

Tek Fazlı Şebekeden Bağımsız HERIC Eviricili Fotovoltaik Sistem Denetimi

A Single Phase Standalone Photovoltaic System with HERIC Inverter Control

Ahmet Yüksel, Emre Özkop

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Karadeniz Teknik Üniversitesi
ahmetyuksel@ktu.edu.tr, eozkop@ktu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, tek fazlı şebekeden bağımsız transformatörsüz fotovoltaik sistem denetimi benzetimsel olarak sunulmaktadır. Sistemin güç elektroniği devre yapısını, DA-DA yükseltilen çevirici ve HERIC (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept) evirici oluşturmaktadır. Sistemin denetimi geleneksel PI denetleyici ile gerçekleştirilmekte olup evirici çıkış filtre yapısı olarak LCL filtre kullanılmıştır.

Abstract

In this study, a control of a single phase standalone transformerless photovoltaic (PV) inverter is presented by simulation. The system power electronic converter structure is constituted of DC-DC boost converter and HERIC (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept). The system control is realized by conventional PI controller and LCL filter is employed in the inverter output.

1. Giriş

Dünyada elektrik enerji tüketiminin gün geçtikçe artması ile birçok sorun günümüzde daha baskın şekilde kendini göstermektedir. Geleneksel enerji kaynak miktarının azalması, bu kaynakların sebep olduğu çevresel olumsuzluklar ve insanlar üzerinde oluşturduğu karamsar bakış açısı, kaynakların bölgesel ve/veya küresel anlaşmazlıklara hatta ve hatta savaşlara sebebiyet vermesi, son yıllarda enerji arz-talep dengesinin sağlıklı sağlanamaması sonucunda kısa ve uzun süreli elektrik kesintileri ve bunun sonucu meydana gelen mali kayıplar, insanları elektrik enerjisi elde edilecek kaynaklarda çeşitliliği oluşturma, sürekliliği artırma, güvenliği sağlamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir [1].

Dünya nihai enerji tüketiminin yaklaşık %20 kısmı yenilenebilir enerji kaynakları tarafından sağlanmakta olup bu kaynaklardan biri olan güneş enerjisinden elektrik üretimi, fotovoltaik sistemler aracılığı ile sağlanmaktadır [2]. 2014 yılında dünya genelinde toplam 177 GW güce sahip olan fotovoltaik, 2016 başında 227 GW değerini aşmış durumdadır. Kurulu fotovoltaik güç bakımında sırasıyla Çin, Almanya, Japonya'nın önderliğini yaptığı bu sektörde fotovoltaik sistem, uygulama yerine göre yapısal farklılıklar göstermektedir. Enerji sağlanacak tüketicinin veya yükün DA ve AA özelliğine göre sistem içerisinde kullanılacak güç elektroniği çevirici yapısı farklılık göstermektedir [3-5].

Fotovoltaik sistemlerde AA yüklerin talebini karşılamak için eviriciler kullanılmakta olup bu eviricilerde transformatör içerip içermemesine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır [6]. Transformatörün eviricinin veriminin düşürmesi, maliyeti artırması ve ebat olarak büyümesi gibi olumsuz özellikleri sebebiyle son yıllarda fotovoltaik sistem verimine katkıda bulunmak için transformatörsüz evirici topolojileri kullanılmaktadır [7].

