

Yenilenebilir Enerji ile Güçlendirilmiş Elektrikli Araçlar İçin Çok Portlu Entegre Dönüştürücü Tasarımı: Türkiye'de Yerli Üretim Potansiyeli

A. Özgür POLAT^{1,3}, Seyit Alperen ÇELTEK², Seda KÜL³, Alihan ATAY⁴, M. Mustafa SAVRUN⁵

¹Solvaytech Mühendislik Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Çukurova Teknokent, Adana.
ozgrpolat@ceryan.com.tr

²Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü,
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman.
salperenceltek@kmu.edu.tr

³Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman.
sedakul@kmu.edu.tr

⁴Solvaytech Mühendislik Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Çukurova Teknokent, Adana.
alihanatay@ceryan.com.tr

⁵Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana.
msavrun@atu.edu.tr

Özetçe

Birden fazla pil ve güç kaynağı içeren çoklu güç kaynağı sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve elektrikli araçların sistem entegrasyonları gereksinimleriyle büyük önem kazanmıştır. Bu sistemlerin kurulumunda güç kaynağı sayılarıyla orantılı olarak dönüştürücüye ihtiyaç vardır. Bu durum doğrudan maliyet ve kurulum karmaşasında artış meydana getirmektedir. Çok portlu entegreler (MPC) ile bu iki durumda minimuma indirilebilmektedir. Bu çalışma da elektrikli araçlar için çok portlu entegre dönüştürücü tasarımı incelenmiştir. Çalışmanın amacı, güneş enerjisi ve yakıt hücreleri gibi alternatif enerji kaynakları ile entegre elektrikli araçların verimliliğini ve menzilin artırmaktır. Araştırma, çeşitli enerji kaynaklarını eşzamanlı olarak yönetebilen çok portlu bir entegre dönüştürücü geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu teknoloji, henüz Türkiye'de yerli tasarım ve üretimi olmayan bir ürün sınıfına dahildir. Çalışma süreci, fizibilite çalışmaları, teknik özelliklerin belirlenmesi, simülasyonlar ve tasarım optimizasyonları gibi aşamaları kapsar. Simülasyon sonuçları, önerilen tasarımın istenen fonksiyonları yerine getirdiğini doğrulamaktadır. Bu makale, elektrikli araç pazarında yerli tasarım ve üretim kapasitesinin önemini vurgulamaktadır ve bu teknolojiyi yerli elektrikli araçların altyapısına entegre etme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Abstract

Multiple power supply systems containing multiple batteries and power sources have gained great importance with the system integration requirements of renewable energy sources and electric vehicles. In the integration of these systems, a converter is needed in proportion to the number of power supplies. This situation creates an increase in direct cost and installation complexity. With a multi-port integrated converter (MPIC), these two cases can be minimized. In this study, MPIC for electric vehicles is examined. The study aims to increase the efficiency and range of integrated electric cars with alternative energy sources such as solar energy and fuel cells. The research seeks to develop a multi-port integrated converter that simultaneously manages various energy sources. This technology is included in a product class not yet domestically designed and produced in Turkey. The study process includes feasibility studies, simulations, and design optimizations. The simulation results confirm that the proposed design fulfills the desired functions. This article highlights the importance of domestic design and production capacity in the electric vehicle market. It reveals the potential of integrating this technology into the infrastructure of domestic electric vehicles.

1. Giriş

Karbon ayak izi ve sera gazı emisyonunun artmasıyla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Gelişen yenilenebilir enerji sektörü ile birlikte yenilenebilir enerji kaynakları büyük uygulamaların

yanı sıra mikro şebeke ve elektrikli araç gibi düşük güçlü uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, elektrikli araçların daha geniş bir alanda benimsenmesini engelleyen birkaç zorluk bulunmaktadır. Özellikle, mevcut elektrikli araçların menzil problemi ve şebeke bağımlılığı, yaygın kullanımı için önemli engellerdendir. Bu noktada bahsi geçen zorlukların üstesinden gelmek ve EV teknolojilerinin daha geniş bir alanda benimsenmesini teşvik etmek için yeni ve yenilikçi çözümlere ihtiyaç vardır.

