

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035202 (579-585)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035202 (579-585)

DOI: 10.35414/akufemubid.702382

Araştırma Makalesi / Research Article

Endüstriyel Amaçlı Yarım H-Köprü Modüllü Üç Fazlı Çok Seviyeli Evirici Yapısı

Ersoy BEŞER¹, Esra KANDEMİR BEŞER^{1*}¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.Sorumlu yazar e-posta: esrakandemir@kocaeli.edu.tr
ebeser@kocaeli.edu.trORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4305-3415>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3200-0027>

Geliş Tarihi: 11.03.2020

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Bu makalede, endüstriyel amaçlı çok seviyeli yeni bir evirici topolojisi geliştirilmiştir. Evirici yapısında yarım H-köprü seviye modülleri bulunmaktadır. Evirici çıkış gerilimindeki seviye sayısını değiştirebilmek amacıyla seviye modüllerinin sayısı azaltılıp artırılabilir. Seviye sayısının artması ile birlikte çıkış gerilimi sinüsoidal forma yaklaşmakta ve eviricideki gerilim ve akımdaki toplam harmonik bozunumu (THB) değerleri düşmektedir. Önerilen evirici yapısı oldukça esnek ve anahtarlama sinyalleri verilen eşitlikler yardımıyla bulunabilmektedir. Anahtarlama stratejisi karmaşık değildir. Önerilen evirici yapısı farklı seviyeler için simüle edilerek gerilim ve akım dalga şekilleri elde edilmiştir. Bu dalga şekillerinin THB değerleri hesaplanmıştır. Önerilen evirici klasik Uzay Vektör Modülasyonlu (UVM) ve Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) eviriciler ile kıyaslandığında hem akım hem de gerilim harmoniklerinin birlikte düşük olduğu görülmektedir. Oysa ki klasik UVM ve DGM eviricilerde akım harmonikleri düşük olmakla beraber gerilim harmonikleri yüksektir. Önerilen evirici gerilim harmoniklerini de düşürerek bu açığı kapatmaktadır. Ayrıca klasik UVM ve DGM eviricilerin bir diğer dezavantajı anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim streslerinin (dv/dt) yüksek olmasıdır. Önerilen eviricide çıkış geriliminde seviyeler bulunduğundan anahtarlar üzerindeki dv/dt stresleri de düşük olmaktadır. Dolayısıyla klasik sistemlerdeki bir diğer dezavantaj da bu yapı ile yok edilmiştir. Ayrıca geliştirilen evirici yapısı literatürdeki benzerleri ile kıyaslandığında anahtar sayısı avantajına sahiptir.

Anahtar kelimeler

Çok seviyeli evirici;
Yarım H- köprü;
Toplam harmonik bozunumu (THB);
3-faz;

Three Phase Multi Level Inverter Structure with Half H-Bridge Module for Industrial Applications

Abstract

In this paper, a new three phase multi-level inverter topology has been developed for industrial purposes. Half H-bridge level modules exist in the inverter structure. In order to change the number of levels in the output voltage, the number of level modules is changed. With the increase in the number of levels, the output voltage approaches the sinusoidal form and the total harmonic distortion (THD) values in the voltage and current decrease. The proposed inverter structure is very flexible and switching signals can be found by the generated equations. The switching strategy is not complicated. Proposed inverter was simulated for different levels and voltage and current waveforms were obtained. THD values of these waveforms were calculated. Compared with the classical Space Vector Modulation (SVM) and Pulse Width Modulation (PWM) inverters, it is seen that both current and voltage harmonics are low together. However, current harmonics are low in conventional SVM and PWM inverters, but voltage harmonics are high. The improved inverter also closes this gap by reducing the voltage harmonics. In addition, another disadvantage of conventional SVM and PWM inverters is the high voltage stresses (dv/dt) on the switching elements. Since the proposed inverter has levels on the output voltage, the dv/dt stresses on the switches are also low. Additionally, the developed inverter structure has the switch number advantage compared to its counterparts.

