


Şebeke Bağlantılı Tek Fazlı Transformatörsüz Evirici için Modifiye Edilmiş Taşıyıcı Temelli DGM Kontrolü

Modified Carrier Based PWM Control for Grid-Connected Single Phase Transformerless Inverter

Emre Özkop 

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Trabzon, Türkiye

cozkop@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9395-9899

Öz

Bu çalışmada aynı anahtarlama frekansı için şebeke bağlantılı tek fazlı H6-II tipi transformatörsüz evirici için farklı taşıyıcı işaret temelli modülasyon tekniklerinin performans karşılaştırılması sunulmaktadır. Burada çok seviyeli ve çoğunlukla üç fazlı eviricilerde kullanılmakta olan taşıyıcı işaretleri ve bunlardan türetilmiş yeni taşıyıcı işaretler tek fazlı H6-II tipi eviricin kontrolü için sunulmaktadır. Oluşturulan taşıyıcı temelli darbe genişlik modülasyonu (DGM) kontrol teknikleri için sistem performansı, gözlemlenen evirici çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri, ölçülen akım ve gerilim ve hesaplanan verim ve toplam harmonik bozunum (THB) ile değerlendirilmiştir. Test sonuçları, modifiye edilmiş taşıyıcı tabanlı DGM kontrol tekniklerinin verimlilik, THB ve kaçak akım açısından geleneksel teknikten daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Darbe genişlik modülasyonu (DGM), taşıyıcı temelli DGM, transformatörsüz evirici, modülasyon ve kontrol.

Abstract

In this paper, the performance comparison of different carrier signal based modulation techniques is presented for grid-connected single phase H6-II type transformerless inverter for same switching frequency. Here, carrier signals used in multi-level and mostly three-phase inverters and new carrier signals derived from them are extended for controlling single-phase H6-II type inverter. System performance is evaluated with observed inverter output voltage and current waveforms, measured current and voltage, and calculated efficiency and total harmonic distortion (THD) for the created carrier-based pulse width modulation (PWM) control techniques. Test results show that modified carrier based PWM control techniques performs better than the traditional technique in terms of efficiency, THD and leakage current.

Keywords: Pulse width modulation (PWM), carrier based PWM, transformerless inverter, modulation and control.

1. Giriş

Pandeminin hayatın her noktasına olumsuz etkilere ve yenilenebilir enerji tedarik zincirini kıran ve projelerini sekteye uğratan küresel emtia fiyatlarındaki artışa rağmen başta fotovoltaik olmak üzere arz edilen yenilenebilir enerji kapasitesi artmaya devam etmektedir [1]. 2021 yılının sonlarında enerji fiyatlarının keskin bir şekilde artışı ve 2022 yılının başlarında Rusya Federasyonu'nun Ukrayna'yı işgali, milyarlarca insan için

enerji yoksulluğu tehdidi ile karşı karşıya kalmasına yol açabileceği ve bunun önüne geçmek ve enerjinin güvenliği ve sürekliliği için fotovoltaik ve rüzgâr teknolojisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla hayatın merkezine alınması gerektiği öngörülmektedir [2], [3].

Fotovoltaik (FV) güç sistemlerinin, uygulama alanları çeşitlilik göstermekte olup FV modül ve güç elektroniği çeviricileri bu sistemlerin ana omurgasını oluşturmaktadır. FV modüller, şebekeden bağımsız veya şebeke bağlantılı sistemler olarak çalıştırılabilir ve bu durumların gerçekleştirilmesi için DA gücünü AA gücüne çevirecek bir eviriciye ihtiyaç duyulur [4], [5]. Evirici topolojisi, temelde transformatörlü ve transformatörsüz olarak sınıflandırılabilir. Transformatörlü yapı, galvanik yalıtım sağlamakta ve sistemde emniyet ve güvenilirliğin artmasına pozitif katkı vermektedir. Fakat bir FV sistemde transformatörün olması sebebiyle FV sistemin verimi azalmakta, sistemin hacmi, ağırlığı ve toplam maliyeti artmaktadır [6]. Transformatörsüz yapıda ise FV dizinlerin kaçak akımları (i_{CM}) önemli bir meseledir. FV dizinler ile toprak arasındaki parazitik kapasite, kaçak akım değerini artırır ve bu da sistemin emniyetini ve güvenilirliğini azaltabilir.

Kaçak akım FV sistemi içinde dolaşır, şebeke akımının bozulmasına, yayılan veya iletilen elektromanyetik girişime ve FV paneller üzerinde korozyon etkilerine sebep olur [7]. Dolaşımdaki kaçak akım, kaybı artırır ve DA bağlantı dalgalanma gerilimini artırır. VDE0126-1-1 standardına göre kaçak akımın RMS değeri 300 mA'ı aşarsa, FV eviricinin şebekeden bağlantısı 0.3 sn'den daha kısa sürede kesilmelidir [8]. Bunun için kaçak akımın ortadan kaldırılması elzemdir. DA bağlantı dalgalanma gerilimi, şebeke bağlantılı FV evirici sisteminde ortak mod gerilimini (V_{CM}) ortaya çıkarır ve asimetrik AA gerilimini üretir. Bu ortak mod geriliminin ayrıca kaçak akımına katkısı mevcuttur [9]. Bunun yanında şebeke bağlantılı eviricilerde şebekeye enjekte edilen akım için toplam harmonik bozunum (THB) değeri %5'i aşmamalıdır [10]. Şebeke bağlantılı transformatörsüz eviricilerin performansı iyileştirmek (akım ve gerilime ait THB ve kaçak akımı azaltmak, verimi artırma, ideal ortak mod gerilime yaklaşma, vb.) literatürde önerilen çözüm teknikleri: i) topolojik iyileştirmeler, ii) yeni modülasyon tekniklerinin dikkate alınması, iii) uygun kontrol stratejilerinin kullanılması [11]. Darbe genişlik modülasyonu (DGM) teknikleri, evirici topolojisinin yapısı, seviyesi ve amaçlanan (uygulama kolaylığı, verim, THB, kaçak akım, ortak mod gerilim, vb.) iyileştirmelere bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir.