Bu bağlamda, bu çalışma, "6 kW Araç üstü Çok Portlu Entegre Dönüştürücü Tasarımı ve Prototip Üretimi" projesini sunmaktadır. Bu proje, araçların menzilin artırmayı ve şebekeye olan bağımlılıklarını azaltmayı amaçlamaktadır. Bunun yanı sıra, projede sunulan çözüm, fotovoltaik paneller ve yakıt hücreleri gibi alternatif enerji kaynaklarını entegre etme özelliğiyle, EV teknolojilerinin sürdürülebilirliğini ve çevre dostu özelliklerini daha da artırmayı hedeflemektedir.

Bu çalışmada, proje kapsamında gerçekleştirilen uygulamalardan birine ait simülasyonlar ve sonuçları gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar bu teknolojinin gelecekteki potansiyeli hakkında ayrıntılı bilgi sunmaktadır.

Bu çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, çok portlu entegre dönüştürücünün geliştirilmesi ve literatürde bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar referans alınarak, mevcut elektrikli araç teknolojilerindeki kısıtlamalar ve bu kısıtlamaları aşmak için çok portlu entegre dönüştürücülere duyulan ihtiyaç ele alınmaktadır. Üçüncü bölümde, proje kapsamında gerçekleştirilen çok portlu entegre dönüştürücü tasarımı ve geliştirilmesi detaylarına yer verilmektedir. Dördüncü bölümde, simülasyon sonuçlarına ve tasarımın işlevselliğini doğrulayan kanıtlara yer verilmektedir. Simülasyon modeli ve yöntemi, elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların analizine odaklanan bu bölüm, çok portlu entegre dönüştürücünün araçlarda kullanılabilirliği ve etkinliğini kanıtlamaktadır. Son olarak, beşinci bölümde, projenin potansiyel kazanımları ve genel sonuçları özetlenerek çalışmanın özgünlüğü ve sektöre olan katkısı vurgulanmakta ve projenin gelecekteki çalışmalarında yeni fırsatlar yaratabileceği potansiyeli ele alınmaktadır.

2. Literatür Taraması ve Motivasyonu

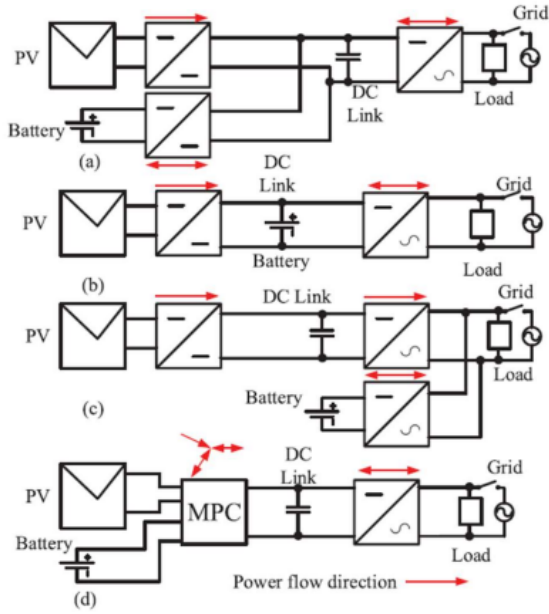
Elektrikli araçlar, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Ancak, mevcut teknolojiler hala enerji yoğunluğu, menzil sınırlamaları ve yüksek şarj süreleri gibi önemli kısıtlamalarla karşı karşıyadır.

Son yıllarda bu zorlukların üstesinden gelebilmek için çeşitli EV alt sistemleri türetilmeye ve tasarlanmaya başlanmıştır. Özellikle güç elektroniği temelli olan EV alt bileşenleri farklı enerji kaynaklarının ve yüklerin bulunduğu çok portlu dönüştürücü olarak adlandırılan DA/DA dönüştürücü topolojileri türetilmeye başlanmıştır. Çok portlu dönüştürücüler güç akışı yönetimi yaparak birden fazla güç kaynağının elektrikli araçta entegre edilmesi ile bu sorunları çözmeye potansiyeline sahiptir. Ayrıca, bu dönüştürücüler araçların menzilin artırılabilir ve şarj sürelerini azaltabilmektedir.