Keywords

Multilevel inverter;
Half H-bridge;
Total harmonic distortion (THD);
3-phase

1. Giriş

Günümüzde birçok endüstriyel uygulama için çok seviyeli eviriciler iki seviyeli eviricilere rakip olmuştur (Majareh *et al.* 2019). Çok seviyeli eviricilerde temel amaç, düşük değerli doğru akım gerilimlerin yarıiletken anahtarlama elemanları ile anahtarlanarak, çıkışta basamaklı ve yüksek değerli gerilim formunun elde edilmesidir (Majareh *et al.* 2019). Klasik iki seviyeli eviricilerin gerilim harmoniklerinin, anahtarlama elemanlarındaki gerilim streslerinin ve anahtarlama kayıplarının yüksek olması gibi olumsuzluklara karşı çok seviyeli eviricilerin bu durumdaki olumlu yönleri bu evirici tiplerini öne çıkarmıştır (Majumdar *et al.* 2020). Bu avantajları çok seviyeli eviricileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı sistemler, motor sürücüler, aktif filtre uygulamaları, elektrikli araçlar, akıllı şebekeler, dinamik gerilim düzenleyici gibi endüstriyel uygulamalarda popüler elemanlar haline getirmiştir (Majumdar *et al.* 2020, Boora and Kumar 2019). En genel olarak çok seviyeli eviriciler, diyot kenetlemeli, kapasitör kenetlemeli ve kaskat bağlı H-köprü eviriciler olarak sıralanabilir (Rodriguez *et al.* 2002, Boora and Kumar 2019, Sutar *et al.* 2019). Bu yapılar klasik çok seviyeli evirici yapılarıdır (Majareh *et al.* 2019). Literatürde hem klasik çok seviyeli eviriciler hem de bunlara alternatif olan yeni topolojilerle ilgili çalışmalar oldukça yaygındır.

Sutar *et al.* (2019)' un çalışmasındaki evirici yapısı 3 fazlı diyot kenetlemeli evirici ile kaskat bağlı H-köprü evirici birleşiminden oluşmaktadır. Çalışmada 5 seviyeli eviricinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. 5 seviyeli eviricide 24 adet anahtar, 12 adet diyot, 6 adet kapasite ve 3 adet bağımsız kaynak kullanılmıştır. Dhanamjayulu *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada bir fazlı 49 seviyeli asimetrik kaskat bağlı bir yapı önermiştir. Islam *et al.* (2019), 3 fazlı kapasitör kenetlemeli 7 seviyeli evirici topolojisi kullanmıştır. Bu seviye sayısı için eviricide toplamda 36 anahtar, 24 kapasite ve 3 bağımsız kaynak bulunmaktadır. Ray *et al.* (2019) 3 fazlı kaskat H-köprü çok seviyeli evirici ile Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) tekniği kullanarak bir simülasyon çalışması gerçekleştirmiştir. 5 seviyeli eviricide 24 anahtar, 6 bağımsız kaynak

kullanılmıştır. Pore *et al.* (2019), yine klasik kaskat H-köprü çok seviyeli eviricide sabit frekanslı evrik sinüs DGM tekniği kullanmıştır. 5 seviyeli eviricide 24 anahtar, 6 bağımsız kaynak kullanılmıştır. Saeidabadi *et al.* (2017), çalışmasında her fazda H-köprü evirici ve buna ek yardımcı modüllerden oluşan hibrit yapıda bir evirici topolojisi önermiştir. Sabyasachi *et al.* (2017) yine her fazda H-köprü evirici ve kaynak gerilimlerini ekleme ve çıkarma işlemi yapan ek modüllerden oluşan bir topoloji önermiştir. Salem *et al.* (2016), 3 fazlı modüler yapıda çok seviyeli evirici topolojisi kullanmaktadır. Evirici faz başına 3 seviye üretebilmek için 12 anahtara ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışmada çok seviyeli evirici yapısı için yeni bir topoloji önerilmektedir. Önerilen topolojinin literatürde yer alan çok seviyeli evirici yapılarına göre anahtar sayısı avantajı bulunmaktadır. Evirici modüler yapıdadır. Sistemde yer alan seviye modüllerinin sayısı artırılarak seviye sayısı kolaylıkla arttırılmaktadır. Anahtarlama stratejisi karmaşık değildir. Çıkışta çok seviyeli gerilim şekli elde edildiğinden anahtarlama elemanlarının maruz kaldığı dv/dt gerilim stresi düşüktür. Gerilim harmonikleri klasik eviricilere göre azdır. Bu avantajları ortaya koyabilmek amacıyla yapılan çalışmada evirici yapısı anlatılmış ve anahtarlama mantığı açıklanmıştır. Farklı seviyeler için önerilen evirici simüle edilmiştir. Çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri ile gerilim ve akım THB değerleri verilmiştir. Önerilen eviricinin endüstriyel birçok uygulama için uygun olduğu yapılan bu simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır.

