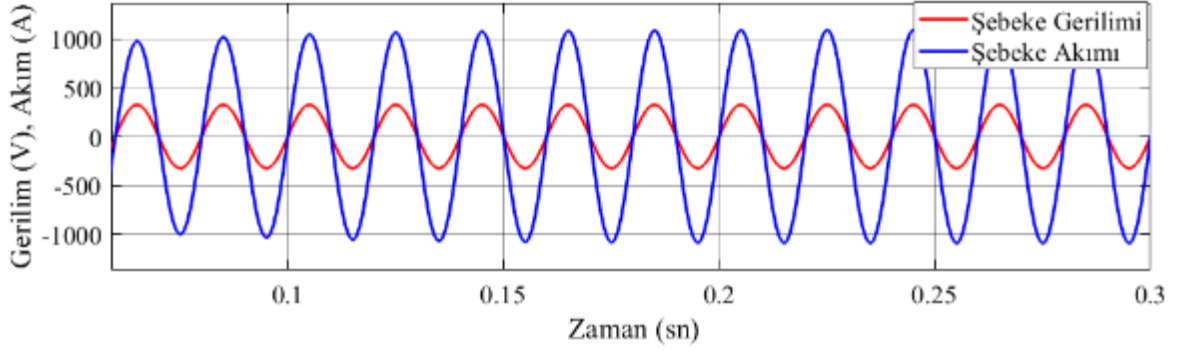
Şekil 45. DGM tekniklerine dayalı olarak her iki taşıyıcı için doğrultucu çıkış dalgalanmalarının 75 kW-350 kW arasındaki değişimi a) gerilim dalgalanması b) akım dalgalanması

Şekil 46.a'da yeni modifiyeli taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı SK-DGM tekniği ile değerlendirilen 350 kW gücündeki sistemin terminal girişleri gösterilmektedir. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun AA terminallerindeki anahtarlama durumları nedeniyle üç gerilim seviyesi elde edilir. Doğrultucu giriş terminal gerilimi (V_{an}) ve şebeke akımı (I_{an}) Şekil 46.b'deki gibidir.



Şekil 46. a) Önerilen DGM tekniği ile 350 kW gücündeki sistemin doğrultucu terminal girişleri b) Giriş terminal gerilimi (V_{an}) ve şebeke akımı (I_{an})

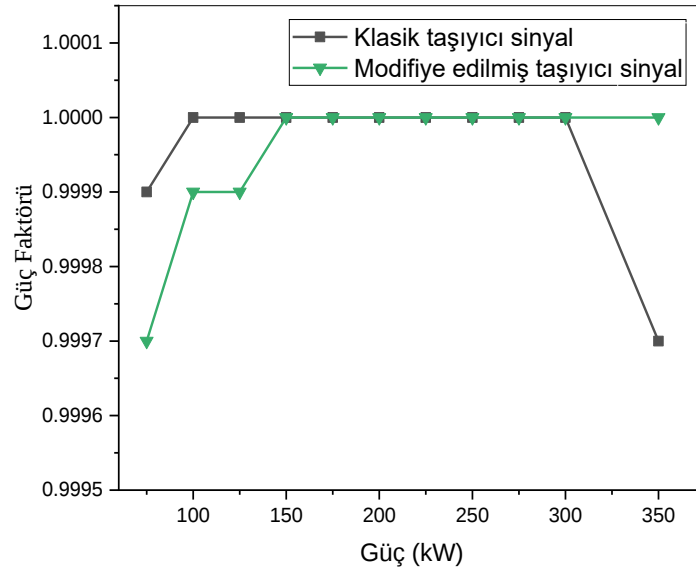
Şekil 46'nın devamı



b)

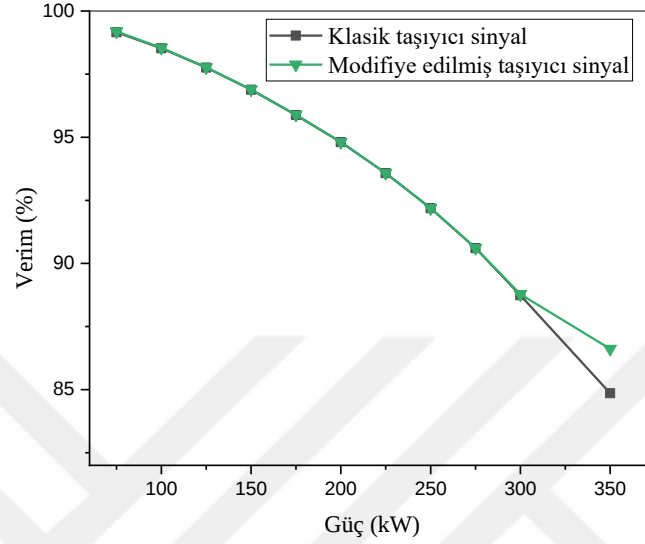
Akım ve gerilim fazlarının eş zamanlı olduğu görülmektedir. Bu durumda güç faktörünün 1'e yakın olduğu tahmin edilebilir.

Şekil 47, önerilen yeni DGM tekniği ile klasik SDGM tekniği için farklı güç değerlerinde güç faktörü değerinin değişimini göstermektedir. 350 kW için modifiyeli taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı DGM tekniği ile güç faktörü 1'dir. Kontrol yöntemi geliştirilerek optimum parametreler göz önüne alınarak hızlı şarj sistemi için ele alınan doğrultucunun diğer çıktıları iyileştirilebilir. Klasik kontrol yöntemi kullanılarak sistem standartlara uygun davranabilmektedir.



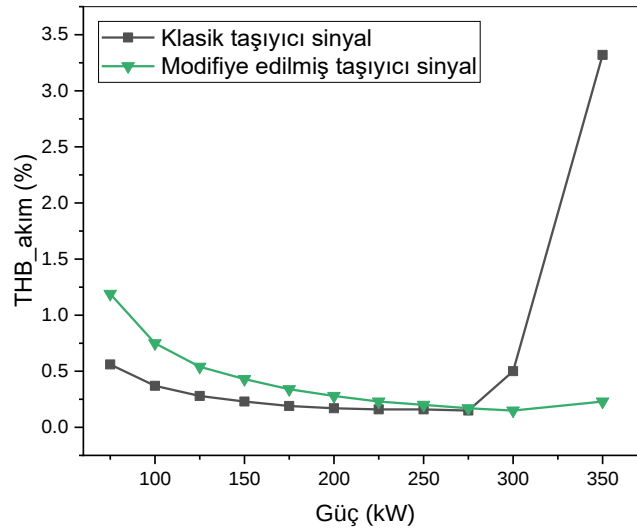
Şekil 47. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun yük gücü değişimiyle birlikte giriş güç faktörü değişimi

30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun verimliliği (η), giriş gücü ($P_{giriş}$) ve çıkış gücü ($P_{çıkış}$) ölçülerek $P_{giriş}/P_{çıkış}$ olarak hesaplanır. Şekil 48'e baktığımızda yeni modifiyeli DGM tekniği 350 kW gücünde olan doğrultucu için en iyi verimi sağlamaktadır.



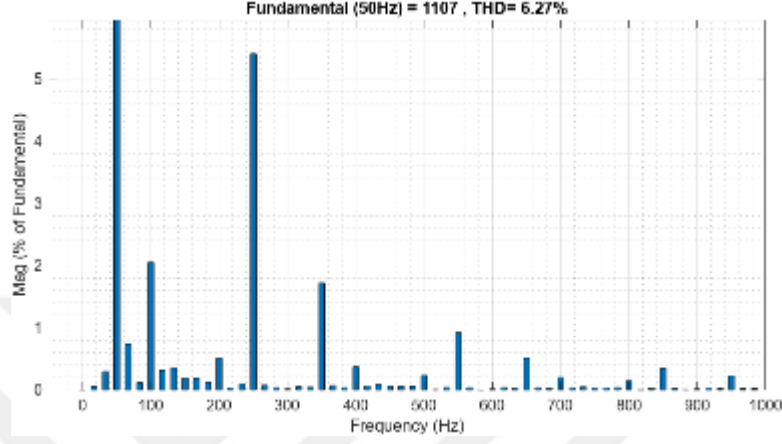
Şekil 48. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun her iki DGM tekniği için güç-verim değişimi

Önerilen yeni modifiyeli hibrit frekanslı DGM tekniği, Şekil 49'da gösterildiği gibi THB açısından yüksek güçlerde bile tutarlıdır.

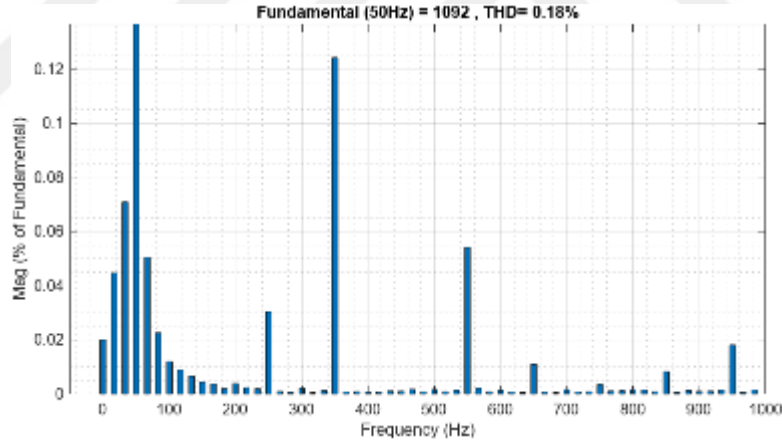


Şekil 49. GFD doğrultucunun yük gücüne bağlı AA terminal akımının THB'sinin değişimi

Şekil 50, 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun AA terminallerinden çekilen akımın FFT analizini göstermektedir. Şekil 50.a, klasik üçgen taşıyıcı tabanlı PWM tekniğine göre kontrol edilen doğrultucunun giriş akımı harmoniğini göstermektedir. Şekil 50.b, 350 kW güç için önerilen değiştirilmiş DGM yöntemi için harmoniği göstermektedir.



a)



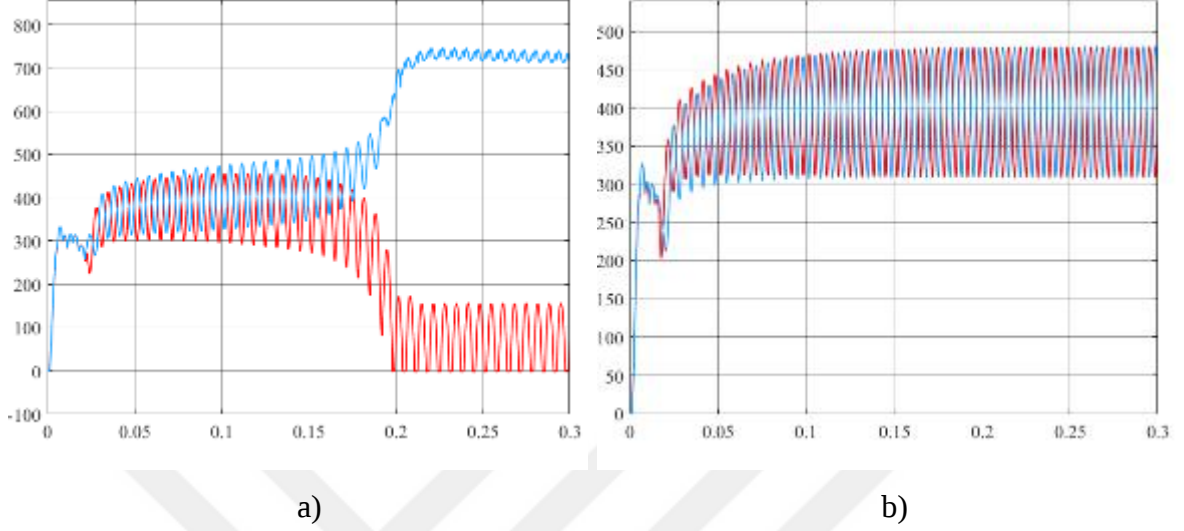
b)

Şekil 50. 350 kW gücündeki doğrultucunun AA terminal akımının FFT'leri. a) klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi b) önerilen değiştirilmiş hibrit frekanslı SK-DGM yöntemi

Ancak klasik DGM tekniği ile yapılan doğrultucu kontrolü ile şebekeden çekilen akımın harmonikleri %6'nın üzerinde olduğundan standart dışıdır.

Şekil 51, her iki taşıyıcı tabanlı DGM tekniğine göre kontrol edilen 350 kW 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun kapasite dengesini göstermektedir. 350 kW için üç fazlı sistem, klasik üçgen taşıyıcı tabanlı DGM tekniği için Şekil 51.a'da denge

sağlamamaktadır. Ancak önerilen modifiyeli taşıyıcı tabanlı modülasyon tekniği, Şekil 51.b'deki gibi kısa sürede kapasite dengesini göstermektedir.



Şekil 51. Klasik taşıyıcı tabanlı ve modifiyeli taşıyıcı tabanlı DGM tekniğine göre kontrol edilen 350 kW gücündeki doğrultucunun kapasite dengesini: a) klasik DGM yöntemi b) önerilen modifiyeli SK-DGM yöntemi

Yüksek güçlü uygulamalar için şebekeden yüksek akım sağlanması gerekmektedir. Dönüştürücülerin verimli ve kayıpsız çalışması ve şebeke tarafında güç faktörünün 1 olması yüksek güç için çok önemlidir. Tüm bu faktörler dikkate alındığında optimum modülasyon yönteminin bulunması önemli bir faktördür. İstenilen sonuca ulaşmanın bir yolu olarak bu kısımda taşıyıcı tabanlı DGM yöntemleri alanında araştırmalar yapılmıştır. Üçgen sinyalden türetilen yeni geliştirilen seviye kaydırmalı hibrit frekanslı taşıyıcının 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için etkili olduğu vurgulanmaktadır. Bu gelişme önemlidir çünkü AA/DA doğrultma sürecinde performansın iyileştirilmesini sağlar ve bu da genel sistem verimliliği ve güvenilirliği üzerinde olumlu etkiler yaratabilir. Bu çalışmanın bulgularının, yüksek güçlü uygulamalar için güç faktörü düzenleyiciler ile ilgilenen araştırmacıları motive etmesi muhtemeldir. Bu çalışmada vurgulanan yöntem değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı SK-DGM tekniklerinin performansına ışık tutuyor ve geliştirilebilecek hibrit frekanslı DGM teknikleri için bir fikir sağlıyor. Sonuç olarak çalışmanın bu önemli alanda daha fazla araştırma ve geliştirme çabalarına ilham vermektedir.

Hızlı şarj sistemleri yüksek güçlü uygulamalar olduğundan bu kısımda 75 kW ve üzeri güç değerleri dikkate alınmıştır. 275'ten 350 kW'a kadar olan uygulamalarda yalnızca

değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı DGM kontrolü kabul edilebilir sınırlar içerisinde davranmıştır. Bu çalışmada, hem klasik taşıyıcı tabanlı DGM tekniği hem de önerilen yeni değiştirilmiş seviye kaydırmalı taşıyıcı tabanlı DGM tekniği için sonuçlar analiz edilmiştir. Ele alınan bulgular, 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun çıkış akımları ve çıkış gerilimlerindeki dalgalanmalarla ilgilidir. Bu doğrultucu için şebekeden çekilen akımın harmoniği de dikkate alınır. Üç seviyeli dönüştürücünün kapasite dengesi incelenmektedir. Ayrıca bu doğrultucu için hem DGM teknikleri kullanılarak verim hesaplamaları yapılmakta hem de güç faktörü kontrol edilmektedir. Yüksek güçlü sistemin çıktılarının, önerilen yeni değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı DGM tekniği ile iyileştirildiği görülmektedir. Önerilen değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı sinyal, diğer çok seviyeli dönüştürücüler için de dikkate alınabilir. Önerilen yöntemle birlikte farklı kontrol algoritmaları da değerlendirilebilir ve ultra hızlı şarj için ele alınan doğrultucu devreyi 350 kW'tan yüksek güçlerde çalıştırmak mümkün olabilir.

Yüksek güçlü uygulamalar şebekeden yüksek akım çekilmesini gerektirir. Dönüştürücülerin verimli ve kayıpsız çalışması, şebeke tarafındaki güç faktörünün 1 olması ve sistemin standartlara uygun olması da oldukça önemlidir. Tüm bu faktörler göz önüne alındığında önerilen yeni modifiyeli SK-DGM yöntemi 350 kW anma gücünde geleneksel taşıyıcı sinyalden çok daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir. Anahtarlama frekansı aynı olmasına rağmen yeni yöntemle dönüştürücü daha verimli hale getirilmiştir. Yüksek güçlü uygulamalar için yüksek anahtarlama frekanslarına çıkmadan sistemi standartlara uygun çalıştırmak yüksek güçlü uygulamaların sorunlarına bir çeşit çözüm getirmektedir.

4.1.3. EA Hızlı Şarj Cihazlarında Uygulanması Düşünülen Üç Fazlı Diyot Kenetlemeli Doğrultucu İçin Yeni Taşıyıcı Tabanlı Seviye Kaydırmalı DGM Kontrolü

Bu kısımda elektrikli araçların hızlı şarjı için değerlendirilen üç fazlı diyot kenetlemeli güç faktörü düzelten AA/DA doğrultucu, farklı modifiye edilmiş hibrit frekanslı seviye kaydırmalı modülasyon teknikleri ile izoleli DA-DA dönüştürücü ve batarya ile birlikte MATLAB/Simulink platformunda test edilmektedir. Hızlı şarj gibi yüksek güçlü uygulamalar için anahtarlama frekansını artırmak büyük kayıplara neden olabileceğinden düşük frekansta farklı doluluk boşluk oranlarına sahip anahtarlama durumlarını bu tür uygulamalar için değerlendirmek karşılaşılabilecek sorunlar için çözüm sunmaktadır. Elektrikli

araç hızlı şarj cihazları için üç fazlı (3 ϕ) AA/DA diyot kenetlemeli GFD çok seviyeli dönüştürücü performansı yeni modifiyeli taşıyıcı tabanlı SK-DGM tekniği ile birlikte 300 kW gücündeki bir hızlı şarj cihazı için değerlendirilmektedir. Bu kısımda literatürde ele alınan diğer hibrit frekanslı teknikler de hızlı şarj kapsamında değerlendirilmiş olup yeni modifiyeli taşıyıcı tabanlı DGM tekniğinin standartlara uygun sonuçlar verdiği görülmektedir.

