



YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINA SAHİP EVSEL UYGULAMALAR İÇİN HİBRİT ANAHTARLI BİR DA/AA DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN FARKLI GÜÇ KOŞULLARI ALTINDAKİ PERFORMANS ANALİZİ

Hakan AKÇA^{1*}, Uğur Savaş SELAMOĞULLARI²

¹ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Yenilenebilir Enerji, DA/AA Dönüştürücü, Hibrit Anahtar, Güç Faktörü, Düşük Güç Verimliliği.</i>	Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının konutlarda verimli kullanımı için hibrit anahtar yapısına sahip bir da/aa dönüştürücü ve kontrol yöntemi incelenmiştir. Konut uygulamalarında, elektrik güç talebinin büyük oranda 500 W ve altında kalması nedeniyle bu tip sistemlerde kullanılacak da/aa dönüştürücünün düşük güçlerde yüksek verimliliğe sahip olması kritik bir önem taşımaktadır. Da/aa devrelerinde yaygın olarak kullanılan IGBT anahtarı yerine paralel IGBT-MOSFET kombinasyonu ile beraber yük akımı geri besleme yöntemi kullanılarak düşük güç seviyelerinde ve farklı güç faktörlerinde verimlilik artırılmıştır. Analizlerde maksimum güç talebinin yanı sıra günlük yük değişkenliği de dikkate alınmıştır. Örneğin, 100 W gibi düşük bir güç seviyesinde hibrit anahtar kullanımı, yalnızca IGBT kullanımına kıyasla güç faktörü 1,00 ve 0,85 için sırasıyla %6,3 ve %8,0 oranında verim artışı sağlamıştır. Bu durum, hibrit anahtar yapısının yalnızca yüksek değil, aynı zamanda düşük güç faktörü koşullarında da avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

PERFORMANCE ANALYSIS OF A HYBRID-SWITCHING DC/AC CONVERTER USED IN RENEWABLE ENERGY SUPPLIED HOUSES UNDER DIFFERENT POWER CONDITIONS

Keywords	Abstract
<i>Renewable Energy, DC/AC Converter, Hybrid Switch, Power Factor, Light Load Efficiency.</i>	In this study, a hybrid switch-based dc/ac converter and its control method are investigated for the efficient utilization of renewable energy sources in residential applications. Since the power demand in residential systems often remains below 500 W, achieving high efficiency at low power levels is critically important for dc/ac converters used in such systems. Instead of a conventional IGBT switch, a parallel IGBT-MOSFET combination along with a load current feedback method is employed to improve efficiency under low power levels and varying power factor conditions. In the analysis, not only the maximum power demand but also the daily load variability is taken into account. For example, at a low power level of 100 W, the hybrid switch configuration achieves an efficiency improvement of 6,3% and 8,0% compared to IGBT-only usage for power factors of 1,00 and 0,85, respectively. This indicates that the hybrid switch structure provides advantages both under high power factor conditions and under low power factor conditions.

Alıntı / Cite

Akça, H., Selamoğulları, U. S., (2025). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Kullanılan Hibrit Anahtarlı Bir DA/AA Dönüştürücünün Farklı Güç Koşulları Altındaki Performans Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 480-493.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
H. Akça, 0000-0001-9138-0755	Başvuru Tarihi / Submission Date
U. S. Selamoğulları, 0000-0002-2272-4355	Revizyon Tarihi / Revision Date
	Kabul Tarihi / Accepted Date
	Yayın Tarihi / Published Date

* İlgili yazar / Corresponding author: hakan.akca@ege.edu.tr, +90-232-311-1817

PERFORMANCE ANALYSIS OF A HYBRID-SWITCHING DC/AC CONVERTER USED IN RENEWABLE ENERGY SUPPLIED HOUSES UNDER DIFFERENT POWER CONDITIONS

Hakan Akça^{1†}, Uğur Savaş Selamoğulları²

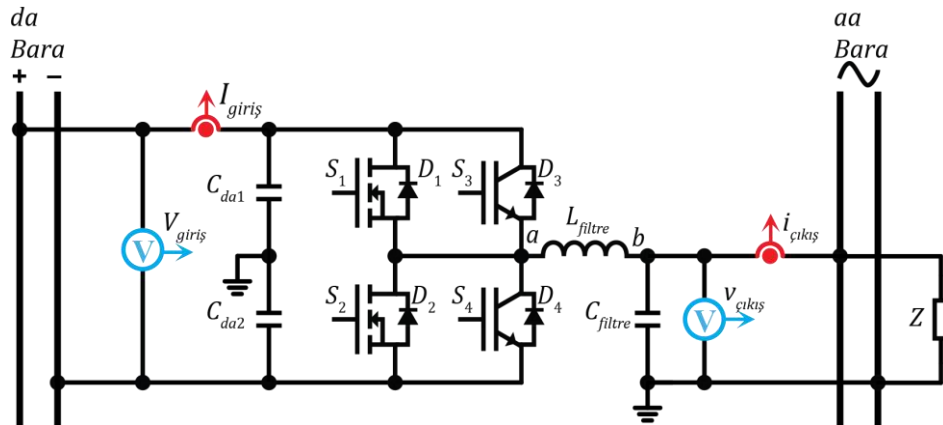
¹ Ege University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, İzmir, Türkiye

² Yıldız Technical University, Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electrical Engineering, İstanbul, Türkiye

Highlights

- Hybrid switch-based dc/ac converter with load current feedback control is designed for efficient energy use for residential applications.
- Parallel IGBT-MOSFET combination and load current feedback increase efficiency at light loads and at different power factor values.
- Hybrid converter achieves efficiency improvements of 6,3% and 8,0% at power factors of 1,00 and 0,85, respectively, about 100 W output power.
- Hybrid switch operation improves efficiency over IGBT alone operation under varying power and load conditions.

Graphical Abstract



Şekil./Figure. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücü (dc/ac converter with hybrid switches)

Purpose and Scope

This study aims to analyze the design of hybrid switch-based dc/ac converters to improve efficiency in residential applications, particularly at light loads and varying power factors. The study investigates the use of a parallel IGBT-MOSFET switch combination and a load current feedback method to achieve better converter performance at light loads compared to IGBT based dc/ac converter performance.

Design/methodology/approach

A hybrid dc/ac converter with a parallel IGBT-MOSFET switch combination and load current feedback method is designed to enhance efficiency in residential applications. The converter's performance is analyzed under varying power factors (1,00 and 0,85) and light load conditions.

Findings

The hybrid IGBT-MOSFET switch combination improves the dc/ac converter efficiency and hybrid converter achieves maximum efficiency improvements of 6,3% and 8,0% at power factors of 1,00 and 0,85, respectively.

Originality

This study presents a method for improving dc/ac converter efficiency, particularly at light load conditions under different power factor conditions.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: hakan.akca@ege.edu.tr, +90-232-311-1817

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde enerji ihtiyacının artması, fosil yakıtların azalması ve çevresel etkiler, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının önemini ortaya koymaktadır. Özellikle fotovoltaiik (FV) paneller ve rüzgar türbini gibi yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır (Blaabjerg vd., 2004; Selamoğulları, 2020; Akça ve Ayaz, 2024). Yenilenebilir kaynakların elektriksel bir yükü beslemek için kullanıldığı sistemlerde da/aa dönüştürücüler temel bir bileşen olarak yer almaktadır. FV sistemleri ile birlikte kullanılan düşük maliyetli dönüştürücü tasarımları üzerine yapılan araştırmalarda, güç elektroniği devrelerinin optimizasyonu, enerji kalitesi vb. konularda çalışmalar yapılmıştır (Stecca vd., 2022; Zhang vd., 2024). Bu dönüştürücüler; devre topolojileri, kontrol algoritmaları ve devre bileşenleri açısından farklılık gösterebilmekte ve her bir unsurun sistem performansı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bunlar arasında yarıiletken anahtarların türü sistemin genel verimliliğini doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biridir (Oneill, 2004).

