

Bir Fazlı Akım Zorlamalı Şebeke Komütasyonlu Evirici A Single Phase Current Forced Line-Commutated Inverter

Murat Ünlü, Sabri Çamur, Ersoy Beşer, Birol Arifoğlu

Elektrik Mühendisliği
Kocaeli Üniversitesi

muratunlu@kocaeli.edu.tr, scamur@kocaeli.edu.tr, ebeser@kocaeli.edu.tr, barif@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynakları için geliştirilmiş yeni bir topoloji önerilmiştir. Önerilen topoloji şebeke komütasyonlu evirici tabanlıdır. Geleneksel şebeke komütasyonlu evirici (ŞKE) devreleri DA kaynaktan şebekeye güç aktarırken şebekeye aktarılan akım yüksek harmonikli olduğundan ek filtre elemanı gerektirmektedir. Bu yüzden günümüzde pek tercih edilmemektedir. Bu çalışmada önerilen ŞKE devresi şebekeye sinüsoidal akım aktarmayı başardığı için geleneksel ŞKE'lerdeki dezavantajı ortadan kaldırmaktadır. Önerilen evirici devresi deneysel olarak test edilmiştir ve elde edilen sonuçlardan şebekeye aktarılan akımdaki Toplam Harmonik Bozunum (THB) seviyesinin IEEE-1547 standardında belirtilen %5'in altında kalması başarılmıştır. Böylelikle, bu çalışmada geliştirilen evirici bir fazlı şebekeye bağlı sistemlerde, Fotovoltaik (FV), yakıt pili ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen gücü şebekeye aktarmada iyi bir alternatif olacaktır.

Abstract

This work presents a new topology improved for renewable energy resources connected to the grid. The proposed topology is based on Line-Commutated Inverter (LCI). The conventional LCI circuits are not preferred nowadays because its injecting current to the grid contains higher harmonic contents. In this work, the proposed method eliminates the problems of harmonics in the ac current injected to grid in the conventional LCI circuits without filter equipment. It is accomplished owing to the proposed method capable of sinusoidal current injection. The complete system has been tested experimentally and the total harmonic distortion (THD) of the injecting currents to the grid is achieved less than 5%, which meet IEEE-1547 standards. The developed single-phase LCI inverter topology is a good alternative to power transfer from renewable energy sources (the photovoltaic, fuel cell etc.) to the utility grid.

1. Giriş

FV enerji dönüşüm sistemlerinden elde edilen gücü şebekeye aktarmak için ara yüz olarak kullanılan şebeke bağlantılı eviricilerin temel işlevi; FV panelden elde edilen DA akımı alternatif sinüsoidal akıma çevirmektir [1]. Bu eviriciler şebekeye eşzamanlı olarak yüksek kalitede sinüsoidal akım

aktarırken belirli teknik standartları karşılamak zorundadırlar [2].

Eviriciler genel olarak, Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) ve Akım Kaynaklı Evirici (AKE) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır [2]. Her iki eviricinin de amacı şebekeye sinüsoidal akım aktarmaktır. GKE girişi sabit bir gerilim kaynağından sağlanır ve şebekeye sinüsoidal akım aktarmak için şebekeye anlık değerleri pozitif, negatif veya sıfır olan gerilim darbeleri uygulamaktadır. AKE girişinde doğrultulmuş sinüs akımı elde edilerek şebeke tarafına aktarırken tekrar sinüs formuna dönüştüren eviricilerdir [1].