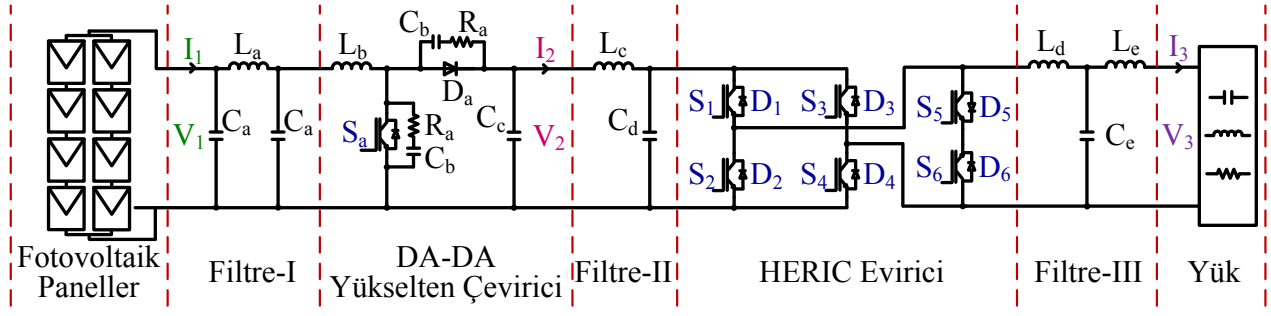
Literatürde farklı yapılarda transformatörsüz evirici topolojileri önerilmekte olup bu topolojilerin sınıflandırılması farklılık göstermektedir [8, 9]. Bu topolojilerden ön plana çıkarılır; HERIC, H5, H6, Steca, NPC, ANPC, Conergy, Vincotech tir [8, 9, 10]. Bu evirici topolojilerinin; kullanılan giriş kapasitör, anahtarlama eleman, diyot ve iletim esnasında aktif eleman sayısı, çıkış gerilim seviyesi, kaçak (sızıntı) akımı miktarı ve verim değeri gibi birçok yönden değerlendirilmesi ve karşılaştırılması yapılabilmektedir [10]. Örneğin HERIC, H6, Steca ve ANPC 6 anahtarlama elemanı içerirken, NPC, Conergy ve Vincotech te ise 4 adet bulunmakta olup kaçak akım ve verim değerleri anahtarlama elemanı sayısından bağımsız olarak farklılık göstermektedir [8]. Conergy eviricide kaçak akım çok düşük seviyede ve maksimum verim %97.67 olarak gözlemlenmesinin yanında 5 anahtarlama elemanlı H5 eviricide kaçak akım seviyesi düşük ve verim %98.5 seviyelerindedir [8].

Transformatörsüz evirici topolojilerinin sistem içerisindeki gerilim veya akım esaslı denetimi farklı yöntemler ile gerçekleştirilebilmektedir [11]. Denetim yöntemlerindeki amaçlardan bir kaç, giriş kaynağından maksimum güç elde etme, şebekeye aktarmak için aktif güç denetimi, şebeke ile farklı yapıdaki dağıtık güç üretim sistemi arasında reaktif güç aktarımı, DA bara gerilim denetimi, yük için kaliteli güç sağlanması olarak sıralanabilir [12, 13, 14].

Bu çalışmada, şebekeden bağımsız bir HERIC eviricili fotovoltaik sistemin tasarımı ve denetimi gerçekleştirilmektedir.

2. Sistem Genel Tanımı

Tek fazlı şebekeden bağımsız HERIC eviricili fotovoltaik sistemin genel blok diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir. Sistem yapısı, fotovoltaik panel, HERIC evirici, filtre, yük ve denetim kısımlarından oluşmaktadır. Fotovoltaik panel



Şekil 1: Sistem genel yapısının blok diyagramı.

kısımdan elde edilen DA gerilim, denetimli HERIC evirici ile AA gerilime dönüştürülmektedir. AA gerilimi filtreden geçirilerek istenmeyen bozuntuların ortada kaldırılması sağlanmakta ve yüke uygulanmaktadır.

2.1. HERIC Evirici

Trafosuz evirici topolojilerden biri olan HERIC (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept) evirici, tam dalga doğrultucu üzerine AC tarafına bypass kolu eklenerek elde edilmiştir. Şekil 1’de gösterilen evirici devresi girişinde kullanılan C_d kapasitesi dizilerinde ürettiği gerilimi sabitleme ve L_d ve L_e endüktansları ise filtreleme amaçlıdır.