Yarıiletken anahtarlar olarak MOSFET ve IGBT günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Her bir yarıiletken teknolojisinin avantaj ve dezavantajları bulunduğundan, uygulama alanına göre uygun anahtar seçimi yapılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, MOSFET'lerin düşük akım değerlerinde IGBT'lerin ise yüksek akım değerlerinde daha verimli çalıştığını göstermektedir (Marinov ve Valchev, 2009; Stecca vd., 2022). Ancak her iki anahtar tipinin de sınırlamaları nedeniyle, belirli çalışma aralıklarında tek başına kullanımları verim kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle MOSFET ve IGBT'nin paralel bağlanarak hibrit bir yapı şeklinde kullanılması önerilmiştir (Selamoğulları vd., 2010; Marinov ve Valchev, 2009; Wang vd., 2022; Long vd., 2024). İletim kaybının incelendiği bir çalışmada hibrit anahtar yapısının tek başına SiC MOSFET kullanımına göre daha düşük iletim kaybı sunduğu ve bu sayede yüksek frekanslı çalışma için daha uygun olduğu ortaya konulmuştur (Hu vd., 2023). Gecikme sürelerinin analiz edildiği bir diğer çalışmada ise hibrit yapının kesime girme kayıplarını azalttığı belirtilmiştir (Jin vd., 2024). Diğer bir çalışmada hibrit yapı için kullanılan SiC MOSFET/Si IGBT ve SiC FET/Si IGBT hibrit anahtarları karşılaştırılmış ve SiC FET tabanlı yapının daha düşük anahtarlama kaybı ve iletim gerilim düşümü sunduğu belirlenmiştir (Hu vd., 2024). Ayrıca, Si-IGBT ve SiC-MOSFET tabanlı yapılarda özel paketleme teknikleri kullanılarak düşük endüktanslı yapı elde edilerek hem düşük güç kaybı hem de yüksek termal performans sağlanmıştır (Deshpande vd., 2023).

Hibrit anahtar kullanımında, her iki anahtarın avantajlarını birleştiren kontrol algoritmaları (Jiang vd, 2022) geliştirilmiştir. Özellikle yük akımına göre anahtar seçimi yapan geri beslemeli kontrol stratejileri ile düşük güç bölgelerinde MOSFET, yüksek güç bölgelerinde ise IGBT kullanılarak dönüştürücü verimliliği artırılmaktadır (Li vd., 2022; Woldegiorgis vd., 2023; Selamoğulları vd., 2010). Anlık yük akımına göre hangi anahtarın aktif olacağı belirlenmekte ve sistemin tüm çalışma aralığında yüksek verim elde edilmesi hedeflenmektedir (Selamoğulları vd., 2010). Bu sayede, MOSFET'in düşük yüklerdeki yüksek verim avantajı ile IGBT'nin yüksek yüklerdeki düşük iletim kaybı avantajı birleştirilerek genel verimlilik artırılmaktadır (Akca vd., 2013; Quin vd., 2023). Farklı iki anahtara ait anahtarlama sinyallerinin zamanlamasının yanında genlik değerinin de değiştirilmesiyle verim arttırmaya çalışılmıştır (Xiao vd. 2024). Ayrıca, bu yapıların yüksek frekanslı anahtarlama sırasında oluşabilecek elektromanyetik parazitleri azalttığı ve sistem güvenilirliğini artırdığı rapor edilmiştir (Zhang vd., 2022). Hibrit anahtar yapılarıyla ilgili literatürde sürme devresi tasarımına odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır. Si ve SiC gibi farklı yarıiletken teknolojilerinin birlikte kullanıldığı hibrit yapılarda, aşırı akım problemini çözmek amacıyla aktif kapı sürme devresi kullanılarak sistemin güvenli ve kararlı çalışmasının sağlanabileceği gösterilmiştir (Liu vd., 2025).

Literatürdeki hibrit yapılar çoğunlukla yüksek güçlü sistemlerde test edilmiş olup düşük güçlü konut tipi uygulamalarda kullanımları nadiren ele alınmıştır (Woldegiorgis vd., 2023; Yin vd., 2023). Oysa konut tipi sistemlerde kullanılan yüklerin çoğu 500 W ve altındaki güç seviyelerinde (Selamoğulları vd, 2010) çalışmaktadır. Ayrıca, konut tipi yükler genel olarak 1,00 ile 0,85 aralığındaki güç faktörlerinde çalışmakta olup, literatürde güç faktörünün 0,3 seviyelerine kadar düştüğü örneklerle de rastlanmaktadır (Anderson vd., 2012). Bu durum, diyotlar üzerinden geçen ters yönlü akımı artırarak anahtarlama ve iletim kayıplarını yükseltmekte, dolayısıyla dönüştürücü verimliliğini azaltmaktadır. Bu bağlamda, diyotun ileri yönlü gerilim düşümünün azaltılması da verimlilik açısından önemli bir parametre haline gelmiştir (Anderson vd., 2012). Özellikle MOSFET diyotlarının düşük ileri gerilim değerleri sayesinde bu kayıpların azaltılabileceği belirtilmiştir (Stecca vd., 2022).

Kontrol algoritmalarına odaklanan diğer bazı çalışmalarda, hibrit yapıların sürülmesi için eşik akım düzeyi tabanlı geçiş stratejileri mantıklar ve çok desenli modülasyon teknikleri önerilmiştir (Selamoğulları vd, 2010; Li vd., 2022; Xu vd., 2021). Düşük frekansta IGBT ve yüksek frekansta MOSFET çalıştırılması ile farklı anahtarlama frekansı çalışmaları önerilmiştir (Li vd., 2024; Zhang vd., 2022). Ancak, bu yöntemler genellikle teorik ya da modüler çok seviyeli dönüştürücülere özgü yapılar üzerinde uygulanmış olmasına rağmen günlük yük profilini dikkate alan konut tipi sistemlerde uygulama örnekleri sınırlı kalmıştır. Sonuç olarak, hibrit anahtarlama dönüştürücülerle ilgili literatürde önemli bir birikim olmakla birlikte, bu yapının günlük yük profiline göre konut tipi uygulamalara

özel uyarlanması, akım geri beslemeli geçiş kontrolüyle birleştirilmesi ve farklı güç faktörlü yüklerin incelenmesi henüz yeterince ele alınmamıştır.

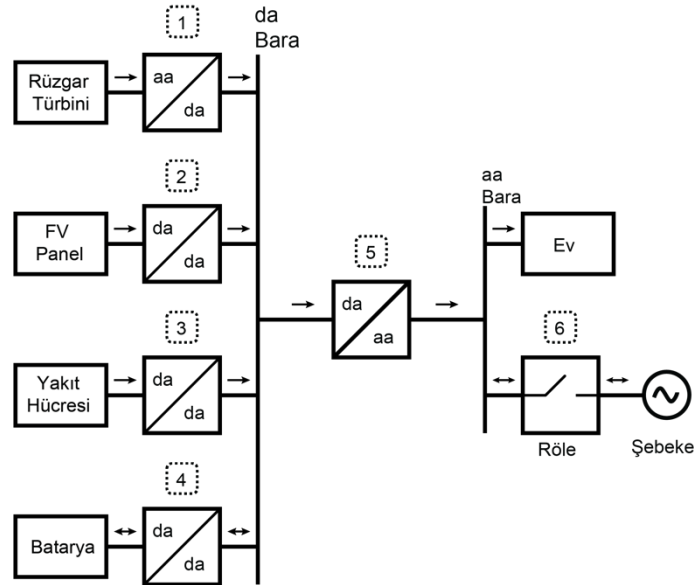
Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları ile beslenen bir evin günlük yük profilini dikkate alarak, MOSFET ve IGBT anahtarlarının paralel bağlandığı hibrit anahtarlı bir da/aa dönüştürücü topolojisi tasarlanmış, bu topoloji için anlık yük akımı geri beslemeli bir kontrol algoritması geliştirilmiş ve farklı güç faktörü koşullarında analizler yapılmıştır.

Makalenin organizasyonu şu şekildedir: İkinci bölümde yük karakteristikleri ile önerilen hibrit anahtarlı dönüştürücü yapısı ve kontrol algoritması sunulmuştur. Üçüncü bölümde simülasyon sonuçları ve performans analizlerine yer verilmiştir. Son bölümde ise genel sonuçlar ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar tartışılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bir evin enerji ihtiyacını aa baradan karşılayan örnek bir sistem Şekil 1’de verilmiştir. Bu şekilde, rölenin (Blok 6) konumuna bağlı olarak sistem şebeke bağlantılı (grid-connected) veya ada modu (stand-alone) çalışma modlarında çalışabilmektedir. Bu çalışmada, sadece ada modu çalışma durumu ele alınmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağından elde edilen enerji ilk olarak bir da barada toplanmakta ve ikinci aşamada ise evsel yükleri besleyebilmek için aa baraya aktarılmaktadır. Bu dönüşüm ve aktarım işlemlerinde aa/da, da/da veya da/aa dönüştürücüler kullanılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynağı ile da bara arasında kullanılacak dönüştürücünün türü, kaynağın ürettiği enerji formuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, rüzgâr enerjisinden yararlanıldığında aa çıkışlı bir generatör tercih edilirse, rüzgârdan elde edilen enerji bir aa/da dönüştürücü yardımıyla da baraya aktarılır. Öte yandan, fotovoltaik paneller, yakıt hücreleri veya bataryalar kullanıldığında, üretilen enerji da/da dönüştürücüler aracılığıyla da baraya iletilir. İkinci aşamada ise da barada toplanan enerji da/aa dönüştürücü kullanılarak aa baraya aktarılır. Bu dönüştürücü, elektriksel yüklerin ihtiyaç duyduğu gerilim genliği ve frekansta enerji sağlayarak evdeki yüklerin kesintisiz beslenmesini sağlar.



