



Elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik şarj cihazı tasarımlarının benzetim ortamında gerçekleştirilmesi

Implementation of onboard charger designs used in electric vehicle in a simulated environment

Mehmet Tahir Özsoy¹ , Remzi İnan^{2*} 

^{1,2} Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Isparta Türkiye

Öz

Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte şebeke üzerindeki olumsuz etkileri de artmaktadır. Düşük güç faktörü ve yüksek harmonik akımları şebeke güç kalitesini bozmakta ve verimliliği düşürmektedir. Verimliliği artırmak ve güç kalitesini iyileştirmek için tasarlanan şarj cihazlarında güç faktörü düzeltme yöntemleri kullanılmaktadır. Güç faktörü düzeltmeli şarj cihazları incelendiği zaman tek aşamalı ve iki aşamalı olmak üzere iki farklı tasarım görülmektedir. Bu çalışmada iki aşamalı yerleşik şarj cihazı tasarımında yaygın olarak kullanılan AA-DA dönüştürücü topolojileri incelenmektedir. Topolojilerin seçiminin ardından elektrikli araçların yapısı, batarya tipleri, batarya seti gerilimleri, ülkelere göre değişen şarj standartları ve kullanılacak olan yarı iletken malzemeler incelenmektedir. Güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü yapılarında temel hedef şebeke kalitesini korumaktır. Bu nedenle MATLAB / SIMULINK ortamında gerçekleştirilen topolojilerin başarımları, FFT analiz yöntemi kullanılarak 6 farklı yük durumunda Toplam Harmonik Bozulma/Total Harmonic Distortion (THD) değerleri elde edilerek karşılaştırılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araçlar, Yerleşik şarj cihazı, Güç faktörü düzeltme, AA-DA dönüştürücüler

1 Giriş

Elektrikli araçların otomotiv endüstrisindeki yeri ve önemi son zamanlarda oldukça artmıştır. Dünya genelinde trafikteki elektrikli araç sayısı 2010 yılında 17 bin iken 2019 yılında 7.2 milyona yükselmiştir [1].

Günümüzde içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla elektrikli araçların birçok avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları yakıt tasarrufu, yüksek performans, bakım kolaylığı ve gürültü kirliliğini azaltmasıdır. Ayrıca elektrikli araçlarda bulunan rejeneratif frenleme yöntemi ile elektrik motoru jeneratör gibi kullanılmaktadır. Bu sayede frenleme sırasında aküler şarj edilir. Tek bataryalı elektrikli aracın verimi yaklaşık %46 iken geleneksel içten yanmalı motorlarda verim %18-%25 arasında kalmaktadır [2].

Elektrik araçların en önemli dezavantajları ise kısa menzilli olmaları, şarj süresinin uzunluğu ve yetersiz şarj istasyonu ağdır. Yerli modellerin piyasa sürülmesi ile

Abstract

With the widespread adoption of electric vehicles, their adverse effects on the power grid have also increased. A low power factor and high harmonic currents degrade grid power quality and reduce overall efficiency. To enhance efficiency and improve power quality, power factor correction (PFC) techniques are employed in the design of charging devices. Power factor corrected chargers generally fall into two categories: single-stage and two-stage designs. This study focuses on AC-DC converter topologies that are commonly used in two-stage onboard charger designs. Following the selection of these topologies, the structure of electric vehicles, battery types, battery pack voltage levels, country-specific charging standards, and the semiconductor materials to be used are examined in detail. The primary objective of power factor corrected converter structures is to maintain grid quality. Therefore, the performance of the selected topologies implemented in the MATLAB/SIMULINK environment is evaluated. Using the Fast Fourier Transform (FFT) analysis method, Total Harmonic Distortion (THD) values are obtained and compared under six different load conditions.

Keywords: Electric vehicles, Onboard charger, Power factor correction, AC-DC convertor

birlikte şarj istasyonu ağında ciddi bir artış yaşanmıştır. Yaygınlaşan şarj istasyonu ağı ve yüksek güçlü şarj üniteleri ile birlikte elektrikli araçların kullanımında pratiklik kazanılmıştır.

Pil teknolojisinde yaşanan gelişmeler ile birlikte katı pillerin güç yoğunlukları ve depolama kapasiteleri her geçen gün artmaktadır. Bu artışa paralel olarak elektrikli araçların tek bir şarj ile gidebilecekleri maksimum menzili de artış göstermektedir. Artan güç kapasitesi ile birlikte, batarya paketlerini daha kısa sürede şarj edebilecek şarj cihazlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak için yüksek güçte şarj cihazları geliştirilmektedir.

Elektrikli araçlar için tasarlanan şarj cihazları harici ve yerleşik olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Harici şarj cihazları da kendi içerisinde ev tipi ve istasyon tipi olarak ikiye ayrılır. Yüksek maliyetler nedeniyle şehir içi kullanımlarda ev tipi ya da araç içerisine yerleşik şarj

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: remziinan@isparta.edu.tr (R. İnan)

Geliş / Received: 09.05.2025 Kabul / Accepted: 07.09.2025 Yayınlanma / Published: 15.10.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1694529

cihazları tercih edilmektedir. Şehirlerarası yolculuklarda ise istasyon tipi şarj cihazları kullanılmaktadır.

Elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması ile birlikte şebekeye olan etkileri de tartışılmaya başlanmıştır. Şebeke güç kalitesini korumak ve verimli olarak şarj işlemini gerçekleştirmek için güç faktörü düzeltilmeli (GFD) dönüştürücü topolojileri kullanılmaktadır. İki aşamalı olarak çalışan GFD dönüştürücülerde, ilk aşamada doğrultma işlemi yapılır. İkinci aşamada ise endüktans üzerinde anahtarlama yapılarak güç faktörü düzenlenir. Bu şekilde hem verimli bir dönüşüm sağlanır hem de şebeke güç kalitesi korunmuş olur.

Literatürde elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik şarj cihazları ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Karsavuran, tarafından yapılan çalışmada yerleşik şarj cihazlarında kullanılan 3 farklı tasarım prototip olarak seçilmiş ve MATLAB/SIMULINK uygulaması üzerinde sistemin benzetimi yapılmıştır [3]. [3]'te sunulan çalışma kapsamında oluşturulan tasarımlarda yük olarak lityum-iyon pil paketleri kullanılmıştır. Yapılan üç farklı benzetim çalışması verimlilik, güç faktörü, güvenilirlik ve sistem kontrol karmaşıklığı açısından değerlendirilmiştir.

Dantondji tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlar için 1.2 kW gücünde iki aşamalı yerleşik şarj cihazı tasarlanmıştır [4]. [4]'te önerilen çalışmada gerçekleştirilen tasarımda alternatif akım- doğru akım (AA-DA) dönüştürücü kısmında klasik yükseltici GFD (YGFD) topolojisi, doğru akım – doğru akım (DA-DA) dönüştürücü kısmında faz kaydırmalı tam köprü topolojisi kullanılmıştır. Geliştirilen prototipin genel olarak sistem verimi %94.3 ve güç yoğunluğu 0.52 W/cm³ olarak ölçülmüştür.