Şebeke bağlantılı eviriciler ayrıca; Şebeke Komütasyonlu Evirici (ŞKE) (Doğal komütasyonlu, line commutated) ve zorlamalı komütasyonlu (self commutated) evirici olmak üzere sınıflandırılabilir. Zorlamalı komütasyonlu eviricilerde Mosfet ve IGBT gibi yüksek hızda çalışabilen yarı iletken elemanlar kullanılmaktadır. Bu eviricilerde yarı iletken elemanların iletme ve kesime girme zamanları evirici tarafından belirlenir [3]. GKE genel olarak zorlamalı komütasyonlu yapılarıdır ve 1-5kW güç aralığındaki bir fazlı şebeke bağlantılı birçok FV uygulamalarda kullanılmaktadır [4]. H-Köprü yapıya sahip olup darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile yüksek anahtarlamalı olarak sinüsoidal akım aktarmada kullanılmaktadır [5].

Şebeke komütasyonlu eviricilerde zorlamalı komütasyonlu eviricilerin aksine yarı iletken elemanların kesime girmesi için ayrıca tetikleme yapılmaz, doğal yapısından kaynaklı olarak içinden geçen sinüsoidal akımın sıfır olmasıyla doğal olarak kesime kendiliğinden girmektedir [6]. Bu eviricilerde yarı iletken eleman olarak tristör (SCR) kullanılmaktadır. Tristör yarı iletken elemanları şebeke komütasyonlu olduklarından şebeke ile senkronizasyonu kolay olmaktadır. için fazlardan çaba sarf etmeye gerek kalmamaktadır [7]. Burada bir tristör iletimde iken diğer tristör iletme sokulduğunda iletimde olan tristörün içinden geçen akım sıfıra düşüncüye kadar iletimde kalmaktadır. Bu sebepten bu tür eviricilerde tristörler sadece iletme girmesi için tetiklenmektedir [8].

Şebeke komütasyonlu eviricilerin gelişimi 1980 başlarından itibaren kullanılan elektrik motor sürücü teknolojisine dayanmaktadır ve genellikle elektrik motor uygulamalarında kullanılmaktadır [2]. Bu eviriciler 1.5 kVA nominal gücünde bir fazlı sistemlerde kullanılmaktadır [9]. Ancak geçmişte popüler olmalarına rağmen günümüzde ek olarak filtre gereksinimleri dolayısıyla pek tercih edilmemektedirler [1].

ŞKE'lerin en büyük avantajı şebeke ile kolaylıkla senkronize olarak çalışmalarıdır, ayrıca basit ve sağlam bir yapıda olmaları, yüksek verime sahip olmaları ve ucuz olmaları diğer avantajlarıdır [10]. Fakat bunların yanında dezavantaj olarak; kare dalga formuna yakın akım aktarmaları sebebiyle fazla miktarda harmonik içermeleri ve güç faktörlerinin düşük olmaları (0.6-0.7) sayılabilir [9]. Bu harmonikleri bastırmak için harmonik filtre devreleri kullanmak gerekmektedir.

Literatürde bir fazlı sistemler için şebekeye güç aktarmada, ŞKE tekniğinin kullanımı oldukça azdır. Son yıllarda bazı çalışmalarda yenilebilir kaynaklardan şebekeye güç aktarmada ŞKE kullanılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan ŞKE devre yapısı Şekil 1'deki gibidir [9]. Fakat bu çalışmaların tümünde bazı sakıncalar mevcuttur. Bu çalışmalarda şebekeye aktarılan akım yaklaşık olarak kare dalga formunda olduğundan dolayı, akım fazla miktarda harmonik bileşen içermekte ve bu yüzden Toplam Harmonik Bozunum (THB) seviyesi uluslararası standartların çok üzerinde olmaktadır [5]. Bundan dolayı benzer çalışmaların hepsinde maliyetin artmasına ve verimin düşmesine neden olan harmonik filtre ekipmanları kullanılmaktadır [7,8,10-14]. Ayrıca bu çalışmaların bazılarında maksimum güç izleme için tetikleme açısı sürekli olarak değiştirildiğinden güç faktörü sabit değildir [7,11,13,14].