Çok portlu DA/DA dönüştürücüler çok girişli ve çok çıkışlı sistem gereksinimi olan farklı uygulamalarda kullanılabilir. Özellikle elektrikli araçlar ve bağımsız

gerilim kaynağı ihtiyacı olan sistemler için çok girişli dönüştürücü sistemler uygundur [1]. Çok portlu DA/DA dönüştürücüler veya bunların azaltılmış anahtar formu, daha az karmaşıklık, daha düşük maliyet ve daha az bileşen sayısına sahip kompakt yapılar nedeniyle kullanılmaktadır [2],[3]. PV (Fotovoltaik Panel) ve ES (Enerji Depolama) sistemlerini entegre eden Çok Portlu Dönüştürücü (MPC) topolojisi önerilmiştir [4],[5]. Yenilenebilir enerji sistemlerini bir dağıtılmış güç sistemi (DPS) olarak kullanmak için çoklu dönüştürücü yapıları uygundur. [6]'de, yenilenebilir enerji kaynakları için Çok Bağlantı Noktalı Güç Elektroniği Arayüzü (MPEI) için örnek deneysel çalışma sunulmuştur. Deneyde 1.2KW'lık bir prototip girişinde yakıt hücresi ve batarya olan iki kaynakla gerçekleştirilmiştir. Batarya ve yakıt hücresi portundaki akım, sistemin hızlı başlamasıyla birlikte bataryanın deşarj koruması içinde çalışma sırasında ayarlanır. [7]'de ise güç kaynağı fazla olan sistemler için iki PWM dönüştürücüsünü entegre eden MPC önerilmiştir. Bu dönüştürücü, bir transformatör kullanmadan anahtarları paylaşarak tek bir birime entegre ettiğinden sistem basite indirgenmiş olur. Bu işlem için 240 W'lık bir prototip kullanılarak batarya ve PV ile çalıştırılarak tam yükte % 96.8 verimlilik elde edilmiştir. Hibrit elektrikli araçlar (HEV) için hibrit çok portlu çift yönlü dönüştürücü sistemi [8]'de önerilmiştir. Bu sistem bir ultra kapasitör bankası, bir batarya bankası ve ortak bir DA bağlantısı olan alternatöre bağlı bir içten yanmalı motordan oluşur ve böylece performans ve verimlilik artırılmayı amaçlanır. Bu enerji kaynaklarından en iyi performansı elde etmek için bir kontrol stratejisi önerilmiştir. Bu topolojinin kontrol sistemi PSCAD/EMTDC kullanılarak simüle edilmiştir. Sonuç olarak kontrol sisteminin kazançlı dönüştürücünün ideal olmamasından dolayı ideal kazançtan daha az olarak elde edilmiş ve bu durum prototiple doğrulanmıştır. 48V ve 12V DA bağlantı noktası ve izole bir DA bağlantı noktası olan üç girişli bir DA-DA dönüştürücü tasarlanmış ve analiz edilmiştir [9]. Bu çalışmada tüm yük koşullarında kayıpları analiz etmek için 750 W, 125 kHz'lik TPC prototip için bir kayıp tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Elde edilen verimlilik, farklı yük koşullarında %90'ın üzerindedir.

Şekil 1, PV ve ES'yi entegre etmek için dört baskın mimariyi göstermektedir ve kırmızı oklar güç akışının yönünü göstermektedir. YEK ve ES üniteleri için ayrı bir DA/DA dönüştürücü ile ikinci bir DA/AA invertör aşaması içeren en yaygın mimari Şekil 1(a)'da gösterilmektedir. İkinci en popüler mimari, Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi, batarya DA/DA dönüştürücüsünün ortadan kaldırıldığı DA-Link mimarisi ile entegre bataryadır. Şekil 1(c), bataryanın ayrı bir invertör kullanılarak AA tarafına entegre edildiği bir AA batarya mimarisini göstermektedir [5]. Her mimarinin avantaj ve dezavantajları vardır.