Şebeke bağlantılı üç fazlı transformatörsüz eviricide kaçak akımı bastırmak için iyileştirilmiş büyük orta uzay vektör modülasyonu (ILMSVM) yöntemi önerilmiş ve geleneksel uzak vektör darbe genişlik modülasyonu (CSSVPWM) ve büyük orta pozitif/negatif küçük vektör modülasyon yöntemleri ile karşılaştırılması yapılmıştır [12]. Üç fazlı iki, üç ve beş seviyeli transformatörsüz evirici için ortak mod gerilimi düşürümü için farklı yapıda uzay vektör modülasyonu (SVM) yöntemleri kullanılmıştır [13], [14], [15]. Şebeke bağlantısız tek fazlı kaskad bağlı on bir seviyeli transformatörsüz eviricide

maksimum darbe genişliğine dayalı gerilim seviyesi yöntemi tercih edilmiş ve gerilim ve akıma ait THB değerlerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir [16]. Seviye kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu (LS-PWM) tekniğinin şebeke bağlantılı tek fazlı beş seviyeli eviricide hem benzetim hem de deneysel olarak kullanılması sonucunda sistemin performansının arttığı, kaçak akım ve anahtarlama elemanları üzerindeki stresin azaldığı vurgulanmıştır [17].

Genellikle çok seviyeli eviricilerde uygulamaları olan modülasyon tekniğinin temelini oluşturan referans sinüs dalgası ve taşıyıcı işaretlerinden taşıyıcı işaretinin temel üçgen taşıyıcı işaretinden farklılaştırılarak (faz kaydırma, seviye kaydırma, vb.) oluşturulan yeni taşıyıcı işaretini barındıran modülasyon teknikleri mevcut olup bu tür modülasyon yöntemine hibrit/modifiye edilmiş modülasyon tekniği ismi verilmektedir [18-23]. Modifiye edilmiş sıralı seviye kaydırmalı DGM tekniği, yarım-köprü alt modüllerden oluşturulmuş üç fazlı beş seviyeli eviricinin kontrolünde önerilmiş ve alt modül kapasitör üzerindeki stresin azaldığı tespit edilmiştir [19]. Şebeke bağlantılı tek fazlı yarı empedans kaynak temelli kaskad beş seviyeli evirici için alternatif faz-karşıtlı kaydırılmış DGM teknikler önerilmiştir. Taşıyıcı tek, iki ve üç döngü taşıyıcı rotasyonlu yapıya sahiptir. Gerçekleştirilen benzetimsel ve deneysel çalışmalar sonucunda modifiye edilmiş DGM tekniklerinin eviricide daha yüksek verim sağladığı ifade edilmiştir [20]. Daha yüksek ve daha düşük taşıyıcı hücreler alternatif faz karşıtlı (HLCAPO) DGM ve taşıyıcı faz kaydırmalı DGM kontrol teknikleri şebeke bağlantısız hibrit kenetlemeli yedi seviyeli evirici için önerilmiş ve (HLCAPO) DGM kontrol tekniği ile anahtarlama kayıplarının azaldığı ve harmonik performansının iyileştiği gözlemlenmiştir [21].

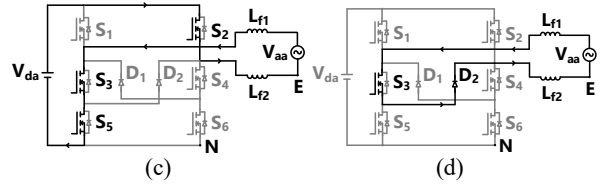
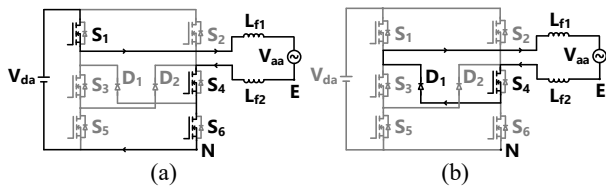
Bu çalışmada modifiye edilmiş sıralı seviye kaydırmalı, tek, iki ve üç döngü taşıyıcı rotasyonlu, HLCAPO, taşıyıcı faz kaydırmalı ve bunlardan türetilmiş farklı DGM tekniklerinin şebeke bağlantılı tek fazlı H6-II tipi transformatörsüz evirici üzerinde test edilmektedir. Bu çalışma şu şekilde düzenlenmiştir. H6-II tipi transformatörsüz eviricinin çalışma prensibi, uygulanacak modifiye edilmiş temel taşıyıcı işaret (TTİ) temelli modülasyon teknikleri, FV sisteminin kontrol yapısı ve FV eviricideki kaçak akım Bölüm 2’de ele alınmıştır. Evirici için önerilen modifiye edilmiş TTİ temelli DGM tekniklerinin geçerliliğini doğrulamak için benzetim sonuçları Bölüm 3’te sunulmuştur.

2. Sistem tasarımı

Literatürde farklı yapıda H6 tipi evirici mevcut olup bu çalışmada H6-II tipi transformatörsüz evirici topolojisi kullanılacaktır.

2.1 H6-II tipi evirici ve çalışma prensibi

Şekil 1’de H6-II tipi eviricinin temel dört çalışma durumu gösterilmiştir.



Şekil 1. H6-II tipi evirici çalışma durumları.