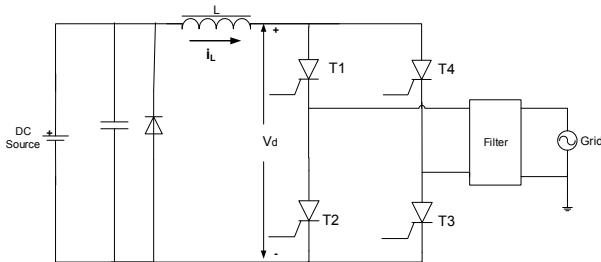
2. Geleneksel bir fazlı şebeke komütasyonlu evirici

Geleneksel bir fazlı ŞKE için literatürde kullanılan devre yapısı Şekil 1'de verilmektedir. Şekil 1'den de görüldüğü üzere, bir fazlı ŞKE dört adet tristör elemanından oluşmaktadır. Bu tür devreler küçük güçlü enerji üretim kaynakları olan FV, yakıt pili ve rüzgar gibi kaynaklardan şebekeye güç aktarmak için kullanılabilir [10].

Burada, V_d gerilimi Denklem (1)'deki gibi hesaplanmaktadır. Bu devrede tristör tetikleme açısı, $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ arasında olduğunda; V_d gerilimi pozitif olmakta ve I_L akımı bu gerilime göre ters yönde akmaktadır. Bu yüzden tristör köprüsünün çıkış gücü P_{dc} negatif değer almaktadır. Bu aralıkta dönüştürücü evirici modunda çalışmaktadır. Bu durumda; güç akışı DC kaynaktan şebekeye doğru olur. Başka bir deyişle ŞKE evirici modunda çalıştığında P_{dc} negatif değer alacağından şebeke tarafına enerji akışı olduğu anlamına gelir.

$$V_d = -\frac{2}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (1)$$

Burada; V_m şebeke geriliminin tepe değerini α ise tetikleme açısını temsil etmektedir.



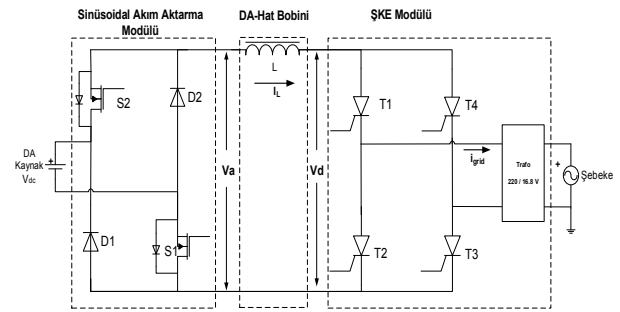
Şekil 1: Geleneksel bir fazlı ŞKE yapısı.

Geleneksel ŞKE'nin en büyük dezavantajı, şebekeye aktarılan akımın sinüs formundan uzak olmasıdır. Burada, aktarılan akım kontrol edilememekte ve yaklaşık olarak kare-dalga formunda olmaktadır. Bu yüzden bu eviricilerde şebekeye aktarılan akımın THB'si % 48.4 'e kadar çıkabilmektedir.

3. Önerilen bir fazlı akım zorlamalı şebeke komütasyonlu evirici

Bu çalışmada, Geleneksel ŞKE'nin tüm dezavantajlarını giderecek, şebekeye sinüsoidal akım aktarabilen, sabit güç faktöründe çalışabilen akım zorlamalı şebeke komütasyonlu yeni bir evirici yapısı geliştirilmiştir. Bu çalışmada önerilen sinüsoidal akım zorlamalı ŞKE devresi Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere devredeki ŞKE modülü ve DC-hat bobin kısmı, geleneksel olan ŞKE ile aynı yapıya sahiptir. Önerilen evirici yapısal anlamda geleneksel şebeke komütasyonlu eviricilerden farklı olarak sinüsoidal akım aktarma modülü içermektedir. Bu modül iki adet Mosfet ve iki adet diyottan meydana gelmektedir. Bu modüldeki iki adet Mosfet histerezis kontrolörden gelen sinyallere göre anahtarlanarak istenilen referans sinüsoidal akımın akması sağlanmaktadır. Bu devrenin şebekeye sinüsoidal akım aktarma özelliği sayesinde THB'nin küçük olması başarılmıştır.