Şekil 1. PV ve ES entegrasyonu için ana mimariler. (a) Çoklu evirici mimarisi (b) DA-link batarya mimarisi (c) AA tarafı batarya mimarisi (d) Entegre MPC [10]

Şekil 1(a)'daki topoloji en makul seçenektir, çünkü ara DA/DA kademesi batarya voltajını AA hattıyla uyumlu yüksek voltajlı bir DA baraya yükseltebilir. Şekil 1(b) ve (c)'deki topolojiler daha yüksek voltajlı bir batarya sistemi için uygundur, ancak Şekil 1(b)'deki topoloji, üçüncü portu etkilemeden güç akışını PV'den bataryaya veya PV'den şebekeye yönlendirmek için ek anahtarlar/röleler gerektirir. Bu eklemeler güvenilirlik sorunlarına ve sistem kaybına yol açmaktadır. Şekil 1(b)'ye bakıldığında, batarya kontrolsüz olduğundan ve doğrudan DA baraya bağlı olduğundan, bataryanın SOC'sine bağlı olarak DA-bara voltajı değişir ve şebeke eşzamanlılığını korumak için uygun invertör kontrolü gerektirir. Şekil 1(d)'de gösterilen MPC, Şekil 1(a)-(c)'de gösterilen topolojilerin ortaya çıkardığı zorlukların çoğunu çözmekte ve böylece entegre şebekeye bağlı veya bağımsız PV-batarya sistemi için uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Batarya boyutu ve voltajı artık DA bara tarafından belirlenmemektedir. Buna ek olarak, sistem konfigürasyonu seçimi çok daha esnek ve Şekil 1(a) veya (b)'deki topolojilerle aynı performansı elde etmek için daha az bileşen kullanır, böylece sistem verimliliği ve güç yoğunluğu artar. Şekil 1(d)'deki tipik bir MPC yapısının analizi [11]'de yapılmış ve dönüştürücünün daha düşük cihaz sayısına sahip olduğu ve yalnızca bir güç dönüştürme aşamasıyla oldukça kompakt olduğu sonucuna varılmıştır.

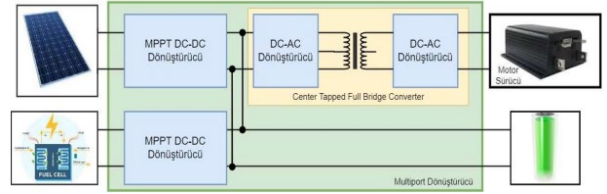
Literatürde yapılan uygulamalar ve topoloji özellikleri göz önüne alındığında bu çalışmanın yapılmasındaki temel amaç ve motivasyon sağlayan katkıları şu şekilde sıralanabilir:

3. Çok Portlu Entegre Dönüştürücü Tasarımı ve Geliştirilmesi

Bu proje kapsamında geliştirilen çok portlu entegre dönüştürücü, birden fazla enerji kaynağını yönetebilme yeteneğine sahip olan bir güç elektroniği cihazıdır.

Dönüştürücü tasarımı, birden çok enerji kaynağından gelen enerjiyi en etkin şekilde kullanmayı ve dağıtmayı hedefler. Fotovoltaik paneller, yakıt hücreleri ve batarya, bu enerji kaynaklarından bazılarıdır. Bu kaynakların her biri, farklı çevresel ve operasyonel koşullara en iyi yanıtı verebilmek için kendi DA-DA dönüştürücüsüne sahiptir.

Şekil 2'de çok portlu dönüştürücünün sadeleştirilmiş blok diyagramı verilmiştir. Sistem, fotovoltaik panel ve yakıt hücresi olmak üzere iki enerji portuna, bir adet çift yönlü batarya portuna ve bir adet çift yönlü yük portuna sahiptir. Yük portuna bağlanan motor sürücü ile birlikte rejeneratif frenleme anında motor tarafından üretilen güç bataryaya aktarılırken motorun güç talebinde bulunduğu durumda ise enerji portları ve batarya portu yük portuna güç aktarmaktadır.