Şekil 1. Farklı enerji kaynaklarından beslenen bir eve ait blok diyagramı (Block diagram of a house powered by different energy sources)

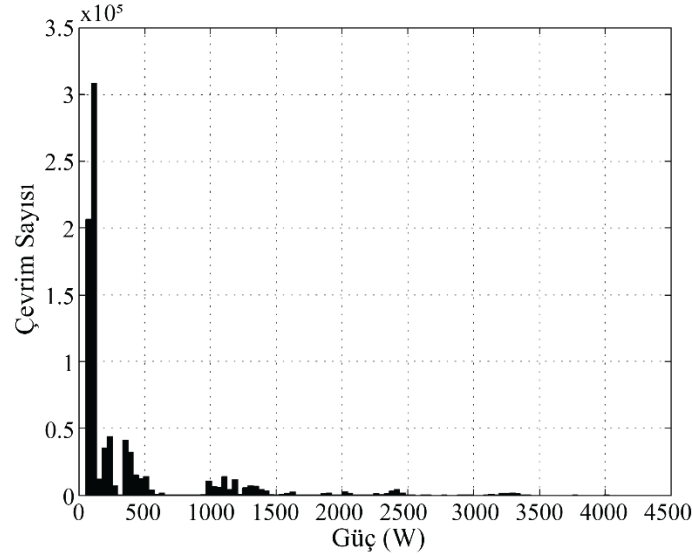
Bu çalışmada şebekeden bağımsız çalışan bir evin enerji ihtiyacının güneş gibi yenilenebilir enerji kaynağından karşılandığı senaryoda, üretilen enerjinin daha verimli şekilde kullanılması amacıyla bir sistem tasarlanmıştır. Bu kapsamda, bir evin günlük yük profili analiz edilmiş, bu profil doğrultusunda MOSFET ve IGBT tabanlı tipik da/aa dönüştürücü verim eğrileri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, daha yüksek verim elde etmeyi sağlayacak hibrit anahtarlama yapısı ve buna uygun bir kontrol algoritması geliştirilmiştir.

Önerilen hibrit da/aa dönüştürücü topolojisinin ve kontrol algoritmasının performansları PSIM2022 yazılımı kullanılarak simülasyon ortamında analiz edilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri

MATLAB 2023a ortamına aktarılmış ve m-file kodları ile sistemin giriş-çıkış güçleri hesaplanarak verim analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.1. Bir Eve Ait Güç Talebi Profili ve Yük Karakteristikleri (Power Demand Profile and Load Characteristics of a Residential House)

Bir evin günlük güç talebi zamana bağlı olarak farklı güç seviyelerinde değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenliğin başlıca sebepleri arasında evde yaşayan birey sayısı, cihazların çalışma süreleri ve mevsimsel faktörler gibi etkenler bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada, dört kişilik bir evden elde edilen elektriksel güç talebi verileri incelenmiş ve Şekil 2’de gösterildiği gibi güç talebinin gün boyunca değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu deneysel veriler, güç talebinin genel olarak günün büyük bir bölümünde düşük seviyelerde kaldığını, ancak bazı aktiviteler veya cihaz kullanımı nedeniyle kısa süreli yüksek güç değerlerine de çıktığını ortaya koymaktadır (Selamoğulları vd., 2010).



Şekil 2. Bir evin günlük güç talep dağılımı (Daily power demand distribution of a household) (Selamoğulları vd., 2010)

Şekil 2’de verilen güç dağılımı analiz edilmiş ve belirlenen güç aralıklarında güç talebinin gün içinde ne kadar sürdüğü ve buna karşılık gelen yüzde değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de düşük, orta, yüksek ve çok yüksek güç seviyesi olmak üzere dört farklı güç aralığında yükler gruplanmıştır. Bu gruplardaki cihazlar ayrıntılı olarak incelendiğinde farklı güç ve güç faktörlerinde cihazlar karşımıza çıkmaktadır. Düşük güçlü yükler grubunda yer alan buzdolabı, LED lambalar, floresan lambalar, laptop ve televizyon gibi cihazlar, günlük kullanım süresinin %85,01’ini oluşturmaktadır. Bu cihazlar genellikle düşük ve orta seviyede güç faktörüne sahiptir. Sürekli çalıştıkları için toplam enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptirler. Orta düzey güçteki yükler ($500 \leq P \leq 1000$ W) arasında çamaşır makinesi, masaüstü bilgisayar, nem alıcılar bulunmaktadır. Bu cihazlar daha kısa süreli çalışsa da belirli zaman dilimlerinde enerji tüketimine etki etmektedir. Bu gruptaki cihazlar, günlük toplam kullanım süresinin %2,36’sını oluşturmaktadır. Yüksek güçlü yükler ($1000 \leq P \leq 1500$ W) kategorisinde bulaşık makinesi ve elektrikli süpürge yer almaktadır. Bu cihazlar genellikle yüksek güç faktörüne sahiptir, ancak kısa süreli çalıştıkları için toplam enerji tüketimi içindeki payları daha düşüktür. Günlük kullanım süresi %8,91’dir. Çok yüksek güçlü yükler ($1500 \leq P \leq 4500$ W) ise su ısıtıcısı ve çamaşır kurutma makinesi gibi cihazları içermektedir (Anderson vd., 2012). Bu cihazlar yüksek güç faktörüne sahip olup, güç tüketimleri oldukça yüksektir. Günlük kullanım süresi %3,72 olmasına rağmen, anlık güç talepleri yüksek olduğu için kullanılacak da/aa dönüştürücü tasarımı açısından dikkate alınması gereken cihazlardır.

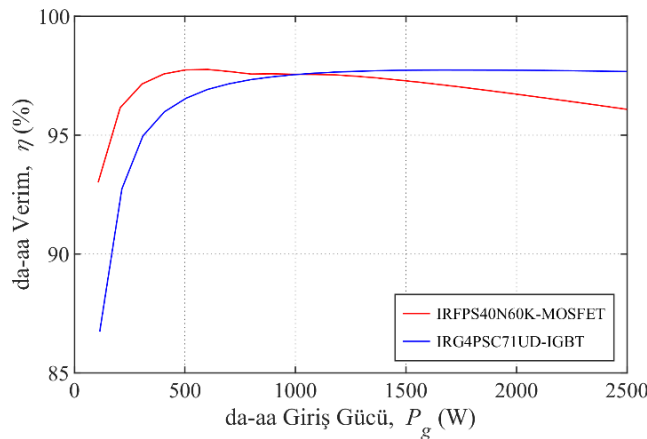
Tablo 1. Bir evdeki güç tüketiminin günlük yüzdesel dağılımı (Daily power consumption percentage distribution) (Selamoğulları vd., 2010)

Güç Seviyesi	Güç (W)	Zaman (Saat)	Yüzde (%)
Düşük	$P < 500$	20,40	85,01
Orta	$500 \leq P \leq 1000$	0,570	2,36
Yüksek	$1000 \leq P \leq 1500$	2,140	8,91
Çok Yüksek	$1500 \leq P$	0,892	3,72

Cihazların Tablo 1’de belirtilen seviyelerde güç ihtiyacını da baradan karşılayabilmek için kullanılan da/aa dönüştürücünün gün içinde büyük oranda düşük güç bölgesinde çalışması gerekecektir. Çalışma gücüne uygun olarak bu dönüştürücülerde IGBT ve MOSFET gibi yarıiletken anahtarlar kullanılmaktadır. Yarıiletken yapısı ve çalışma değerlerine (frekans, gerilim, akım, güç vb.) bağlı olarak çalışma sırasında kayıplar meydana gelmektedir. Bu nedenle, güç elektroniği sistemlerinde kayıpları en aza indirmek ve verimliliği artırmak için devre tasarımı ve bileşen seçimi büyük önem taşımaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji sistemleri gibi verimliliğin doğrudan performansı etkilediği uygulamalarda, bu kayıpların anlaşılması ve minimize edilmesi kritik bir gerekliliktir.