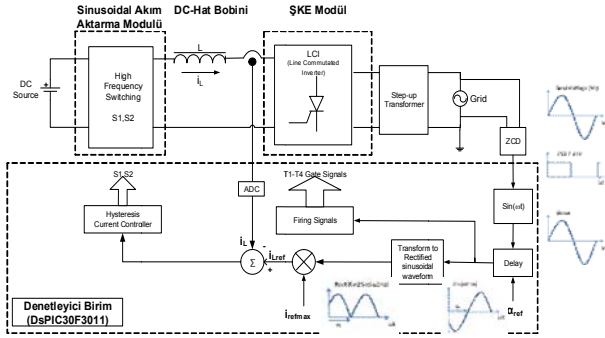
Geliştirilen devre basit, sağlam ve düşük maliyetli olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen gücü şebekeye doğrudan aktarmak için de iyi bir alternatif olacaktır. Böylece daha önceki yıllarda akımdaki THB'nin yüksek olması sebebiyle tercih edilmeyen ŞKE'nin dezavantajları giderilmiştir.



Şekil 2: Önerilen sinüsoidal akım zorlamalı bir fazlı ŞKE devresi.

DC-link bobini enerji aktarma ara elemanı olarak kullanılmaktadır. Burada geleneksel ŞKE'lerden farklı olarak şebekeye sinüs formunda akım aktarmak için sinüsoidal akım aktarma modülü eklenmiştir.

Tüm sistemin çalışmasını özetleyen blok diyagram Şekil 3'te verilmiştir. Bu blok diyagramından rahatlıkla görüleceği üzere önerilen sistem ŞKE modülü, DC-hat bobini, Histerezis kontrolör tarafından denetlenen sinüsoidal akım aktarma modülü, trafo (220/16.8V) ve Mikrodenetleyici devreden meydana gelmektedir.



Şekil 3: Önerilen bir fazlı sinüsoidal akım zorlamalı ŞKE blok diyagramı.

Bu devredeki trafo şebeke gerilimi uyumu gerektiren durumlarda kullanılmaktadır. Eğer DA kaynak yeteri kadar büyük ise devre doğrudan şebekeye bağlanabilmektedir. Denetleyici birim, tristörlerin ne zaman iletme gireceğini ve Mosfetlerin de iletim ve kesim zamanlarını belirlemekte ve buna göre kontrol işaretleri üretmektedir. Önerilen devrede sistemin kontrolü için DsPIC30F3011 mikrodeneleyicisi kullanılmıştır.

3.1. Denetleyici birim

DA kaynaktan şebekeye olan güç akışı iki adet Mosfet aracılığıyla mikrodeneleyici tarafından üretilen referans akıma göre kontrol edilmektedir. Blok diyagramdaki akıştan da anlaşılacağı üzere, mikrodeneleyici içinde referans akımı üretmek için öncelikle; şebeke ile senkronizasyonu sağlamak için sıfır geçiş algılama (SGA) devresi kullanılarak, şebeke geriliminin sıfır geçiş anları sürekli olarak tespit edilir ve buna göre çıkış üretir. Bu çıkış mikrodeneleyiciye harici kesme (interrupt) girişi olarak verilmektedir. Böylelikle denetleyici içerisinde ilk aşamada şebeke ile senkronize, birim sinüs sinyali oluşturulur. Daha sonra istenilen güç faktörüne göre belirlenen α tetikleme açısı değeri kadar bir faz farkı ile ötelenmiş sinüs sinyali elde edilir. Ötelenmiş olan bu sinyalin mikrodeneleyici içerisinde doğrultulmuş sinüs şekli oluşturulur. Burada elde edilen sinyal DC-hat bobini üzerinden geçmesini istediğimiz akım ile aynı fazda birim sinyaldir. Şebekeye aktarmak istediğimiz akım (I_{Lref}), bir önceki aşamada elde edilmiş birim sinyal ile dışarıdan girilen istenilen genlikteki bir $I_{Lrefmax}$ katsayısı ile çarpılarak üretilir. DA-hat bobini üzerinden LA-25np akım algılayıcısı devresi vasıtasıyla ölçülen I_L bobin akımı mikrodeneleyicinin analog dijital dönüştürücü (ADC) portundan algılanarak sayısal sinyale dönüştürülür. Denetleyici içerisinde oluşturulan I_{Lref} referans akımı ile ölçülen I_L akımı karşılaştırılarak fark akımı elde edilir. Bu fark akımı histeresis akım kontrolör bloğuna girilir ve daha önceden belirlenmiş olan hata bandına (ΔI) göre Mosfet'ler için sürme sinyalleri üretilir. Denetleyici kısmı için Microchip firmasına ait DsPIC30F3011 denetleyicisi kullanılmıştır.