Şekil 2. Çok Portlu Dönüştürücü Blok Diyagramı

Önerilen sistem, motor sürücü için 6 kW'lık center tapped tam köprü dönüştürücü, yakıt hücresi için 2kW'lık MPPT DA-DA dönüştürücü ve fotovoltaik panel için MPPT DA-DA dönüştürücü sistemlerinin bataryaya akuple ortak bir DA barada entegre edilmesi ile oluşturulmuş bir yapıya sahiptir. Böylelikle 6 kW a kadar nominal güce sahip mikro mobilite elektrikli araçlara uyarlanabilir yapıya sahip olacaktır. Ayrıca, motor ve motor sürücüdenden bağımsız yapısı ile çıkış tarafı DA barada istenilen tip araca bağlantı imkanı sağlayacaktır.

Dönüştürücünün kontrol mekanizması, çeşitli enerji yönetim stratejilerini kullanır. Bunlar arasında Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT), sabit akım, sabit voltaj, push-pull ve faz kaydırma kontrol yöntemleri bulunur. Bu çeşitli kontrol stratejileri, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengeyi optimize eder, böylece sistem genelinde enerji verimliliğini artırır.

Çok portlu entegre dönüştürücünün donanım bileşenleri, yüksek enerji yoğunluğu ve verimlilik sağlamak üzere dikkatlice seçilmiştir. Yüksek frekanslı anahtarlamaları yönetebilen ve yüksek sıcaklık koşullarında bile stabil performans gösteren bileşenler kullanılmıştır. Ayrıca, tüm bileşenler, araç elektronik sistemleri ile uyumlu olacak şekilde AEC (Automotive Electronics Council) standartlarına uygun olarak seçilmiştir.

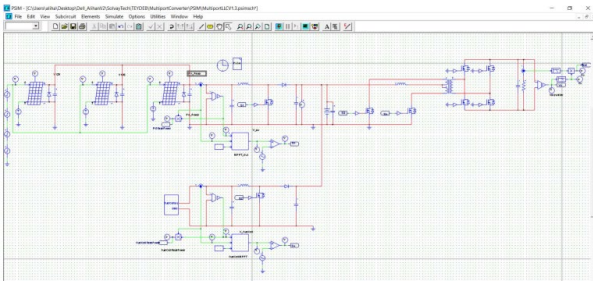
Tasarımda ayrıca, araçların frenleme enerjilerini geri kazanma yeteneği de dikkate alınmıştır. Dönüştürücü, çift yönlü bir yapıya sahip olduğundan, frenleme sırasında motor tarafından üretilen enerji bataryaya geri kazanılabilir. Bu, enerji israfını önler ve genel verimliliği artırır.

Sonuç olarak, çok portlu entegre dönüştürücünün tasarımı ve bileşenleri, elektrikli araçların enerji verimliliğini, menzili ve şarj sürelerini optimize etmek için stratejik olarak seçilmiştir. Bu dönüştürücünün kullanımı, enerji yönetimi açısından çok daha esnek ve verimli bir elektrikli araç deneyimi sağlayabilir.