Şebekenin sadece yarım döngüsü ele alırsa, pozitif yarım döngüde S_4 anahtarı sürekli ON konumunda iken S_2, S_3 ve S_5 anahtarları sürekli olarak OFF konumundadır. S_1, S_6 ve D_1 anahtarlama frekansında komütasyona girer. S_1, S_6 ve S_4 ON konumunda, diğer anahtarlar (S_2, S_3, S_5) ve diyotlar (D_1, D_2) OFF konumunda olduğunda endüktör akımı şarj olur ve endüktör gerilimi ($L_{f1} = L_{f2}$ için) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$v_{Lf1} = v_{Lf2} = 0.5(v_{da} - v_{aa}) \quad (1)$$

Çıkış gerilimi v_{aa} ise

$$v_{aa} = v_{da} \cdot M \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

burada, v_{da} : DA link gerilimi $M = m_{indeks}$: Modülasyon indeksi ω : Şebeke açısal frekansı ifade etmektedir.

Temel modülasyon indeksi değeri, referans sinüs dalgası tepe değerinin (V_R) taşıyıcı dalganın tepe değerine (V_T) oranı olarak ifade edilebilir [24].

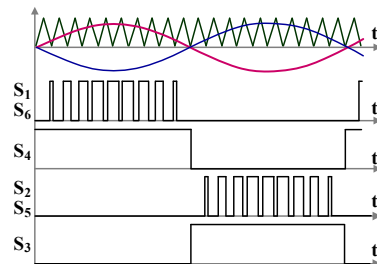
$$m_{indeks} = \frac{V_R}{V_T} \quad (3)$$

Nötr hat ve toprak arasındaki hat frekansındaki empedansı ihmal edilirse hem şebeke pozitif hem de negatif yarım döngüsünde eviricinin N noktası ile şebeke tarafında bulunan E noktası arasındaki gerilim aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$v_{EN1} = 0.5v_{da}[1 - (M \sin(\omega t))] \quad (4)$$

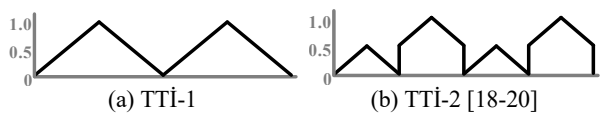
2.2. Modülasyon tekniği

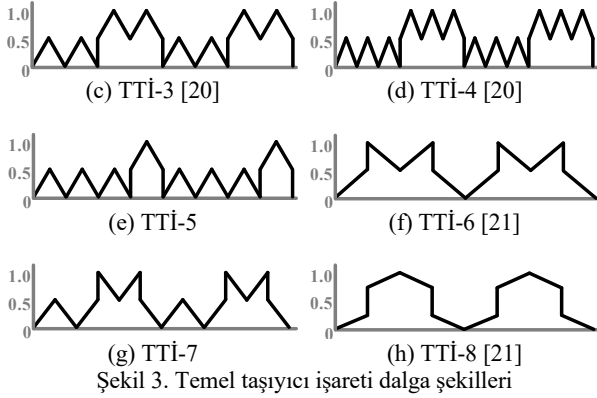
H6-II tipi eviricinin temel darbe genişlik modülasyonuna (DGM) ait anahtarlama işareti Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Temel DGM yapısı (anahtarlama işaretleri)

Bu çalışmada anahtarlama işareti üretiminde referans modülasyon işareti (RMI) olarak sinüzoidal dalga şekli kullanılacaktır. Temel taşıyıcı işaret (TTİ) olarak farklı yapıdaki dalga şekilleri tercih edilmiş olup bunları biçimleri Şekil 3’te gösterilmiştir.





Şekil 3. Temel taşıyıcı işaretleri

Buradaki taşıyıcı işaretlerin çoğu çok seviyeli üç fazlı eviricilerde kullanılmakta olup diğerleri ise bu taşıyıcı işaretlerinden türetilmiş yeni taşıyıcı işaretlerdir. Temelde transformatörsüz tek fazlı evirici ailesinde kullanılan temel taşıyıcı işareti testere biçimindedir. Şekil 3'te gösterilen diğer taşıyıcı işaretlerinin transformatörsüz tek fazlı eviricilerde kullanımı literatürde gözlemlenmemiştir.

2.3. Aktif güç kontrolü

Şebeke gerilimi (v_s) ve şebekeye enjekte edilen akımının (i_s) dq döner referans eksenindeki değerleri kullanılarak aktif güç hesabı yapılır ve ilgili kontrol gerçekleştirilebilir. Şebeke enjekte edilen akım ve şebeke gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [25]:

$$v_s(t) = V_s \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$i_s(t) = I_s \cos(\omega t - \varphi) = I_{sd} \cos(\omega t) - jI_{sq} \sin(\omega t) \quad (6)$$

Denklem (6)'dan enjekte edilen şebeke akımının dq döner referans eksenindeki bileşenleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

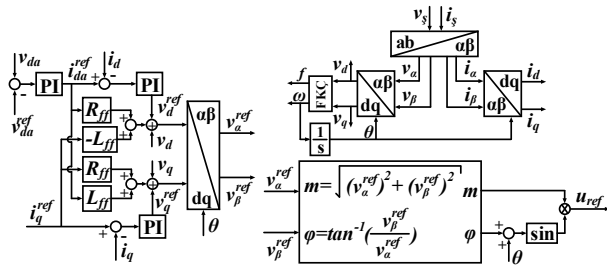
$$i_d = I_s \cos(\varphi) \quad (7)$$

$$i_q = -I_s \sin(\varphi) \quad (8)$$

Denklem (5)-(8) dikkate alındığında şebeke bağlantılı eviricinin aktif gücü aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P = \frac{1}{2} \times v_{sd} \times i_{sd} \quad (9)$$

Aktif güç kontrolü, şebeke akımının i_d bileşeninin kontrolü ile gerçekleştirilebilir. Şekil 4'te şebeke bağlantılı transformatörsüz H6-II tipi evirici kontrol blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4. Kontrol blok diyagramı

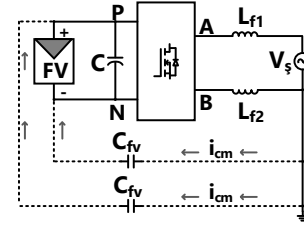
Şebekeye enjekte edilen akımın I_s ve eviricinin filtre sonrası şebeke bağlantı noktası geriliminin V_s ilgili dönüşüm

denklemleri kullanılarak dq bileşenleri (I_d, I_q, V_d, V_q) elde edilir. Faz kilitlemeli çevrim (FKÇ) bloğu yardımı ile şebekeye ait frekans (f) ve açısal hız (ω) bilgileri ve evirici girişi bara gerilimi (V_{da}, V_{da}^{ref}) değerlerinden faydalanılarak referans akımın d bileşeni (I_d^{ref}) elde edilir.