Özdentürk tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlar için kullanılan tek fazlı aktif doğrultucuların şebekeye olan etkileri karşılaştırılmıştır [5]. Klasik, interleaved ve köprüsüz AA-DA dönüştürücülerin MATLAB/SIMULINK ortamında benzetimleri yapılmıştır. Oluşturulan benzetim devreleri üzerinden verimlilik, güç faktörü ve toplam harmonik bozulma (THD) verileri ölçülmüştür. Sonuçlar bölümünde elde edilen veriler tablolar halinde özetlenmiştir.

Rodriguez ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan iki aşamalı şarj cihazı tasarımları incelenmiştir [6]. İncelenen topolojiler kullanılan bileşen sayısı, verimlilik, THD, güç faktörü, galvanik izolasyon ve güç seviyesi açısından birbirleri ile karşılaştırılmaktadır. Sırası ile incelenen topolojiler; izole edilmiş tam köprü DA-DA yükselticiye bağlı girişimli YGFD, seri yükü rezonans DA-DA, izole edilmiş zeta, girişimli kademeli düşürücü-yükseltici, girişimli anahtarlama lu, izole olmayan yükseltici-düşürücü, tek fazlı köprüsüz düşürücü-yükseltici, çift aktif köprü çoklu modül DA-DA, düşürücü-yükseltici GFD, köprüsüz cuk, tek fazlı aktif doğrultucu ve köprüsüz sepic dönüştürücüdür.

Yılmaz tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazı tasarımında kullanılabilecek DA-DA dönüştürücüler incelenmiştir [7]. Yapılan incelemeler sonucunda 3.1 kW gücünde iki farklı topoloji önerilmiştir. Önerilen ilk topolojide kolay uygulama, düşük kayıp ve yüksek verim gibi standartlar göz önüne alınarak LLC rezonans dönüştürücü kullanılmıştır. Önerilen ikinci

topolojide tek bir şarj işlemi ile maksimum menzil hedeflenmiştir. Bu nedenle PV paneller ile desteklenmiş çok giriş-çıkışlı LLC rezonans dönüştürücü kullanılmıştır.

Türksoy tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazı tasarımında kullanılan AA-DA dönüştürücü topolojileri incelenmiştir [8]. Yapılan incelemeler sonucunda 3.3 kW gücünde iki farklı topoloji önerilmiştir. Önerilen ilk tasarımda girişimli GFD topolojisi kullanılmıştır. Ayrıca dinamik gerilim kontrol yöntemi ile anahtarlama yapılarak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen ikinci topolojide klasik dönüştürücü devresine yeni bir yumuşak anahtarlama devresi eklenmiştir.

Thosar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan iki aşamalı şarj topolojileri incelenmiştir [9]. Klasik, girişimli, köprüsüz ve modifiye edilmiş köprüsüz AA-DA dönüştürücü topolojileri açıklanmıştır. Söz konusu topolojiler bileşen sayısı, endüktans akımlarının dalgalanması ve verimlilik açısından birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Choi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada tam dalga DA-DA dönüştürücü ve rezonans DA-DA dönüştürücü tek bir transformatör ile aynı tasarım altında birleştirilmiştir [10]. Bu şekilde iki farklı DA-DA dönüştürücünün avantajları tek bir tasarım altında birleştirilmiştir. Geliştirilen 6.6 kW gücünde prototip tam yük altında %97.5 verimliliğe ulaşmıştır.

Liu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazı tasarımında kullanılabilecek çift yönlü olarak çalışan ve geniş bant aralıklı yarıiletken malzemelerin kullanıldığı bir tasarım önerilmiştir [11]. Önerilen sistem yeni değişken DC hat gerilimi sistem mimarisi, yüksek frekanslı yumuşak anahtarlama işlemi ve entegre manyetikler sayesinde yüksek verimlilik ve güç yoğunluğuna ulaşmaktadır. Geliştirilen prototipte %98.5 verimliliğe ulaşıldığı belirtilmiştir.

Morris tarafından yapılan çalışmada şebeke ve araç batarya grubu arasında çift yönlü enerji iletimi gerçekleştirebilen bir prototip geliştirilmiştir [12]. Kontrollü şarj işlemi sayesinde elektrik şebekesinin aşırı yüklenme sorunlarına destek olmak amaçlanmıştır. Üretilen prototipin testlerinde şebekeden araç batarya grubuna doğru enerji transferinde %89.65, araç batarya grubundan şebekeye doğru enerji transferinde %88.38 verime ulaşılmıştır.

Whitaker ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada silisyum-karbür tabanlı anahtarlama elemanları kullanarak yüksek verimli şarj cihazı topolojisi tasarlanmıştır [13]. Üretilen 6.1 kW gücünde prototip tam yükte %95 verime ve 3.8 kW/kg güç yoğunluğuna ulaşmıştır. Ayrıca üretilen prototip ile 2010 model Toyota Prius'da kullanılan araç içi şarj cihazı kıyaslanmıştır. Yapılan bu kıyaslamaya göre üretilen prototip 10 kat daha verimli çıkmıştır.

Akamatsu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elektrikli araç akü şarj sistemleri için uygun olan ikincil taraf faz kaydırmalı yumuşak anahtarlama DC-DC dönüştürücü prototipi sunulmaktadır [14]. Önerilen dönüştürücü yüksek frekanslı transformatörün parazitik endüktansını kullanarak geniş bir yük aralığında komütasyonlar elde eder. Tasarlanan prototip ile geniş bir yük aralığında yumuşak anahtarlama

yapılabildiğini ve faz kaydırma açısında nispeten küçük bir değişim ile kontrol sağlanabildiği gösterilmiştir.

Akın tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon akülerin hızlı ve verimli şarjını sağlamak amacıyla güç faktörü düzeltmeli AA-DA dönüştürücülerin performansları incelenmiştir [15]. Geleneksel, dönüşümlü ve köprüsüz dönüştürücü topolojileri için temel büyüklük değerleri hesaplanmış ve bulunan değerler üzerinden benzetim yapılmıştır. Sonuç bölümünde benzetim çıktıları değerlendirilmiş ve 3 kW çıkış gücünde en iyi sonuçların dönüşümlü dönüştürücüde alındığı belirtilmiştir.