4. Uygulama ve Sonular

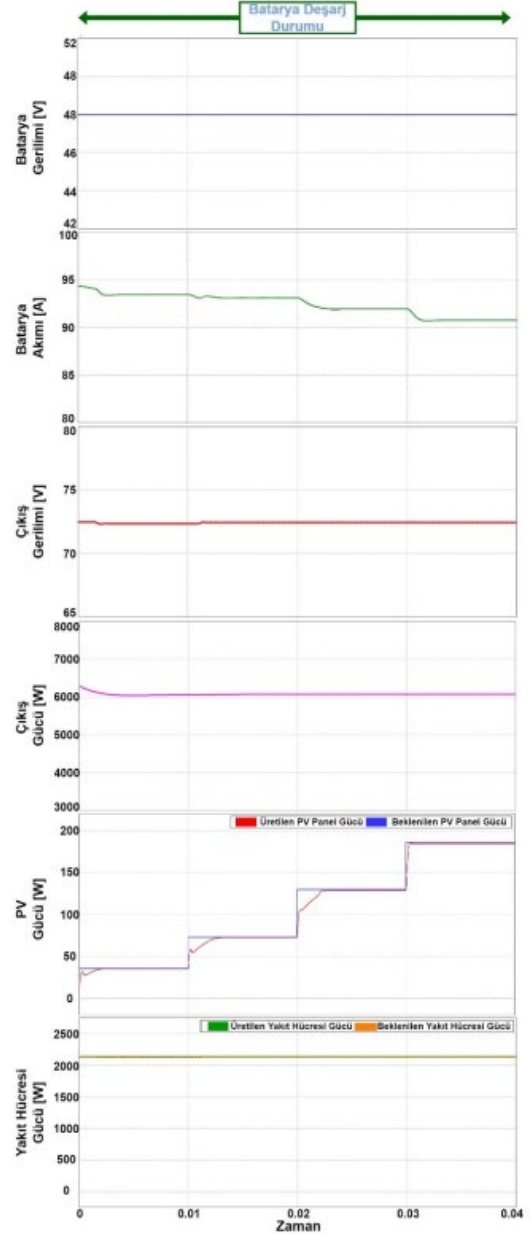
Bölüm 4, ok portlu entegre dnüşürücünün işlevselliğini ve performansını doğrulayan detaylı simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. İlk olarak, dnüşürücünün prototipi PSIM simülasyon ortamında modellenmiştir. Ardından, dnüşürücünün farklı alışma koşulları altında nasıl performans gösterdiği test edilmiştir. Bu simülasyonlar, dnüşürücünün elektrikli araçlardaki eşitli enerji kaynaklarını etkin bir şekilde yönetme ve dağıtma becerisini ortaya koymaktadır.

Bu projenin ön alışmaları kapsamında önerilen ok portlu entegre dnüşürücü yapısı PSIM ortamında modellenmiştir. Simülasyon modeli Şekil 3’de görülmektedir. Sistemin farklı alışma modları altında incelemesi yapılmış olup sistemin fonksiyonları ve performansı test edilmiş ve doğrulanmıştır.



Şekil 3. ok Portlu Dnüşürücü PSIM Simülasyon Modeli

Hazırlanan simülasyon modelinde 2kW’lık yakıt hücresi ve 60W’lık olmak üzere toplamda 3 adet seri PV panel enerji üniteleri olarak bağlanmaktadır. Bunun yanı sıra 48V 45Ah’lık batarya paketi modellenmesi yapılmıştır. Yüksek frekans transformatörün sağ tarafında motor sürücü yük olarak modellenmektedir.



Şekil 4. Performans Sonucu

Şekil 4’te gösterilen simülasyon sonuçları, motor sürücünün 6 kW güç talebinde bulunduğu, yakıt hücresinin yaklaşık 2100 W sabit güç sağladığı, PV panel anlık gücünün kademeli olarak yükseldiği durumu temsil etmektedir. İlgili simülasyon süresinde batarya tampon görevi görerek (deşarj olarak) motor sürücüye kesintisiz güç sağlamaktadır. Kademeli artan PV panel gücü ile ters orantılı olarak batarya akımı azalış göstermektedir. Tablo 1’de ve Şekil 4’te verilmekte olan performans sonuçlarından da anlaşıldığı üzere belirlenen simülasyon zaman aralığında çıkış gerilimi sabit tutulmuş olup, motor sürücüye kesintisiz güç sağlanmıştır.

Tablo 1. 6 kW Simülasyon Sonucu Performans Sonuçları

Sistem Güçleri	Zaman Aralığı			
	0-0.01 sn	0.01-0.02 sn	0.02-0.03 sn	0.03-0.04 sn
Motor Gücü	6.05kW	6.05kW	6.05kW	6.05kW
Batarya Gücü	4.48kW	4.46kW	4.41kW	4.35kW
Yakıt Hücresi Gücü	2.13kW	2.13kW	2.13kW	2.13kW
PV Panel Gücü	35.2W	72.2W	129.2W	184.4W
Verimlilik	%91	%90.8	%90.7	%90.7

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, dönüştürücünün araç motorundan, fotovoltaiik panellerden ve yakıt hücrelerinden gelen gücü yönetebildiği ve aynı zamanda bataryaya frenleme enerjisi aktarabildiği görülmüştür. Bu bulgular, dönüştürücünün çift yönlü güç transferi yeteneğini ve enerji yönetimindeki etkinliğini belgelendirmektedir.