3.2. ŞKE modülü

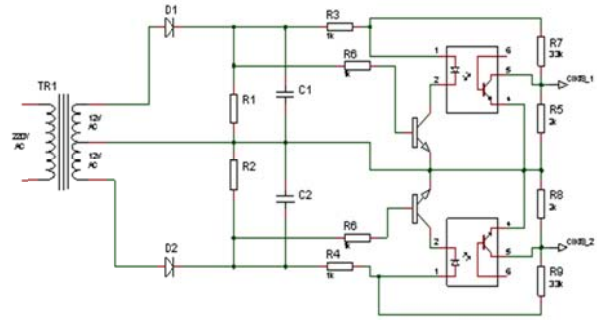
Dört adet tam kontrollü tristör köprüsünden oluşmakta olan ŞKE modülünde tristörler 90° 'nin üzerinde sabit tetikleme açısında iletme sokularak evirici modunda çalışması sağlanır. Burada tristör olarak IXYS serisi kullanılmıştır. Tristörün tetiklemesi için MOC3021 optotriyak kullanılarak tetikleme devresi tasarlanmıştır.

3.3. Sinüsoidal akım aktarma modülü

Histeresis kontrol algoritması kullanılarak mikrodeneleyici içerisinde sürme sinyalleri üretilir. Sinüsoidal akım aktarma modülü bu sinyalleri kullanarak Mosfetler aracılığıyla şebekeye sinüs formunda akım aktarma işlevini yerine getirir. Bu modül iki adet yüksek hızlarda anahtarlama yapabilen kontrollü eleman olan Mosfet ve 2 adet kontrolsüz eleman olan diyotlardan oluşmaktadır. Mosfet sürme devresi için optik izoleli TLP250 entegresi kullanılmıştır.

3.4. Sıfır Geçiş Algılama (SGA)

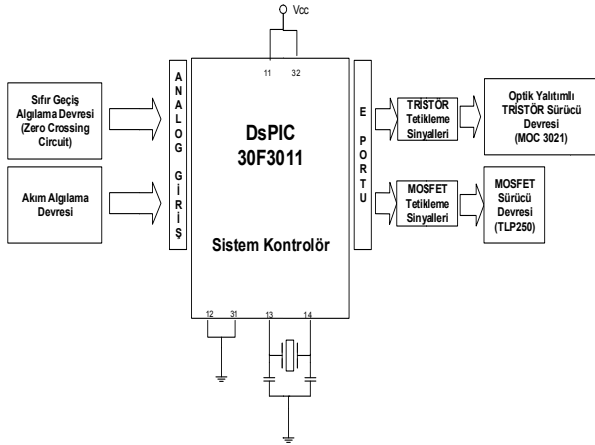
Şebeke bağlantılı sistemlerde; şebeke geriliminin sıfır geçişlerini tespit etmek için Faz kilitleme döngüsü (Phase locked loop) ve Sıfır geçiş algılama (Zero-crossing detection) teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada sıfır geçiş algılama devresi olarak Şekil 4'de gösterilen devre kullanılmıştır. Bu devrede şebeke geriliminin sıfır geçişlerinde elde edilen sinyal, referans sinyal oluşturmak ve tristörlerin tetikleme sinyallerini elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Referans sinüs sinyalinin istenilen faz açısında doğru şekilde oluşturmak ve tetikleme sinyallerinin mikrodeneleyici program akışından bağımsız olması için SGA devresinin çıkış sinyali DsPIC30F3011 mikrodeneleyicisine donanımsal harici dış-kesme sinyali olarak girilmiştir.