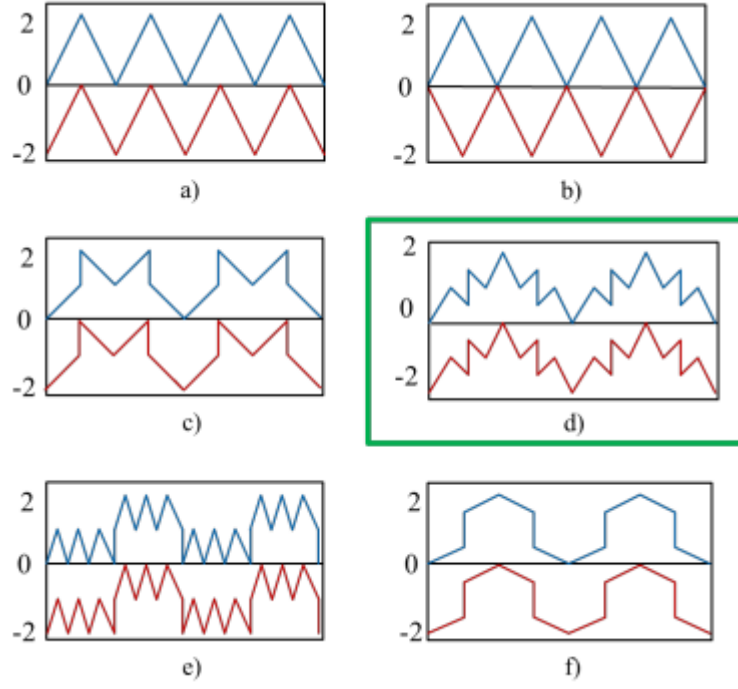
EA hızlı şarj cihazları için güç faktörünün düzeltilmesi, verimli güç kullanımı ve şarj cihazının şebekeye uyumluluğu çok önemlidir. Çok seviyeli dönüştürücüler şarj verimliliğini artırır, bileşenler üzerindeki gerilim stresini azaltır, elektromanyetik paraziti en aza indirir ve yüksek güç özelliklerini destekler. Bu nedenle GFD özelliğine sahip çok seviyeli dönüştürücüler, hızlı şarj altyapısının güvenilir ve etkin çalışmasına katkı sağlamaktadır. Doğrultucu analizi, yeni değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu tekniği kullanılarak kapsamlı simülasyonlarla test edilmektedir. Elde edilen sonuçlar uluslararası standartlara uygundur. Önerilen DGM tekniği, hızlı şarj sistemlerinde uygulanması düşünülen 3 θ -3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için düşük gerilim regülasyonu, düşük toplam harmonik bozulma, birim giriş güç faktörü ve iyi düzenlenmiş bir DA bara gerilimi sağlar ve sistem yüksek verimliliğe sahiptir. Ayrıca modülasyon yöntemi ek bir GFD devresine olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Sistem, kapasitör gerilim dengesi gibi kritik parametrelerin ele alınmasında dikkate değer bir başarı göstermektedir. Bu değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı DGM, DA hızlı şarj cihazları için tasarlanmış, 300 kW'a kadar güce sahip doğrultucu için oldukça başarılıdır. DA hızlı şarj sisteminin simülasyon sonuçları, önerilen taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı DGM yönteminin geçerliliğini ve esnekliğini göstermektedir. Önerilen DGM tekniği 300 kW gücündeki bir hızlı şarj cihazı için bir çözümdür ancak sistem parametreleri optimize edilerek daha yüksek güçlere çıkabilmek mümkün olabilir. Mevcut şarj cihazı yine sistem parametreleri iyileştirilerek en optimum hale getirilebilir.

Bu kısımda, hızlı şarj sistemine uyarlanmış bir 3 θ -3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için altı farklı taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı DGM modülasyon tekniği değerlendirilmektedir. Bu taşıyıcı sinyallerden beşi literatürde farklı dönüştürücüler için tartışılmaktadır. Ancak önerilen değiştirilmiş taşıyıcı sinyal, önerilen doğrultucu için standartları karşılamaktadır. Sistem hızlı şarj için değerlendirildiğinden 50 kW ve üzeri güç değerleri dikkate alınmıştır. Çıkış gerilimi 800 V ve nominal akımı 375 A olan 300 kW DA hızlı şarj cihazı için yalnızca önerilen modifiyeli taşıyıcı tabanlı SK-DGM tekniği kabul

edilebilir sınırlar içerisinde davranmaktadır. Bu çalışma, deneysel doğrulama yapmak isteyen diğer araştırmacılara ilham verebilir. Bu çalışmanın temel amacı hızlı şarj altyapısını geliştirmektir. Bu nedenle amaç, söz konusu yüksek güçlü doğrultucu için Şekil 5'te gösterilen gözlemleri geliştirmektir. Şekil 5'te tüm taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı DGM sinyalleri için bu çalışmada incelenen sonuçlar sembolik olarak gösterilmektedir.

Bu kısımda değerlendirilen sistemin genel yapısı Şekil 3'te blok şemalar halinde gösterilmektedir. Hızlı şarj için değerlendirilen 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun bir fazına ait çalışma modu Şekil 17'de gösterilmektedir. Tablo 10 doğrultucunun her bir ayağı için anahtarlama durumlarını göstermektedir. 300 kW gücündeki bir şarj sistemi için önerilen değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı DGM tekniği Şekil 30'da gösterilmektedir. Matematiksel ifadesi ise Denklem 32'de ki gibidir. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun A fazına ait önerilen değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı SDGM yönteminin anahtarlama sinyalleri Şekil 43'te gösterilmektedir.

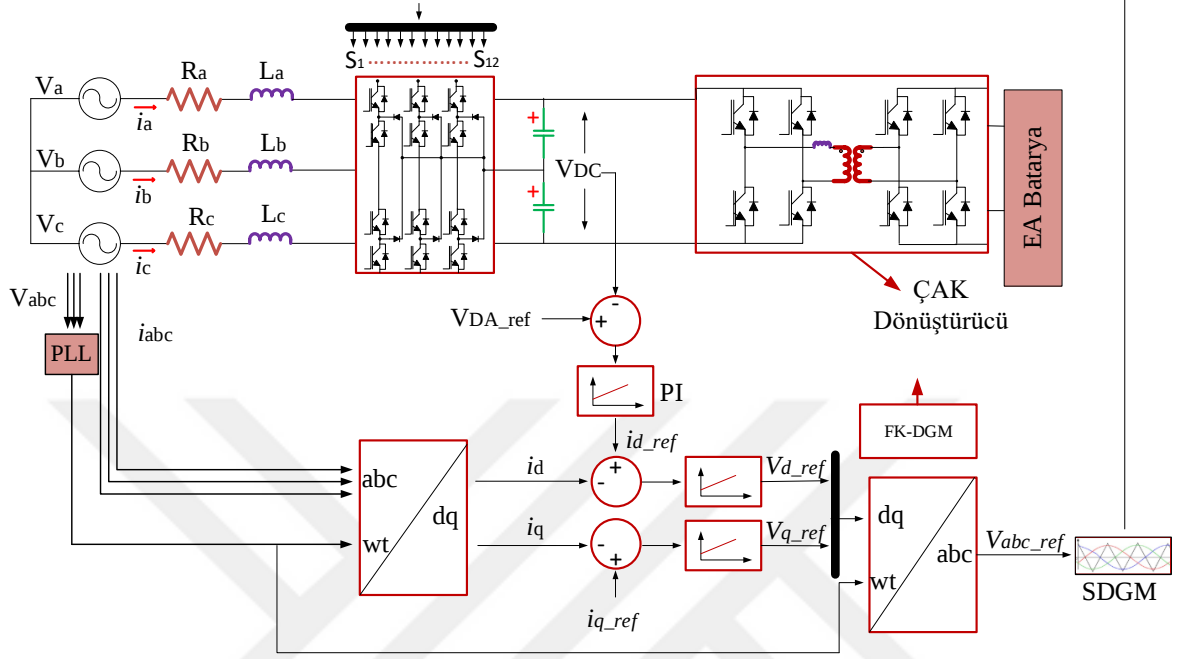
Temel modülasyon indeks değeri (m_i), referans sinüs dalgasının tepe değerinin taşıyıcı üçgen dalgasının tepe değerine oranıdır. Simülasyon sırasında tüm taşıyıcıların frekansı 1 kHz ve modülasyon indeksi 0,86'dır. Bu çalışmada anahtarlama sinyalinin üretilmesinde referans modülasyon sinyali olarak sinüzoidal bir dalga formu kullanılmıştır. Şekil 52'de gösterilen temel taşıyıcı sinyal olarak çeşitli tipte dalga formları kullanılmıştır. Burada kullanılan taşıyıcı sinyallerin çoğu, çok seviyeli üç fazlı doğrultucularda ve invertörlerde kullanılanlardan türetilmiştir. Bu taşıyıcı sinyallerin temeli üçgen dalga şeklindedir. Şekil 52.d'de gösterildiği gibi TS4 taşıyıcı sinyali literatürde daha önce gözlemlenmemiştir. Taşıyıcı sinyal 1 (TS1) (Singh & Mandal 2023)'te gözlenmiştir ve Şekil 52.a'da gösterilmektedir. Benzer şekilde, (Chitra & Valluvan 2020) TS2'yi (POD-DGM) değerlendirirken, (Zhao vd. 2010) Şekil 52.c ve 52.e'de gösterilen TS3 ve TS5'i değerlendirmiştir. Ayrıca (Meraj vd. 2021), Şekil 52.f'de görüldüğü gibi TS6'yı tartışmıştır. Değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı DGM sinyalleri (TS3, TS5 ve TS6) transformatörsüz bir evirici için de değerlendirilir (Özkop 2022).



Şekil 52. EA hızlı şarj cihazı için değerlendirilen 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için ele alınan taşıyıcı sinyal formları

Bu çalışmada geleneksel temel taşıyıcı sinyal (TS1) ile literatürdeki diğer değiştirilmiş TS tipleri karşılaştırılmaktadır. Anahtarlama frekansı aynı olmasına rağmen kullanılan TS tipine bağlı olarak TS4 tabanlı SDGM kontrolünde bir anahtarın aynı periyotta tam açık ve tam kapalı durum sayısı diğerlerinden daha fazladır. Bu durum Şekil 5'te gösterilen parametreleri etkilemektedir. TS4, yüksek güçlü uygulamalar için THB, çıkıştaki akım-gerilim dalgalanma, kapasite dengesi, verim ve GF açısından tatmin edicidir. Anahtarlama frekansının aynı olması ancak kullanılan taşıyıcı sinyalin türüne bağlı olarak bir anahtarın aynı zaman diliminde tam açık ve tam kapalı durum sayısının fazla olması EA hızlı şarjı için değerlendirilen doğrultucunun çalışmasını olumlu etkilemektedir. Modifiyeli taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi ile gerçekleştirilen kontrol yöntemi ile doğrultucunun verimi artar, çıkış akımının THB değeri düşer, çıkış gerilimi ve akım dalgalanması azalır. Önerilen taşıyıcı sinyal ile referans sinyalin karşılaştırılması sonucu ortaya çıkan DGM sinyalleri Şekil 43.b'de gösterilmektedir. Şekil 43.b incelendiğinde anahtarların tam açık ve tam kapalı durum sayısının fazla olduğu görülmektedir. Bu, Şekil 5'te doğrultucu analizi için dikkate alınan çıktıları iyileştirir. Önerilen taşıyıcı sinyal, simülasyon çalışmalarında testere dişi sinyali ile kare sinyalin toplamı olarak oluşturulmuştur. Şekil 30'da verilen 1 kHz'lik taşıyıcı sinyal SK-DGM yöntemi ile hızlı şarj için değerlendirilen doğrultucu için test edilmektedir.

Şekil 53 elektrikli araç hızlı şarjı için değerlendirilen sistemin genel tasarımını ve d - q dönüşümüne dayalı kontrol yöntemini göstermektedir.



Şekil 53. Sistemin genel tasarımı ve 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun d - q dönüşümüne dayalı kontrol yöntemi

30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun giriş terminalleri, R-L aracılığıyla üç fazlı kaynağa bağlıdır. d - q dönüşümüne dayalı kontrol edilen doğrultucunun kontrol stratejisi üç fazlı giriş gerilimlerinin d - q gerilim vektörlerine dönüşümüne dayanır. Dönüştürülen gerilim veya akım, kapalı çevrim denetleyicilerde referans gerilimi veya akım sinyallerini üretmek için kullanılır. Doğrultucunun her bir ayağındaki anahtarlama sinyalleri için referans birim sinüs işaretleri üretilmektedir. SDGM için referans olarak alınan birim sinüzoidal sinyallerin 120° faz farkıyla kontrol edilmesi sonucu önerilen taşıyıcı sinyaller ile karşılaştırılır. Önerilen modülasyon tekniği ele alınan doğrultucu için uygulanırken, doğrultucu ardından izoleli ÇAK dönüştürücü ve bataryanın olması tam bir hızlı şarj sistemi için de değerlendirildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada önerilen modülasyon tekniği, çıkış gerilimi dalgalanması, giriş akımının harmoniği, doğrultucunun güç faktörü ve kapasite dengesi açısından değerlendirilmiştir. Modülasyon teknikleri enerji verimliliği açısından önemlidir. Literatürde AA/DA doğrultucuların performansı değerlendirilirken THB, güç faktörü ve gerilim regülasyonu dikkate alınmaktadır. Güç faktörü, AA/DA doğrultucu devresinin giriş gerilimi sinyali ile

akım sinyali arasındaki faz farkına dayanır, 0 ile 1 arasındadır. Doğrultucunun gerilim regülasyonu, çıkış geriliminin nominal çıkış gerilimine göre ne kadar dalgalandığıyla ölçülür. Genellikle bu dalgalanma, yük değişiklikleri veya giriş gerilim dalgalanmaları ile değişir. Bu nedenle doğrultucunun gerilim dalgalanması izoleli ÇAK dönüştürücü ve batarya bağlı iken dikkate alınmaktadır.

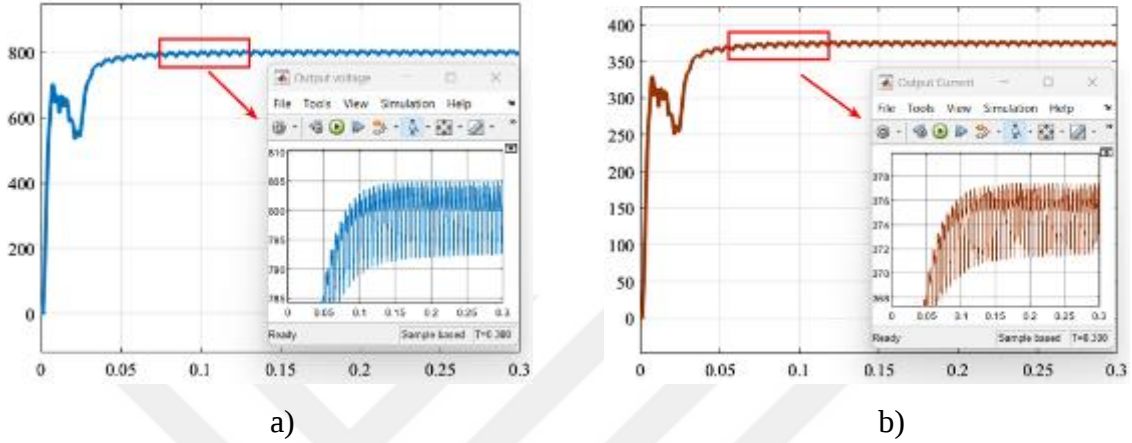
Benzetim çalışmalarında kullanılan elemanlar hızlı şarj cihazlarında sıklıkla tercih edilen SiC MOSFET'lerdir. Simülasyonda yer alan yarı iletken malzemeler ve simülasyon zaman çerçevesi parametreleri Tablo 15'te detaylı olarak verilmiştir. Sistemin Simulink arayüzü Ek 1'de verilmektedir. Sistem kriterlerinin gerçek dünyaya uygun olmasına dikkat edilmiştir.