2.2. MOSFET ve IGBT Kullanımının da/aa Dönüştürücü Verimi Üzerindeki Etkisi (Impact of MOSFET and IGBT Utilization on dc/ac Converter Efficiency)

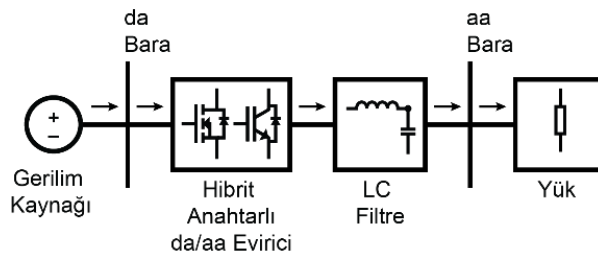
Dönüştürücü yapısında MOSFET ve IGBT kullanıldığı durumda farklı güçlerde farklı verim değerleri elde edilmektedir. Şekil 3’te MOSFET ve IGBT için elde edilmiş tipik verim eğrileri gösterilmektedir. MOSFET, özellikle düşük güç seviyelerinde daha yüksek verim sağlarken, güç seviyesi arttıkça iletim direncine bağlı kayıplar nedeniyle verimde düşüş yaşanmaktadır. Buna karşılık, IGBT yüksek güç seviyelerinde daha düşük iletim kayıplarına sahip olduğu için MOSFET’e kıyasla daha yüksek verim sağlamaktadır. Ancak, IGBT’nin anahtarlama kayıpları özellikle düşük güç seviyelerinde daha belirgin hale geldiğinden, bu bölgelerde verim düşmektedir. Eğer MOSFET ve IGBT paralel olarak hibrit yapıda kullanılırsa, her iki anahtarın avantajlarından faydalanılarak tüm çalışma bölgelerinde yüksek performanslı bir enerji dönüşümü sağlanabilir. Hibrit yapı sayesinde geniş bir çalışma aralığında daha yüksek verimli bir güç dönüşümü elde edilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 3. IRFPS40N60K MOSFET ve IRG4PSC71UD IGBT tabanlı da/aa dönüştürücü devresi verim eğrileri (IRFPS40N60K MOSFET and IRG4PSC71UD IGBT based dc/ac converter circuit efficiency curves)

2.3. Önerilen Anlık Akım Kontrol Algoritması (Proposed Instantaneous Current Control Algorithm)

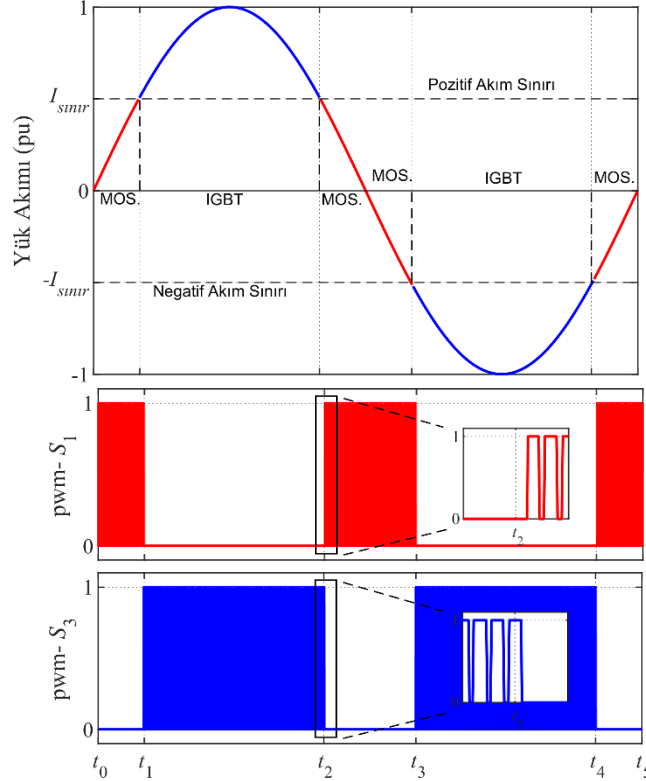
Hibrit anahtarlı devre yapısına ait blok diyagram Şekil 4’te sunulmuştur. Hibrit yapıyı gerçekleştirebilmek için yarım köprü dönüştürücü yapısındaki her bir faz kolunda paralel bağlı IGBT-MOSFET anahtar kombinasyonu kullanılmıştır. Hibrit anahtar yapısı, farklı güç seviyelerinde da/aa dönüşümü sağlamak için kullanılırken, LC filtre da/aa dönüştürücü çıkışındaki yüksek frekanslı elektriksel bileşenlerin bastırılması için kullanılmıştır.



Şekil 4. Hibrit anahtarlı devre blok diyagramı (Hybrid switch circuit block diagram)

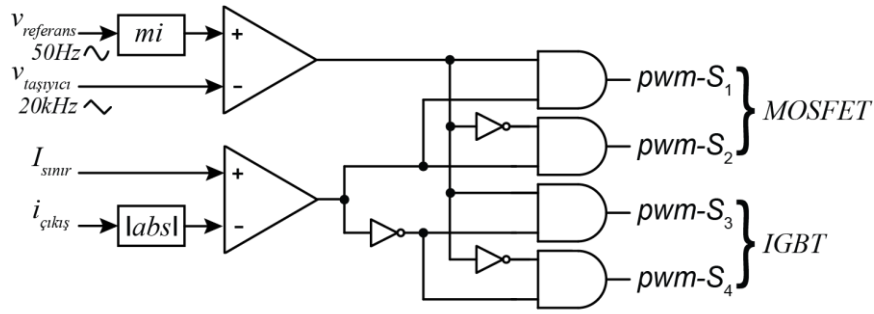
Anahtar seçimi için kullanılan yük akımı geri beslemesi için tasarlanan anlık akım kontrol algoritması ve anahtarların çalıştırılması için gerekli olan kapı sinyalleri Şekil 5’te verilmiştir. Akım geri beslemesi sayesinde uygun anahtar seçimi yapılarak dönüştürücü devresinin verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Şeklin üst kısmında verilen grafikte, sinüzoidal olarak zamanla değişen yük akımı ve anahtar seçimi için belirlenen sınır akım ($I_{sınır}$) değeri görülmektedir. Yük akımının anlık değeri ile $I_{sınır}$ akım değeri karşılaştırılarak belirli zaman dilimlerinde farklı anahtarlar devreye sokularak MOSFET ve IGBT’lerin yük akımının belirli aralıklarında aktif hale

gelmesi sağlanır. Yük akımının belirlenen pozitif ve negatif akım sınırlarının altında olduğu bölgelerde ($t_0 - t_1$, $t_2 - t_3$, $t_4 - t_5$ aralıkları) MOSFET'ler aktif durumdadır. Bu bölgelerde MOSFET'ler için uygun kapı sinyalleri üretilirken, IGBT'lere 0 seviyesinde kapı sinyali uygulanır, yani IGBT'ler bu zaman diliminde kesimde tutulur. Yük akımının belirlenen pozitif ve negatif akım sınırlarının üstünde olduğu bölgelerde ($t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$ aralıkları) IGBT'ler aktif durumdadır. Bu bölgelerde IGBT'lere kapı sinyalleri uygulanırken, MOSFET anahtarına 0 seviyesinde kapı sinyali uygulanır, yani MOSFET'ler bu zaman diliminde kesimde tutulur. Şeklin ortasında MOSFET için üretilen PWM sinyalleri verilirken en alttaki grafikte de IGBT için üretilen PWM sinyalleri verilmiştir. PWM sinyalleri, anlık yük akımına göre her iki anahtarın farklı zaman aralıklarında çalışmasını sağlayacak şekilde üretilmiştir. Bu sayede, her iki anahtarın da avantajları kullanılarak sistemin verimliliği artırılarak düşük ve yüksek güç seviyelerinde maksimum performans elde edilecektir.