Şekil 4: Sıfır geçiş algılama (SGA) devresi.

4. Deneysel çalışmalar

Önerilen ŞKE yapısının kontrol ve sürücü kartının genel prensip şeması Şekil 5'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda Çizelge 1'de verilen herhangi bir α tetikleme açısı ve farklı iki I_{Lref} akımı için önerilen ŞKE'nin deneysel çalışmaları yapılmıştır. Diğer devre parametreleri; DA-hat bobin endüktansı $L = 5$ mH, bobin iç direnci $r = 0.4 \Omega$, DA kaynak gerilimi $V_{dc} = 25.6$ V, şebeke gerilimi $V_{grid} = 16.8$ V ve tolerans bant $\Delta I = 0.2$ A olarak seçilmiştir.

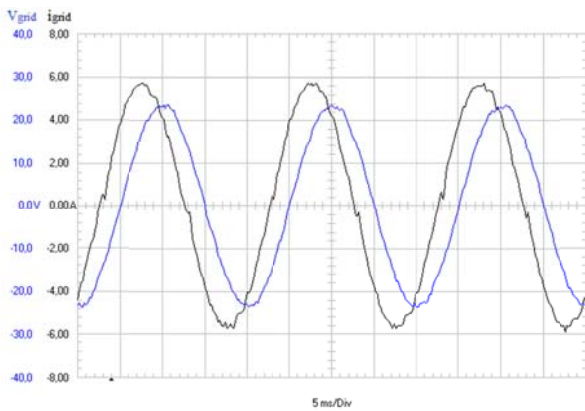


Şekil 5: Önerilen sinüsoidal akım zorlamalı ŞKE devresi kontrol ve sürücü kartının genel prensip şeması.

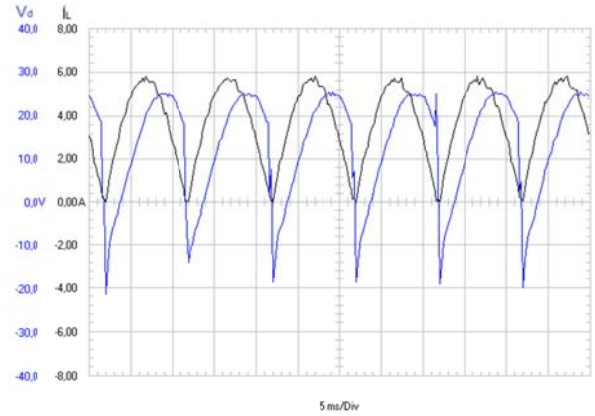
Tetikleme açısı $\alpha = 145^\circ$ sabit güç faktöründe, $I_{ref} = 4$ A ve $I_{ref} = 2.4$ A olarak girilen iki farklı referans akımı için şebekeye aktarılan akım, şebeke gerilimi, bobin üzerinden geçen akım (I_L), şebeke tarafındaki gerilim (V_d), DA tarafındaki gerilim (V_a), şebeke tarafına aktarılan aktif güç değişimleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 7'de $\alpha = 145^\circ$ ve $I_{ref} = 4$ A için şebekeye aktarılan akımın toplam harmonik bozunumu (THB_i) grafiksel olarak vermiştir. Önerilen ŞKE'nin bu iki farklı durum için giriş ve çıkış güçleri, güç faktörleri ve toplam harmonik bozunumları (THB) sayısal olarak çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1: Deneysel parametreler ve sonuçlar