Yapılan kaynak araştırmalarında yerleşik şarj cihazlarında en çok tercih edilen topolojilerin klasik, girişimli, temel köprüsüz ve tam köprü kontrollü YGFD olduğu görülmüştür. Ayrıca son yıllarda totem kutuplu YGFD uygulamaları sıkça araştırmalara konu olmuştur. Bu nedenle 5 farklı topoloji MATLAB/SIMULINK (v. R2020 ve Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi tarafından sağlanan Matlab Lisansı kullanılmıştır) ortamında benzetimleri yapılmak üzere seçilmiştir. Benzer çalışmalardan farklı olarak Avrupa verimlilik standartlarına göre 6 farklı yük durumunda ölçüm yapılmıştır. Bu yöntem ile seçilen topoloji performanslarının daha doğru değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışma kapsamında iki aşamalı yerleşik şarj cihazı tasarımında yaygın olarak kullanılan AA-DA dönüştürücü topolojileri incelenmiştir. Topolojilerin seçiminin ardından elektrikli araçların yapısı, batarya tipleri, batarya seti gerilimleri, ülkelere göre değişen şarj standartları ve kullanılacak olan yarı iletken malzemeler incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde çalışma şartları aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

- Elektrikli araçlarda kullanılan şarj standartları incelendiğinde AA 1. Seviye şarj akımının 16A ile sınırlandığı görülmektedir. Bu nedenle maksimum şarj gücü 3.3 kW olarak belirlenmiştir.
- Seçilen şarj gücüne göre kullanılacak uygun AA-DA güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü topolojileri belirlenmiştir.
- Belirlenen YGFD'ler hakkında araştırmalar yapılmıştır.
- Seçilen topolojilerde kullanılacak olan elemanların değerleri uygun formüller ile hesaplanmıştır.
- Yarı iletken malzemelerin yapıları ve anahtarlama kayıpları göz önüne alınarak anahtarlama frekansı 50 kHz olarak belirlenmiştir.
- Kullanılacak olan güç elektroniği topolojisi ve şarj gücüne göre uygun olarak ortalama akım kontrolü yöntemi seçilmiştir.
- Belirlenen tasarım kriterleri ve hesaplanan değerler üzerinden seçilen topolojilerin MATLAB/SIMULINK programı üzerinde benzetimleri yapılmıştır.
- Benzetim sonuçları üzerinde ölçüm araçları kullanılarak giriş ve çıkış noktalarından akım, gerilim ve güç değerleri ölçülmüştür.

- MATLAB/SIMULINK programındaki FFT analiz yöntemi ile 50Hz frekans temel alınarak THD hesaplanmıştır.
- Yapılan ölçümler tablolar halinde birbirleri ile kıyaslanmış ve farklı topolojilerin çeşitli alanlarda avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir.

Batarya şarj işlemi sırasında yerleşik şarj cihazı kısa bir süre tam yükte çalışmaktadır. Batarya setinin doluluk oranı arttıkça şarj akımı düşer. Bu nedenle devre topolojisinin toplam verimliliği hesaplanırken farklı yük durumlarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Gerçeğe yakın sonuçlar almak için tüm devre topolojileri Avrupa verimlilik standartlarına uygun şekilde 6 farklı yük durumunda test edilmiştir. Toplam devre verimliliği ise yine Avrupa standartlarına göre aşağıda verilen formüle uygun şekilde hesaplanmıştır.

$$\% \Sigma \eta = 0,03\eta_{\%5} + 0,06\eta_{\%10} + 0,13\eta_{\%20} + 0,1\eta_{\%30} + 0,48\eta_{\%50} + 0,2\eta_{\%100} \quad (1)$$

IEC 61000-3-2 standardında, cihazlar özelliklerine göre 4 farklı kategoriye ayrılmıştır. Her bir sınıf için izin verilen maksimum harmonik güçleri belirlenmiştir. Dolayısıyla batarya şarj cihazlarının da bu standartlara uyması gerekmektedir. Benzetimleri yapılan topolojilerin şebekeye olan bozucu etkilerini gözlemlemek için MATLAB/SIMULINK programında FFT analizi yöntemi kullanılmıştır. Her bir devre topolojisi için 50 Hz frekans temel alınarak THD hesaplanmıştır.

2.1 Batarya şarj cihazı topolojileri

Günümüzde elektrikli araçlar için önemli seçim kriterlerinden biride tek bir şarj ile gidilebilecek maksimum menzildir. Pil teknolojisinde yaşanan gelişmeler ile birlikte bataryaların güç yoğunluğunda ciddi artışlar gerçekleşmiş ve elektrikli araçların menzilleri önemli ölçüde artırılmıştır. Kapasitesi ve güç yoğunluğu artan bataryalar için yüksek güçlü şarj cihazlarının tasarlanması bir zorunluk haline gelmiştir.

Elektrikli araç bataryaları için 2 farklı şarj cihazı tasarlanabilmektedir. Bunlar, harici ve yerleşik olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Harici şarj cihazları kısa sürede dolum imkanı sağlar. Ancak istasyon sayısının yetersizliği ve yüksek maliyetler nedeniyle şehir içi kullanımlarda genellikle araç içine yerleşik şarj cihazları ile evde dolum işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında araç içine yerleşik batarya şarj cihazları incelenecektir.

Yerleşik şarj cihazları detaylı bir şekilde incelendiğinde tek katmanlı ve iki katmanlı olmak üzere 2 farklı tasarım görülmektedir. Tek katmanlı tasarım düşük güç kademelerinde yüksek verimli olarak çalışır. Devre elemanı sayısı az olduğu için iki katmanlı yapıya göre nispeten daha az maliyetli ve daha güvenilirdir. Fakat elemanların üzerinde oluşan yüksek gerilim stresi, yüksek güçlere çıkıldığında azalan verimlilik ve güç yoğunluğu nedeniyle genellikle 1 kW altındaki güçlerde tercih edilir.

İyi tasarlanmış iki katmanlı şarj cihazlarının yüksek güç yoğunluğu, yüksek güç dönüşüm verimliliği, geniş yük aralığında performanslı çalışma, düşük THD gibi özelliklere

sahiptirler. Tek katmanlı yapılara göre nispeten daha karmaşık ve daha maliyetlidir. Genellikle 1 kW üzeri güçlerde tercih edilmektedirler. Bu yapıda ilk olarak şebekeden çekilen enerji, GFD özellikli AA-DA dönüştürücüler ile yükseltilmekte ve ikinci adımda yüksek verimli DA-DA dönüştürücüler ile batarya grubuna uygun bir gerilime dönüşüm yapılmaktadır.

2.2 Klasik YGFD

Şekil 1’de görüldüğü gibi klasik YGFD devre yapısında köprü doğrultucu, endüktans, anahtarlama elemanı ve bir adet hızlı diyot kullanılır. İlk olarak alternatif akım köprü diyot yapısı ile doğrultulur. Ardından yarıiletken elemanlar ile endüktansa yüksek frekansta enerji aktarımı yapılır. Bu yöntem ile şebeke ve endüktans gerilimi birleşerek gerilim yükseltilmiş olur. Klasik YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Girişteki köprü diyot yapısı nedeniyle 1 kW’a kadar olan güçlerde tercih edilmektedir. Artan güç seviyesi diyotların ters toparlanma sürecindeki enerji kaybını artırmaktadır. Dolayısıyla devrenin verimi düşmektedir.
- Anahtarlama elemanlarının gerilim stresi yüksektir.
- Tek bir anahtar olduğu için devrenin kontrolü kolaydır.