Tablo 15. EA hızlı şarj sisteminin benzetim parametreleri

Parametre	Değer
Şebeke gerilimi	400 V
Şebeke frekansı	50 Hz
Doğrultucu çıkış gerilimi	800 V
Nominal güç	50-300 kW
Anahtarlama frekansı	1 kHz
Benzetim, örnekleme süresi	5e-7 (sn)
Modülasyon indeksi	0.86
Giriş empedansı	1 mH
Giriş direnci	0.01 Ω
Çıkış kapasiteleri (C_1 ve C_2)	5200 μ F
Doğrultucu anahtarları (C3M0060065D – SiC MOSFET)	$V_{DSS} = 650$ V
	$R_{DS(on)} = 60$ m Ω
	$V_{SD} = 4.8$ V
Güç diyotları (APT15D60B)	$V_R = 600$ V
	$V_F = 1.9$ V
Kontrol parametreleri (Akım-gerilim döngüsü)	$K_p = 0.02$
	$K_i = 10.7$
Kontrol parametreleri (DA tarafı)	$K_p = 0.2$
	$K_i = 90$

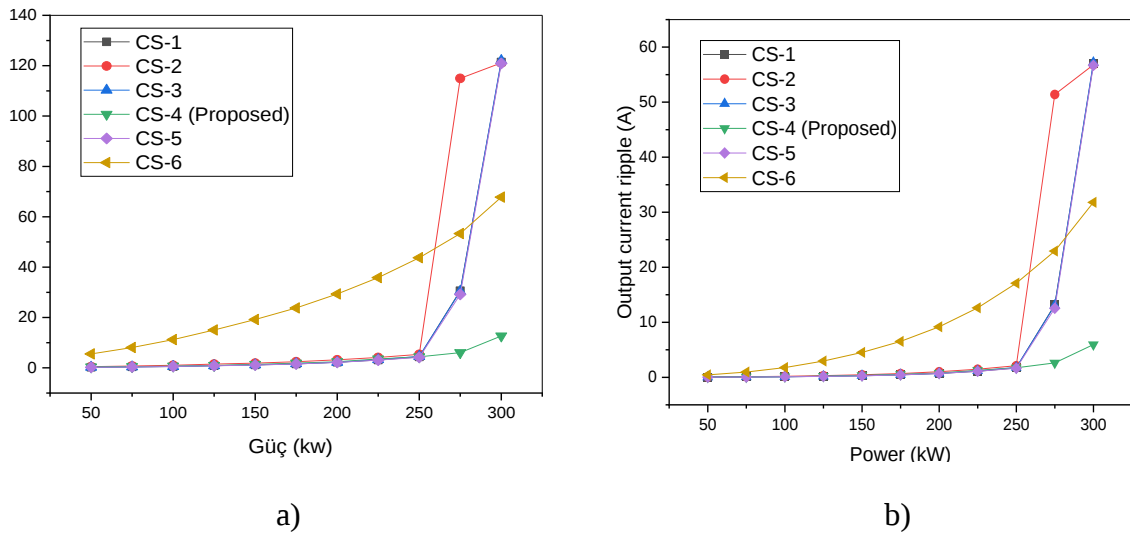
Bu sistemde AA/DA kademesi için doğrusal olmayan yük olarak EA şarj cihazlarında izole edilmiş DA-DA dönüştürücüler olan ÇAK dönüştürücü ve batarya tercih edilmektedir. Sistem parametreleri, AA kaynak geriliminin sinüzoidal olduğu ve ÇAK dönüştürücünün kayıpsız olduğu varsayılarak belirlenir. Amaç, yüksek güçlü bir uygulama olan hızlı şarj cihazı için AA/DA kademesinin davranışını gözlemlemektir. Bu sistem ayrıca önerilen

modülasyon tekniği ile anahtarlama kayıpları ve termal analizler yapılarak da geliştirilebilir. Doğrultucu dalgalanması 0,2. saniyede $V_{max} - V_{min}$ olarak hesaplanır. Şekil 54'te örnek olarak TS4 için 300 kW'ta 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun çıkış gerilimi ve çıkış akımı dalgalanmaları gösterilmektedir.



Şekil 54. 300 kW EA hızlı şarj cihazı için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun gerilim ve akım dalgalanmaları

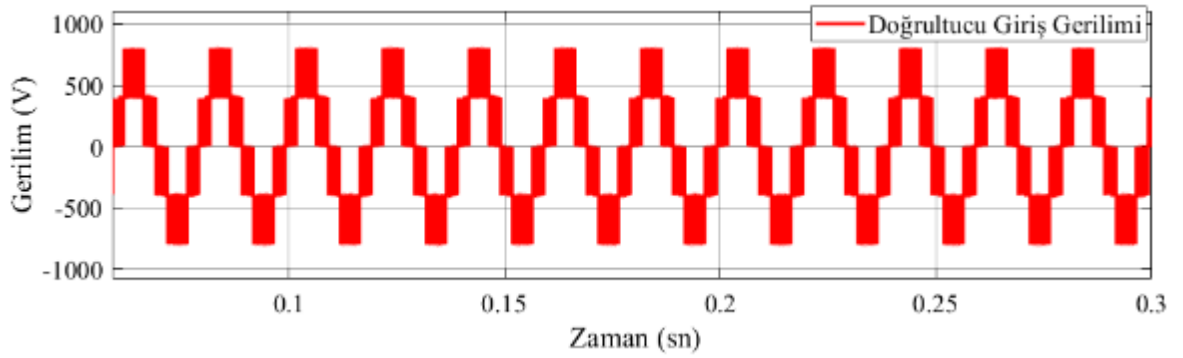
Şekil 55.a ve 55.b, dikkate alınan tüm taşıyıcı sinyaller için farklı güç değerlerine yönelik gerilim ve akım dalgalanmalarını göstermektedir.



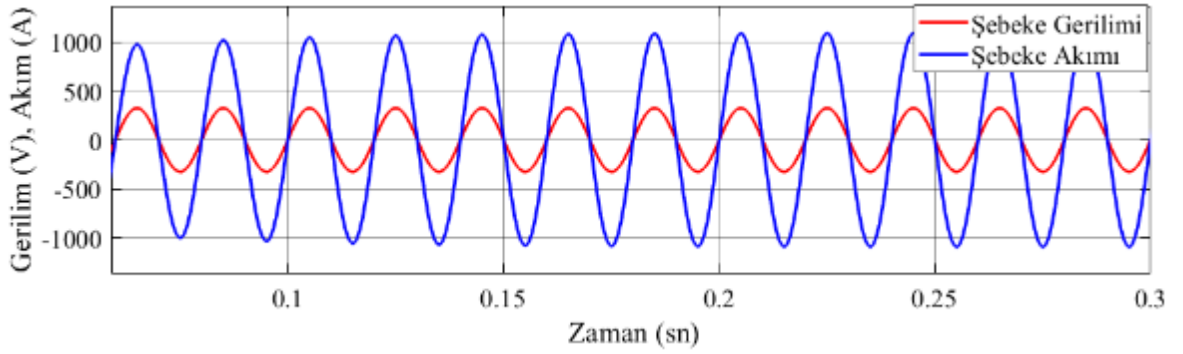
Şekil 55. 50-300 kW arasındaki hızlı şarj sistemi için değerlendirilen doğrultucunun çıkış dalgalanmalarının farklı taşıyıcı sinyaller için değişimi a) gerilim dalgalanması b) akım dalgalanması

TS1, TS2, TS3, TS4 ve TS5, 50 kW'dan 250 kW'a kadar hem gerilim hem de akım için %1'den az dalgalanma göstermektedir. Ancak yalnızca TS4, 250 kW'tan 300 kW'a kadar kabul edilebilir sınırlar içerisinde davranmaktadır.

Şekil 56.a örnek olarak TS4 taşıyıcısı için değerlendirilen 300 kW gücündeki sistemin terminal girişlerini göstermektedir. 3θ-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun AA terminallerindeki anahtarlama durumları nedeniyle üç gerilim seviyesi elde edilir. Doğrultucu giriş terminal gerilimi (V_{an}) ve şebeke akımı (I_{an}) Şekil 56.b'deki gibidir.



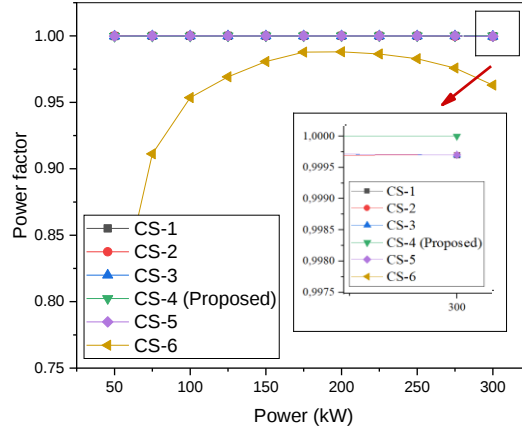
a)



b)

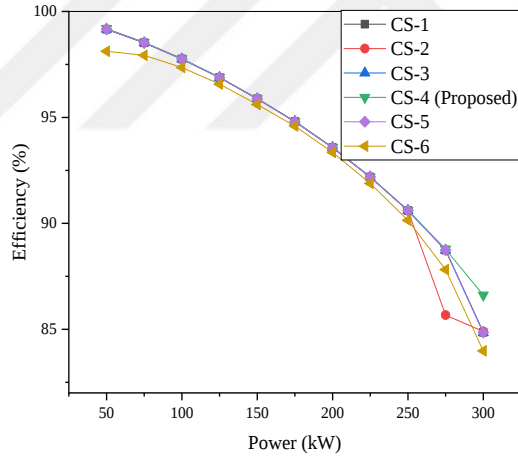
Şekil 56. a) TS4 tabanlı SK-DGM tekniği ile ele alınan 300 kW gücündeki hızlı şarj sistemi için doğrultucu terminal girişleri b) giriş terminal gerilimi (V_{an}) ve şebeke akımı (I_{an}).

Şekil 57, değerlendirilen tüm TS tabanlı DGM teknikleri için farklı güç değerlerindeki güç faktörü değişimi göstermektedir. 300 kW için TS4 tabanlı SDGM tekniğinde güç faktörü 1'dir.



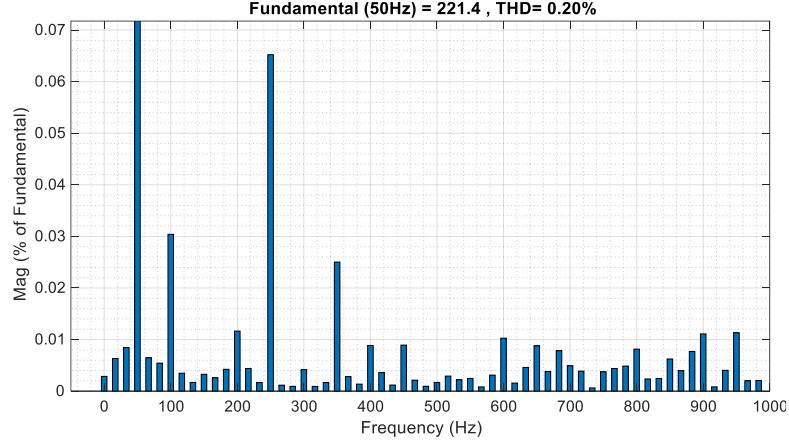
Şekil 57. Hızlı şarj sisteminin gücüne bağlı olarak güç faktörü değişimi

Doğrultucunun verimliliği (η), giriş gücü ($P_{giriş}$) ve çıkış gücü ($P_{çıkış}$) ölçülerek $\eta = P_{çıkış} / P_{giriş}$ olarak hesaplanır. Şekil 58'e baktığımızda TS4 tabanlı modülasyon tekniği 300 kW gücündeki doğrultucu için hızlı şarj sisteminde en iyi verimi sağlamaktadır.



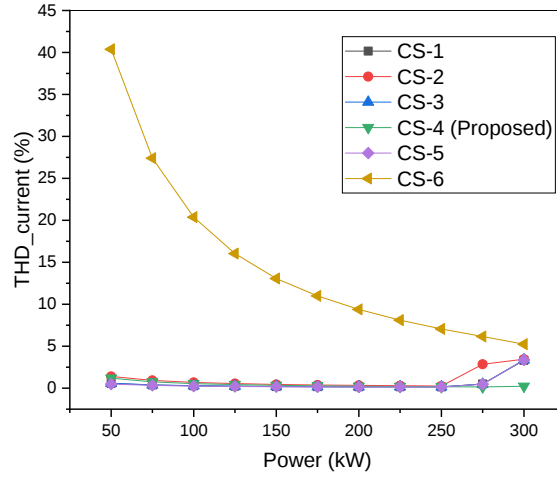
Şekil 58. GFD doğrultucunun farklı taşıyıcı modülasyonlar için verim-güç grafiği

Şekil 59 TS4 tabanlı modülasyon tekniği ile tasarlanan doğrultucunun maksimum nominal güç için AA terminallerinden çekilen 375 amper akımın FFT'lerini gösterir. THB %2'nin altındadır. TS4 tabanlı modülasyon tekniği, Şekil 59'da gösterildiği gibi yüksek güçlerde bile tutarlı davranır.



Şekil 59. 300 kW gücündeki TS4 tabanlı modülasyon tekniği ile tasarlanan sistemin AA terminal akımının FFT'leri

Şekil 60, değerlendirilen tüm taşıyıcı tabanlı modülasyon teknikleri ile tasarlanan doğrultucunun AA terminallerinden maksimum çekilen akımın %harmonik değerlerinin güçlere karşı değişimini göstermektedir. Hızlı şarj için değerlendirilen sistemde 300 kW güç sağlayabilen doğrultucunun yalnızca önerilen taşıyıcı tabanlı modülasyon tekniği için en düşük harmonik sağladığı görülmektedir.

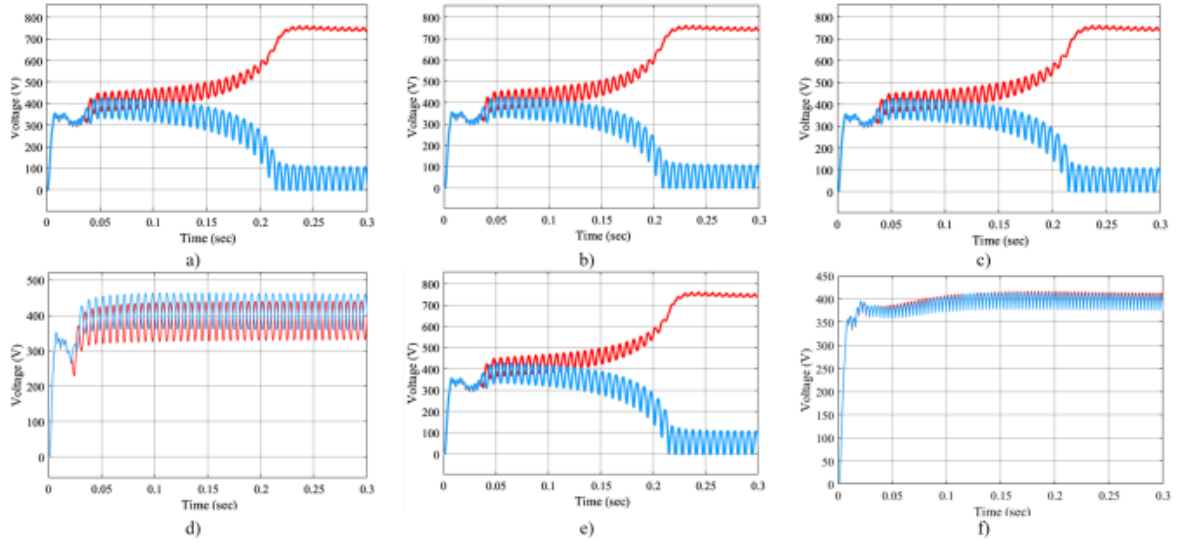


Şekil 60. Farklı TS tabanlı modülasyon teknikleri ile gerçekleştirilen doğrultucunun 50 kW-300kW arasındaki güç değerlerine bağlı olarak AA terminal akımının THB'sinin değişimi

Şekil 61 literatürde var olan taşıyıcılar ve önerilen taşıyıcı tabanlı modülasyon teknikleri ile gerçekleştirilen hızlı şarj sistemi için doğrultucu çıkışındaki kapasite dengeleri

gösterilmektedir. 300 kW gücündeki 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu ile gerçekleştirilen hızlı şarj sistemi TS1, TS2, TS3, TS5 ve TS6 için dengeleme yapmaz. Ancak TS4 tabanlı modülasyon tekniği kısa sürede kapasite dengesi sağlamaktadır. TS6 için dengede gibi görünse de TS6 verimlilik, THB, güç faktörü ve çıkış dalgalanmaları açısından tutarlı davranmamaktadır.

Kontrol edilemeyen yüksek akımlar güvenlik risklerini artırır. Tablo 14'te verilen kontrol parametreleri ve anahtarlama cihazları ile şarj sistemi 300 kW gücünde uygun şartlarda çalışmaktadır. 300 kW'ın üzerindeki güçler için değerlendirilen aynı şarj sistemi uygun standartları karşılamamaktadır. Yalnızca TS4, 300 kW için kabul edilebilir sınırlar içerisinde çalışır. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için kullanılan Tablo 14'te belirtilen tüm anahtarlara yönelik gerilim stresleri, anahtarların dayanabileceği sınırlardadır.



Şekil 61. Tüm taşıyıcı tabanlı DGM teknikleri için kapasite gerilim dengesi: a) TS1, b) TS2, c) TS3, d) TS4, e) TS5 ve f) TS6.

Önerilen TS4 tabanlı modülasyon tekniği, özellikle 300 kW gücündeki bir EA şarj istasyonu için başarılı sonuçlar sunmaktadır. 300 kW gücündeki şarj istasyonu için değerlendirilen TS tiplerine ilişkin gözlemler Tablo 16'da verilmektedir. Tablo detaylı incelendiğinde TS4 tabanlı modülasyon tekniği ile yapılan kontrol, diğer taşıyıcı tabanlı kontrol yöntemlerine göre daha optimum sonuçlar vermektedir.