Denetim yapısı akım ve gerilim kontrol döngülerine sahip olup bu döngüler ileri besleme ve kompozisyon (R_{ff}, L_{ff}) özelliklerini barındırmaktadır. Döngü çıktıları referans gerilim işaretinin elde edilmesi için ters dq dönüşümüne uğrattırılır ve $\alpha\beta$ uzayında referans gerilim uzay vektörleri ($V_\alpha^{ref}, V_\beta^{ref}$) elde edilir. Bu gerilim vektörleri kullanılarak büyüklüğü ve açısı belli olan referans gerilim işareti (u_{ref}) elde edilir. Referans gerilim sinyali, referans modülasyon işareti (RMİ) olan sinüzoidal dalga şeklini oluşturmaktadır.

2.4. Kaçak akım

Transformatörsüz evirici yapısında FV panel ile şebeke sistemi arasında galvanik izolasyon bulunmaması sebebiyle panel ile şebeke arasında kısa devre meydana gelir ve Şekil 5'te gösterildiği gibi bir kaçak akım akışı gözlemlenir.



Şekil 5. Transformatörsüz FV eviricide kaçak akım akışı.

FV hücreler/panel ile toprak arasındaki parazitik kapasiteleri (C_{fv}) gerilim dalgalanmaları ile şarj ve deşarj olurken Kaçak akım (i_{cm}) şebeke alçak frekans ve anahtarlama yüksek frekans bileşenlerini içerir ve bu bileşenler şebeke akımına harmonik enjekte eder, sistem kaybını artırır, elektromanyetik uyumluluğu zayıflatır ve elektrik çarpması gibi güvenlik problemlerine sebep olabilir [26, 27]. Bu sebeple kaçak akım değeri Tablo 1'de verilen değerleri aşmamalıdır:

Tablo 1. Kaçak akımı sınır değerleri (VDE 0126-1-1)

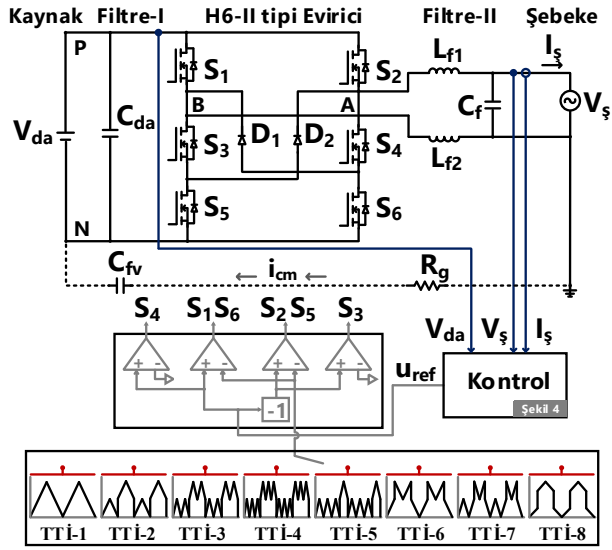
Kaçak Akım (mA)	Arıza Süresizlik Süresi (ms)
30	300
60	150
150	40

Kaçak akım değerini azaltmak için birçok yöntem literatürde önerilmiş olup bunlardan bir tanesi, uygun modülasyon stratejisi kullanarak toprak ve FV arasında gerilim dalgalanmaları azaltarak ve kaçak akım düşürmektir [27-29].

3. Benzetim çalışması

Benzetim çalışmasında kullanılacak sistemin temel blok diyagramı Şekil 6'da gösterilmiştir. Şebekeye enjekte edilen akım (I_s), eviricinin filtre sonrası şebeke bağlantı noktası gerilim (V_s) ve evirici girişi bara gerilim (V_{da}) bilgileri kontrol bloğunda işlendikten sonra elde edilen referans gerilim işareti (u_{ref}) bir başka ifade ile referans modülasyon işareti (RMİ) ve seçilecek

olan TTI bilgisi kullanılarak eviricinin anahtarları ($S_1 - S_6$) için uygun anahtarlama işaretleri üretilir.



Şekil 6. Benzetim çalışması blok şeması.

Benzetim çalışması Matlab/Simulink ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup sistem parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Sistem benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
DA bara gerilimi (V_{da})	400 V
Çıkış gerilimi (V_{aa}, V_s)	$220\sqrt{2}$ V
Şebeke frekansı (f_s)	50 Hz
Nominal Güç	4 kW
Anahtarlama frekansı (f_{sw})	10 kHz
Filtre endüktansı (L_{f1}, L_{f2})	1.6 mH
Filtre kapasitörü (C_f)	2.0 nF
Parazitik kapasitör (C_{fv})	18 nF
Anahtarlar (SCT3080ALGC11)	$V_{DSS} = 650$ V, $R_{DS(on)} = 80$ m Ω , $V_{SD} = 3.2$ V
Diyotlar (APT15D60B)	$V_R = 600$ V, $V_F = 1.9$ V
PI (I ve V döngüsü)	$K_P = 0.5$, $K_I = 5$
PI (V_{da})	$K_P = 0.1$, $K_I = 1.1$

Benzetim çalışmasında irdelenecek haller Tablo 3’te özetlenmiştir. Bu çalışmada farklı temel taşıyıcı işaretlerinin şebeke bağlantılı tek fazlı transformatörsüz H6-II evirici sistem performansı üzerindeki etkileri irdelenecektir.