Klasik YGFD topolojisinde çıkış gerilimi ayarı anahtarlama elemanının kontrolü ile sağlanır. Anahtar iletim duruma geçtiğinde endüktans şarj olur. Bu sırada kondansatör yükü beslemektedir. Anahtar kesime girdiği zaman ise endüktans üzerinden gelen akım hem yükü hem de kondansatörü besler. Endüktans ve kaynak gerilimleri toplanarak çıkış gerilimi katlanmış olur.

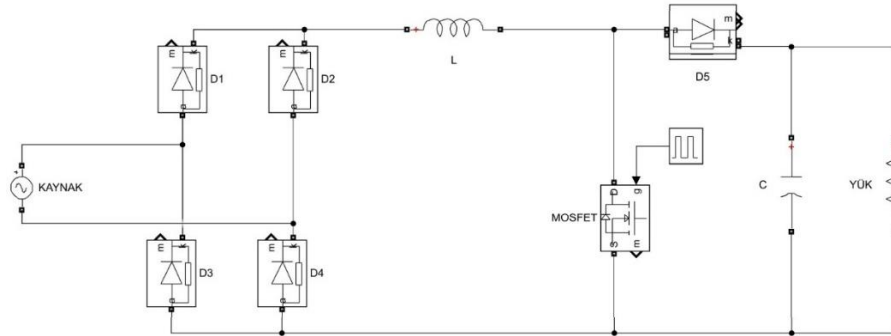
Anahtar ne kadar uzun süre iletimde kalırsa endüktans üzerinde o kadar çok enerji depolanmış olur. Dolayısıyla çıkış gerilimini artırmak için anahtarın iletimde kalma süresi artırmak ve çıkış gerilimini azaltmak için ise anahtarın iletimde kalma süresini azaltmak gerekir.

2.3 Girişimli YGFD

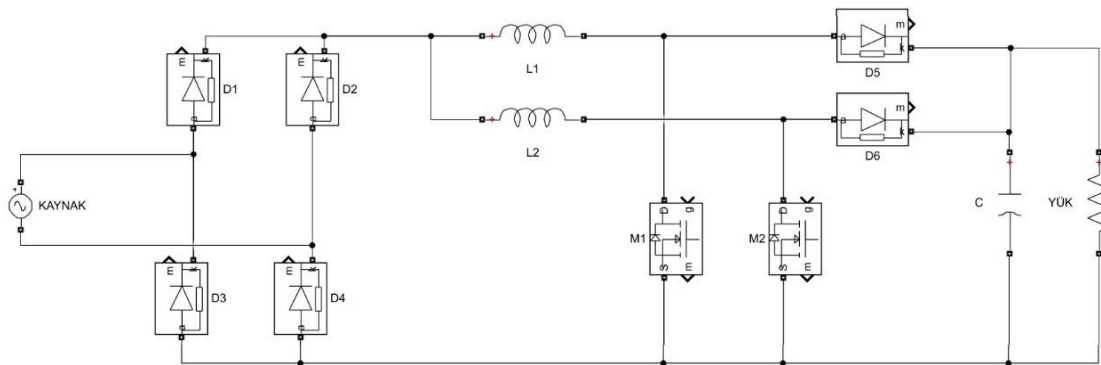
Şekil 2’de görüldüğü gibi girişimli YGFD devre yapısı, klasik YGFD yapısına oldukça benzerdir. Köprü diyotlardan sonra fazladan bir endüktans ve anahtarlama elemanı eklenmiştir. Bu şekilde çift katlı bir yükseltici yapısı oluşturulmuş olur.

Devrede bulunan iki anahtarlama elemanı uygun kontrol teknikleri kullanılarak birbirleriyle senkronize bir şekilde çalıştırılır. Bu şekilde güç faktörü yükseltilir ve giriş akımındaki harmonik bozulmalar elimine edilir. Girişimli YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- İki fazlı girişimli devre yapısında efektif dalgalanma frekansı iki kat artar ve mevcut dalgalanma büyüklüğü azalır. Gerilim dalgalanmasının azalması ile birlikte kapasitör üzerindeki stres azalmış olur.
- Giriş akım dalgalanması klasik YGFD devrelerine göre düşüktür. Böylece girişimli dönüştürücülerde, klasik dönüştürücülere göre daha düşük THD değeri gözlenir.
- Köprü diyot yapısı nedeniyle anahtarlama kayıpları klasik yükseltici GFD yapısı ile benzerdir.
- Devre topolojisinin çok fazlı yapısı nedeniyle endüktans üzerinde depo edilmesi gereken enerji miktarı azalır. Faz sayısına bağlı olarak gerçekleşen bu azalış nedeniyle endüktans hacimleri de küçülmektedir [5].

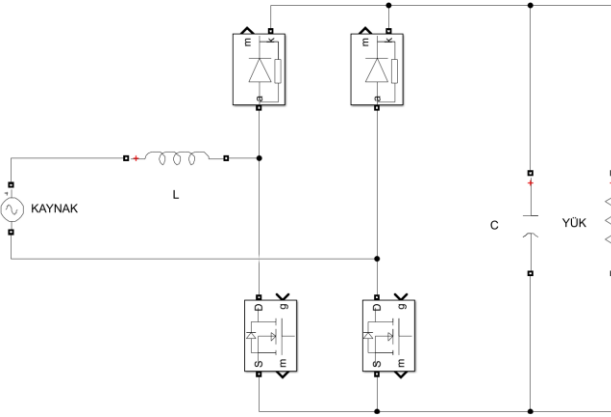


Şekil 1. Klasik YGFD



Şekil 2. Girişimli YGFD

2.4 Temel köprüsüz YGFD



Şekil 3. Temel köprüsüz YGFD

Yüksek güçlü uygulamalarda sıklıkla kullanılan topolojilerden biri de köprüsüz yükseltici yapılarıdır. Klasik ve girişimli yapılarından farkı olarak giriş gerilimini doğrultan köprü doğrultucu yapısı yoktur. Yüksek verim ve güç yoğunluğu istenilen uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 3'te temel köprüsüz yükseltici GFD yapısı gösterilmiştir.

Köprü diyot barındıran GFD topolojilerinde giriş geriliminin her bir alternansında iki diyot iletimdedir. İletimde olan her iki diyotun da üzerinde, geçen akımın karesi ile doğru orantılı olarak iletim kayıpları oluşur. Köprüsüz yapılarda ise her bir yarım periyotta bir anahtarlama elemanı ve bir doğrultucu diyot bulunur. Anahtarlama elemanlarının uçlarına ters gerilim oluşmasını engellemek için ters toparlanma süresi daha kısa olan diyotlar paralel olarak bağlanır. Bu şekilde hem doğrultucu diyotlara göre daha az iletim kaybı oluşur hem de devre kontrollü hale gelir.