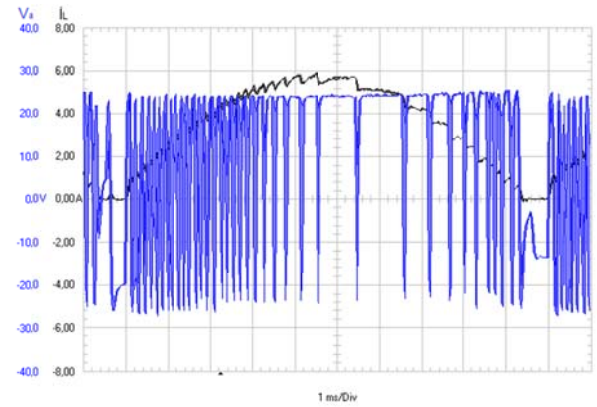
	$\alpha = 145^\circ$	
	$I_{ref} = 2.4$ A	$I_{ref} = 4$ A
Şebekeye aktarılan akım (I_{grid})	2.4 A	4 A
Şebekeye aktarılan Aktif güç (P_{grid})	32.25 W	53.2 W
DA kaynak gücü (P_{dc})	38.16 W	68.1 W
Güç faktörü ($\cos \phi$)	-0.819	-0.79
Akım Toplam Harmonik Bozunumu (%THB _i)	%4.15 W	% 2.80



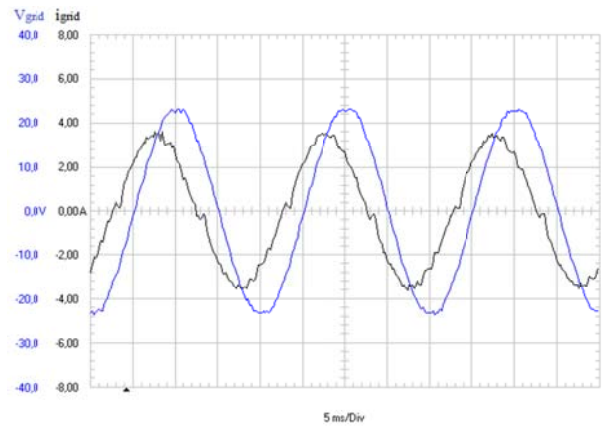
(a) $\alpha=145^\circ$ ve $I_{ref}=4$ A için V_{grid} ve i_{grid} değişimi



(b) $\alpha=145^\circ$ ve $I_{ref}=4$ A için V_d ve i_L değişimi

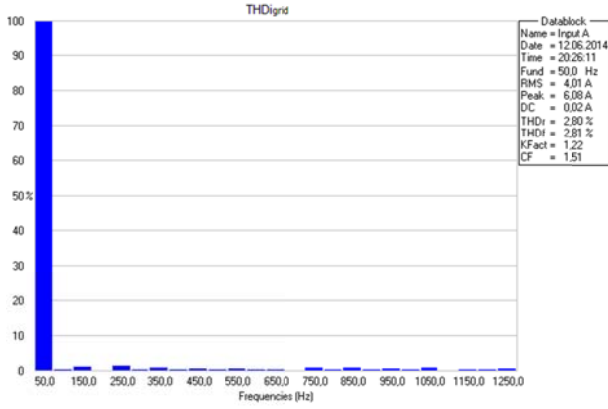


(c) $\alpha=145^\circ$ ve $I_{ref}=4$ A için V_{avr} ve i_L değişimi



(d) $\alpha=145^\circ$ ve $I_{ref}=2.4$ A için V_{grid} ve i_{grid} değişimi

Şekil 6: Çizelge 1 parametreleri için deneysel sonuçlar.