Tablo 3. Benzetim çalışması halleri

Hal	Temel Taşıyıcı İşareti (TTI)
I	TTI-1
II	TTI-2
III	TTI-3
IV	TTI-4
V	TTI-5
VI	TTI-6
VII	TTI-7
VIII	TTI-8

Şekil 7’de gösterilen ölçüm noktalarından alınan akım ve gerilim bilgileri kullanılarak evirici giriş gücü (P_{giris}) ve çıkış gücü (P_{cikis}) ve bunlar ile ilişkili evirici verimi (η), çıkış akımına ait THB, ortak mod geriliminin ortalama değeri (V_{CM}) ve kaçak akım (i_{cm}) değerinin etkin değerleri hesaplanacaktır. Evirici temel verimi (η), aşağıdaki verilen denklemdeki gibi hesaplanabilir [30].

$$\eta = \frac{\int_0^{T_0} p_{cikis}(t) dt}{\int_0^{T_0} p_{giris}(t) dt} \quad (10)$$

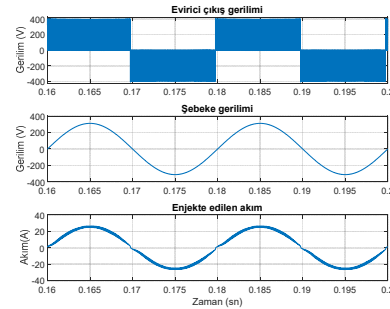
Burada;

$p_{giris}(t)$: Kaynaktan çekilen (evirici girişi) anlık güç değeri

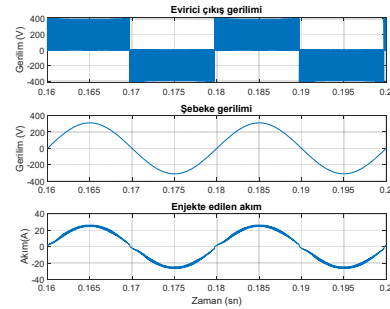
$p_{cikis}(t)$: Yüke aktarılan (evirici çıkışı) anlık güç değeri

T_0 : Ölçüm periyodu

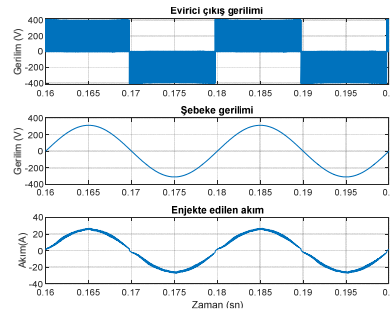
Şekil 7-14’te Hal I-VIII için maksimum evirici çıkış gücünde ($P_{cikis} = P_{maks}$), evirici çıkış gerilimi, yük akımı ve gerilimi dalga şekilleri ve Şekil 15-22’de ortak mod gerilimi, ortak mod geriliminin ortalama değeri ve kaçak akım dalga şekilleri gösterilmiştir.



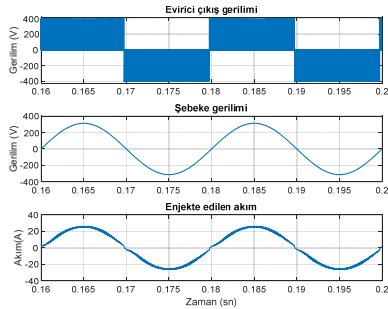
Şekil 7. Gerilim-akım (Hal-I)



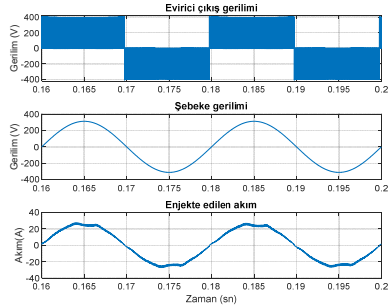
Şekil 8. Gerilim-akım (Hal-II)



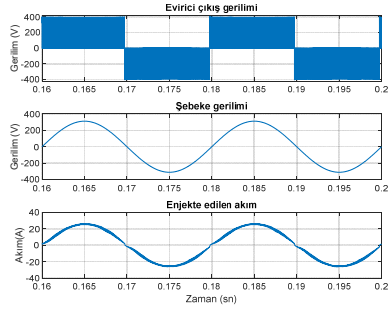
Şekil 9. Gerilim-akım (Hal-III)



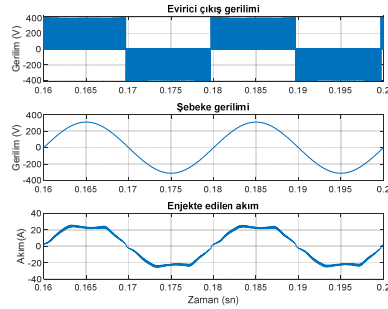
Şekil 10. Gerilim-akım (Hal-IV)



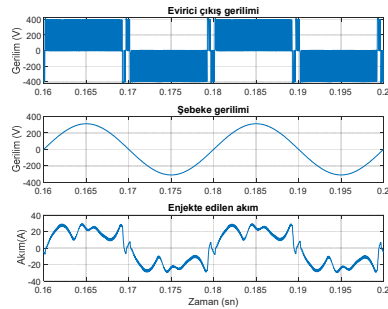
Şekil 11. Gerilim-akım (Hal-V)