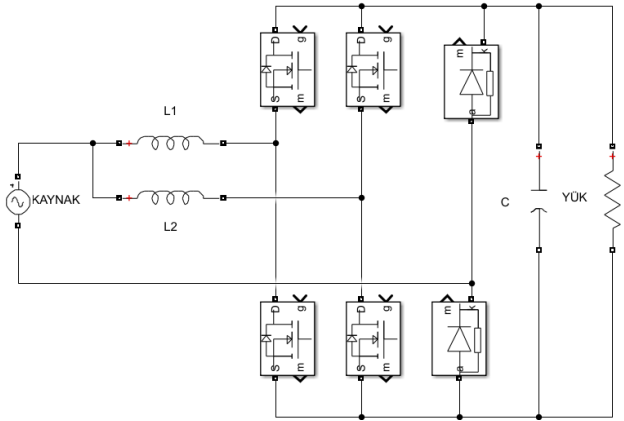
Köprüsüz YGFD yapılarında anahtarlama elemanları senkronize biçimde kontrol edilerek yüksek verimde güç dönüşüm işlemi yapılır. Diğer yapılardan farklı olarak iki anahtarlama elemanı bulunduğu için kontrol kabiliyeti daha yüksektir. Temel köprüsüz YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Düşük anahtarlama kayıpları nedeniyle yüksek güçlerde tercih edilmektedir.
- Düşük yük koşullarında iletim performansı yüksektir.
- Diğer yükseltici dönüştürücülere göre daha fazla elektromanyetik girişime (Electromagnetic interference) sebep olurlar.
- Köprüsüz topolojilerde akımın ve gerilimin ölçülmesi zordur. Akım yolu anahtarlama elemanın durumuna göre her bir çevrimde değişir. Bu nedenle ölçüm yapılması için harici devre elemanları kullanılmaktadır [5].

Köprüsüz topolojilerde üzerinde bulunan anahtarların konumları değiştirilerek çok farklı yapıda doğrultucu devre tasarımları elde edilebilir. Bunlardan biri de totem kutuplu köprüsüz yükseltici topolojisidir. Yapı itibarıyla temel

köprüsüz yükselten topolojiye çok benzemekle birlikte aralarındaki en önemli fark yarı iletken anahtarların konumudur. Bu yapıda yarı iletken anahtarlar ve diyotlar kendi aralarında seri olarak bağlanmıştır [16]. Şekil 4'te totem kutuplu YGFD yapısı gösterilmiştir.

2.5 Totem kutuplu YGFD

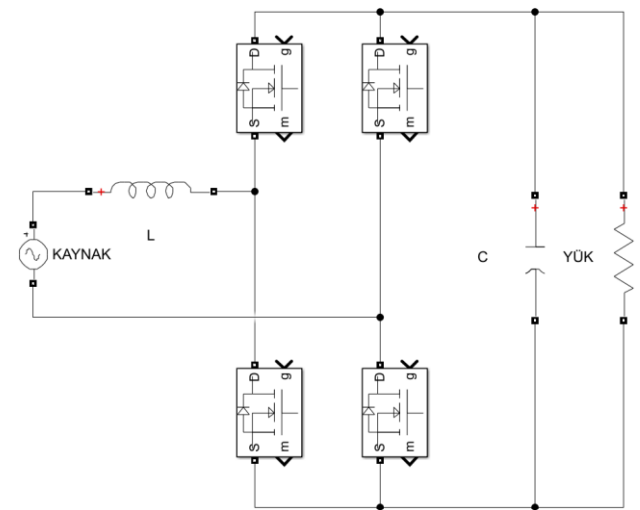


Şekil 4. Totem kutuplu YGFD

Totem kutuplu YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Köprü diyot yapısı bulunmadığı için anahtarlama kayıpları düşüktür.
- Düşük yük koşullarına yüksek performanslı çalışmaktadır.
- Temel köprüsüz dönüştürücüye göre daha düşük EMI gürültüsüne sahiptir.
- Dahili diyotların ters toparlanma süreleri nedeniyle 1 kW ve üstü güç gereksinimleri için uygun değildir.

2.6 Tam köprü kontrollü YGFD



Şekil 5. Tam köprü kontrollü YGFD

Yüksek güçlü uygulamalarda verimi artırmak için kullanılabilecek dönüştürücü türlerinden biri de Tam Köprü Kontrollü YGFD yapısıdır. Şekil 5'te gösterilen devre yapısı

incelendiği zaman temel köprüsüz dönüştürücü ile oldukça benzer yapıdadır. Aralarındaki tek farkı tüm anahtarlama elemanlarının kontrollü olmasıdır. Tam köprü kontrollü YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Tüm anahtarlama elemanları kontrollü olduğu için iletim kayıpları önemli ölçüde azalır.
- Tam kontrollü yapısı nedeniyle devre tepki süresi kısadır.
- Diğer GFD dönüştürücülere göre daha fazla EMI'ye neden olur.

3 Benzetim sonuçları

Bu bölümde bir önceki bölümde genel hatları ile incelemeleri yapılan klasik, girişimli, temel köprüsüz, tam dalga kontrollü ve girişimli-totem kutuplu YGFD dönüştürücülerin benzetim sonuçları verilmiştir. Totem kutuplu topoloji devre yapısında bulunan dahili diyotların ters toparlanma süreleri nedeniyle 1 kW üzeri güçlerde kullanıma uygun değildir. Bu nedenle girişimli ve totem kutuplu devre topolojileri birleştirilerek yüksek güçlerde verimli çalışmaya uygun bir yapı elde edilmiştir.

Klasik, girişimli, temel köprüsüz, girişimli-totem kutuplu ve tam dalga kontrollü YGFD dönüştürücü topolojilerinde kullanılan endüktans ve kondansatör değerleri aşağıda verilen ifadeler yardımı ile hesaplanmıştır ve ifadelerdeki kısaltmalar Tablo 1'de verilmiştir [16].

$$L_{min} = \frac{V_{in(peak)} D_{peak}}{f_{sw} \Delta iL} \quad (2)$$

$$D_{peak} = \frac{V_{out} - V_{in(peak)}}{V_o} \quad (3)$$

$$C = \frac{P_{out}/V_{out}}{2\pi f_r \Delta V_{out}} \quad (4)$$

Tablo 1. YGFD Denklemlerinde kullanılan kısaltmalar

Simgeler	Karşıllıkları
L (min)	Endüktans değerinin en düşük değeri
V _{in(peak)}	En düşük tolerans değerindeki giriş geriliminin maksimum değeri
V _{out}	Çıkış gerilimi
P _{out}	Çıkış gücü
f _r	Şebeke frekansı
D _{peak}	Bağlı iletim süresi
f _{sw}	Anahtarlama frekansı
ΔiL	Endüktans akımındaki dalgalanma
ΔV _{out}	Çıkış gerilimindeki dalgalanma

Hesaplamalar sonucunda elde edilen parametre değerleri ve belirlenen sınır şartları Tablo 2'de sunulmuştur.