Ek olarak, simülasyon sırasında elde edilen veriler, dönüştürücünün toplam verimliliğinin %90'ın üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu durum, dönüştürücünün enerji israfını minimize etme ve güç kaynaklarını verimli bir şekilde yönetme yeteneğine işaret etmektedir.

5. Değerlendirme ve Tartışma

Elektrikli araç ve enerji ihtiyacının arttığı göz önüne alındığında enerji verimliliği önem kazandığı görülmektedir. Bununla birlikte elektrikli araç alt sistemlerinde birbirine entegre edilebilen yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama birimleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu noktada çok portlu entegre dönüştürücü tasarımı, elektrikli araçlarda enerji yönetimini etkileyen kritik sorunlara yenilikçi ve etkili bir çözüm sunduğu vurgulanmaktadır.

Çok portlu dönüştürücünü elektrikli araçların enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda enerji kullanımını optimize etmekle görevlidir. Çok portlu dönüştürücülerin diğer bir görevi birbirinden farklı olan enerji kaynakları, enerji depolama birimlerini ve aynı zamanda yük grublarından oluşan sistemleri birbirine entegre etmekle ve güç akışını yönetmekle görevlidir.

Sonuç olarak, bu makalede gelişen elektrikli araçlarda kullanılan yakıt hücresi, fotovoltaiik panel ve bataryanın birbirine entegre edildiği ve bir adet yük portundan oluşan çok portlu dönüştürücü topolojisi önerilmektedir. Elektrikli araç teknolojisi üzerindeki potansiyel etkisini geniş bir perspektiften ele alarak, gelecekteki çalışmalarda bu teknolojinin nasıl daha da geliştirilebileceğine dair önemli içgörüler sunmaktadır. Bu bölüm, aynı zamanda bu çalışmanın özgün katkılarını ve etkilerini vurgulayarak makaleyi sonlandırmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, bu projeye 7220751 proje numarası ile mali destek sağladığı için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) minnettedir.

Kaynakça

- [1] Dhananjaya, M., & Pattnaik, S. (2022). Review on multi-port DC-DC converters. *IETE Technical Review*, 39(3),586-599.
- [2] A. Ganjavi, H. Ghoreishy, and A. A. Ahmad, 'A novel single-input dual-output three-level DC-DC

- converter', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 8101-8111, 2018.
- [3] N. K. Reddi, M. R. Ramteke, H. M. Suryawanshi, K. Kothapalli, and S. P. Gawande, 'An isolated multi-input ZCS DC-DC front-end-converter based multilevel inverter for the integration of renewable energy sources', *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 494-504, 2017.
- [4] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, 'A power management strategy for PV/battery hybrid systems in islanded microgrids', *IEEE Journal of Emerging and Selected topics in Power electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 870-882, 2014
- [5] M. Bragard, N. Soltau, S. Thomas, and R. W. De Doncker, 'The balance of renewable sources and user demands in grids: Power electronics for modular battery energy storage systems', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3049-3056, 2010.
- [6] Jiang, W., & Fahimi, B. (2009, February). Multi-port power electric interface for renewable energy sources. In *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* (pp. 347-352). IEEE.
- [7] Nagata, H., & Uno, M. (2017, June). Multi-port converter integrating two PWM converters for multi-power-source systems. In *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia)* (pp. 1833-1838). IEEE.
- [8] Narayanan, K. N., Reddy, S. R. P., & Umananad, L. (2018, October). Multi-port bidirectional high gain converter system for hybrid electric vehicle applications. In *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 5050-5054). IEEE.
- [9] Itoh, K., Inoue, S., Ishigaki, M., Sugiyama, T., & Sugai, M. (2015, September). Loss estimation of an isolated three-port DC-DC converter for automotive applications. In *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 3667-3673). IEEE.
- [10] A. K. Bhattacharjee, N. Kutkut, and I. Batarseh, 'Review of multiport converters for solar and energy storage integration', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 2, pp. 1431-1445, 2018.
- [11] Z. Qian, O. Abdel-Rahman, H. Al-Atrash, and I. Batarseh, 'Modeling and control of three-port DC/DC converter interface for satellite applications', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 3, pp. 637-649, 2009