2. Yarım H-Köprü Modüllü Üç Fazlı Çok Seviyeli Evirici

2.1 Evirici yapısı

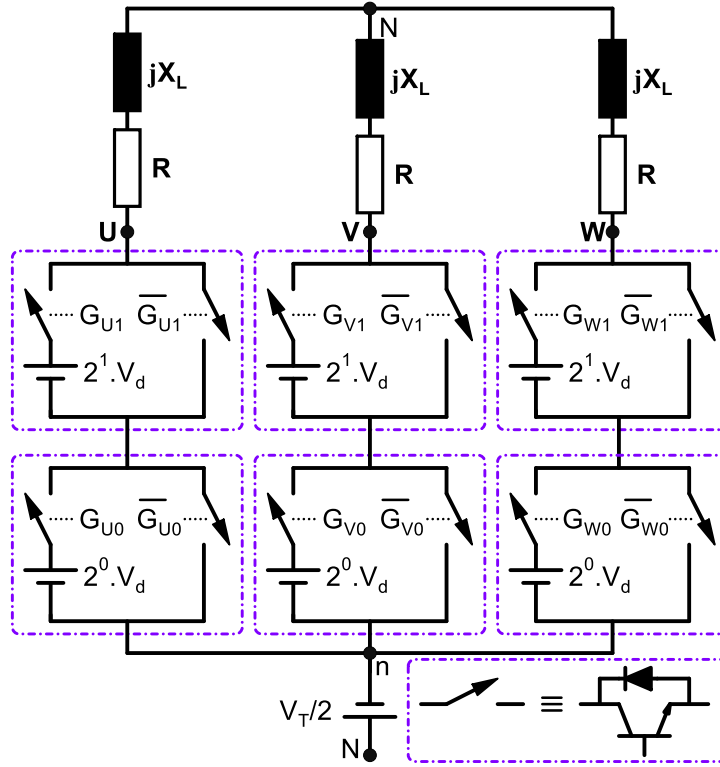
Bu çalışma kapsamında önerilen evirici literatürde yeni bir topoloji sayılabilecek bir yapı teşkil etmektedir. Önerilen evirici üç koldan oluşmaktadır. Eviricinin bir kolu bir fazlı çok seviyeli evirici yapısıdır. Her fazda gerilim seviyelerini oluşturmak için yarıiletken anahtarlama elemanlarını içeren seviye modülleri bulunur. Evirici yapısının genel şeması Şekil 1'de görülmektedir.

Bir fazda oluşacak seviye sayısı (n) seviye modülü sayısına (m) bağlı olarak Denklem (1) ile ifade edilebilir. Yine faz arası gerilim seviyesi (N) bir faz gerilim seviyesi veya seviye modülü cinsinden Denklem (2) ile ifade edilebilir.

$$n = 2^m \quad (1)$$

$$N = 2n - 1 = 2^{m+1} - 1 \quad (2)$$

Şekil 1'den de görülebileceği gibi her bir seviye modülünde iki adet yariletken anahtarlama elemanı ve bir adet doğru gerilim kaynağı bulunmaktadır. Şekil 1'de verilen evirici yapısında her kolda iki seviye modülü bulunduğu için Denklem (1) ve (2)'ye göre bir faz geriliminde elde edilebilecek maksimum seviye sayısı 4, faz arası gerilim seviyesi ise 7 olur.



Şekil 1. Yarım H-Köprü modüllü üç fazlı çok seviyeli evirici yapısı.

Çıkış geriliminde olması istenen referans gerilim değerinin tepe değerine göre seviye modüllerindeki gerilim kaynaklarının temel değeri Denklem (3) kullanılarak bulunabilir. Bulunan bu temel değer kullanılarak seviye modüllerindeki diğer gerilim kaynaklarının değerleri de temel değer 2^k değeri ile çarpılarak bulunabilir. Buradaki k değeri seviye modülünün numarasıdır.

$$V_d = \frac{2V_{max}}{n-1} \quad (3)$$

Önerilen evirici yapısında seviye modüllerinin dışında bir kaynağa daha ihtiyaç vardır. Bu kaynağın gerilim değeri ise bir kolda yer alan seviye modüllerinde bulunan kaynak gerilimlerinin toplamının yarısına eşit olmalıdır. ($V_T/2$)

Toplam modül sayısı (M), anahtarlama elemanı sayısı (R) ve kaynak sayısı (S) ise Denklem (4) ve (5)'te ifade edildiği gibi bulunur.

$$R = 6m \quad (4)$$

$$S = 3m + 1 \quad (5)$$

Önerilen eviricide bir fazda ve faz arası gerilimde oluşacak maksimum seviye sayıları, toplam kaynak ve anahtarlama elemanı sayıları, seviye modülü sayısına bağlı olarak hesaplanabilir.

Hesaplanan bu değerler Çizelge 1'de verilmiştir. Belirli bir modül sayısı için maksimum seviye sayısının altında değerlerde de gerilim seviyeleri üretilebilmektedir.

Çizelge 1. Seviye modülü sayısına göre hesaplanan seviye sayıları, toplam anahtarlama elemanı ve kaynak sayıları.

Seviye Modülü Sayısı (m)	1	2	3	4	m
Faz Gerilimi Seviye Sayısı (n)	2	4	8	16		2^m
Hat Gerilimi Seviye Sayısı (N)	3	7	15	31		$2^{m+1}-1$
Kaynak Sayısı (S)	4	7	10	13	$3m+1$
Toplam Anahtar Sayısı (R)	6	12	18	24		$6m$

2.2 Anahtarlama sinyallerinin elde edilmesi

Çok seviyeli gerilim şeklini evirici çıkışında oluşturabilmek için seviye modüllerinde yer alan yarıiletkenlerin uygun sırada anahtarlması gerekmektedir.