Şekil 5. Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtarlama algoritması dalga şekli ve kapı sürme sinyalleri (Signal waveform of the proposed instantaneous load current feedback hybrid switching algorithm and gate driving signals)

Dönüştürücünün çalışması için gerekli olan PWM sinyallerini (Şekil 5) üretmek için Şekil 6'da şematiği verilen kontrol devresi kullanılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere 50 Hz frekanslı referans sinüzoidal sinyal ($v_{referans}$) Eşitlik (1)'de verilen modülasyon indeksi (mi) ile işleme sokularak elde edilen sinyal 20 kHz frekanslı taşıyıcı sinyali ($v_{taşıyıcı}$) ile karşılaştırılarak PWM sinyalleri üretilmiştir. Bu işlem dönüştürücü devrenin çıkışında istenilen gerilimi elde etmek üzere doğru anahtarlama işlemini sağlamak için gereklidir. Ayrıca, çıkış akımının ($i_{çıkış}$) mutlak değeri ile Eşitlik (7) ile elde edilen $I_{sınır}$ değeri anlık olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın amacı hangi anahtarın aktif olacağını belirlemektir. $i_{çıkış}$ yük akımının anlık değeri ile $I_{sınır}$ karşılaştırması sonucunda üretilen PWM sinyali aktif olacak anahtarlara doğrudan uygulanarak anahtarların ilettime girmesi sağlanırken, pasif olacak anahtarlara 0 seviyesinde sinyal uygulanarak kesimde kalması sağlanır. Bu şekilde, uygun anahtarın çalışması sağlanarak önerilen çalışma algoritması ile verimli bir dönüştürme işlemi gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 6. Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtarlama algoritması devre şematığı (Circuit schematic of the proposed instantaneous load current feedback hybrid switching algorithm)

Eşitlik (1)'e göre kontrol sinyali olan referans gerilim ($v_{referans}$) ve taşıyıcı gerilim ($v_{taşıyıcı}$) oranı bize modülasyon indeksini (mi) vermektedir. Eşitlik (2)'ye göre modülasyon indeksi (mi) ile giriş da bara geriliminin ($V_{giriş}$) çarpımı ile çıkış aa bara geriliminin maksimum değeri ($V_{çıkış}$) elde edilmektedir.

$$mi = \frac{v_{referans}}{v_{taşıyıcı}} \quad (1)$$

$$V_{çıkış} = mi \cdot V_{giriş} \quad (2)$$

$I_{sınır}$ akımının değeri belirlenirken MOSFET ve IGBT kayıpları göz önüne alınmıştır. Normal şartlarda bu kayıplar iletim, kesim ve anahtarlama kayıplarından oluşmaktadır. Burada Eşitlik (3) ve Eşitlik (4) kullanılarak sadece iletim kayıplarının göz önüne alınmıştır. Bu eşitliklere göre $I_{sınır}$ akım değerinde MOSFET iletim kaybı ($P_{iletim-MOSFET}$) ve IGBT iletim kaybı ($P_{iletim-IGBT}$) birbirine eşit hale gelmektedir. Bu akım değerinin altında MOSFET iletim kaybı daha düşükken bu akım değerinin üstüne çıktığında IGBT iletim kaybı daha düşük olmaktadır. Bu nedenle bu akımın altında MOSFET üstünde ise IGBT'nin kullanılması kayıpların azaltılmasını sağlamaktadır. Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) kullanılarak Eşitlik (7) elde edilir. Eşitlik (7)'ye göre $I_{sınır}$ akım değeri IGBT iletim geriliminin ($V_{CE(on)}$) MOSFET iletim direncine ($R_{DS(on)}$) oranı olarak hesaplanabilmektedir.

$$P_{iletim-MOSFET} = I_{sınır}^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (3)$$

$$P_{iletim-IGBT} = I_{sınır} \cdot V_{CE(on)} \quad (4)$$

$$P_{iletim-MOSFET} = P_{iletim-IGBT} \quad (5)$$

$$I_{sınır}^2 \cdot R_{DS(on)} = I_{sınır} \cdot V_{CE(on)} \quad (6)$$

$$I_{sınır} = \frac{V_{CE(on)}}{R_{DS(on)}} \quad (7)$$

2.4. Önerilen Hibrit Anahtarlı da/aa Dönüştürücü Yapısı (Proposed Hybrid Switch-Based dc/ac Converter Structure)

Hibrit anahtar yapısı yarım köprü da/aa dönüştürücü topolojisi üzerinde kurgulanmıştır. Bu yapıyı gerçekleştirebilmek için yarım köprü dönüştürücü yapısındaki her bir faz kolunda paralel bağlı IGBT-MOSFET anahtar kombinasyonu kullanılmıştır. MOSFET anahtarı olarak International Rectifier firmasının 600 V, 40 A ve 110 mΩ iç direnç değerlerine sahip IRFPS40N60K model numaralı MOSFET (Tablo 2) ve 600 V, 40 A ve 1,67 V iletim gerilimine sahip IRG4PSC71UD model numaralı IGBT (Tablo 3) anahtarları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan IGBT ve MOSFET anahtarlara ait parametreler Eşitlik (7)'de görüldüğü devrenin çalışma noktasını ($I_{sınır}$) etkilemektedir. Bu parametreler, MOSFET diyodunun ileri yönlü gerilim düşümü 1,5 V ve IGBT diyodunun ise 1,7 V olarak teknik dokümanlardan elde edilmiştir.

Tablo 2. IRFPS40N60K MOSFET karakteristik değerleri (Characteristic values for IRF40N60K MOSFET)

Açıklama	Parametre	Değer
Anahtar maksimum gerilimi	V_{DSS}	600 V
Anahtar maksimum akımı	I_D	40A
Anahtar iletim direnci	$R_{DS(on)}$	110 mΩ
Diyot ileri yönlü gerilim düşümü	V_{SD}	1,5 V

Tablo 3. IRG4PSC71UD IGBT karakteristik değerleri (Characteristic values for IRG4PSC71UD IGBT)

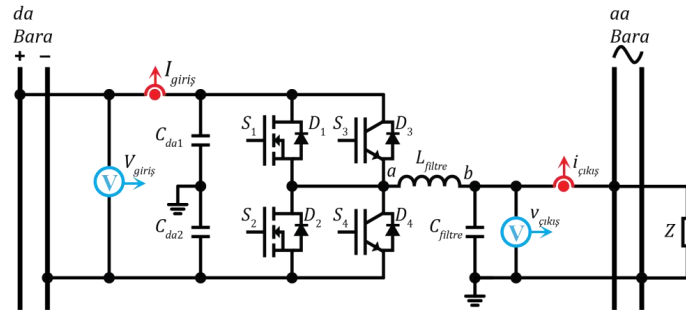
Açıklama	Parametre	Değer
Maksimum anahtar gerilimi	V_{CES}	600 V
Maksimum kollektör akımı	I_C	60A
Anahtar iletim gerilimi	$V_{CE(on)}$	1,67 V
Diyot ileri yönlü gerilim düşümü	V_{FM}	1,7 V

Devrenin çalışma parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Eşitlik (2)'de verilen modülasyon indeksi $m_i = 0,85$ olarak kullanılarak girişte $V_{giriş} = 300 V$ da bara gerilimi için çıkışta aa bara gerilimin maksimum değeri $V_{çıkış,max} = 127,5 V$ olarak elde edilmiştir. Şebeke frekansı 50 Hz olup anahtarlama frekansı 20 kHz olarak kullanılmıştır. Devre çıkış gücü olarak 4500 W seviyesinde aktif güç sağlayabilmektedir. Dönüştürücü girişinde da bara hattına bağlı her biri 4700 μF olan iki adet kondansatör (C_{da1}, C_{da2}) kullanılmıştır. Dönüştürücü çıkış geriliminin filtrelenerek yüksek frekanslı bileşenlerin bastırılması için 343,5 μH değerinde filtre endüktansı (L_{filtre}) ve 14,7 μF değerinde filtre kondansatörü (C_{filtre}) kullanılmıştır. Devrede sırasıyla IRFPS40N60K ve IRG4PSC71UD kodlu MOSFET ve IGBT kullanılmıştır. Eşitlik (7) kullanılarak sınır akım değeri, MOSFET iletim direnci ($R_{DS(on)}$) ve IGBT iletim gerilimi ($V_{CE(on)}$)'nin oranından yaklaşık 15 A olarak hesaplanmıştır. Ancak bu değer, yalnızca iki parametreye dayanan teorik bir yaklaşım olup simülasyonlar sırasında yapılan detaylı analizlerde, en yüksek verimin 13 A akım değerinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu sapmanın nedeni; diyot gerilim değerleri, anahtarlama frekansı, filtre elemanları ve yükün güç faktörü gibi diğer devre ve sistem parametrelerinin de sınır akım üzerinde etkili olmasıdır. Konut tipi sistemlerde kullanılan yükler genel olarak $\cos\phi_1 = 1,00$ ve $\cos\phi_2 = 0,85$ aralığında güç faktörleriyle çalıştığı için dönüştürücü performansı bu iki güç faktörü için incelenmiştir. Şekil 7'de hibrit anahtarlı yarım köprü da/aa dönüştürücü devreleri sunulmuş ve çalışma prensipi açıklanmıştır.