Tablo 16. EA hızlı şarj cihazı için 300 kW 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için sayısal gözlem sonuçları

Parametre	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
$V_{dalgalanma}$	121,45	121,09	122,02	12,67	120,91	67,80
$I_{dalgalanma}$	56,93	56,77	57,20	5,94	56,68	31,78
THB	3,32	3,45	3,37	0,23	3,36	5,24
Verim (%)	84,86	84,89	84,84	86,61	84,85	83,98
GF	0,9997	0,9997	0,9997	1	0,9997	0,963

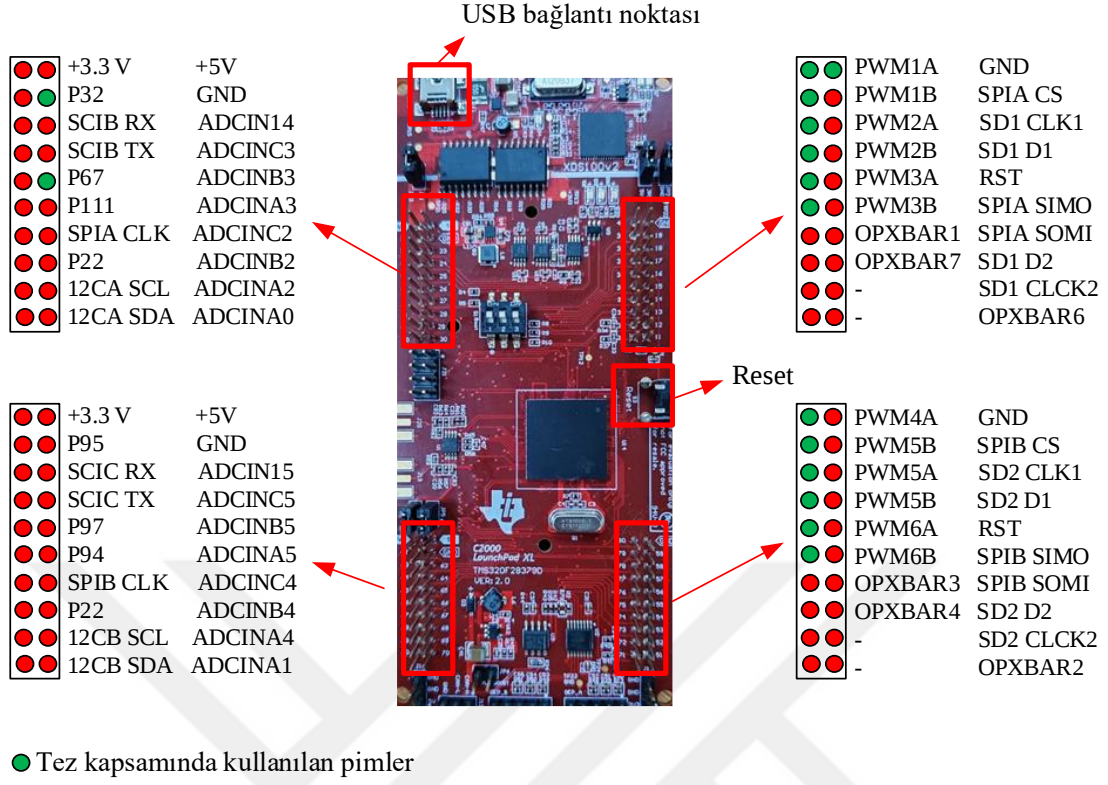
Literatürde elektrikli araç hızlı şarj cihazı için değerlendirilen diğer üç fazlı AA/DA GFD doğrultucular incelendiğinde üç fazlı diyot kenetlemeli güç faktörü düzelten doğrultucunun yarı iletken malzeme sayısı yüksektir. Ancak bu doğrultucu güç faktörü düzelten özellik gösterdiğinden ekstra bir GFD devresine ihtiyaç duymaz. Doğrultucu devresindeki eleman sayısının fazla olması kontrol karmaşıklığına neden olur. Ancak ekstra bir GFD devresinin bulunmaması ve yarı iletkenleri üzerindeki gerilim streslerinin düşük olması yüksek güçlü uygulamalar için avantajlıdır. Önerilen değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı DGM tekniği, EA hızlı şarj cihazları için güç faktörü, verimli güç kullanımı ve şarj cihazının şebekeye uyumluluğu açısından başarılı sonuçlar vermektedir. Önerilen yöntemle şarj cihazları için değerlendirilen 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu, hızlı şarj altyapısını desteklemektedir. Önerilen yeni değiştirilmiş taşıyıcı sinyal farklı güç elektroniği devreleri ile test edilebilir. Hızlı şarj için değerlendirilen farklı AA/DA doğrultuculara da uygulanabilir. Mevcut sistem için kontrol parametreleri optimize edilerek sistem mevcut durumundan daha da iyileştirilebilir. Bu, hızlı şarj cihazları gibi yüksek güçlü uygulamalar için gelecekte potansiyel bir gelişmedir. Bu çalışmada istenilen sonuca ulaşmak için taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı modülasyon teknikleri hızlı şarj cihazında kullanılmak üzere değerlendirilen üç fazlı diyot kenetlemeli doğrultucuya uygulanmaktadır. Üçgen sinyalden türetilen önerilen seviye kaydırmalı taşıyıcının (TS4) ele alınan doğrultucu için etkili olduğu görülmektedir. 300 kW nominal güçteki doğrultucu için birçok değiştirilmiş taşıyıcı sinyalden çok daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir. Anahtarlama frekansı aynı olmasına rağmen kullanılan TS tipine bağlı olarak dönüştürücü verimliliği, sistem harmonikleri, gerilim ve akım dalgalanmasının 300 kW'ta öne çıktığı görülmektedir. Bu çalışmanın bulguları, elektrikli araçlara yönelik araç dışı şarj çözümlerinin araştırılması ve geliştirilmesi için ilham kaynağıdır. Önerilen yöntemle şarj edilmesi değerlendirilen 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu, hızlı şarj altyapısını desteklemektedir.

4.2. Deneysel Çalışmalar

Elektrikli araçların hızlı şarj sistemi için değerlendirilen 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için yapılan deneysel çalışmalar, 3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMIKRON Güç Modülü ile gerçekleştirilmektedir. Bu güç modülü açık çevrim kontrol yöntemi ile test edilmektedir. Güç modülü üzerinde doğrultucu anahtarları ve bu anahtarların sürücüleri bulunmaktadır. F28379D DSP Uygulama Geliştirme Kartı ile anahtarlara uygun DGM işaretleri gönderilmektedir. Bu kısımda önerilen yeni modifiyeli hibrit frekanslı SK-DGM tekniği için geliştirilen yazılım anlatılmaktadır. Daha sonra SEMIKRON firmasının çok seviyeli dönüştürücü olarak tasarladığı güç modülü tanıtılmaktadır. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için yeni modifiyeli hibrit frekanslı modülasyon tekniği açık çevrim kontrol yöntemi ile gerçekleştirilerek bu doğrultucunun hızlı şarj sistemi için yeni teknik ile uygulanabilirliği bu kısımda gösterilmektedir.

4.2.1. F28379D DSP Uygulama Geliştirme Kartı ile Yeni Modifiyeli DGM Tekniği İçin Yazılım Geliştirilmesi

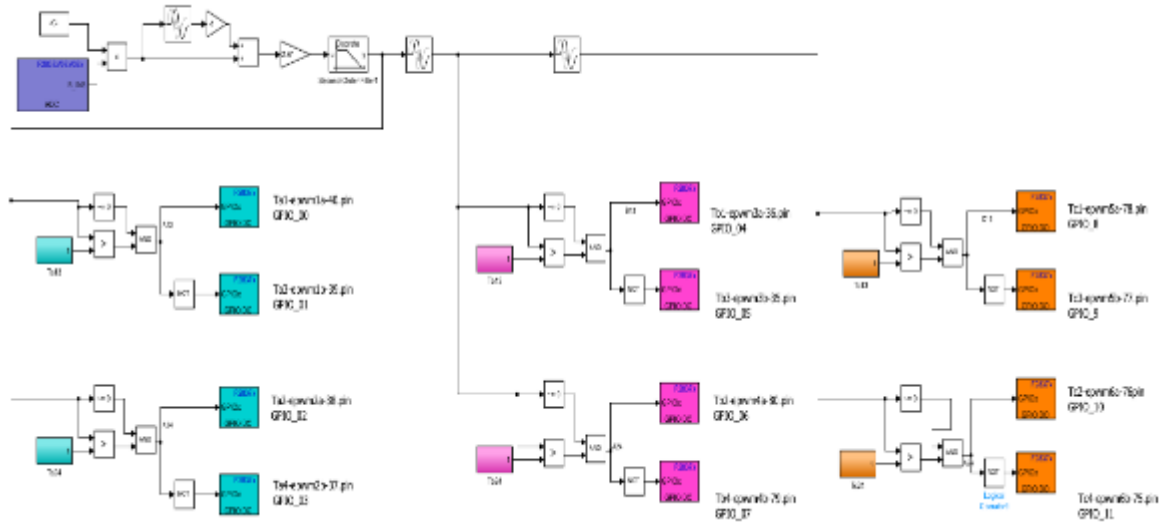
C2000™ LAUNCHXL-F28379D LaunchPad™, Texas Instruments Delfino™ F2837xD serisinin düşük maliyetli geliştirme kartlarından biridir. LAUNCHXL-F28379D kiti, F2837xD mikroişlemcisini temel alan uygulamalar geliştirmek için gerekli tüm donanım ve yazılımı içerir. Bu LaunchPad, F28379D cihazını temel alır ve ana bilgisayara UART seri bağlantısı sağlar. Özellikle güç elektroniği ve endüstriyel elektronik uygulamalarında kullanılmaktadır. MATLAB/Simulink üzerinden kolayca kontrol edilebildiğinden karmaşık sistemlerin kontrolünü oldukça kolaylaştırmaktadır. TMS320F28379D LaunchPad işlemcisinin genel görünümü ve temel pin özellikleri Şekil 62’de verilmektedir (URL-4, 2023).



Şekil 62. TMS320F28379D DSP kontrol kartı ve kullanılan çıkış pinleri

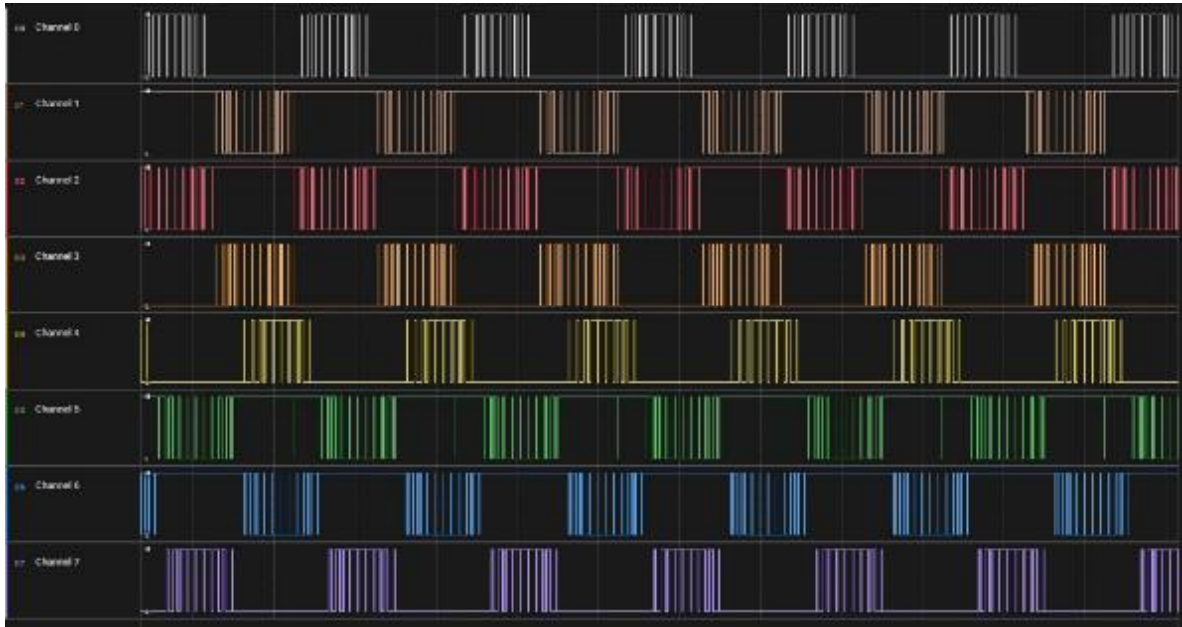
TMS320F28379D kartı C2000 Delfino serisine ait 200 MHz çalışma hızındadır. Code Composer Studio IDE desteği, DesignDRIVE platform desteği, PowerSUITE yazılım desteği, MathWorks Gömülü hedef desteği ve ControlSUITE yazılım desteğine sahiptir. 12 adet PWM çıkışına sahiptir. 12-bit ADC girişine sahip olup 0 – 3V aralığında gerilim girişine izin verir.

Deneyisel çalışmada kullanılan 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun anahtarlama işaretlerinin elde edilmesi için için TMS320F28379D LaunchPad ile MATLAB/Simulink yazılımından faydalanılmıştır. Şekil 63'te, anahtarlama işaretlerinin elde edilmesi için tasarlanan MATLAB/Simulink arayüzü verilmektedir.



Şekil 63. Deneyisel çalışmada kullanılan 30-3S diyet kenetlemeli GFD doğrultucunun anahtarlama işaretlerinin elde edilmesi için tasarlanan uygulama arayüzü

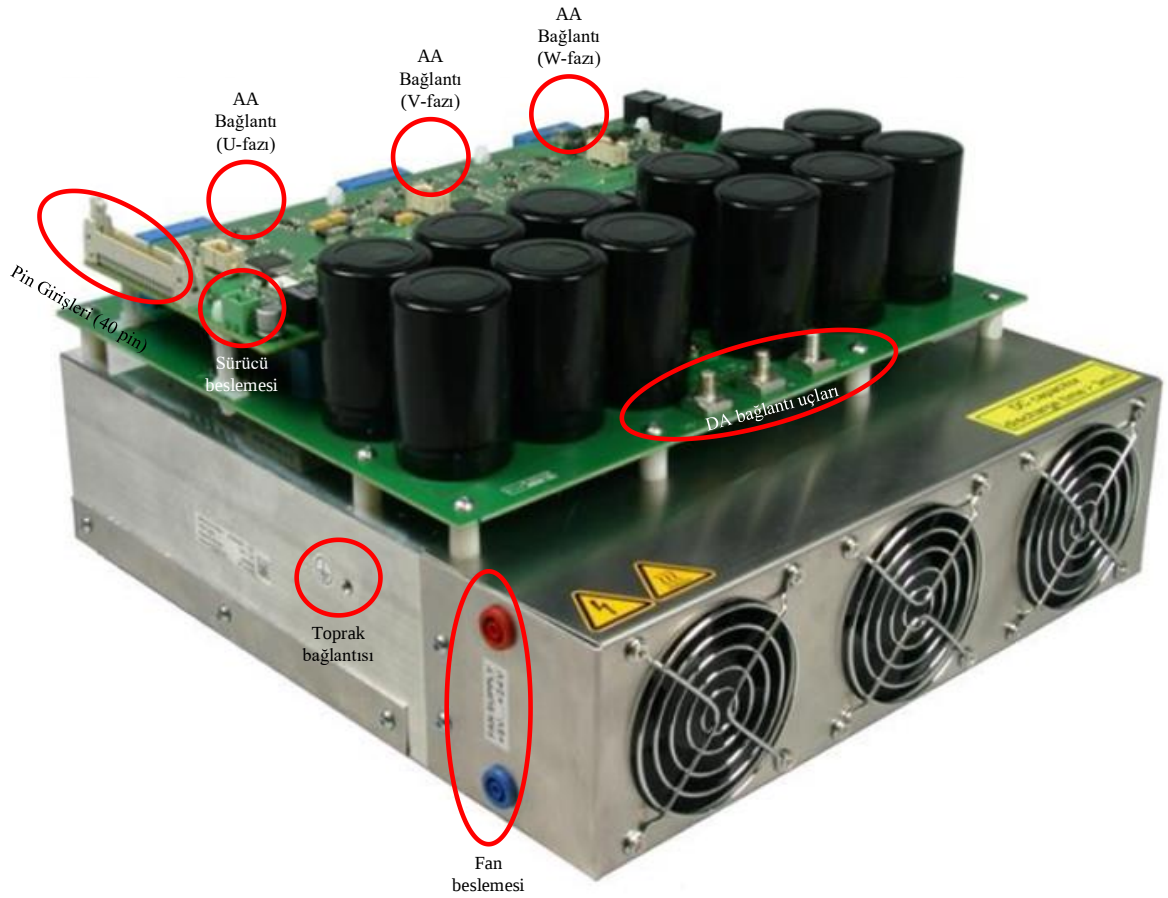
Şekil 64'te ise tasarlanan arayüz sonucunda GPIO uçlarında elde edilen anahtarlama işaretlerini göstermektedir. A ve B fazlarına ait olan anahtarlama işaretleri 8 kanallı dijital lojik analizör ile görülmüştür.



Şekil 64. Anahtarların yeni modifiyeli seviye kaydırmalı DGM yöntemi ile oluşturulmuş işaretlerinin 8 kanallı lojik analizör ile elde edilen görüntüsü

4.2.2. Üç Fazlı Üç Seviyeli 3L-SkiiP28MLI07E3V1 SEMİKRON Güç Modülü

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan SEMİKRON marka, üç seviyeli, nötr nokta kenetlemeli evirici tanıtılmaktadır. Üç fazlı üç seviyeli 3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMİKRON Güç Modülüne ait genel görünüm Şekil 65'te sunulmaktadır. Burada güç terminallerinin konumu, AA şebeke U, V, W girişleri ile DA+, N, DA- ve toprak bağlantıları gösterilmektedir. Ayrıca sürücü beslemeleri, fan beslemesi ve 40 pinli kontrol arayüzü de gösterilmiştir.