Devrede bulunan bypass kolu; fotovoltaik dizileri ile şebeke arasında, şebekeden diziye gerilim yükselmesi anında devreden ayrılması ve sıfır gerilim durumu esnasında filtre endüktansı ile C_d kapasitesi arasında reaktif güç geçişini önleme görevlerini yerine getirmek için yararlanılmaktadır.

Evirici yapısında 6 adet aktif anahtarlama elemanı olup bunlardan S_1, S_2, S_3 ve S_4 yüksek frekansta, S_5 ve S_6 ise alçak frekansta tetiklenmektedirler. Çıkış pozitif alternansdayken S_5 anahtarı aktif durumdayken S_1 ve S_4 anahtarları yüksek frekansta anahtarlanırlar. Bu yüksek frekansta anahtarlanması S_1 ve S_4 anahtarlarının pasif hale gelme durumunda ortaya çıkarır bu durumda ise D_6 diyotu üzerinden yol tamamlanır. Çıkış negatif alternansa geçince, bu sefer S_6 anahtarı aktif duruma geçer ve S_2 ve S_3 anahtarları yüksek frekansta anahtarlanırlar. Bu yüksek frekansta anahtarlanması S_2 ve S_3 anahtarlarının pasif hale gelme durumunda ortaya çıkarır bu durumda ise D_5 diyotu üzerinden yol tamamlanır. HERIC evirici sisteme ait anahtarlama durumları Çizelge 1’de verilmiş ve anahtarlama sinyalleri Şekil 2’de gösterilmiştir.

Evirici çıkış filtresi (Filtre-III) olarak pasif endüktans ve kapasitelerden oluşan LCL tipi filtre kullanılmıştır. LCL filtre parametreleri denklem (1)-(3) temel alınarak belirlenmiştir [15-17].

$$L_e = \frac{V_3}{2\sqrt{6}i_{ripm}f_s} \quad (1)$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_d + L_e}{L_d \times L_e \times C_e}} \quad (2)$$

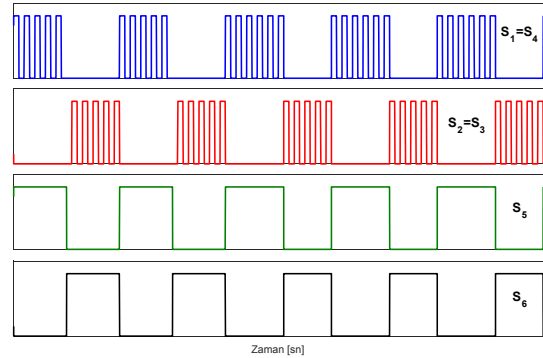
$$10f \leq f_{res} \leq 0.5f_s \quad (3)$$

Burada, i_{ripm} , harmonik akımının tepe değeri, f_{res} , rezonans frekansı, f_s , anahtarlama frekansı ve f , şebeke frekansıdır.

Çizelge 1: HERIC evirici anahtar çalışma durumları

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	D_5	D_6	$V_{çıkış}$
+	-	-	+	+	-	-	+	$V_{giriş}$
-	-	-	-	+	-	-	+	0
-	+	+	-	-	+	-	-	$-V_{giriş}$
-	-	-	-	-	+	+	-	0

Not: “+” iletimde, “-” kesimde



Şekil 2: HERIC evirici anahtarlama sinyalleri

2.2. Denetleyici Yapısı

Sistem kontrol yapısı, HERIC eviricinin denetimi temeline dayanmaktadır. Tek çevrimli (döngülü) klasik PI denetleyici, evirici çıkış gerilimini düzenlemek için kullanılmaktadır. Gerilim hatası sinyali, ölçülen yük gerilimi ile referans yük gerilimi arasındaki farkı alınarak elde edilmektedir. PI denetleyici, HERIC evirici anahtarları (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 ve S_6) için anahtarlama işareti üretecek olan darbe üretici giriş sinyalinin meydana getirir.