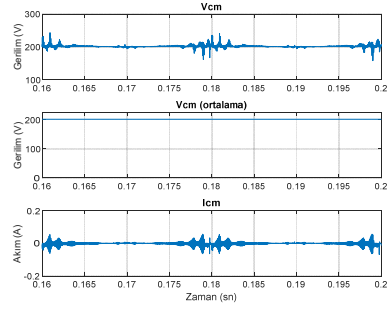
Şekil 12. Gerilim-akım (Hal-VI)



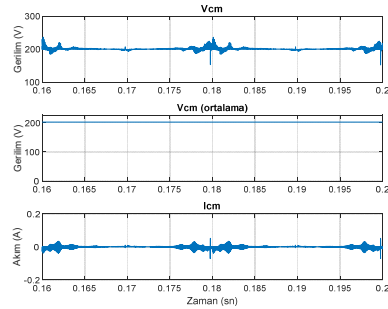
Şekil 13. Gerilim-akım (Hal-VII)



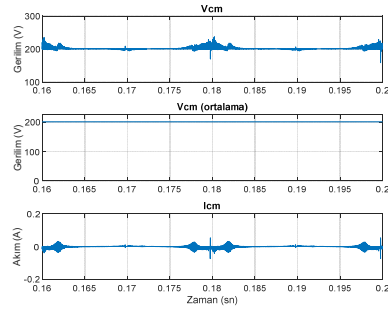
Şekil 14. Gerilim-akım (Hal-VIII)



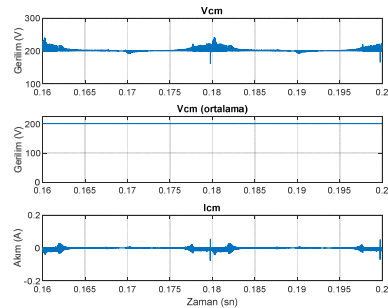
Şekil 15. V_{cm} ve i_{cm} (Hal-I)



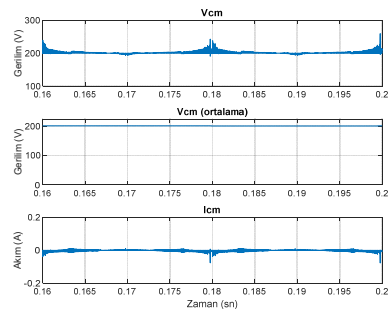
Şekil 16. V_{cm} ve i_{cm} (Hal-II)



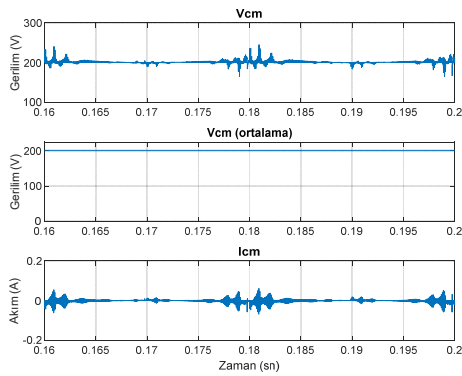
Şekil 17. V_{cm} ve i_{cm} (Hal-III)



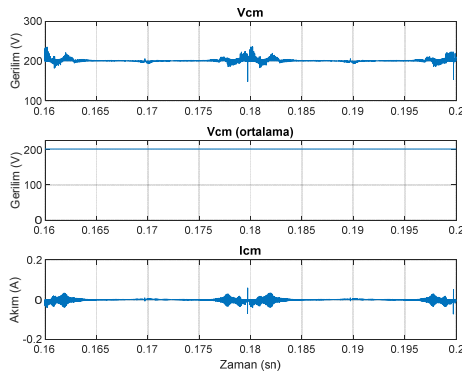
Şekil 18. V_{cm} ve i_{cm} (Hal-IV)



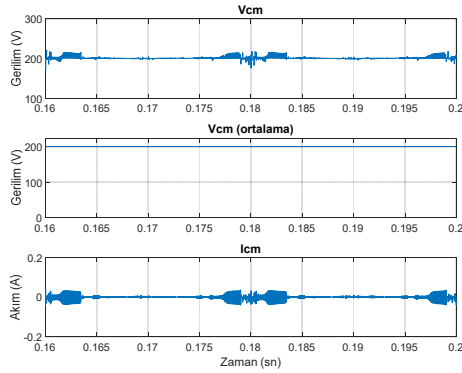
Şekil 19. V_{cm} ve i_{cm} (Hal-V)



Şekil 20. V_{CM} ve i_{cm} (Hal-VI)



Şekil 21. V_{CM} ve i_{cm} (Hal-VII)



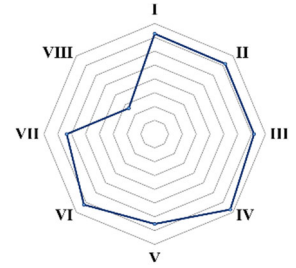
Şekil 22. V_{CM} ve i_{cm} (Hal-VIII)

Hal-V, VII ve VIII DGM kontrol yapılarına ait şebekeye enjekte edilen akım dalga şekillerinin ideal sinüzoidal biçimin uzağında olduğu ve Hal-I-IV ve VI DGM kontrol yapısında ise akımın sinüzoidal dalga şekli biçimine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 15-22’de görüldüğü üzere ortak mod gerilimi ile kaçak akım aynı noktalarda dalgalanmalara sahip olduğu ve Hal-V DGM kontrolüne ait kaçak akım dalga şeklindeki dalgalanmaların diğer kontrol yapılarına göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 23’te uygulanan farklı TTİ şekillerinin meydana getirdiği Hal türü ile evirici verimi (η) arasındaki ilişki hem şekilsel olarak hem de sayısal değerler ile gösterilmiştir.