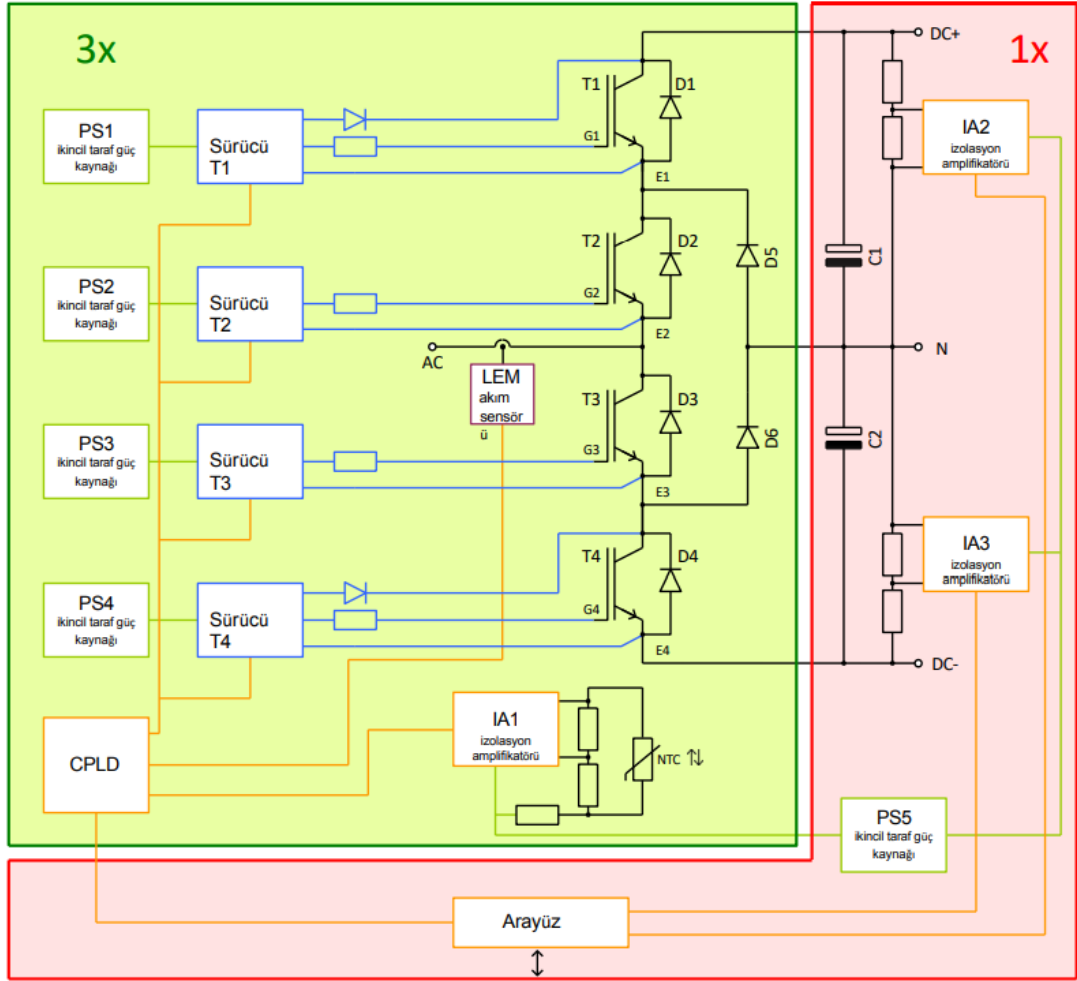
Şekil 65. Üç fazlı üç seviyeli 3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMİKRON güç modülü

Bu modül, 750 V DA bara gerilimi ve maksimum 100 A etkin akım taşıyabilmektedir. Bu kompakt modülün Şekil 66'da bir fazına ait blok şeması verilmektedir. Şekil 66'da yeşil işaretli kısım örnek olarak eviricinin üç fazlı bacaklarından birini göstermektedir. Bu güç modülü sürücü devrelerini, IGBT başına galvanik olarak izole edilmiş güç kaynaklarını,

akım sensörü, sıcaklık ölçümü ve doğru anahtarlama modelini, doğru açma ve kapatma sıralarını hesaba katan programlanabilir bir cihaz gibi gerekli tüm devreleri devralır.

Bu güç modülünün sahip olduğu başlıca fonksiyonlar şu şekilde sıralanabilir:

- AA faz akımı ölçümü ve aşırı akım koruması
- Modül sıcaklık ölçümü ve aşırı sıcaklık koruması
- DA-bara gerilim ölçümü ve aşırı gerilim koruması
- Desatürasyon algılama ve koruma devresi



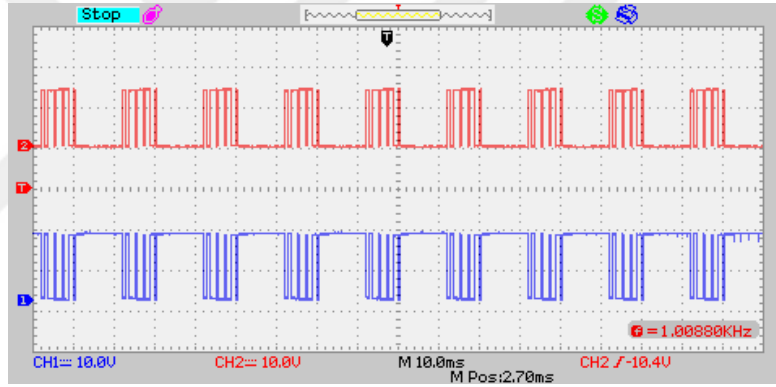
Şekil 66. 3L-SKüP28MLI07E3V1 SEMIKRON güç modülünün bir fazına ait blok şeması

Şekil 66’da bir fazına ait blok şeması verilen güç modülünün teknik elektriksel özellikleri Tablo 17’de özetlenmektedir (URL-5, 2023). Şekil 66’da ki sarı alan her bir faz için geçerlidir. Pembe alanda 680 μ F değerinde 12 adet kapasiteler bulunmaktadır.

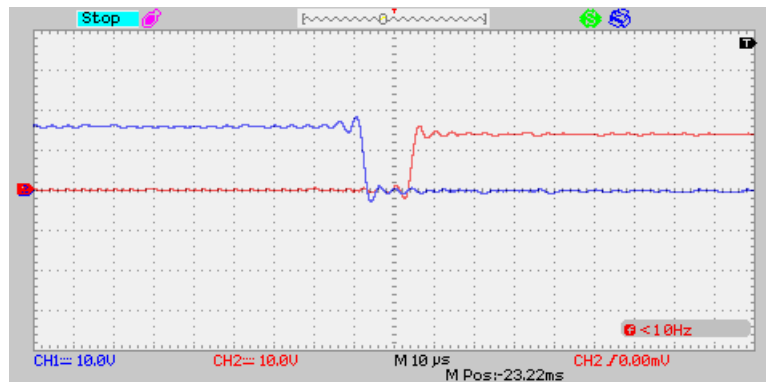
Tablo 17. 3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMIKRON güç modülünün teknik özellikleri

Parametre	Değer
Maksimum DA bağlantı gerilimi	750 V
Maksimum AA gerilimi	480 V
Maksimum AA akım	100 A (etkin)
Maksimum anahtarlama frekansı	20 kHz
Ortam sıcaklığı	0° C - 40° C
Benzetim örnekleme süresi	5e-7 (sn)

3L-SKiiP28MLI07E3V1 SEMIKRON güç modülünde, tüm ölü zamanlar 3µs olarak ayarlanmıştır. Kullanıcılar, bu ölü zaman değerinden daha yüksek değerleri kendileri ayarlayabilmektedir. Bu tez çalışmasında anahtarlama sinyalleri arasındaki ölü zaman değeri 3µs olarak ayarlanmıştır. Güç modülünün sürücü devreleri çalıştırıldıktan sonra IGBT tetikleme uçlarına iletilen anahtarlama işaretlerine ait görüntü Şekil 67’de gösterilmektedir.



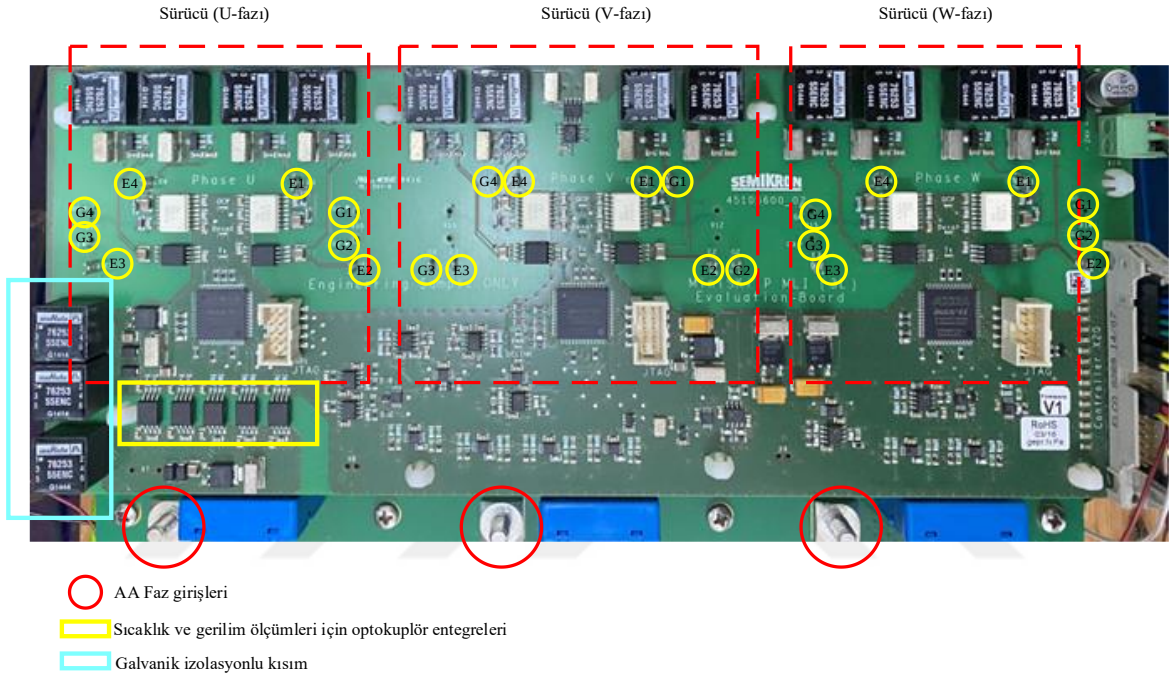
a)



b)

Şekil 67. a) IGBT tetikleme uçlarına iletilen anahtarlama işaretlerine ait görüntü b) Ta1 ve Ta3 anahtarlarının işaretleri arasındaki ölü zaman gösterimi

Şekil 68’de bu çalışmada kullanılan güç modülünün üst kısmında bulunan sürücü bölümü verilmektedir. Sürücü kısmı, çeşitli fonksiyonel gruplara ayrılabilir: U, V ve W fazlarının sürücü aşamaları için bölümlendirilmiştir. Sürücü kısmı çeşitli gerilim düzenleyicileri ve işlemsel yükselteçleri de devralır. Ayrıca üç fazlı ayakların tüm IGBT’lerinin kapı ve emitör potansiyelleri için ölçüm noktaları sunar. Bu noktaların konumu Şekil 68’de sol kısımda vurgulanmıştır.



Şekil 68. Güç modülü sürücü kartı

Bu güç modülüne ait sürücü 24 VDA beslenme gerilimine sahip olup, maksimum 1 Ampere dayanabilmektedir. Aynı şekilde 1 amperlik akıma dayanabilen fan beslemesi ise 5 -24 VDA değerleri arasında çalışabilmektedir. Tablo 18’de 40 pinli kontrol arayüzünün yalnızca 16 pini için gerekli anahtarlama işaretlerinin konumu verilmektedir.

Tablo 18. 40 pinli kontrol arayüzünün tez kapsamında kullanılan 16 adet pini

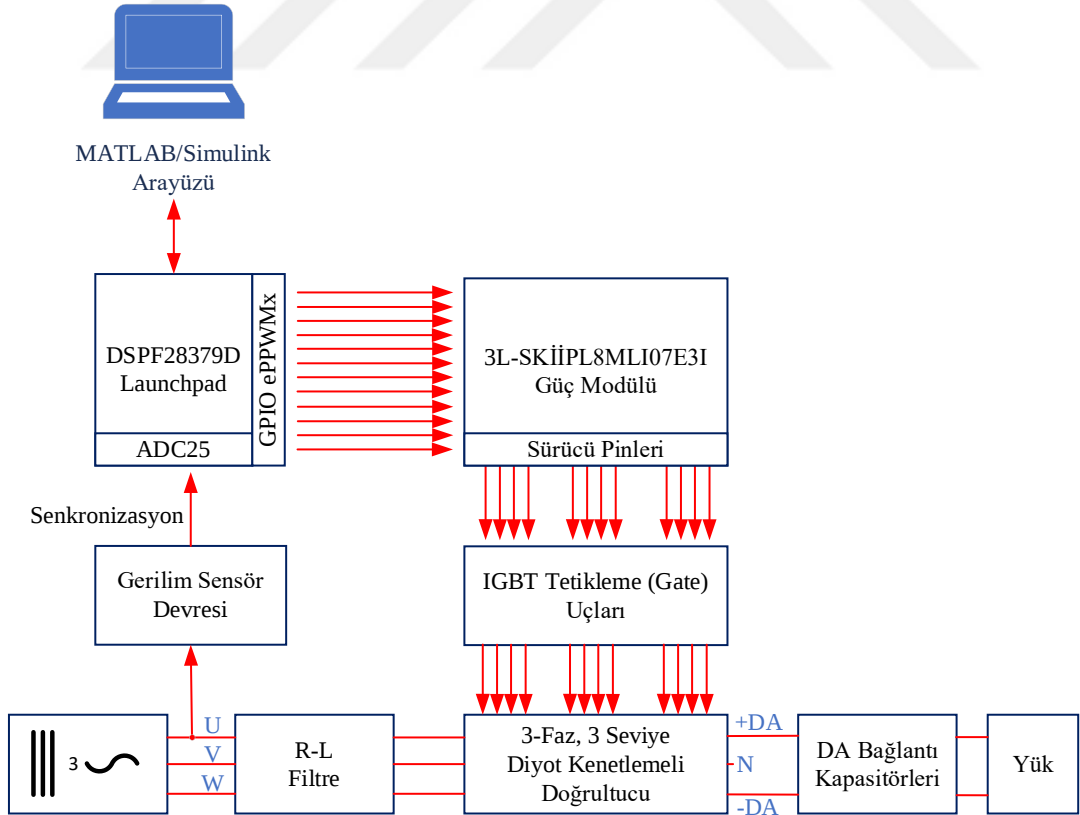
Pin	Sinyal	Tanım	Gerilim Seviyesi
1	GND	Toprak	0
2	T1-Faz-A	A fazına ait T1 anahtarlama işareti	Kesimde= 0 V İletimde= $V_{ref} = 3,3 V$ $R_{in} = 12k\Omega / 1nF$
3	T2-Faz-A	A fazına ait T2 anahtarlama işareti	
4	T3-Faz-A	A fazına ait T3 anahtarlama işareti	
5	T4-Faz-A	A fazına ait T4 anahtarlama işareti	

Tablo 18'in devamı

6	GND	Toprak	0
7	T1-Faz-B	B fazına ait T1 anahtarlama işareti	Kesimde= 0 V İletimde= $V_{ref} = 3,3 V$ $R_{in} = 12k\Omega / 1nF$
8	T2-Faz-B	B fazına ait T2 anahtarlama işareti	
9	T3-Faz-B	B fazına ait T3 anahtarlama işareti	
10	T4-Faz-B	B fazına ait T4 anahtarlama işareti	
11	GND	Toprak	0
12	T1-Faz-C	C fazına ait T1 anahtarlama işareti	Kesimde= 0 V İletimde= $V_{ref} = 3,3 V$ $R_{in} = 12k\Omega / 1nF$
13	T2-Faz-C	C fazına ait T2 anahtarlama işareti	
14	T3-Faz-C	C fazına ait T3 anahtarlama işareti	
15	T4-Faz-C	C fazına ait T4 anahtarlama işareti	
16	GND	Toprak	0

4.2.3. Yeni Seviyeli Kaydırmalı Modifiye Edilmiş DGM Yönteminin Üç Fazlı Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Doğrultucu İçin Doğrulanması

Üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu için önerilen yöntemi test etmek üzere tez kapsamında tasarlanan sistemin genel blok şeması Şekil 69'da gösterilmektedir.



Şekil 69. DSP-tabanlı 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultuculu sistemin genel blok diyagramı

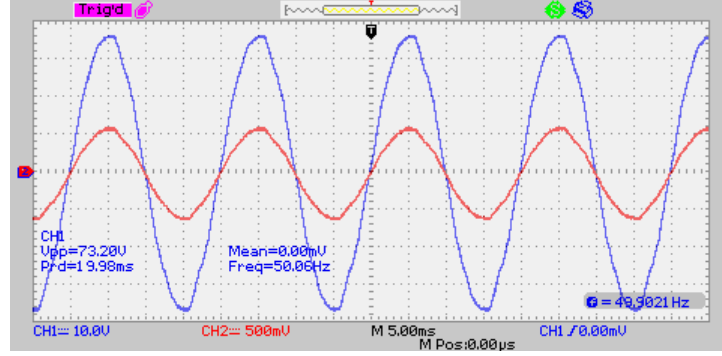
Şekil 69’da belirtilen blok diyagrama göre kurulan düzenek Şekil 71’de gösterilmektedir. Üç faz gerilim kaynağından beslenen sistem bir filtre ardından güç modülüne bağlanmaktadır. Üç fazlı gerilim kaynağının U fazı anahtarlama işaretlerinin senkronizasyonu için referans olarak kullanılmaktadır. U fazı bir gerilim bölücü ve gerilim sensör devreleri yardımıyla DSP’nin analog girişine bağlanır. Böylece her bir fazdaki 4 anahtar için anahtarlama işaretlerini oluşturmak için gerekli SDGM tekniğindeki referans sinüs gerilimler sağlanmış olur. F28379D DSP uygulama geliştirme kartı ile ADC girişlerine uygulanacak analog işaretin gerilim seviyesi $0 \sim +3\text{ V}$ aralığında olmalıdır. Bu nedenle, gerilim sensörlerinden gelen analog işaret $0 \sim +3\text{ V}$ aralığına ölçeklendirilmiştir. ADC girişleri için kullanılan gerilim bölücü sensörlerden oluşan devre yapısı, ölçüm sinyallerini işlemcinin okuyabileceği uygun seviyelere dönüştürür. Giriş gerilim seviyeleri sensör çıkışları dikkate alınarak tasarlanan bu devreler Şekil 70’te gösterildiği gibidir. Şekil 70 gerilim bölücü sensör devresini göstermektedir.



a)

Şekil 70. a) Gerilim bölücü sensör devresi, b) Sensör devresi giriş çıkış sinyalleri