3. Benzetim Çalışması

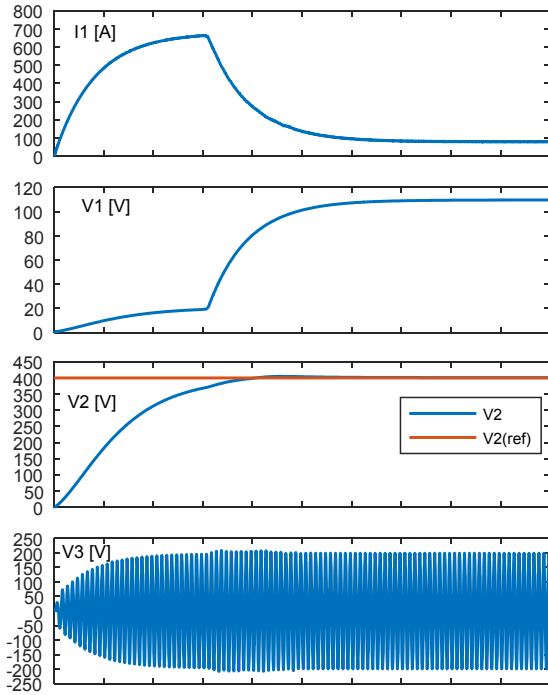
Bu bölümde, önerilen sistemin çalışma prensibine ilişkin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan benzetim çalışması irdelenmektedir. Benzetim çalışmasında kullanılan tüm sistem parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir

Çizelge 2: Sisteme ait parametreler

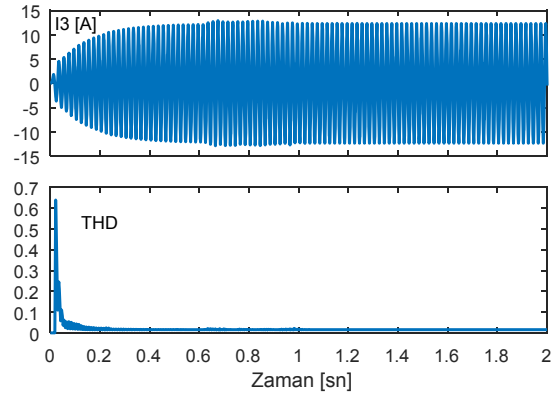
Fotovoltaik Panel		Yükselten Çevirici	
$V_{açık-devre}$	37.6 V	L_b	2.55 uH
$I_{kısa-devre}$	8.55 A	R_a	33 Ohm
N_{seri}	79	C_b	300 pF
$N_{paralel}$	3	C_c	1 mF
T_{ortam}	25 °C	f_s	1 kHz
S_{ortam}	1000W/m ²		
Filtre-I		Filtre-II	
L_a	16.2 uH	L_c	0.338 uH
C_a	33 uF	C_d	10 mF
Filtre-III		Yük	
L_d	40 mH	P	1.5 kW
L_e	40 mH	f	50 Hz
C_e	0.65 mF		
HERIC Evirici			
f_s	10 kHz		

Sistemin benzetimi sonucunda elde edilen dalga şekilleri Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir. Tek fazlı şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem çıkış gerilimi DA-DA yükseltici tarafından referans olarak belirtilen gerilim değerine yükseltilmekte ve transformatörsüz evirici olan HERIC evirici topolojisi kullanılarak AA gerilim dalga şekline dönüştürülmektedir. Elde edilen dalga şeklindeki harmonik değerlerini standartlarda belirtilen sınırdan tutmak için LCL filtre yapısı kullanılmaktadır.

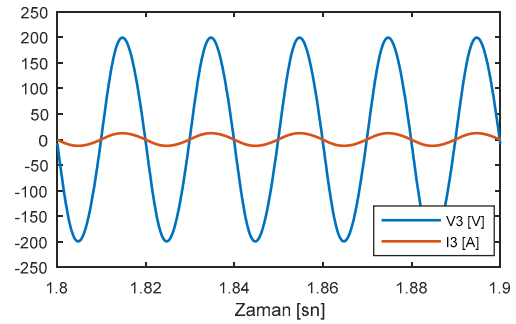
Şekil 3'te fotovoltaik panellerinin ortak çıkış noktası gerilim ve akım (V_1 ve I_1), DA-DA yükseltici çevirici çıkış gerilim (V_2), Şekil 4'te HERIC evirici çıkış gerilim ve akım (V_3 ve I_3) ve toplam harmonik bozunum (THD) dalga şekilleri gösterilmiştir. Şekil 5'te ise HERIC evirici çıkış gerilim ve akım (V_3 ve I_3) dalga şekillerinin belirli zaman dilimine odaklanmış halleri paylaşılmaktadır.