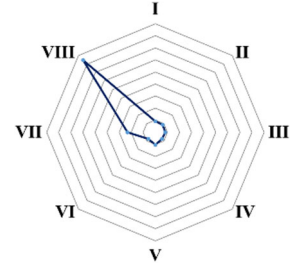
Hal	η
I	98.113
II	98.110
III	98.109
IV	98.136
V	98.076
VI	98.112
VII	98.068
VIII	97.882



Şekil 23. Hal-verim sonuçları

Bu çalışma koşullarında TTİ-VIII dalga şeklini içeren Hal-VIII DGM ile kontrol sonucunda evirici verimi en düşük değerde olduğu, TTİ-IV dalga şeklini içeren Hal-IV DGM ile kontrolü gerçekleştirilmesi durumunda ise verimin en yüksek değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 24’te uygulanan farklı TTİ şekillerinin meydana getirdiği Hal DGM kontrol türüne bağlı evirici çıkış akımına ait THB değeri Şekil 24’te gösterilmiştir.

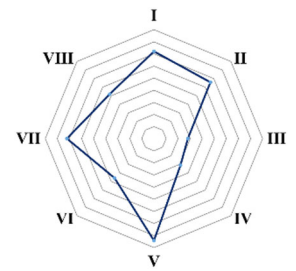
Hal	$THB_{I_{çıkış}}$
I	4.54
II	4.39
III	4.14
IV	4.00
V	5.30
VI	4.00
VII	11.53
VIII	42.20



Şekil 24. Hal- $THB_{I_{çıkış}}$ sonuçları

Öncelikli olarak Hal-V, VII ve VIII DGM ile kontrol sonucunda gözlemlenen çıkış akımındaki THB değerleri standartlarda belirtilen %5 sınır değerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Hal-VI ve VIII DGM kontrol ile sırasıyla THB değerinin en küçük ve en büyük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 25’te Hal DGM kontrol türüne bağlı ölçülen ortak mod geriliminin (V_{CM}) ortalama değeri gösterilmiştir.

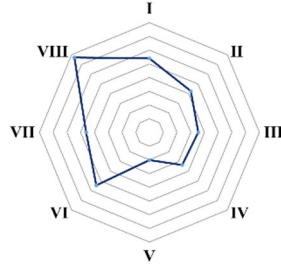
Hal	V_{cm} (V) (ortalama)
I	201.360
II	201.330
III	201.140
IV	201.155
V	201.420
VI	201.230
VII	201.360
VIII	201.260



Şekil 25. Hal- V_{cm} sonuçları

İdeal durumda V_{CM} değerinin $V_{da}/2$ değerine eşit olması beklenir. Gerçekleştirilen farklı senaryo çalışmaları sonucunda Hal-III DGM kontrol uygulanan evirici sisteminde ölçülen değerinin diğer Hal durumlarına göre ideale daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Şekil 26’da farklı Hal DGM kontrol yapısına bağlı olarak kaçak akım (i_{cm}) değerinin etkin değeri gösterilmiştir.

Hal	I_{cm} (mA) (rms)
I	5.4026
II	4.2614
III	3.5589
IV	3.3615
V	2.0210
VI	5.4592
VII	4.5998
VIII	7.7225



Şekil 26. Hal- I_{cm} sonuçları

Tüm Hal DGM kontrol türlerine ait ölçülen kaçak akım değerlerinin standartlarda belirlenen 300 mA sınır değerinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Hal-V ve Hal-VIII DGM kontrol yapıları ile sırasıyla en düşük ve en yüksek kaçak akım değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada şebeke bağlantılı tek fazlı H6-II tipi transformatörsüz eviricinin kontrolü için taşıyıcı işaret temelli modülasyon teknikleri kullanılmıştır. Bunun yanında bu çalışma, benzer çalışma koşulları altında Hal-I-VIII DGM kontrol teknikleri arasında bir performans karşılaştırması sunmuştur. Geleneksel temel taşıyıcı işareti (TTI-1) ile karşılaştırıldığında birçok modifiye edilmiş TTI türünün daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Anahtarlama frekansı aynı olmasına rağmen kullanılan TTI türüne bağlı olarak aynı zaman diliminde bir anahtarın tam açık ve tam kapalı durum sayısının TTI-IV kullanılan DGM kontrolünde diğerlerine göre fazla olması, evirici verimi ve çıkış akımına ait THB değeri olarak TTI-IV kullanılan DGM kontrolünün diğerlerine göre ön plana çıkmasını sağladığı tespit edilmiştir. Diğer yöntemlere göre ortak mod geriliminin zamanla değişiminin TTI-V'li DGM kontrol yöntemi kullanılması durumunda daha az olması sebebiyle en düşük kaçak akım değerine sahip olan yapı ise TTI-V'li DGM kontrol yöntemidir.

5. Kaynaklar

- [1] World Energy Outlook 2021, IEA, International Energy Agency, IEA Publications, October 2021
- [2] Renewables 2022 Global Status Report, REN21. 2022, REN21 Secretariat, Paris, 2022.
- [3] B. Çavdar, Ö. Akyazı, E. Sahin ve F. Nuroglu, "Büyük Ölçekli Fotovoltaik Santrallerde Aktif Güç Kontrol Yöntemlerinin Frekans Kararlılığı Analizi", EMO Bilimsel Dergi, c. 11, sayı. 21, ss. 17-27, 2021.
- [4] M. Mohan, J. Joy, G. James and S. Paulose, "Switched Inductor Based Transformerless Boost Inverter", Materials Today: Proceedings, vol. 58, no. 1, pp. 496-503, 2022.
- [5] H. Aydınöz, "Fotovoltaik Güç Santrallerinin Elektrik Şebekesine Harmonik Etkisinin Modellenmesi ve Analizi", EMO Bilimsel Dergi, c. 11, sayı. Özel Sayı, ss. 56-63, 2021.
- [6] T. Ahmadzadeh, E. Babaei, M. Sabahi and T. Abedinzadeh, "Design and Control of an Improved Z-H8 Inverter for Photovoltaic Applications", International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 50, no. 10, pp. 1-30, 2022.
- [7] G. Kamurthy and S. B. Veeranna, "Hybrid Bypass Technique to Mitigate Leakage Current in the Grid-Tied Inverter", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 12, no. 1, pp. 131-140, 2022.
- [8] M. Bahrami-Fard et al., "A New Topology and Modulation Strategy to Suppress the Leakage Current in Transformerless