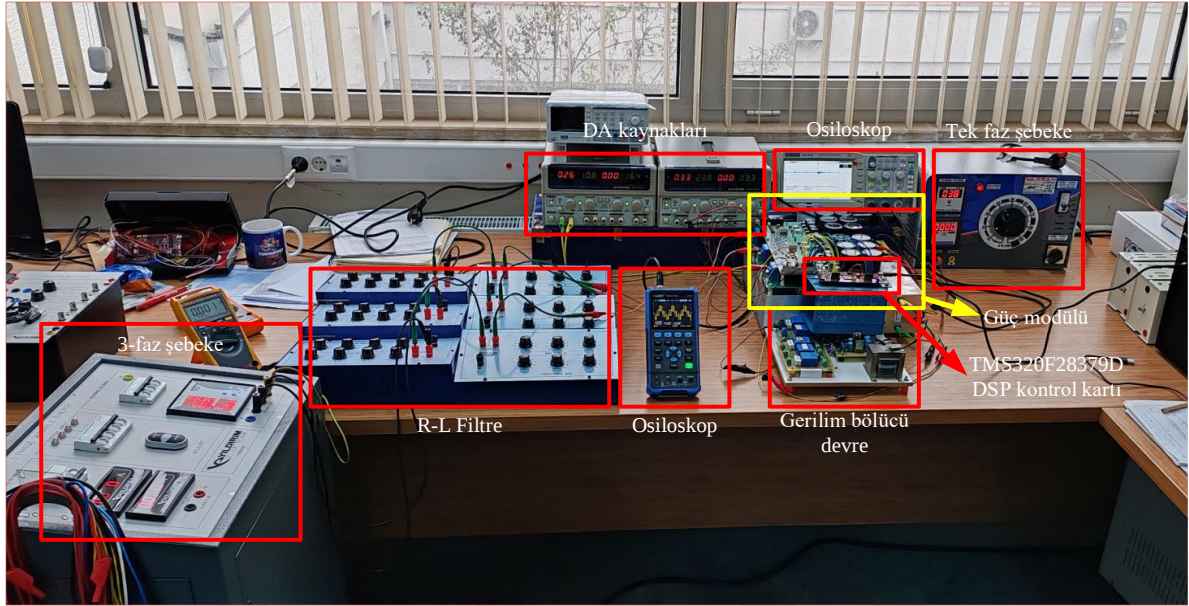
Şekil 70'in devamı



b)

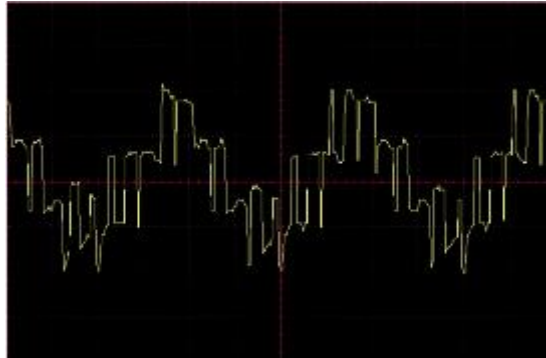
Şekil 70.b incelendiğinde sensör devresine uygulanan giriş işaretinin yaklaşık üçte biri çıkışta görülmektedir. Bu durum senkronizasyon sağlamak için referans alınan bir fazın mikroişlemcinin içerisine göndermek için önemlidir. DSP'nin ADC girişinden alınan işaret MATLAB/Simulink ara yüzünde 120° kaydırılarak diğer fazlardaki anahtarlar için de referanslar sağlanır. Bu senkronizasyon sayesinde besleme giriş gerilimlerindeki faz farkı takibi yapılabilir ve anahtarlama işaretleri için referans sinüs işaretleri de aynı faz ile sağlanmış olur. Benzetim ortamında oluşturulan anahtarlama işaretleri DSP'nin GPIO uçlarından kullanılan güç modülünün kontrol pinlerine bağlanır. Böylece modülün sürücü devresi IGBT'nin gate uçları için uygun gerilimde anahtarlama işaretleri sağlar. Doğrultucu uçlarındaki kapasite dengesinin sağlanması, giriş terminallerinde güç faktörünü 1'e yakın olduğunu görmek ve çıkış gerilim dalgalanmasının düşük olması önemlidir.

Şekil 71, 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için kurulan deney düzeneğini göstermektedir. Varyak 3-faz şebeke gerilimini yavaşça artırmak için kullanılmaktadır. Ardından filtre için R-L yük kutuları kullanılmaktadır. R ve L değerleri sırasıyla 120Ω ve 850 mH olarak alınmıştır. Filtreler çıkıştaki kapasite dengesi, DA dalgalanma faktörünü etkilemektedir. Filtre ile güç modülü girişinde üç seviye gerilim görülmektedir. Filtre ardından 3L-SKiiP28MLI07E3V1 evirici modülü bulunmaktadır. Modül üzerinde 40 pinli kontrol arayüzü vardır ve bu kısımdan güç modülü DSP mikroişlemcisi ile kontrol edilmektedir. Tek faz şebeke varyak kullanımı senkronizasyon için ele alınan gerilimi indirmek için kullanılmaktadır. Böylece sensör devresinin girişi sabit tutulmaktadır.



Şekil 71. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu deney düzeneği

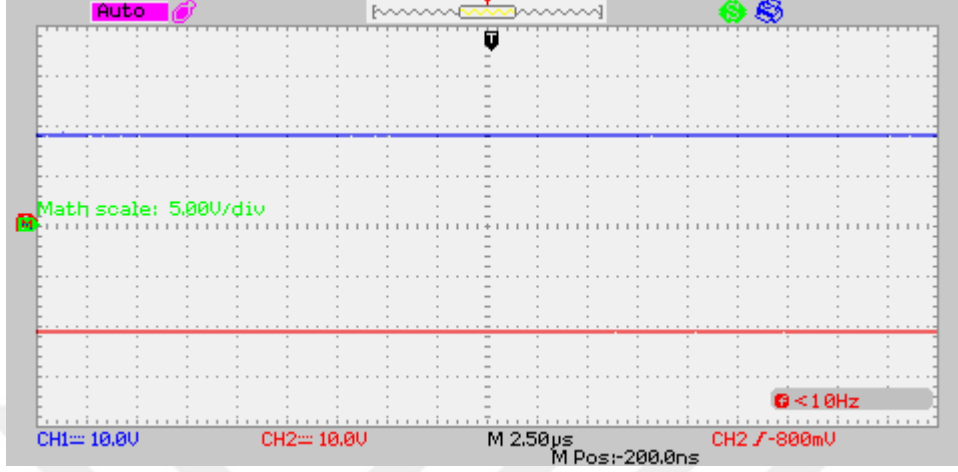
Şekil 72, filtreden sonra doğrultucu girişinde meydana gelen faz-faz arasındaki üç seviyeyi göstermektedir. Doğrultucu girişindeki önerilen modülasyon tekniği ile meydana gelen üç seviye filtre değerlerine bağlı olarak değişmektedir.



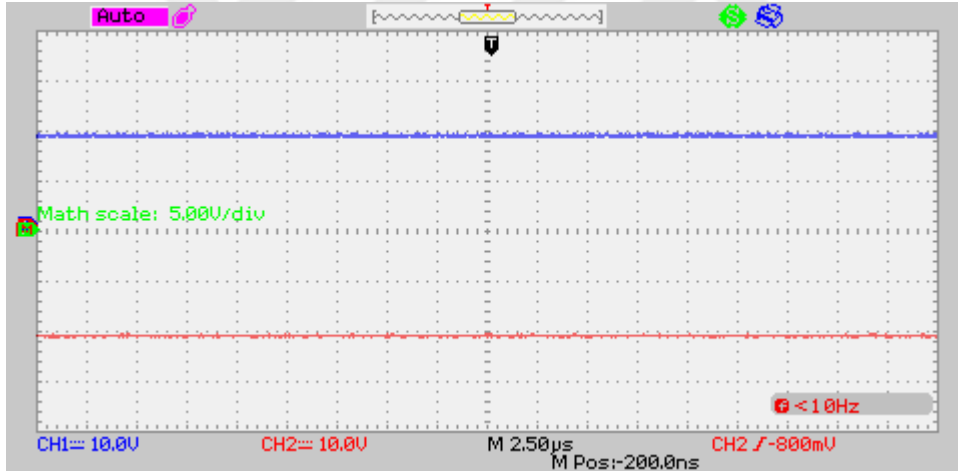
Şekil 72. 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun faz-faz arasında meydana gelen üç seviye

Şekil 73'te DA uçlarındaki gerilim dalgalanması görülmektedir. Sistemin klasik DGM yöntemine kıyasla daha az dalgalanma gösterdiği söylenebilir. Kapasite uçlarındaki her bir gerilim dalgalanması önerilen yöntem için daha düzgündür. Nötr nokta kilitlemeli devrenin üst kapasite ve alt kapasite gerilimleri klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi ile çalıştırılan

sistem için toplam DA gerilimi 39,5 V iken önerilen modülasyon tekniği ile yaklaşık 40.3 V değerindedir. %dalgalanma faktörü önerilen yöntem ile birlikte daha azdır.



a)

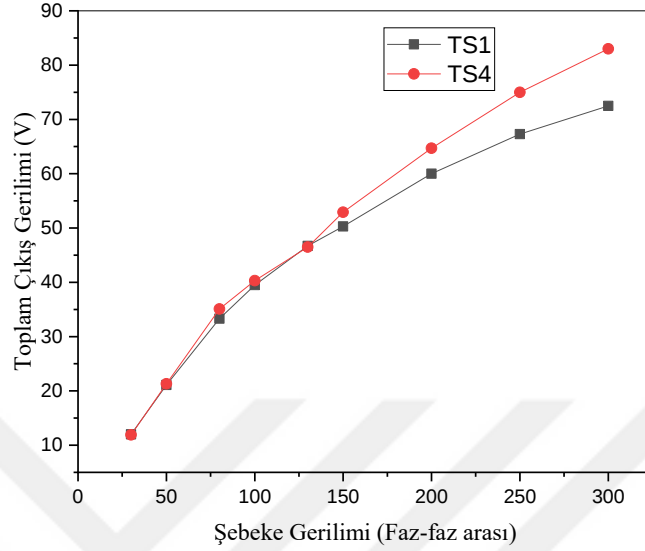


b)

Şekil 73. Nötr nokta kilitlemeli devrenin üst kapasite ve alt kapasite gerilimleri a) önerilen TS4 taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi b) klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi

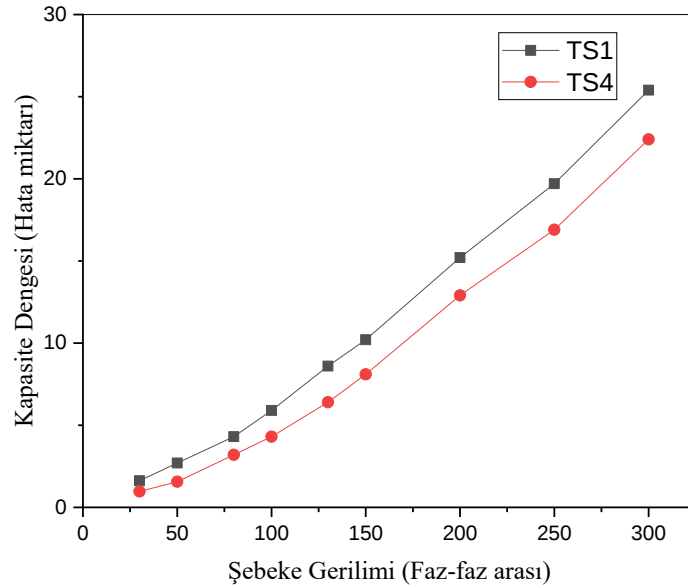
Şekil 74 incelendiğinde faz-nötr arası giriş gerilimi arttıkça önerilen modülasyon tekniği sayesinde çıkış gerilimi, girişten verilen aynı değerler için daha fazladır. Örneğin, varyaktan uygulanan 300 V değerindeki giriş gerilimi için yaklaşık 70 Volt DA çıkış sağlanırken önerilen yöntem ile birlikte çıkış gerilimi 80 Volt değerindedir. Aynı anahtarlama frekansı için sistem parametreleri tamamen aynı iken 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için önerilen modülasyon tekniği ile sonuçların daha başarılı olduğu

görülmektedir. Yüksek gerilim uygulamalarında anahtarlama frekansını değiştirmeden daha iyi bir gerilim sağlayabilmek önemlidir.



Şekil 74. Her iki modülasyon tekniği ile giriş gerilimine karşılık çıkış gerilim değişimi

Şekil 75, girişten verilen gerilime karşılık üst ve alt kapasite şarj gerilimleri arasındaki farkı göstermektedir. Kapasitelerin dengeli şarj durumunda bu farkın sıfır olması beklenir.



Şekil 75. Giriş gerilimine karşılık kapasite uçlarında meydana gelen gerilim farkı

Şekil 75 incelendiğinde önerilen modülasyon ile dengenin daha iyi sağlandığı kapasiteler arasında daha dengeli şarj olduğu söylenebilir. Yüksek gerilimlerde kapasite uçlarındaki gerilim farkı gittikçe artarken önerilen teknikle daha az arttığı söylenebilir.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçların hızlı şarj sistemi için 30-3S yüksek güç faktörlü diyot kenetlemeli AA/DA dönüştürücü için taşıyıcı tabanlı yeni bir DGM tekniği önerilmektedir. Önerilen yeni DGM tekniği, literatürdeki benzer teknikler ile karşılaştırılarak dönüştürücünün performansı benzetim ve deneysel çalışmalar ile değerlendirilmiştir.

MATLAB/Simulink ortamında yapılan ilk benzetim çalışmasında, 30-3S yüksek güç faktörlü diyot kenetlemeli AA/DA dönüştürücü, literatürde yaygın kullanıma sahip iki farklı izoleli DA-DA dönüştürücü ile simüle edilmiştir. Bu izoleli dönüştürücüler DA hızlı şarj cihazları için kullanılan FKTK ve ÇAK dönüştürücüleridir. Simülasyon sonuçlarına göre, 100 kW gücünde değerlendirilen doğrultucunun giriş akımının THB'si farklı yük koşulları altında %0,19 ile %5 arasında değişmektedir. Dönüştürücü anahtarlama frekansı, giriş akımı harmonikleri göz önünde bulundurularak 33 kHz olarak tahmin edilmiştir. Güç faktörü 0.995 ile 1 arasındadır. 800 Volt doğrultucu DA çıkış gerilimi ve 125 Amper DA çıkış akımı incelenmiştir. DA çıkış gerilimi dalgalanması ve DA akım dalgalanması %1'den azdır. Bu iki farklı DA şarj cihazı, ekstra bir GFD devresi olmadan yüksek güç seviyelerinde iyi performans gösterir ve 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun verimi %96'nın üzerindedir. Bu sonuçlar, önerilen doğrultucunun elektrikli araç DA şarj sistemleri için geçerli ve esnek olduğunu göstermektedir.

Benzetim ortamında yapılan ikinci çalışmada 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu yüksek güçlü uygulamalar için yeni seviye kaydırmalı modifiye edilmiş taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi ile değerlendirilmektedir. Doğrultucu analizi, yeni DGM tekniği kullanılarak simüle edilmiştir. Yeni DGM tekniğini kullanan doğrultucu, klasik üçgen taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu yeni DGM tekniği, düşük çıkış gerilim dalgalanması, giriş akımı için düşük toplam harmonik bozulma, birim giriş güç faktörü, iyi düzenlenmiş bir DA bara gerilimi ve kapasite gerilim dengesi sağlar. Önerilen bu değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı DGM, 75 kW ile 350 kW güç uygulamaları arasında derecelendirilen doğrultucu için normal taşıyıcı tabanlı DGM yöntemine kıyasla daha başarılıdır. Sistemin simülasyon sonuçları, özellikle 350 kW gücü gibi yüksek güçlü uygulamalarda 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucu için önerilen yeni taşıyıcı tabanlı

seviye kaydırmalı DGM yönteminin geçerliliğini ve esnekliğini göstermektedir. Yüksek güçlerde ele alınan doğrultucu IEEE standartlarına uygun çalışmaktadır.

Üçüncü benzetim çalışmasında, elektrikli araç hızlı şarj cihazları için 30-3S diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. EA hızlı şarj cihazları için güç faktörünün düzeltilmesi, verimli güç kullanımı ve şarj cihazının şebekeye uyumluluğu açısından çok önemlidir. Doğrultucu analizi, yeni değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı seviye kaydırmalı DGM tekniği kullanılarak kapsamlı simülasyonlarla test edilmiştir. Önerilen DGM tekniği, hızlı şarj sistemleri için ele alınan doğrultucu için %1'in altında gerilim regülasyonu, %5'in altında toplam harmonik bozulma, birim giriş güç faktörü ve iyi düzenlenmiş bir DA bara gerilimi sağlar ve sistem klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemine göre yüksek verimliliğe sahiptir. Sistem, özellikle kapasite gerilim dengesi gibi kritik parametrelerin ele alınmasında dikkate değer bir başarı göstermektedir. Bu değiştirilmiş taşıyıcı tabanlı DGM, DA hızlı şarj cihazları için tasarlanmış, 300 kW'a kadar güce sahip nötr nokta kilitlemeli doğrultucu için klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi ile gerçekleştirilmiş sisteme göre daha başarılıdır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen üçüncü çalışmada ise deneysel ortamda, ele alınan doğrultucunun standartlara uygun çalışabilmesi için yeni bir modifiye edilmiş taşıyıcı tabanlı hibrit frekanslı DGM yöntemi ile test edilmiştir. Önerilen yöntem için TMS320F28379D sayısal işaret işleyicisi kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem düşük güçte üç fazlı üç seviyeli 3L-SKiiP28MLI07E3V1 güç modülü üzerinde test edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda modifiye edilmiş seviye kaydırmalı hibrit frekanslı DGM yönteminin geçerliliği ve esnekliği vurgulanmıştır. Özellikle nötr noktanın üstünde ve altında kalan kapasiteler önerilen yöntem ile birlikte daha dengeli şarj olmuştur. Kapasite üzerindeki gerilim farkını hata miktarı olarak düşünürsek önerilen taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi ile test edilmiş sistem klasik taşıyıcı tabanlı DGM yöntemi ile çalıştırılan sisteme göre daha az hata miktarına sahiptir.

6. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçların hızlı şarj sistemi için üç fazlı üç seviyeli yüksek güç faktörlü diyot kenetlemeli AA/DA dönüştürücü için taşıyıcı tabanlı yeni bir DGM tekniği önerilmiştir. Önerilen modülasyon tekniği, klasik modülasyon teknikleri ile karşılaştırılarak, benzetim ve deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Önerilen modülasyon tekniği ile dönüştürücü sistemin performansını arttırmak için, sonraki çalışmalarda üzerine durulacak konular şu şekilde sıralanabilir:

- Dönüştürücünün sıcaklık ve termal analizleri yapılabilir.
- Önerilen modülasyon tekniği farklı GFD dönüştürücüler için de uygulanabilir.
- Optimizasyon algoritmaları kullanılarak kontrol yöntemleri önerilebilir.
- Sistem kapalı çevrim kontrol uygulaması ile gerçekleştirilebilir. Kayan mod, model öngörülü kontrol ve doğrudan güç kontrolü yapılabilir.
- Önerilen modülasyon tekniği kullanılarak test edilen üç fazlı üç seviyeli yüksek güç faktörlü diyot kenetlemeli AA/DA dönüştürücü için anahtarlama ve iletim kayıpları çeşitli yazılım programları (PSIM, PLECS vb.) ile analiz edilebilir.

Yüksek anahtarlama frekansı yüksek güçlü uygulama için istenilen bir durum değildir. Anahtarlama frekansı düşük tutularak anahtarların ilettime kesime geçiş oranlarını değiştirmek bir çözüm yaklaşımı olmaktadır. Ekstra Snubber devreleri irdelenebilir. Semikron güç modülü yerine SiC MOSFET doğrultuculu devreler daha verimli olabilir. Bu tezde bir yöntem önerilmekte ancak en optimum sonuçlar gösterilmemektedir. Bu sistem iyileştirilebilir. Anahtarlama frekansı artırılmadan kontrol parametreleri iyileştirilerek daha yüksek güçlere çıkmak standartları sağlamak mümkün olabilir. Bu tez, ultra hızlı şarj sistemleri için farklı hibrit türleri ve AA/DA yapılarını ayrıntılı irdelemeye teşvik eder. Öneriler doğrultusunda iyileşmeye açık, geliştirilebilirdir.

7. KAYNAKLAR

- Acharige, S.S.G., Haque, Md.E., Arif, M.T., Hosseinzadeh, N., Hasan, K.N. & Oo, A.M.T. (2023). Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations. *IEEE Access*, 11, 41218-41255. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3267164>
- Ahmed, A., Biswas, S.P., Anower, Md.S., Islam, Md.R., Mondal, S. & Muyeen, S.M. (2023). A Hybrid PWM Technique to Improve the Performance of Voltage Source Inverters. *IEEE Access*, 11, 4717-4729. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3235791>
- Akagi, H., Yamagishi, T., Tan, N.M.L., Kinouchi, S., Miyazaki, Y. & Koyama, M. (2015). Power-Loss Breakdown of a 750-V 100-kW 20-kHz Bidirectional Isolated DC–DC Converter Using SiC-MOSFET/SBD Dual Modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51 (1), 420-428. <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2331426>
- Andler, D., Kouro, S., Perez, M., Rodriguez, J. & Wu, B. (2009). Switching loss analysis of modulation methods used in neutral point clamped converters. *Proceedings of 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, USA, Eylül 2009. 2565-2571. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316040>
- Aretxabaleta, I., De Alegría, I.M., Andreu, J., Kortabarria, I. & Robles, E. (2021). High-Voltage Stations for Electric Vehicle Fast-Charging: Trends, Standards, Charging Modes and Comparison of Unity Power-Factor Rectifiers. *IEEE Access*, 9, 102177-102194. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093696>
- Barth, C.B., Foulkes, T., Azofeifa, O., Colmenares, J., Coulson, K., Miljkovic, N. & Pilawa-Podgurski, R.C.N. (2020). Design, Operation, and Loss Characterization of a 1-kW GaN-Based Three-Level Converter at Cryogenic Temperatures. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35 (11), 12040-12052. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2989310>
- Bhat, A.H. & Agarwal, P. (2008). Three-phase, power quality improvement ac/dc converters. *Electric Power Systems Research*, 78 (2), 276-289. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.02.002>
- Burnham, A., Dufek, E.J., Stephens, T., Francfort, J., Michelbacher, C., Carlson, R.B., Zhang, J., Vijayagopal, R., Dias, F., Mohanpurkar, M., Scofield, D., Hardy, K., Shirk, M., Hovsopian, R., Ahmed, S., Bloom, I., Jansen, A.N., Keyser, M., Kreuzer, C., Markel, A., Meintz, A., Pesaran, A. & Tanim, T.R. (2017). Enabling fast charging – Infrastructure and economic considerations. *Journal of Power Sources*, 367, 237-249. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.06.079>
- Buticchi, G., Barater, D., Lorenzani, E., Concari, C. & Franceschini, G. (2014). A Nine-Level Grid-Connected Converter Topology for Single-Phase Transformerless PV Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (8), 3951-3960. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2286562>
- Carrara, G., Gardella, S., Marchesoni, M., Salutati, R. & Sciutto, G. (1992). A new multilevel PWM method: a theoretical analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 7 (3), 497-505. <https://doi.org/10.1109/63.145137>
- Chen, W., Rong, P. & Lu, Z. (2010). Snubberless Bidirectional DC–DC Converter With New CLLC Resonant Tank Featuring Minimized Switching Loss. *IEEE*

- Transactions on Industrial Electronics*, 57 (9), 3075-3086. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2037099>
- Chitra, S. & Valluvan, K.R. (2020). Design and implementation of cascaded H-Bridge multilevel inverter using FPGA with multiple carrier phase disposition modulation scheme. *Microprocessors and Microsystems*, 76, 103108. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103108>
- Cho, J.-G., Baek, J.-W., Jeong, C.-Y. & Rim, G.-H. (1999). Novel zero-voltage and zero-current-switching full-bridge PWM converter using a simple auxiliary circuit. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35 (1), 15-20. <https://doi.org/10.1109/28.740840>
- Christen, D., Jauch, F. & Biela, J. (2015). Ultra-fast charging station for electric vehicles with integrated split grid storage. *Proceedings of 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, Geneva, Switzerland, Eylül 2015. 1-11. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7309322>
- Coccia, A., Canales, F., Barbosa, P. & Ponnaluri, S. (2007). Wide input voltage range compensation in DC/DC resonant architectures for on-board traction power supplies. *Proceedings of 2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, Eylül 2007. 1-10. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417709>
- Cui, D. & Ge, Q. (2018). A Novel Hybrid Voltage Balance Method for Five-Level Diode-Clamped Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (8), 6020-6031. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2784399>
- Dahidah, M.S.A., Konstantinou, G. & Agelidis, V.G. (2015). A Review of Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM: Formulations, Solving Algorithms, Implementation and Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30 (8), 4091-4106. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2355226>
- Deb, N., Singh, R., Brooks, R.R. & Bai, K. (2021). A Review of Extremely Fast Charging Stations for Electric Vehicles. *Energies*, 14 (22), 7566. <https://doi.org/10.3390/en14227566>
- Du, Y., Lukic, S., Jacobson, B. & Huang, A. (2011). Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure. *Proceedings of 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, USA, Eylül 2011. 553-560. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6063818>
- Elrajoubi, A.M., Ang, S.S. & George, K. (2019). Design and Analysis of a New GaN-Based AC/DC Converter for Battery Charging Application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55 (4), 4044-4052. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2915687>
- Friedli, T., Hartmann, M. & Kolar, J.W. (2014). The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part II. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29 (2), 543-560. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2258472>
- G, S. & K P, G. (2023). Performance Analysis of PWM Rectifier as Charger for Electric Vehicle Application. *Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS)*, Raichur, India, Şubat 2023. 1-7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICACS57338.2023.10100040>
- Garcia, O., Zumel, P., de Castro, A. & Cobos, A. (2006). Automotive DC-DC bidirectional converter made with many interleaved buck stages. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21 (3), 578-586. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.872379>
- Gou, Y., Zhuo, F., Wang, F., Yu, K., Zhan, C. & Xia, B. (2023). Lifetime Estimation of SiC Power Modules in DAB Converter Over Wide-Load Range Considering the

- Temperature-Dependent Characteristic. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2023.3313492>
- Guo, A., Peng, X., Zhou, Y., He, X. & Shu, Z. (2015). The modulation techniques in 3L-NPC cascade converter. *Proceedings of 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, Taipei, Kasım 2015. 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IFEEEC.2015.7361451>
- Habib, S., Khan, M.M., Abbas, F. & Tang, H. (2018). Assessment of electric vehicles concerning impacts, charging infrastructure with unidirectional and bidirectional chargers, and power flow comparisons. *International Journal of Energy Research*, 42 (11), 3416-3441. <https://doi.org/10.1002/er.4033>
- He, P. & Khaligh, A. (2017). Comprehensive Analyses and Comparison of 1 kW Isolated DC-DC Converters for Bidirectional EV Charging Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3 (1), 147-156. <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2630927>
- Huber, J.E., Miniböck, J. & Kolar, J.W. (2018). Generic Derivation of Dynamic Model for Half-Cycle DCM Series Resonant Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33 (1), 4-7. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2703300>
- Islam, R., Rafin, S.M.S.H. & Mohammed, O.A. (2023). Comprehensive Review of Power Electronic Converters in Electric Vehicle Applications. *Forecasting*, 5 (1), 22-80. <https://doi.org/10.3390/forecast5010002>
- Jeyapradha, R.B., Rajini, V. & Vikram, A.S. (2023). Design and Implementation of Active PFC Rectifier Topology for Avionic and Fleet Electrification. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 47 (4), 1405-1416. <https://doi.org/10.1007/s40998-023-00636-3>
- Jung, J.-H., Ku, H.-K., Son, Y.-D. & Kim, J.-M. (2019). Open-Switch Fault Diagnosis Algorithm and Tolerant Control Method of the Three-Phase Three-Level NPC Active Rectifier. *Energies*, 12 (13), 2495. <https://doi.org/10.3390/en12132495>
- Kang, T., Kim, C., Suh, Y., Park, H., Kang, B. & Kim, D. (2012). A design and control of bi-directional non-isolated DC-DC converter for rapid electric vehicle charging system. *Proceedings of 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Şubat 2012. 14-21. <https://doi.org/10.1109/APEC.2012.6165792>
- Kefeng, L., Fei, X., Jilong, L., Zhiqin, M., Chuanqiang, L., Shan, G. & Kangzhuang, F. (2023). Space Vector Pulse Width Modulation Strategy for ANPC-5L Inverter based on Model Predictive Control. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2023.3257572>
- Khaligh, A. & D'Antonio, M. (2019). Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68 (4), 3306-3324. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2897050>
- Khaligh, A. & Dusmez, S. (2012). Comprehensive Topological Analysis of Conductive and Inductive Charging Solutions for Plug-In Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61 (8), 3475-3489. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2213104>
- Kilicoglu, H. & Tricoli, P. (2023). Technical Review and Survey of Future Trends of Power Converters for Fast-Charging Stations of Electric Vehicles. *Energies*, 16 (13), 5204. <https://doi.org/10.3390/en16135204>
- Kim, M.-H., Park, J.-W. & Kim, M. (2023). Bridgeless Filterless Neutral-Point-Clamped Resonant AC/DC Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70 (9), 8895-8906. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3206751>

- Kolar, J.W. & Friedli, T. (2011). The essence of three-phase PFC rectifier systems. *Proceedings of 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Amsterdam, Netherlands, Ekim 2011. 1-27. IEEE. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2011.6099838>
- Kouro, S., Perez, M., Robles, H. & Rodriguez, J. (2008). Switching loss analysis of modulation methods used in cascaded H-bridge multilevel converters. *Proceedings of 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece, Haziran 2008. 4662-4668. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESC.2008.4592703>
- Kumar, M.A. & Srikanth, N.V. (2013). A comparative study of SPWM and SVPWM controlled HVDC Light systems. *Proceedings of 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, Şubat 2013. 591-595. <https://doi.org/10.1109/ICPEC.2013.6527727>
- Kushwaha, R., Khadkikar, V. & Edpuganti, A. (2024). Electric Vehicle On-Board Fast Charging Through Converter Maximum Switch Utilization. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39 (1), 998-1014. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3321760>
- Kushwaha, R. & Singh, B. (2020). Interleaved Landsman Converter Fed EV Battery Charger With Power Factor Correction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56 (4), 4179-4192. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2988174>
- Lahooti Eshkevari, A. & Arasteh, M. (2017). Model-predictive Direct Power Control of three-phase three-level NPC PWM rectifier. *Proceedings of 2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, Şubat 2017. 78-83. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2017.7910394>
- Lee, G.-Y., Park, J.-S., Cho, S.-Y., Shin, W.-G. & Kim, J.-H. (2023). Design and implementation of 1000 V 20 kW power module for electric vehicle fast charger. *Journal of Power Electronics*, 23 (10), 1565-1575. <https://doi.org/10.1007/s43236-023-00691-3>
- Lee, I.-O. (2016). Hybrid DC–DC Converter With Phase-Shift or Frequency Modulation for NEV Battery Charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (2), 884-893. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2477345>
- Leon, J.I., Kouro, S., Franquelo, L.G., Rodriguez, J. & Wu, B. (2016). The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (5), 2688-2701. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2519321>
- Leon, J.I., Vazquez, S. & Franquelo, L.G. (2017). Multilevel Converters: Control and Modulation Techniques for Their Operation and Industrial Applications. *Proceedings of the IEEE*, 105 (11), 2066-2081. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2726583>
- Liu, K.-P., Orfanoudakis, G., Sharkh, S.M. & Cruden, A. (2023). Optimised Online Multi-Sine Battery Electrochemical Impedance Spectroscopy using a Three-Phase Neutral Point Clamped Converter. *Proceedings of 2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Chania, Greece, Ağustos 2023. 606-612. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SDEMPED54949.2023.10271462>
- Maheshwari, A.K., Mahar, M.A., Larik, A.S. & Soomro, A.H. (t.y.). Design and Analyses of Multi-Carrier Pulse Width Modulation Techniques for Double Level Circuit Based Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Design and Analyses of Multi-Carrier Pulse Width Modulation Techniques for Double Level Circuit Based Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter.

- Mallik, A. & Khaligh, A. (2015). Comparative study of three-phase buck, boost and buck-boost rectifier topologies for regulated transformer rectifier units. *Proceedings of 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Haziran 2015. 1-7. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2015.7165821>
- Manoj, V., Pilla, R. & Sura, S.R. (2023). A Comprehensive Analysis of Power Converter Topologies and Control Methods for Extremely Fast Charging of Electric Vehicles. *Journal of Physics: Conference Series*, 2570 (1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2570/1/012017>
- Mastoi, M.S., Zhuang, S., Munir, H.M., Haris, M., Hassan, M., Usman, M., Bukhari, S.S.H. & Ro, J.-S. (2022). An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. *Energy Reports*, 8, 11504-11529. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.011>
- Maswood, A.I. & Tafti, H.D. (2018). *Advanced Multilevel Converters and Applications in Grid Integration*. John Wiley & Sons.
- Mateen, S., Amir, M., Haque, A. & Bakhsh, F.I. (2023). Ultra-fast charging of electric vehicles: A review of power electronics converter, grid stability and optimal battery consideration in multi-energy systems. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 35, 101112. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101112>
- McGrath, B.P. & Holmes, D.G. (2002). Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49 (4), 858-867. <https://doi.org/10.1109/TIE.2002.801073>
- Meraj, M., Rahman, S., Iqbal, A. & Al Emadi, N. (2021). Novel Level Shifted PWM Technique for Unequal and Equal Power Sharing in Quasi Z-Source Cascaded Multilevel Inverter for PV Systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9 (1), 937-948. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2952206>
- Moeini, A., Zhao, H. & Wang, S. (2018). A Current-Reference-Based Selective Harmonic Current Mitigation PWM Technique to Improve the Performance of Cascaded H-Bridge Multilevel Active Rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (1), 727-737. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2630664>
- Mollahasanoglu, M., Mollahasanoglu, H. & Okumus, H.I. (2023). A New PWM Technique for Three-Phase Three-Level Neutral Point Clamped Rectifier. *Arabian Journal for Science and Engineering*,. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08312-8>
- Mollahasanoglu, M. & Okumuş, H. (2021). A Review of Three Phase AC-DC Power Factor Correction Converters for Electric Vehicle Fast Charging. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 663-669. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1041081>
- Monopoli, V.G., Alcaide, A.M., Bruno, L., Rendine, G., Leon, J.I., Liserre, M. & Franquelo, L.G. (2024). A Hybrid Modulation Technique for Operating Medium-Voltage High-Power CHB Converters Under Grid Voltage Disturbances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71 (1), 462-472. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3241246>
- Monteiro, V., Afonso, J., Sousa, T. & Afonso, J.L. (2020). The Role of Off-Board EV Battery Chargers in Smart Homes and Smart Grids: Operation with Renewables and Energy Storage Systems. İçinde: Ahmadian, A., Mohammadi-ivatloo, B., & Elkamel, A. (ed.) *Electric Vehicles in Energy Systems: Modelling, Integration, Analysis, and Optimization*. Springer International Publishing. 47-72. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34448-1_3
- Montero-Robina, P., Albea, C., Gómez-Estern, F. & Gordillo, F. (2023). Hybrid modeling and control of three-level NPC rectifiers. *Control Engineering Practice*, 130, 105374. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105374>