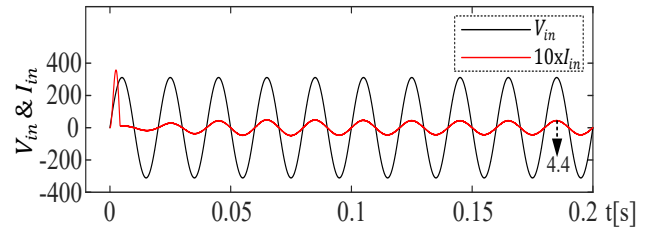
1s süresince klasik, girişimli, temel köprüsüz, totem kutuplu ve tam dalga kontrollü YGFD topolojilerinin benzetim ortamında oluşturulan devreleri çalıştırılmıştır. Benzer koşullar altında 6 farklı yük durumu için simülasyonlar tekrarlanmıştır. 0.8-1 s zaman aralıklarında giriş ve çıkış

akımları, giriş ve çıkış gerilimleri, güç faktörü, verim ve THD ölçümleri yapılmıştır. Tüm çalışma durumlarında güç faktörü 0.99 ve üzeri olarak ölçülmüştür.

Tüm topolojilere ait gerçekleştirilen benzetimler sonucu elde edilen giriş gerilimi ve akımı (V_{in} ve I_{in}) ve çıkış gerilimi ve akımı (V_{out} ve I_{out}) grafikleri aşağıda sunulmuştur. Bu grafiklerde 10 kat ölçeklenmiş giriş akımı yer almaktadır.

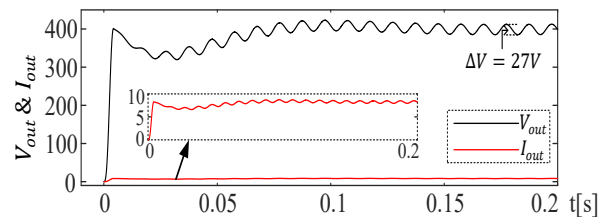
Tablo 2. Kullanılan devre elemanlarının değerleri

Devre Parametresi	Değer	Birim
Maksimum çıkış gücü	3.3	kW
Giriş gerilimi (rms)	220	Vac
Çıkış gerilimi	400	Vdc
Çıkış gerilimi dalgalanması (ΔVo)	28	V
Hat frekansı (fr)	50	Hz
Anahtarlama frekansı (fsw)	50	kHz
İndüktör (L)	700	uH
İndüktör akımının dalgalanması (ΔiL)	15	%
Çıkış kapasitörü (C)	1000	uF
Çıkış yükü (RL)	48.48-969.7	Ohm



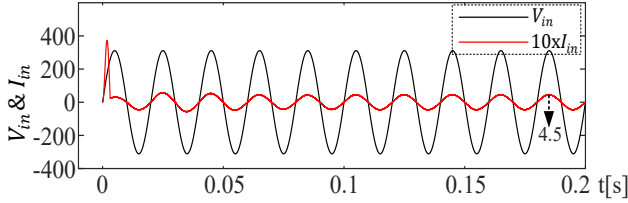
Şekil 6. Klasik YGFD'ye ait giriş gerilimi ve akımı

Şekil 6'da Klasik YGFD'nin giriş akımının giriş gerilimi ile aynı frekansta ve fazda olduğu gözlemlenmektedir. Başlangıçta yaşanan geçici-hal durumu kısa süre içerisinde kararlı duruma ulaşmaktadır. Şekil 7'de ise çıkış gerilimin, sistem çalışmaya başladıktan sonra hızlı bir şekilde yaklaşık 400 V seviyesine ulaştığı ve bu seviyede küçük dalgalanmalar ile sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Grafikte görüldüğü üzere, çıkış gerilimindeki dalgalanma değeri yaklaşık 27 V'tur. Çıkış akımının ise oldukça düşük ve sabit seviyede olduğu görülmektedir. Giriş akımının giriş gerilimine uyumlu olması ve çıkış geriliminin hızlı ve kararlı bir şekilde istenen değere ulaşması, sistemin etkinliğini ve güç kalitesi üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir. Ancak önerilen yapıdaki çıkış akım ve gerilimindeki dalgalanmaların düşürülmesi için farklı filtre yapılarının uygulanması gerekliliği açıktır.

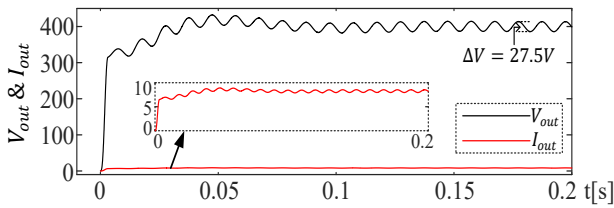


Şekil 7. Klasik YGFD'ye ait çıkış gerilimi ve akımı

Girişimli (interleaved) yükselten tip güç faktörü düzenleyicisinin performansına ilişkin benzetim sonuçları Şekil 8 ve 9'da sunulmuştur. Girişimli tasarımın fazlar arası akım paylaşımı sayesinde çıkış gerilimindeki dalgalanmaların kısmen minimize edildiği, ancak 27.5 V'luk dalgalanmanın ek pasif filtreleme gerektirebileceği anlaşılmaktadır.

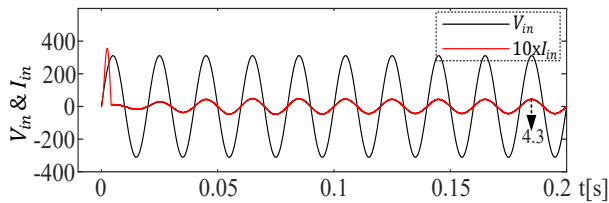


Şekil 8. Girişimli YGFD'ye ait giriş gerilimi ve akımı

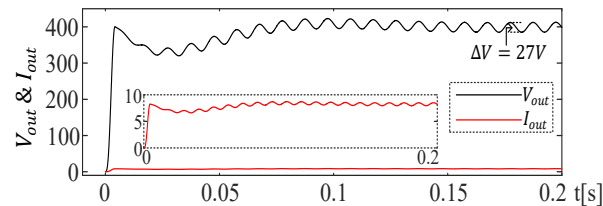


Şekil 9. Girişimli YGFD'ye ait çıkış gerilimi ve akımı

Temel köprüsüz YGFD'nin dinamik davranışını incelemek amacıyla elde edilen benzetim sonuçları Şekil 10 ve Şekil 11'de sunulmuştur. Benzetim sonuçları, temel köprüsüz yükselten tip güç faktörü düzenleyicisinin giriş ve çıkış karakteristiklerini başarılı bir şekilde yansıtmaktadır. Giriş gerilimindeki periyodik değişimler, sistemin tasarımının karmaşık dinamiklere sahip olduğunu göstermektedir. Çıkıştaki gerilim ve akım dalgalanmaları ise sistemin kararlılığını artırmak için ek filtreleme veya gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanması gerektiğine işaret etmektedir.