- Cascaded H-Bridge Inverters in PV Application", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3158424.
- [9] I. Atawi and S. Zaid, "Model Predictive Control of H7 Transformerless Inverter Powered by PV", Intelligent Automation and Soft Computing, vol. 31, no. 1, pp. 449-469, 2022.
- [10] A. Karafil, "Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Eviricide LCL Filtre Parametre Değerlerinin ve Seri Sönümlenme Direnç Değerinin Değişim Etkisi", EMO Bilimsel Dergi, c. 10, sayı. 1, ss. 37-42, 2020.
- [11] S. B. Santra et al., "A Modified Carrier-Based PWM Technique for Minimization of Leakage Current in Transformer Less Single-Phase Grid-Tied PV System", Electrical Engineering, vol. 103, no. 1, pp. 447-461, 2021.
- [12] J. Qiu et al., "An Improved LMSVM Method for Leakage Current Suppression and Neutral-Point Voltage Control in Transformerless NPC Three-Level Inverters", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 3, pp. 3100-3113, 2022.
- [13] T. D. Duong et al., "Topology Review of Three-Phase Two-Level Transformerless Photovoltaic Inverters for Common-Mode Voltage Reduction", Energies, vol. 15, no. 9, 3106, pp. 1-18, 2022.
- [14] G. Vazquez-Guzman et al., "Hybrid PWM Techniques for a DCM-232 Three-Phase Transformerless Inverter with Reduced Leakage Ground Current", Micromachines, vol. 13, no. 1, 36, pp. 1-16, 2021.
- [15] X. Li et al., "Neutral-Point Voltage Oscillation Mitigation Scheme for Transformerless Three-Level PV Inverter in LVRT Operation with Selective Space Vector Modulation", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 3, pp. 2776-2789, 2022.
- [16] M. Irwanto et al., "The Technique of Voltage Level Time Division Based on Maximum Pulse Width to Reduce Total Harmonic Distortion on Multilevel Transformerless Photovoltaic Inverter (MLTPVI) System", Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 17, no. 3, pp. 1715-1730, 2022.
- [17] K. Jena, C. K. Panigrahi, K. K. Gupta and D. Kumar, "A Generalized Transformerless Switched-Capacitor Inverter for Photovoltaic Application", Electrical Engineering, vol. 104, pp. 3435-3444, 2022.
- [18] I. Sarkar and B. G. Fernandes, "Modified Hybrid Multi-Carrier PWM Technique for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter", IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2014, pp. 4318-4324.
- [19] D. Ronanki and S. S. Williamson, "Voltage Ripple Minimization in Modular Multilevel Converters using Modified Rotative PWM Scheme", 2018 AEIT International Annual Conference, 2018, pp. 1-6.
- [20] M. Meraj, S. Rahman, A. Iqbal and N. Al Emadi, "Novel Level Shifted PWM Technique for Unequal and Equal Power Sharing in Quasi Z-Source Cascaded Multilevel Inverter for PV Systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 1, pp. 937-948, 2021.
- [21] J. Zhao, X. He and R. Zhao, "A Novel PWM Control Method for Hybrid-Clamped Multilevel Inverters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2365-2373, 2010.
- [22] S. Podder, M. M. Biswas and M. Z. R. Khan, "A Modified PWM Technique to Improve Total Harmonic Distortion of Multilevel Inverter", 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), 2016, pp. 515-518.
- [23] S. K. Yadav et al., "Modified SPWM Technique for Improved Harmonic Performance of Single PV Array Fed Grid-Tied Five-Level Converter", IET Power Electronics, vol. 13, no. 19, pp. 4498-4506, 2020.
- [24] D. T. Kureve, N. Y. Goshew and S. T. Awuhe, "Amplitude Modulation Index Based Equation for Predicting Total Harmonics Distortion in Seven Level Cascaded H-Bridge", International

- Journal of Scientific and Technology Research, vol. 6, no. 7, pp. 196-199, 2017.
- [25] Z. Ahmad and S. N. Singh, "Improved Modulation Strategy for Single Phase Grid Connected Transformerless PV Inverter Topologies with Reactive Power Generation Capability", Solar Energy, vol. 163, pp. 356-375, 2018.
- [26] M. N. H. Khan et al., "Transformerless Inverter Topologies for Single-Phase Photovoltaic Systems: A Comparative Review", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 1, pp. 805-835, 2020.
- [27] M. Shayestagan et al., "An Overview on Prospects of New Generation Single-Phase Transformerless Inverters for Grid-Connected Photovoltaic (PV) Systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 515-530, 2018.
- [28] R. Gonzalez, J. Lopez, P. Sanchis and L. Marroyo, "Transformerless Inverter for Single-Phase Photovoltaic Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 693-697, 2007.
- [29] A. Khan, L. Ben-Brahim, A. Gastli and M. Benammar, "Review and Simulation of Leakage Current in Transformerless Microinverters for PV Applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 74, pp. 1240-1256, 2017.
- [30] B. Bletterie, R. Bründlinger and G. Lauss, "On the Characterisation of PV Inverters' Efficiency-Introduction to the Concept of Achievable Efficiency", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 19, pp. 423-435, 2011.

Özgeçmişler



Emre ÖZKOP, lisans derecesini 2003 yılında Gazi Üniversitesi elektrik-elektronik mühendisliği bölümünden, yüksek lisans ve doktora derecelerini 2006 ve 2012 yıllarında Karadeniz Teknik Üniversitesi elektrik-elektronik mühendisliği ana bilim dalından almıştır. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi elektrik-elektronik mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.