Tablo 4. da/aa yarım köprü dönüştürücü devre parametreleri (Circuits parameters of dc/ac half bridge converter)

Açıklama	Parametre	Değer
da bara gerilimi	$V_{giriş}$	300 V
Modülasyon indeksi	m_i	0,85
aa bara gerilimi	$V_{çıkış,max}$	127,5 V
Şebeke frekansı	$f_{şebeke}$	50 Hz
Anahtarlama frekansı	$f_{anahtarlama}$	20 kHz
Nominal güç	$P_{nominal}$	4500 W
Giriş kondansatörü	C_{da1}, C_{da2}	4700 μF
Filtre endüktansı	L_{filtre}	343,5 μH
Filtre kondansatörü	C_{filtre}	14,7 μF
MOSFET	S_1, S_2	IRFPS40N60K
IGBT	S_3, S_4	IRG4PSC71UD
Akım sınırı	$I_{sınır}$	13 A
Güç faktörü	$\cos\phi_1$ $\cos\phi_2$	1,00 0,85

Şekil 7'de hibrit anahtar yapısının kullanıldığı da/aa dönüştürücüsüne ait devre verilmiştir. Yük akımı geri beslemesi kullanılarak üst ve alt kollarda bulunan paralel IGBT-MOSFET anahtar yapısında herhangi bir anda sadece bir anahtar aktif olarak çalıştırılmaktadır. $I_{sınır}$ akım seviyesine bağlı olarak anahtar seçimi yapılır. $i_{çıkış}$ yük akımının anlık değeri $I_{sınır}$ seviyesinin altındayken ($t_0 - t_1$, $t_2 - t_3$, $t_4 - t_5$ aralıkları) MOSFET aktif olurken, $i_{çıkış}$ yük akımının anlık değeri $I_{sınır}$ seviyesinin üstündeyken ($t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$ aralıkları) IGBT aktif olur. Hibrit çalışma durumunda anahtar geçişleri sırasında tek anahtarlı devreye göre yük akımı tek diyot yerine iki anahtarın diyeti üzerinden paylaşılır. Akım paylaşımı diyotların ileri yönlü gerilimi ve iç dirençlerine bağlı olarak sağlanır. Önerilen hibrit anahtar yapısı ile her bir yarıiletken anahtar kendisine uygun akım değerlerinde çalıştırılarak her bir anahtarın sunduğu avantajlar bir araya getirilerek dönüştürücü devrenin tüm güç değerlerinde daha iyi verim eğrisine sahip olması sağlanmaktadır.



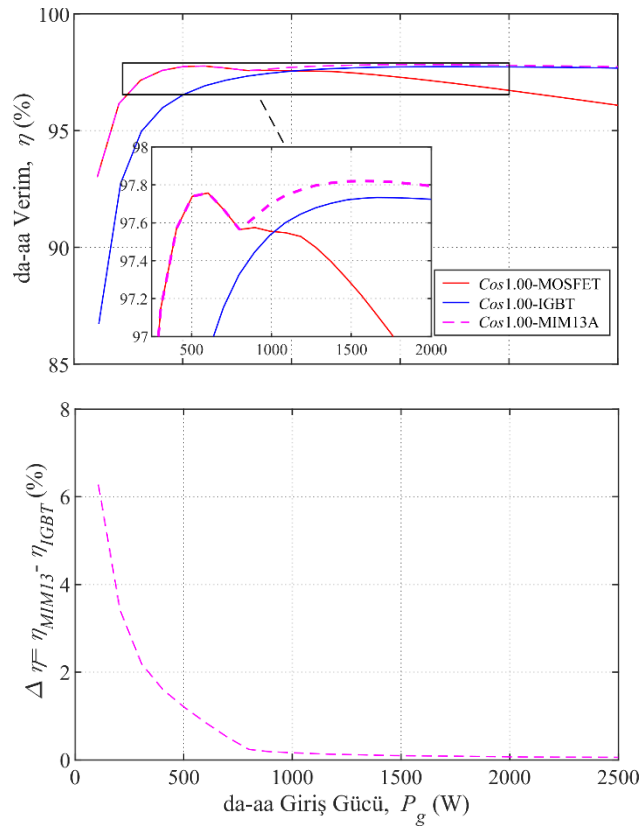
Şekil 7. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücü (Hybrid switch-based dc/ac converter)

4. Analiz Sonuçları (Analysis Results)

Analizlerde yalnızca MOSFET içeren yarım köprü da/aa dönüştürücü, yalnızca IGBT içeren yarım köprü da/aa dönüştürücü ve anlık yük akımı geri beslemeli kontrol algoritmasının uygulandığı hibrit anahtarlı yarım köprü da/aa dönüştürücü (MIM) devre yapıları incelenmiştir. Her bir devre yapısı için giriş ve çıkış akım-gerilim değerleri PSIM programından elde edilerek MATLAB ortamında anlık giriş ve çıkış güçleri hesaplanmış, buna bağlı olarak da sistem verimliliği analiz edilmiştir. Analizlerde yük tarafında $\cos\phi_1 = 1,00$ ve $\cos\phi_2 = 0,85$ olmak üzere iki farklı güç faktöründe çalışma durumu ele alınmış ve her bir dönüştürücü yapısı için verim değerleri hesaplanmıştır. Yatay eksen de dönüştürücünün 2500 W değerine kadar çıkış gücü ($P_{\text{çıkış}}, W$), dikey eksen de ise verimlilik ($\eta, \%$) yer almaktadır. Çalışma kapsamında özellikle düşük güçteki verimlilik üzerine durulduğu için minimum 100 W ve maksimum 2500 W değerine kadar inceleme yapılmıştır.

Şekil 8'de verilen üstteki grafikte $\cos\phi_1 = 1,00$ için verilen ilk analiz sonuçlarına göre yalnızca MOSFET kullanılan yapıda maksimum verim $\%97,75$, I_{sinir} seviyesinin altındaki 600 W gibi düşük bir güç seviyesinde elde edilirken aynı noktada yalnızca IGBT kullanılan yapıda ise verim $\%96,90$ seviyesinde kalmıştır. Bu da MOSFET'e kıyasla $\%0,85$ daha düşük bir verim anlamına gelmektedir. Öte yandan, 2500 W gibi yüksek bir çıkış gücünde, MOSFET yapısının maksimum verimi $\%96,10$ 'a düşerken, IGBT yapısı $\%97,70$ verimle çalışarak MOSFET'e göre $\%1,60$ daha yüksek verim sağlamıştır. I_{sinir} seviyesinin altındaki düşük güç bölgesinde MOSFET ve üstündeki yüksek güç bölgesinde IGBT kullanımının olduğu hibrit anahtarlı yapı olan MOSFET-IGBT-MOSFET (MIM) konfigürasyonuna ait verim eğrisi incelendiğinde, MOSFET eğrisinin eğiminin işaret değiştirdiği yaklaşık 13 A akım değerine kadar hibrit yapının verim eğrisinin MOSFET'in eğrisini takip edip bu noktanın sonrasında hibrit yapının verim eğrisi hem MOSFET hem de IGBT yapıların verim eğrilerinin üzerine çıkarak daha yüksek performans göstermiştir.

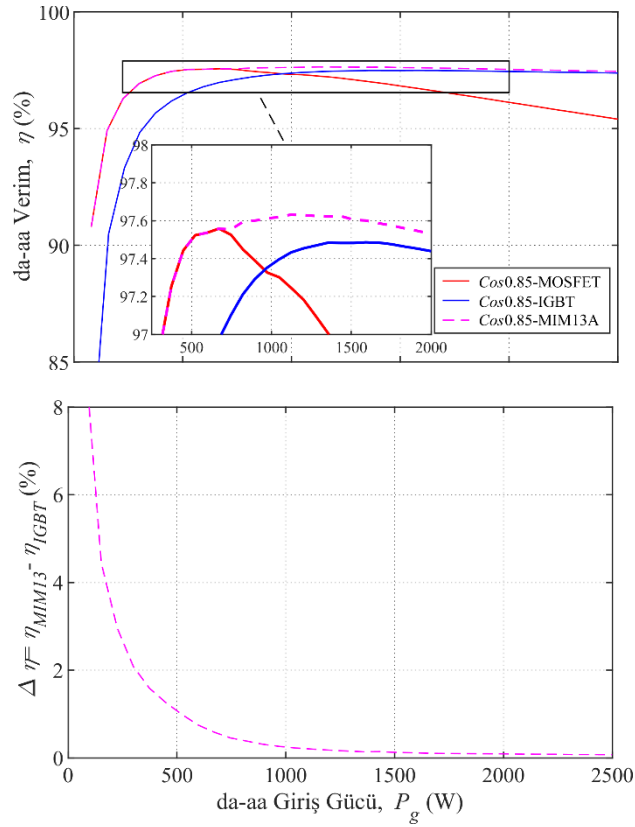
Şekil 8'de verilen alttaki grafikte hibrit yapı ile tek başına IGBT'ye ait verim eğrilerinin arasındaki fark sunulmuştur. Bu grafiğe göre 100 W gibi düşük güç seviyesinde hibrit yapı, yalnızca IGBT kullanımına göre $\%6,3$ oranında daha yüksek verim sağlarken 2500 W gibi yüksek güç seviyesinde küçüğe olsa $\%0,057$ düzeyinde bir verim artışı sağlamıştır. Verim artışında, düşük güç bölgesinde MOSFET'in IGBT'ye göre sağladığı daha düşük iletim kaybı etkili olurken, yüksek güç bölgesinde MOSFET'in düşük gerilimli diyotu verim artışına katkı sağlamıştır. Buradaki etki şu şekilde açıklanabilir. Çıkışta bulunan yük uçlarında güç faktörü her ne kadar $\cos\phi_1 = 1,00$ olsa da çıkış filtresinden kaynaklı olarak meydana gelen endüktif etki nedeniyle da bara yönüne doğru diyotlar üzerinden ters yönde akım geçişi oluşmaktadır. Bu akım, üzerinden geçtiği diyotun ileri yönlü gerilim düşümüne bağlı olarak güç kaybına neden olmaktadır. Hibrit yapı kullanımında bu akım paralel bağlı anahtarların diyotları arasında diyotların ileri yönlü gerilimi ve iç dirençlerine bağlı olarak paylaşılır özellikle yüksek güç seviyelerinde dahi sistem verimliliğinin artmasında katkı sağlar. Bu durum, hibrit anahtar yapısının sadece düşük değil, aynı zamanda yüksek güç seviyelerinde de avantaj sağladığını göstermektedir.