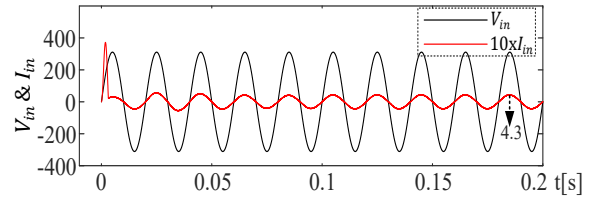


Şekil 10. Temel köprüsüz YGFD'ye ait giriş gerilimi ve akımı

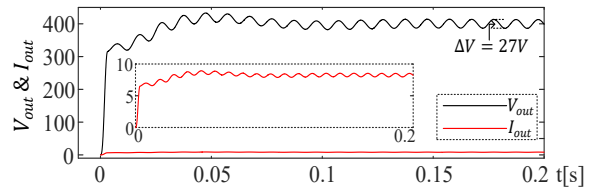


Şekil 11. Temel köprüsüz YGFD'ye ait çıkış gerilimi ve akımı

Totem kutuplu YGFD'ye ait benzetim sonuçları, sistemin dinamik davranışını ve performansını değerlendirmek amacıyla Şekil 12 ve 13'te sunulmuştur. Benzetim sonuçları, totem kutuplu yükselten tip güç faktörü düzenleyicisinin giriş ve çıkış karakteristiklerini açıkça ortaya koymaktadır. Girişte gözlemlenen akım azalması, sistemin enerji tüketiminde bir optimizasyon sağladığını göstermektedir. Ancak çıkış gerilimindeki dalgalanmalar, sistemin kararlılığını artırmak için filtreleme veya kontrol stratejilerinin iyileştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu bulgular, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir referans teşkil edecektir.

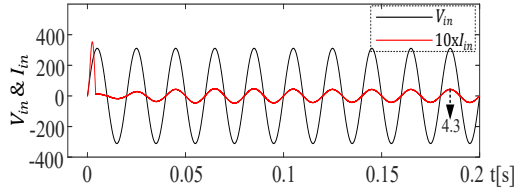


Şekil 12. Totem kutuplu YGFD'ye ait giriş gerilimi ve akımı

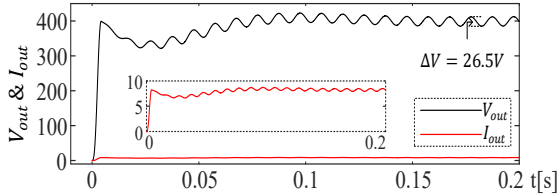


Şekil 13. Totem kutuplu YGFD'ye ait çıkış gerilimi ve akımı

Şekil 14'te giriş geriliminin sinüzoidal dalga formuna sahip olduğu ve giriş akımının da aynı frekansta ve faza yakın bir şekilde dalgalandığı gözlemlenmektedir. Başlangıç anında kısa süreli bir geçici-hal durumu meydana gelmekte, ardından sistem kararlı duruma ulaşmaktadır. Giriş akımının genliği düşük tutulması, güç faktörü düzeltme kontrolünün amacına uygun şekilde, akımın dalga şeklinin sinüzoidalde yakın ve THD'nin düşük seviyede olduğunu göstermektedir. Şekil 15'te ise çıkış gerilimi ve çıkış akımı zamana bağlı olarak verilmiştir. Çıkış gerilimi, sistem çalışmaya başladığında hızlı bir şekilde yaklaşık 400 V seviyesine ulaşmakta ve bu seviyede küçük dalgalanmalar ile sabit kalmaktadır. Grafikte görüldüğü üzere, çıkış gerilimindeki dalgalanma değeri yaklaşık 26.5 V'tur. Bu değer, YGFD tasarımı için kabul edilebilir sınırlar içerisinde değerlendirilmektedir. Çıkış akımının ise oldukça düşük ve sabit seviyede olduğu görülmektedir. Giriş akımının giriş gerilimine uyumlu olması ve çıkış geriliminin hızlı ve kararlı bir şekilde istenen değere ulaşması, sistemin etkinliğini ve güç kalitesi üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir. Sistem veriminin artırılması için farklı anahtarlama modülasyon tekniklerinin uygulanabilir olduğu ve anahtarlama elemanları üzerinde sönmüleme (snubber) donanım yapılarının uygulanabilir olduğu görülmektedir.



Şekil 14. Tam köprü kontrollü YGFD'ye ait giriş gerilimi ve akımı



Şekil 15. Tam köprü kontrollü YGFD'ye ait çıkış gerilimi ve akımı

Tüm topolojilere ait sonuçlar incelendiğinde, giriş akımının geçici-hal davranışında yüksek tepe değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu durumun oluşmasının sebebi ise, çıkış kapasitörünün başlangıç gerilim değerinin sıfır olarak alınmasıdır. Kapasitör başlangıç gerilim değerinin sıfır alınması nedeni ile PI kontrolcü yapısının çıkış geriliminin sürekli-hal durumuna ulaşmadan önce çıkış kapasitörünün ilk şarjı ve kontrolü için yüksek görev oranı belirlemesi nedeniyle oluşmaktadır.

Önerilen çalışma kapsamında farklı yük değerlerinde başlangıç testleri gerçekleştirilen çeşitli topolojilerdeki doğrultucu yapılarına ait THD değerleri **Tablo 3**'te sunulmuştur. **Tablo 3**'te doğrultucu yapılarının düşük yükler altında yüksek THD değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere, düşük yük koşullarında kaynaktan çekilen giriş akımı sürekli iletim karakteristiğinden çıkıp kesikli çalışma karakteristiği sergiler ve bu da akım dalga formunda bozulmalara, ani yükselen ve darbe şeklinde bir akım profiline neden olur. Bu kesikli çalışma karakteristiği giriş akımında daha yüksek harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, düşük yük akımı koşullarında yarı iletken anahtarlama elemanlarının ters gerilimde toparlanma

süreleri ve ölü zaman etkileri daha belirgin hale gelmektedir. Belirtilen hususlar nedeni ile düşük yük akımı altındaki çalışma koşullarında çalışma kapsamında gerçekleştirilen doğrultucu yapılarının THD değerleri artmakta ve **Tablo 4**'te de sunulduğu üzere verimleri düşmektedir.

4 Bulgular ve sonuçlar

Benzetim sonuçları güç faktörü, verim ve THD olarak üç farklı alanda incelenmiştir. Tasarlanan benzetim devrelerinde tüm çalışma durumlarında bire yakın güç faktörü ölçülmüştür. Bu nedenle karşılaştırma kriteri olarak verim ve THD dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar **Tablo 4**'te verilmiştir. Güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü yapılarında temel hedef şebeke kalitesini korumaktır. Bu nedenle en önemli karşılaştırma ölçüsü şebekeden çekilen akımda oluşan toplam harmonik bozulmadır. MATLAB / SIMULINK programındaki FFT analiz yöntemi kullanılarak 6 farklı yük durumunda THD ölçümü yapılmıştır

6 farklı yük durumunda yapılan ölçümler bir bütün olarak incelendiğinde en düşük THD değeri girişimli YGFD devresinde ve en yüksek THD değeri tam dalga kontrollü YGFD devresinde ölçülmüştür.