Şekil 3: Benzetim sonuçları-I.



Şekil 4: Benzetim sonuçları-II.



Şekil 5: Benzetim sonuçları-III.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada şebekeden bağımsız yenilenebilir enerji kaynak beslemeli güç sistemi tasarımı ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Denetimli DA-DA yükseltici çevirici ve transformatörsüz evirici topolojilerinden biri olan HERIC evirici ile fotovoltaik panellerden elde edilen güç AA yüküne verimli, kararlı ve harmonik miktarı standartların belirttiği sınırlar içerisinde aktarılmaktadır.

5. Kaynaklar

- [1] Tsengenes G. and Adamidis G., "Investigation of The Behavior of a Three phase Grid-Connected Photovoltaic System to control active and Reactive Power", *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, pp. 177-184, 2011.
- [2] *Renewables 2016: Global Status Report*, REN21, 2016, ISBN 978-3-9815934-7-1-4.
- [3] Carrasco J. M et al., "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 4, pp. 1002-1016, June 2006.
- [4] Li W. and He X., "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 4, pp. 1239-1250, April 2011.
- [5] Li Q. and Wolfs P., "A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies with Three Different DC Link Configurations", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1320-1333, May 2008.

- [6] Kok S. T. and Saad M., "A Reduced Leakage Current Transformerless Photovoltaic Inverter", *Renewable Energy*, Vol. 86, pp. 1103-1112, February 2016.
- [7] Araujo S.V., Zacharias P. and Mallwitz R., "Highly Efficient Single-Phase Transformerless Inverters for Grid-Connected Photovoltaic Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 9, pp. 3118-3128, Sept. 2010.
- [8] Islam M., Mekhilef S. and Hasan M., "Single Phase Transformerless Inverter Topologies for Grid-Tied Photovoltaic System: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 69-86, May 2015.
- [9] Li W., Gu Y., Luo H., Cui W., He X. and Xia C., "Topology Review and Derivation Methodology of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters for Leakage Current Suppression", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 7, pp. 4537-4551, July 2015.
- [10] Barater D., Lorenzani E., Concari C., Franceschini G. and Buticchi G., "Recent Advances in Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 10, No. 2, pp. 260-273, 2016.
- [11] Yu W., Lai J. S. J., Qian H. and Hutchens C., "High-Efficiency MOSFET Inverter with H6-Type Configuration for Photovoltaic Nonisolated AC-Module Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 4, pp. 1253-1260, April 2011
- [12] Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M. and Timbus A. V., "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006.
- [13] Zhang L., Sun K., Xing Y. and Xing M., "H6 Transformerless Full-Bridge PV Grid-Tied Inverters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 3, pp. 1229-1238, March 2014.
- [14] Yang Y., Blaabjerg F. and Wang H., "Low-Voltage Ride-Through of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, No. 3, pp. 1942-1952, May-June 2014.
- [15] Sun W., Chen Z. and Wu X., "Intelligent Optimize Design of LCL Filter for Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier", *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009 (IPEMC '09)*, Wuhan, pp. 970-974, 2009.
- [16] Saridakis S., Koutroulis E. and Blaabjerg F., "Optimization of SiC-Based H5 and Conergy-NPC Transformerless PV Inverters", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, No. 2, pp. 555-567, June 2015.
- [17] Reznik A., Simões M. G., Al-Durra A. and Muyeen S. M., "LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, No. 2, pp. 1225-1232, March-April 2014.