Şekil 8. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücü $\cos\varphi_1 = 1,00$ için güç/verim grafiği (Power/efficiency graph of hybrid switch-based dc/ac converter at $\cos\varphi_1 = 1,00$)

Şekil 9’da verilen üstteki grafikte $\cos\varphi_2 = 0,85$ için elde edilen ilk analiz sonuçlarına göre yalnızca MOSFET kullanılan yapıda maksimum verim %97,55 olarak $I_{sınır}$ seviyesinin altındaki 600 W gibi düşük bir güç seviyesinde elde edilirken aynı noktada yalnızca IGBT kullanılan yapıda ise verim %96,97 seviyesinde kalmıştır. Bu da MOSFET’e kıyasla %0,55 daha düşük bir verim anlamına gelmektedir. Öte yandan, 2500 W gibi yüksek bir çıkış gücünde, MOSFET yapısının verimi %95,35’a düşerken, IGBT yapısının verimi %97,36’ya çıkarak MOSFET’e göre %2,01 daha yüksek verim sağlamıştır. $I_{sınır}$ seviyesinin altındaki düşük güç bölgesinde MOSFET ve üstündeki yüksek güç bölgesinde IGBT kullanımının olduğu hibrit anahtarlı yapı olan MOSFET-IGBT-MOSFET (MIM) konfigürasyonuna ait verim eğrisi incelendiğinde, MOSFET eğrisinin eğiminin işaret değiştirdiği yaklaşık 13 A akım değerine kadar hibrit yapının verim eğrisinin MOSFET’in eğrisini takip edip bu noktanın sonrasında hibrit yapının verim eğrisi hem MOSFET hem de IGBT yapıların verim eğrilerinin üzerine çıkarak daha yüksek performans göstermiştir.

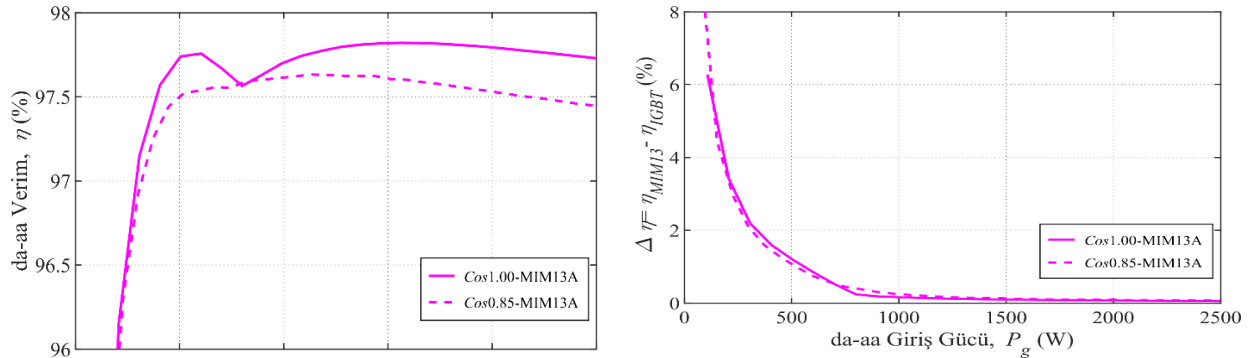
Şekil 9’da verilen alttaki grafikte hibrit yapı ile tek başına IGBT’ye ait verim eğrilerinin arasındaki fark sunulmuştur. Bu grafiğe göre 100 W gibi düşük güç seviyesinde hibrit yapı, yalnızca IGBT kullanımına göre %8,0 oranında daha yüksek verim sağlarken 2500 W gibi yüksek güç seviyesinde küçükte olsa %0,072 düzeyinde bir verim artışı sağlamıştır. Verim artışında, düşük güç bölgesinde MOSFET’in IGBT’ye göre sağladığı daha düşük iletim kaybı etkili olurken, yüksek güç bölgesinde MOSFET’in düşük gerilimli diyotu verim artışına katkı sağlamıştır. Önceki çalışma durumundan farklı olarak $\cos\varphi_2 = 0,85$ olduğu durumda diyotların iletim süresi uzamış ve diyot kayıpları artmıştır. Fakat önceki durumdakine benzer şekilde hibrit yapı kullanımında bu akım yine paylaşılarak sistem verimliliğinin artmasında katkı sağlamıştır. Bu sonuca göre önerilen hibrit anahtar yapısı yalnızca birim güç faktörü altında değil, endüktif yük koşullarında da yüksek verimli çalışmayı mümkün kılmaktadır.



Şekil 9. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücü $\cos\varphi_2 = 0,85$ için güç/verim grafiği (Power/efficiency graph of hybrid switch-based dc/ac converter at $\cos\varphi_2 = 0,85$)

Şekil 10'da verilen üstteki grafikte önerilen hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücünün $\cos\varphi_1 = 1,00$ ve $\cos\varphi_2 = 0,85$ güç faktörleri altındaki güç-verim eğrileri karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Grafik, hibrit yapının iki farklı çalışma koşulundaki performansını ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre hibrit yapı, $\cos\varphi_2 = 0,85$ güç faktörü için $\cos\varphi_1 = 1,00$ güç faktörüne göre daha düşük verim sağlamıştır. Bu azalmanın temel nedeni, güç faktörünün 1,00'den saptmasıyla birlikte sistemdeki endüktif etkinin artarak diyotlar üzerinden geçen ters yönlü akım iletim süresinin artmasıdır. Güç faktörü düştükçe bu akım diyotlardan daha uzun süre geçtiği için toplam diyot iletim kayıpları da artmakta ve bu durum sistem verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, hibrit anahtarlı yapının verim avantajı, birim güç faktörüne sahip senaryolarda daha belirgin şekilde ortaya çıkarken, endüktif yüklerin baskın olduğu durumlarda diyot iletim süresinin artması nedeniyle azalmaktadır.

Şekil 10'da verilen alttaki grafikte $\cos\varphi_1 = 1,00$ ve $\cos\varphi_2 = 0,85$ için hibrit yapı ile tek başına IGBT'ye ait verim eğrilerinin arasındaki fark sunulmuştur. Her ne kadar $\cos\varphi_2 = 0,85$ durumunda hibrit yapı için sistem verimi azalsa da ortaya çıkan verim farkı genel olarak yaklaşık aynı değerde kalmıştır. Dolayısıyla farklı güç koşullarında tek başına IGBT kullanımına göre hibrit yapı benzer verim artışı sağlamıştır.



Şekil 10. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücünün $\cos\varphi_1 = 1,00$ ve $\cos\varphi_2 = 0,85$ için karşılaştırmalı güç/verim grafiği (Comparative power/efficiency graph of hybrid switch-based dc/ac converter at $\cos\varphi_1 = 1,00$ and $\cos\varphi_2 = 0,85$)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının konutlarda daha verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla hibrit anahtarlama yapısına sahip bir da/aa dönüştürücü topolojisi ve bu yapıya özgün anlık yük akımı geri beslemeli bir kontrol algoritması sunulmuştur. Önerilen hibrit yapı, MOSFET ve IGBT anahtarlarının avantajlarını bir araya getirerek farklı yük koşullarında yüksek verimlilik sağlamıştır.