Şekil 7: $\alpha=145^\circ$ ve $I_{ref}=4$ A için şebekeye aktarılan akımın toplam harmonik bozunumu (THB_i)

5. Sonuçlar

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen gücü şebekeye aktarmada kullanılan geleneksel ŞKE'nin tüm dezavantajlarını giderecek, şebekeye sinüsoidal akım aktarabilen, sabit güç faktöründe çalışabilen akım zorlamalı şebeke komütasyonlu yeni bir evirici yapısı önerilmiştir. Bu eviricinin deneysel çalışmaları belirli tetikleme açısı ve farklı referans akımları için gerçekleştirilmiş olup sonuçlarına yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan önerilen ŞKE'nin şebekeye aktardığı akımdaki THB seviyesi IEEE-1547 uluslararası standardının altında kaldığı gözlemlenmiştir. Önerilen sinüsoidal akım zorlamalı ŞKE'nin şebekeye sinüsoidal akım aktarmada iyi sonuçlar verdiğinden dolayı, bu evirici fotovoltaik, yakıt pili, rüzgar enerjisi gibi yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen DA gerilimi şebekeye aktarmak için iyi bir alternatif olacaktır.

6. Kaynaklar

- [1] Kjaer S. B., Pederson J. K., Blaabjerg, F., "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaik Modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(5), 1292-1306.
- [2] M. H. Rashid, "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications", 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.
- [3] Sahan, B., Araújo, S., Nöding, C. and Zacharias P., "Comparative Evaluation of Three-Phase Current Source Inverters for Grid Interfacing of Distributed and Renewable Energy Systems", *IEEE Trans. Power Electronics*, 2011, 26, (8), pp 2304-2318
- [4] J. H. R. Enslin and P. J. M. Heskes, "Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network", *IEEE Transactions on Power electronics*, 2004, 19(6), 1586-1593.
- [5] *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems*, IEEE Std. 1547.2, 2008.
- [6] Bodur H., "Güç Elektroniği", rd Edition, 2002, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010 ISBN: 975-511-546-7.
- [7] Lavanya V., Gounden N. A. and Rao P. M., "A Simple Controller using Line Commutated Inverter with Maximum Power Tracking for Wind-Driven Grid-Connected Permanent Magnet Synchronous Generators", *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, New Delhi, 12-15 Dec. 2006.
- [8] Pilli V. P. B., Bhamu M., "Power Electronic Interface for Grid-Connected PV array using SEPIC Converter and Line-Commutated Inverter with MPPT", *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, 2(2), 1-6.
- [9] IEA Task 16., 'Photovoltaics in Buildings', in Sick, F., Erge., T. (Ed.), 1995
- [10] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner and V. G. Agelidis, "Inverters for single-phase grid connected PV systems an overview", *Proc. IEEE 33rd Annu. PESC*, Cairns, Australia, 23-27 Jun. 2002.
- [11] Shanthi T. and Gounden N. G. A., "Power Electronic Interface for Grid-Connected PV array using Boost Converter and Line-Commutated Inverter with MPPT", *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia 25-28 November 2007.
- [12] Arjun A. et al., "A power electronic controller for PV-tied Grid-connected system with single parameter sensing for mppt using boost converter and line-commutated inverter", *Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, Kathmandu, Nepal 24-27 Sept. 2012.
- [13] Gounden N. A., Sabitha A. P., Nallandula H., S. Krithiga, "Fuzzy logic controller with MPPT using line-commutated inverter for three-phase grid connected photo-voltaic systems", *Elsevier, Renewable energy*, 2009, 34, 909-915.
- [14] Krithiga, S., Gounden, N. G. A., "Power electronic configuration for the operation of PV system in combined grid-connected and stand-alone modes", *IET Power electronics*, 2014, 7(3), 640 -647.