Sadece tam yük durumu ele alındığı zaman ise en düşük THD değeri temel köprüsüz YGFD devresinde %2.23 olarak ölçülmüştür. Ancak düşük yük koşullarında girişimli devre topolojisinin daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

Son olarak benzetim devrelerinde giriş ve çıkış güçleri ölçülerek Avrupa Verimlilik standartlarına göre devrenin toplam verimi hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlere göre en yüksek verim %99.10 ile tam dalga kontrollü GFD devresinde ve en düşük verim %87.98 ile girişimli GFD devresinde bulunmuştur.

Ayrıca adaptif tabanlı PID kontrolcü yapıları, topoloji girişine uygulanabilecek sönümleme (snubber) devreleri ya da anahtarlama modülasyon teknikleri de çalışmada gerçekleştirilen güç elektroniği dönüştürücü topolojilerinin verimliliğini artırabilecek yaklaşımlardır. İleriki çalışmalar, belirtilen yöntemlerin kullanılması ile AC-DC doğrultucu tabanlı şarj birimi topolojilerinin iyileştirilmesine yönelik olacaktır

Tablo 3. Benzetim sonuçlarının THD karşılaştırılması

YGFD Topolojisi	%100 Yükte %THD	%50 Yükte %THD	%30 Yükte %THD	%20 Yükte %THD	%10 Yükte %THD	%5 Yükte %THD
Klasik YGFD	%2.25	%3.84	%5.68	%7.72	%12.81	%20.04
Girişimli YGFD	%2.52	%3.60	%4.68	%5.84	%9.85	%16.09
Temel Köprüsüz YGFD	%2.23	%3.81	%5.73	%7.79	%13.00	%20.03
Tam Dalga Kontrollü YGFD	%2.46	%4.55	%7.10	%10.75	%20.77	%40.72
Totem Kutuplu YGFD	%2.86	%4.61	%7.08	%10.05	%18.55	%33.96

Tablo 4. Benzetim sonuçlarının verimlerinin karşılaştırılması

YGFD Topolojisi	Avrupa Std. Göre %Verim	%100 Yükte %Verim	%50 Yükte %Verim	%30 Yükte %Verim	%20 Yükte %Verim	%10 Yükte %Verim	%5 Yükte %Verim
Klasik YGFD	%93.18	%96.88	%95.15	%92.87	%90.20	%83.11	%71.21
Girişimli YGFD	%93.18	%94.80	%91.10	%86.80	%81.80	%71.11	%57.62
Temel Köprüsüz YGFD	%93.85	%97.48	%95.79	%93.53	%90.83	%83.11	%72.92
Tam Dalga Kontrollü YGFD	%99.10	%99.40	%99.40	%99.22	%98.91	%97.97	%94.96
Totem Kutuplu YGFD	%97.47	%98.84	%98.32	%97.55	%96.47	%93.53	%86.81

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] E. Akyüz, Kentsel Ulaşım: Elektrikli Araçların Artıları Ve Eksileri. Hacıa Sophia 3. International Conference On Multidisciplinary Scientific Studies, sayfa 686-696, İstanbul, Türkiye, 15-16 Eylül 2021.
- [2] N. Ünlü, Ş. Karahan, H. Uçarol, E. Özsu, A. Yazar, L. Turhan, F. Akgün ve M. Tırıs, Elektrikli Araçlar. Teknik Rapor, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Türkiye, 2003.
- [3] İ. E. Karsavuran, Elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazı sistemlerinin simülasyon ortamında analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2024.
- [4] E. A. Dantondji, Elektrikli araçlar için yüksek güç yoğunluklu ve yüksek verimli izole edilmiş yerleşik batarya şarj cihazı tasarımı ve uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [5] A. Özdentürk, Elektrikli araç şarj cihazlarında kullanılan tek fazlı aktif doğrultucuların şebekeye olan etkilerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [6] C. J. Rodriguez-Corte, J. M. Sosa, P. R. Martinez, A. R. Lopez, M. A. Juarez, Brief review of power converters for on-board vehicle battery charging. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), sayfa 1-6, Ixtapa, Meksika, 10-12 Kasım 2021.
- [7] Ö. Türksöy, Design and analysis of high efficient AC-DC power factor corrected converters for on-board battery charging system in electric vehicles. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [8] Ü. Yılmaz, Investigation of high efficient DC-DC converters for on-board battery charging system in electric vehicles. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [9] S. Inamdar, A. Thosar, S. Mante, Literature review of 3.3kW on-board charger topologies. Proceedings of the Third International Conference on Electronics Communication and Aerospace Technology, sayfa 276-281, Coimbatore, Hindistan, 12-14 Haziran 2019.
- [10] C. Jin-Yong, C. Seung-Won, L. Jun-Young, Hybrid PWM DC/DC converter for EV on-board charger with single transformer. EPE Journal, 28 (2), 63-74, 2018. <https://doi.org/10.1080/09398368.2018.1425525>
- [11] Z. Liu, B. Li, F. C. Lee, Q. Li, Design of CRM AC/DC converter for very high-frequency high-density WBG-based 6.6kW bidirectional on-board battery charger. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), sayfa, 1-8, Milwaukee, WI, ABD, 18-22 Eylül 2016.
- [12] J. Morris, Design and testing of a bidirectional smart charger prototype, Yüksek Lisans Tezi, University of Waterloo Electrical and Computer Engineering, Kanada, 2015.
- [13] B. Whitaker, A. Barkley, Z. Cole, B. Passmore, D. Martin, Ty R. McNutt, A. B. Lostetter, J. S. Lee, K. Shiozaki, A high-density, high-efficiency, isolated on-board vehicle battery charger utilizing silicon carbide power devices. IEEE Transactions on power electronic, 29 (5), 2606-2617, 2013. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2279950>
- [14] K. Akamatsu, T. Mishima, M. Nakaoka, A secondary-side phase-shifted zero voltage and zero current full-range soft-switching PWM DC-DC converter for EV battery chargers. 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), sayfa 1-6, Nagasaki, Japonya, 11-14 Kasım 2012.
- [15] B. Akın, Elektrikli arabalarda kullanılan Li-ion akülerin tek fazdan hızlı ve verimli şarjı için güç faktörü düzeltmeli yükselticilerin karşılaştırması. EMO Bilimsel Dergi 2 (4), 87-93, 2012.
- [16] M. Çavdar, Tek fazlı güç faktörü düzeltmeli (PFC) köprüsüz AC-DC dönüştürücülerin incelenmesi ve karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.