Gerçekleştirilen analizlerde hibrit anahtarlı yapının farklı güç faktörleri altında yalnızca MOSFET ve yalnızca IGBT kullanılan yapılara göre özellikle düşük güçlerde %8'e varan daha verimli bir yapı sunduğunu göstermiştir. Bu verim artışı, düşük güç bölgelerinde MOSFET'in düşük iletim kaybı, yüksek güç bölgelerinde ise diyotların akım paylaşımı sayesinde diyot kayıplarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, özellikle çıkış filtresinin endüktif etkisiyle oluşan diyot üzerinden ters akım geçişlerinin arttığı çalışma koşulları için önemlidir. Önerilen yapı sayesinde, diyot iletim süresi boyunca oluşan kayıplar minimize edilmiş ve tüm çalışma aralığında sistemin genel verimliliği artırılmıştır.

Sonuç olarak, önerilen hibrit anahtarlama yapısı ve kontrol algoritması; yenilenebilir enerjiye dayalı konut uygulamalarında daha yüksek enerji verimliliği, düşük kayıplı güç dönüşümü ve farklı güç faktörü koşullarında kararlı çalışma gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Sistem, özellikle ada modunda çalışan fotovoltaiik sistemler gibi uygulamalarda enerjinin daha verimli kullanımı açısından çözüm sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, önerilen hibrit anahtarlama yapısının yüksek anahtarlama frekanslarında çalışan yeni nesil yarı iletken anahtarlarla (örneğin SiC, GaN-FET) performans analizleri, ayrıca doğrusal olmayan ya da hızlı değişen yük profillerinde verim değerlendirmeleri incelenmesi hibrit yapının farklı uygulama alanlarına taşınabilirliğini ve sistem genelinde sağladığı katkının sürdürülebilirliğini ortaya koyacaktır. Ayrıca, hibrit anahtar yapısındaki her iki anahtarın eş zamanlı olarak iletime girmesi durumunda oluşabilecek anahtarlar arası akım paylaşımındaki dengesizlik ve/veya iletim kayıplarındaki artış gibi olası durumlar toplam verim yanında devre elemanlarının güvenliğini de etkileyebilir. Bu nedenle bu konu hem performans hem de koruma açısından gelecek çalışmalarda daha kapsamlı şekilde ele alınacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2010-04-02-KAP03 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Akça, H., Ayaz, R., 2024. Fotovoltaiik Sistem Entegreli Elektrikli Araç Şarj Sistemlerinde Optimum Kapasitenin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 476–487.
- Akca, H. ve Selamogullari, U. S., 2013. Hybrid switch use for light load efficiency improvement of a power inverter for stand-alone residential renewable energy system, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, Fransa, ss. 1–6.
- Anderson, H. C., Hadi, A.A., Jones, E. S. ve Ionel, D. M., 2012. Power Factor and Reactive Power in US Residences – Survey and EnergyPlus Modeling, 10th IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, September 26–29, 2021, Istanbul, TURKEY
- Blaabjerg, F., Chen, Z. ve Kjaer, S. B. (2004). Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 19(5), 1184–1194.
- Deshpande, A., Paul, R., Emon, A. I., Yuan, Z., Peng, H., ve Luo, F., 2022. Si-IGBT and SiC-MOSFET hybrid switch-based 1.7 kV half-bridge power module. Power Electronic Devices and Components, 3, 100020.
- Hu, Z., Xu, J., Wang, Y., He, Z., Yuan, X., Wang, J. ve Shen, Z. J., 2023. Comparative Study on the Characteristics of SiC FET–Si IGBT and SiC MOSFET–Si IGBT Hybrid Switches. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 11(2), ss. 1749–1761.
- Hu, Z., Wang, Y., He, Z., Xu, J., Wang, J. ve Shen, Z. J., 2024. Research on Characteristics of SiC FET–Si IGBT and SiC MOSFET–Si IGBT Hybrid Switches. IEEE Transactions on Power Electronics, 39(2), ss. 2902–2914.
- Jiang, X., Jiang, H., Zhong, X., Mao, H., Wu, Z., Tang, L., Chen, H., Cheng, J. ve Ran, L., 2022. Impact of gate resistance on improving the dynamic overcurrent stress of the Si/SiC hybrid switch, IEEE Transactions on Power Electronics, 37(11), 13319–13330.
- Jin, M., Zhang, C., Wang, J., Hu, B., Yin, X. ve Shen, Z. J., 2024. A Si/SiC Hybrid Full-Bridge Inverter and Its Modulation Scheme. IEEE Transactions on Power Electronics, 39(3), ss. 3425–3437.

- Li, Z., Zhang, C., Yu, J., Hu, B., He, Z., Wang, J. ve Shen, Z. J., 2022. Dynamic gate delay time control of Si/SiC hybrid switch for loss minimization in voltage source inverter, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(4), 4227–4238.
- Li, N., Macavilca, M. B., Wu, C., Finney, S. ve Judge, P. D., 2024. Converter topology for megawatt scale applications with reduced filtering requirements, formed of IGBT bridge operating in the 1000 Hz region with parallel part-rated high-frequency SiC MOSFET bridge, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(1), 799–812.
- Liu, P., Liu, Y., Cao, Q., Xiao, B., Tang, M., Tu, C. ve Yu, B., 2025. Active gate driver for current overshoot suppression of SiC+Si hybrid switches with dynamic gate current regulation. *Microelectronics Reliability*, 168, 115689.
- Long, L., Xiao, F., Tu, C., Guo, Q., Xiaq, B., Liu, P. ve Blaabjerg, F., 2024. Adaptive Multipattern Inverter Control of Si/SiC Hybrid Switches Based on Safe Operating Range Characteristics. *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics*, (12) 6, 5828-5838.
- Marinov, A. ve Valchev, V., 2009. Power loss reduction in electronic inverters through IGBT-MOSFET combination. The 6th International Conference on Mining Science & Technology, 1539-1543.
- Oneill, M. 2004. Silicon carbide MOSFETs challenge IGBTs. www.powerelectronics.com
- Selamogullari, U. S., Torrey, D. A. ve Salon, S., 2010. A systems approach for a stand-alone residential fuel cell power inverter design, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 741–749.
- Selamoğulları, U. S., 2020. Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evin talep karakteristiğine uygun bir inverter tasarımının incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 2020; 23(2) : 257-265.
- Stecca, M., Tan, C., Xu, J., Soeiro, T. B., Bauer, P. ve Palensky, P., 2022. Hybrid Si/SiC switch modulation with minimum SiC MOSFET conduction in grid connected voltage source converters, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(4), 4275–4287.
- Qin, H., Xiw, S., Ba, Z., Liu, X., Chen, W., Fu, D. ve Xun, Q., 2023. Evaluation and Suppression Method of Turn-Off Current Spike for SiC/Si Hybrid Switch. *IEEE Access*, (11)2023, 26832-26842.
- Xiao, B., Guo, Q., Tu, C., Xiao, F., Liu, P., Long, L., ve Blaabjerg, F., 2024. A Novel Switching Strategy Based on the Driving Voltage and Switching Sequence for Si/SiC Hybrid Switch, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 71, No. 11.
- Xu, C., He, J. ve Lin, L., 2021. Research on capacitor-switching semi-full-bridge submodule of modular multilevel converter using Si-IGBT and SiC-MOSFET, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(4), 4385–4396.
- Wang, Y., Chen, M. ve Xu, D., 2022. Design of low inductance SiC-MOS/Si-IGBT hybrid module for PV inverters, *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 3, 942–954.
- Woldegiorgis, D., Hossain, M. M., Saadatizadeh, Z., Wei, Y. ve Mantooth, H. A., 2023. Hybrid Si/SiC switches: A review of control objectives, gate driving approaches and packaging solutions, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 11(2), 1737–1752.
- Yin, T., Lin, L., Shi, X. ve Jing, K., 2023. A Si/SiC hybrid full-bridge submodule for modular multilevel converter with its control scheme. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 11(1), 327–339.
- Zhang, C., Qu, K., Hu, B., Wang, J. Yin, X. (2022). A High-Frequency Dynamically Coordinated Hybrid Si/SiC Interleaved Totem-Pole PFC Converter, *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics*, (10)2, 2088-2100.
- Zhang, C., Yuan, X., Wang, J., Hu, B., Liu, Z. ve Shen, Z. J., 2024. Si/WBG hybrid half-bridge converter using coupled inductors for power quality improvement and control simplification, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(3), 3339–3350.