- Naik, N., Vyjayanthi, C. & Modi, C. (2023). Filter-Based Active Damping of DAB Converter to Lower Battery Degradation in EV Fast Charging Application. *IEEE Access*, 11, 74277-74289. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3295988>
- Nakakohara, Y., Otake, H., Evans, T.M., Yoshida, T., Tsuruya, M. & Nakahara, K. (2016). Three-Phase LLC Series Resonant DC/DC Converter Using SiC MOSFETs to Realize High-Voltage and High-Frequency Operation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (4), 2103-2110. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2499721>
- Özkop, E. (2022). Şebeke Bağlantılı Tek Fazlı Transformatörsüz Evirici için Modifiye Edilmiş Taşıyıcı Temelli DGM Kontrolü. *EMO Bilimsel Dergi*, 12 (2), 7-14
- Pahlevani, M., Pan, S. & Jain, P. (2016). A Hybrid Phase-Shift Modulation Technique for DC/DC Converters With a Wide Range of Operating Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (12), 7498-7510. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2593679>
- Palanisamy, R., Singh, M., Ramkumar, R., Usha, S., Thentral, T.M.T., & Kitmo (2023). Capacitor voltage unbalance minimization for three-phase five-level diode-clamped inverter using hexagonal hysteresis space vector modulation. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*,. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00238-w>
- Patel, N., Lopes, L.A.C., Rathore, A. & Khadkikar, V. (2023). A Soft-Switched Single-Stage Single-Phase PFC Converter for Bidirectional Plug-In EV Charger. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59 (4), 5123-5135. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3270387>
- Piasecki, S., Zaleski, J., Jasinski, M., Bachman, S. & Turzyński, M. (2021). Analysis of AC/DC/DC Converter Modules for Direct Current Fast-Charging Applications. *Energies*, 14 (19), 6369. <https://doi.org/10.3390/en14196369>
- Pourdadaashnia, A., Farhadi-Kangarlu, M., Tousi, B. & Sadoughi, M. (t.y.). SHM-PWM technique in a cascaded H-bridge multilevel inverter with adjustable DC-link for wide voltage range applications. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, n/a (n/a). <https://doi.org/10.1002/cta.3519>
- Poursafar, N., Taghizadeh, S., Hossain, M.J. & Blaabjerg, F. (2023). An enhanced control strategy for an ultra-fast EV charging station in a DC microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 146, 108727. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108727>
- Power Topology Considerations for Electric Vehicle Charging Stations (t.y.). <https://www.ti.com/lit/an/slla497/slla497.pdf> [2024-01-21]
- Praneeth, A.V.J.S. & Williamson, S.S. (2018). A Review of Front End AC-DC Topologies in Universal Battery Charger for Electric Transportation. *Proceedings of 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Long Beach, CA, USA, Haziran 2018. 293-298. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2018.8450186>
- Pulikanti, S.R., Konstantinou, G. & Agelidis, V.G. (2013). Hybrid Seven-Level Cascaded Active Neutral-Point-Clamped-Based Multilevel Converter Under SHE-PWM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (11), 4794-4804. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2218551>
- Rathore, V., Reddy, S.R.P. & Rajashekara, K. (2022). An Isolated Multilevel DC–DC Converter Topology With Hybrid Resonant Switching for EV Fast Charging Application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58 (5), 5546-5557. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3168504>

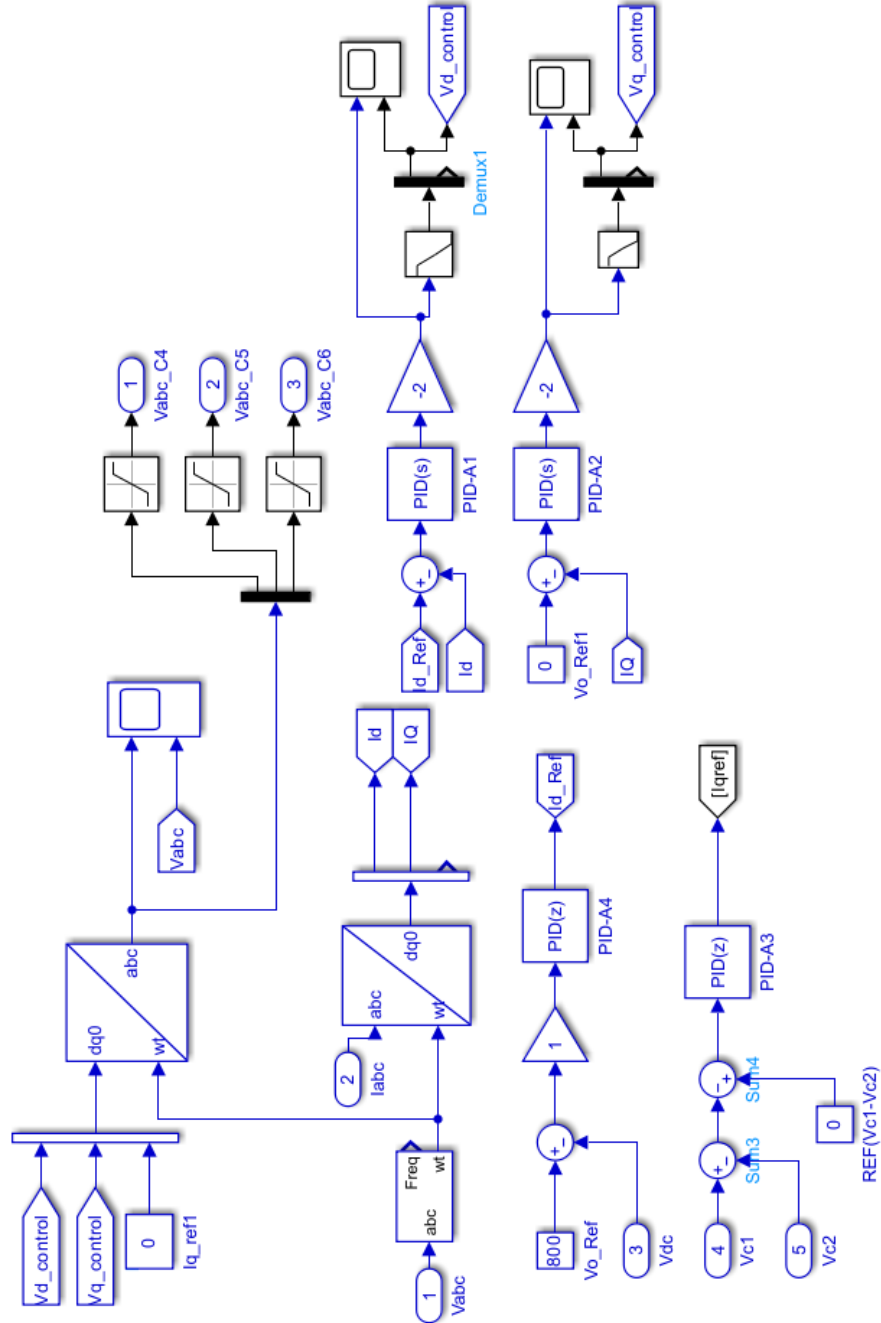
- Rubino, L., Capasso, C. & Veneri, O. (2017). Review on plug-in electric vehicle charging architectures integrated with distributed energy sources for sustainable mobility. *Applied Energy*, 207, 438-464. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.097>
- Saadaoui, A., Ouassaid, M. & Maaroufi, M. (2023). Overview of Integration of Power Electronic Topologies and Advanced Control Techniques of Ultra-Fast EV Charging Stations in Standalone Microgrids. *Energies*, 16 (3), 1031. <https://doi.org/10.3390/en16031031>
- Sabate, J.A., Vlatkovic, V., Ridley, R.B. & Lee, F.C. (1991). High-voltage, high-power, ZVS, full-bridge PWM converter employing an active snubber. *Proceedings of [Proceedings] APEC '91: Sixth Annual Applied Power Electronics Conference and Exhibition*, Dallas, TX, USA, Mart 1991. 158-163. IEEE. <https://doi.org/10.1109/APEC.1991.146157>
- Safayatullah, M., Elrais, M.T., Ghosh, S., Rezaii, R. & Batarseh, I. (2022). A Comprehensive Review of Power Converter Topologies and Control Methods for Electric Vehicle Fast Charging Applications. *IEEE Access*, 10, 40753-40793. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166935>
- Sagar, A., Kashyap, A., Nasab, M.A., Padmanaban, S., Bertoluzzo, M., Kumar, A. & Blaabjerg, F. (2023). A Comprehensive Review of the Recent Development of Wireless Power Transfer Technologies for Electric Vehicle Charging Systems. *IEEE Access*, 11, 83703-83751. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3300475>
- Sah, S. & Rizvi, T. (2021). Power quality improvement using shunt active filters with multilevel inverter. *International Journal for Research Trends and Innovation*, 6 (4), 115-120
- Shareef, H., Islam, Md.M. & Mohamed, A. (2016). A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 403-420. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.033>
- Sharma, D., Bhat, A.H., Ahmad, A. & Langer, N. (2018). Capacitor voltage balancing in neutral-point clamped rectifier using modified modulation index technique. *Computers & Electrical Engineering*, 70, 137-150. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.02.031>
- Singh, A.K. & Mandal, R.K. (2023). Switched-capacitor-based five-level inverter with closed-loop control for grid-connected PV application. *Computers and Electrical Engineering*, 108, 108686. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108686>
- Srdic, S. & Lukic, S. (2019). Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line. *IEEE Electrification Magazine*, 7 (1), 22-31. <https://doi.org/10.1109/MELE.2018.2889547>
- Suhara, E.M. & Nandakumar, M. (2015). Analysis of hysteresis current control techniques for three phase PWM rectifiers. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, Şubat 2015. 1-5. <https://doi.org/10.1109/SPICES.2015.7091434>
- Tan, L., Wu, B., Yaramasu, V., Rivera, S. & Guo, X. (2016). Effective Voltage Balance Control for Bipolar-DC-Bus-Fed EV Charging Station With Three-Level DC-DC Fast Charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (7), 4031-4041. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2539248>
- Tu, H., Feng, H., Srdic, S. & Lukic, S. (2019). Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5 (4), 861-878. <https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2958709>

- URL-1. (2023, Mart 01). EVO Report: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/adresinden alınmıştır>.
- URL-2. (2023, Aralık 20). SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler: https://saemobilus.sae.org/content/j1772_201710/adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2019, Ocak). TOGG T10X: <https://trumore-cdn.togg.cloud/ToggT10XKatalog.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-4.(2024, Ocak 21). LAUNCHXL-F28379D Development kit: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Ocak 21). SEMİKRON Technical Explanation 3L SKiiP28MLI07E3V1 Evaluation Inverter: <https://www.semikron-danfoss.com/de.html> adresinden alınmıştır.
- Upputuri, R.P. & Subudhi, B. (2023). A Comprehensive Review and Performance Evaluation of Bidirectional Charger Topologies for V2G/G2V Operations in EV Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3289965>
- Vijayakumar, A., Stonier, A.A., Peter, G., Loganathan, A.K. & Ganji, V. (t.y.). Power quality enhancement in asymmetrical cascaded multilevel inverter using modified carrier level shifted pulse width modulation approach. *IET Power Electronics*, n/a (n/a). <https://doi.org/10.1049/pel2.12429>
- Vivert, M., Diez, R., Cousineau, M., Bernal Cobaleda, D., Patino, D. & Ladoux, P. (2022). Real-Time Adaptive Selective Harmonic Elimination for Cascaded Full-Bridge Multilevel Inverter. *Energies*, 15 (9), 2995. <https://doi.org/10.3390/en15092995>
- Wang, H., Dusmez, S. & Khaligh, A. (2014). Maximum Efficiency Point Tracking Technique for LLC-Based PEV Chargers Through Variable DC Link Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (11), 6041-6049. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2311399>
- Xu, M., Yang, H. & Wang, S. (2020). Mitigate the range anxiety: Siting battery charging stations for electric vehicle drivers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 164-188. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.001>
- Xue, L., Shen, Z., Boroyevich, D., Mattavelli, P. & Diaz, D. (2015). Dual Active Bridge-Based Battery Charger for Plug-in Hybrid Electric Vehicle With Charging Current Containing Low Frequency Ripple. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30 (12), 7299-7307. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2413815>
- Yan, X., Qin, F., Jia, J., Zhang, Z., Li, X. & Sun, Y. (2020). Virtual synchronous motor based-control of Vienna rectifier. *Energy Reports*, 6, 953-963. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.098>
- Yang, J., Liu, Q., Li, C., Yu, Y. & Wang, L. (2023). Online adaptive SHE algorithm for multilevel converters and implementation with embedded control system. *Energy Reports*, 9, 1190-1202. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.215>
- Yilmaz, M. & Krein, P.T. (2013). Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28 (5), 2151-2169. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2212917>
- Yoon, H., Kim, J. & Song, E. (2013). Design of a novel 50 kW fast charger for electric vehicles. *Journal of Central South University*, 20 (2), 372-377. <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1497-8>

- Yoshida, A., Zaitzu, H. & Kikuta, T. (t.y.). *CHAdEMO Quick Charger Connector with Excellent Operability*. <https://global-sei.com/technology/tr/bn84/pdf/84-05.pdf> [2024-01-21]
- Zahid, Z.U., Dalala, Z.M., Chen, R., Chen, B. & Lai, J.-S. (2015). Design of Bidirectional DC–DC Resonant Converter for Vehicle-to-Grid (V2G) Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1 (3), 232-244. <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2476035>
- Zhang, D., Leontaris, C., Huber, J. & Kolar, J.W. (2023). Optimal Synergetic Control of Three-Phase/Level Boost-Buck Voltage DC-Link AC/DC Converter for Very-Wide Output Voltage Range High-Efficiency EV Charger. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2023.3300693>
- Zhang, X., Tan, G., Xia, T., Wang, Q. & Wu, X. (2020). Optimized Switching Finite Control Set Model Predictive Control of NPC Single-Phase Three-Level Rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35 (10), 10097-10108. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2978185>
- Zhao, J., He, X. & Zhao, R. (2010). A Novel PWM Control Method for Hybrid-Clamped Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (7), 2365-2373. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2027915>
- Zhao, S., Li, Q., Lee, F.C. & Li, B. (2018). High-Frequency Transformer Design for Modular Power Conversion From Medium-Voltage AC to 400 VDC. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33 (9), 7545-7557. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2774440>
- Zhou, K., Wu, Y., Wu, X., Sun, Y., Teng, D. & Liu, Y. (2023). Research and Development Review of Power Converter Topologies and Control Technology for Electric Vehicle Fast-Charging Systems. *Electronics*, 12 (7), 1581. <https://doi.org/10.3390/electronics12071581>
- Zhou, L. & Preindl, M. (2023). A Multilayer Software-Defined System for High-Performance Electric Vehicle Energy Conversion. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9 (3), 3867-3879. <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3243559>
- Zhu, G.-L., Zhao, C.-Z., Huang, J.-Q., He, C., Zhang, J., Chen, S., Xu, L., Yuan, H. & Zhang, Q. (2019). Fast Charging Lithium Batteries: Recent Progress and Future Prospects. *Small*, 15 (15), 1805389. <https://doi.org/10.1002/smll.201805389>

Ek 1. EA hızlı şarj cihazı için izoleli DA-DA dönüştürücülerle gerçekleştirilen üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli GFD doğrultucunun değerlendirilmesi için oluşturulan sistemin Matlab/Simulink arayüzü

Ek 2. Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli doğrultucu için kullanılan kontrol algoritmasının Matlab/Simulink arayüzü



ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve ortaöğretimini Akçaabat'ta tamamlamış olup, 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı sene Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Elektrik Makinaları Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamlayarak yine aynı yıl içerisinde doktora çalışmalarına başladı. Güç elektroniği uygulamaları ve sürücü sistemleri alanında çalışmalar yapmaktadır. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

SCI/SCI-E indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. M. Mollahasanoğlu Et Al. (2023) "New modified carrier-based level-shifted PWM control for NPC rectifiers considered for implementation in EV fast chargers," Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences: Vol. 31: No. 7, Article 8.
2. M. Mollahasanoğlu Et Al. , "A New PWM Technique for Three-Phase Three-Level Neutral Point Clamped Rectifier," Arabian Journal for Science and Engineering, 2023.
3. M. Mollahasanoğlu and H. İ. Okumuş, "Performance Evaluation of the Designed Two-Axis Solar Tracking System for Trabzon," Iete Journal of Research, vol.69, no.8, pp.5338-5350, 2023.
4. Mollahasanoğlu H., Et Al. , "Comparative Study of Single-Phase Multilevel Cascaded Transformerless Inverters with Different Modulation Methods" Engineering Science and Technology, an International Journal, 2024
5. M. Mollahasanoğlu Et Al. , "Three-phase Three-Level Neutral Point Clamped and Two-Level Boost Rectifier Topologies for EV Fast Charger" Electrical Engineering, 2024 (İncelemede)

E-SCI indeksine giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. M. Mollahasanoğlu Et Al. , "Evaluation of Three-Phase Neutral-Point-Clamped PFC Rectifier Implemented with Isolated DC-DC Converters for EV Fast Charger," Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences-Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2023.

Diğer dergilerde yayınlanan makaleler

1. M. Mollahasanoğlu and H. İ. Okumuş, "A Review of Three Phase AC-DC Power Factor Correction Converters for Electric Vehicle Fast Charging," European Journal of Science and Technology , vol.32, pp.663-669, 2021.

Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

1. M. Mollahasanoğlu Et Al. , "Investigation of the Solar Angles Change for Motion Control of Two-Axis Solar Tracking Systems," 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC) , Budapest, Hungary, 2018.
2. M. Aydemir Et Al. , "Torque Ripple Minimization in Double U Core Switched Reluctance Motor," 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC) , Budapest, Hungary, 2018.
3. M. Aydın Et Al. , "Investigation of the Two Most Discriminative Directions of the Wrist Movement Imagery Tasks," 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) , Bursa, Turkey, pp.568-571, 2017.
4. M. Aydın Et Al. , "Temperature Measurement and Monitoring with Wireless Development Tool," International Conference on Image Processing, Production and Computer Science, Londra, United Kingdom, pp.17-22, 2016.

Desteklenen Projeler

Mollahasanoğlu M. (Yürütücü), TÜBİTAK Projesi, Elektrikli Araçların Hızlı Şarjı İçin Üç Fazlı Yüksek Güç Faktörlü AC/DC Doğrultucu Geliştirilmesi, 2023.

Proje No: 123E050