Anahtarlama sinyallerini elde edebilmek amacıyla ilk olarak üç faza ait referans gerilimler Denklem (6)'daki gibi tanımlanır.

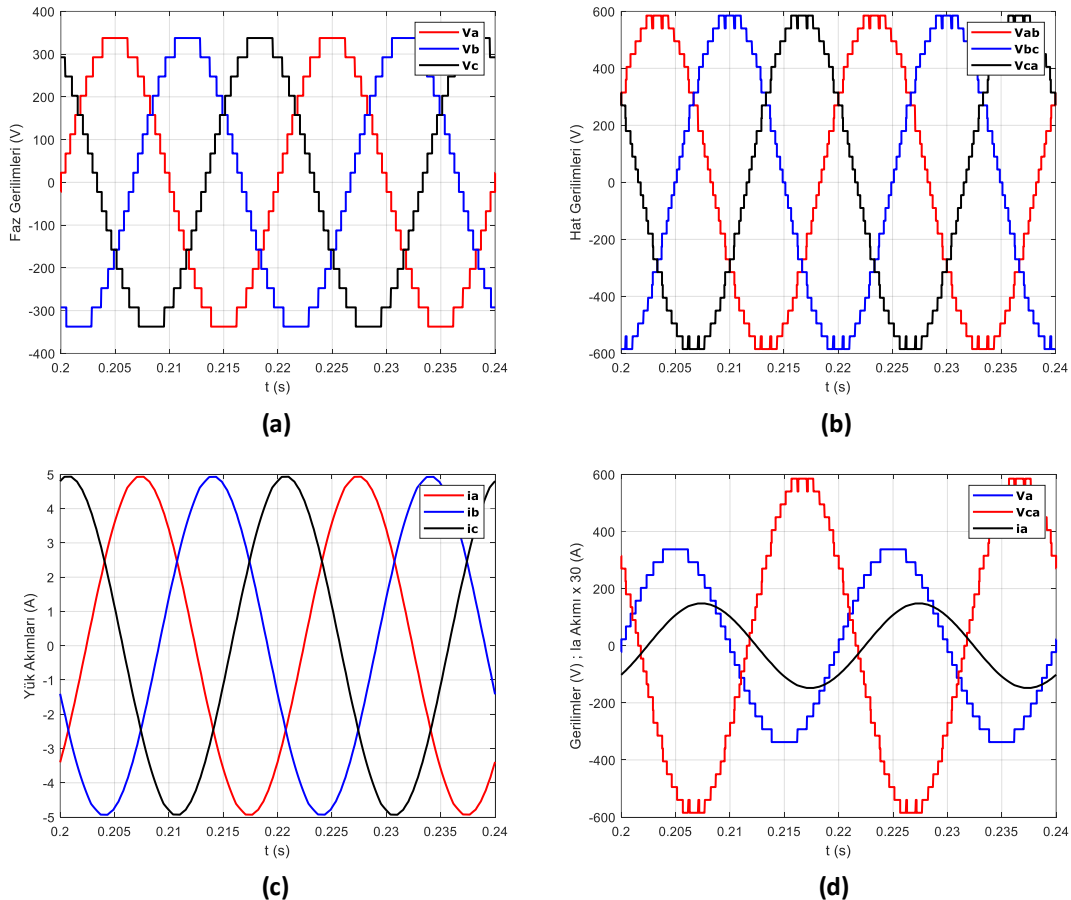
$$\begin{bmatrix} V_{a_ref} \\ V_{b_ref} \\ V_{c_ref} \end{bmatrix} = (2^{m-1} - 2^{-1}) \begin{bmatrix} 1 + \sin(\omega t) \\ 1 + \sin(\omega t + 120) \\ 1 + \sin(\omega t - 120) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Anahtarlama sinyalleri, referans gerilimlerin anlık değerlerine göre Denklem (7) kullanılarak her bir

kolda bulunan anahtarlama elemanları için oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} Q_{abc_0} \\ Q_{abc_1} \\ Q_{abc_2} \\ \vdots \\ Q_{abc_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (V_{abc_ref}) \bmod 2 \\ ((V_{abc_ref}) - (V_{abc_ref} \bmod 2^1))2^{-1} \bmod 2 \\ ((V_{abc_ref}) - (V_{abc_ref} \bmod 2^2))2^{-2} \bmod 2 \\ \vdots \\ ((V_{abc_ref}) - (V_{abc_ref} \bmod 2^k))2^{-k} \bmod 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Her bir koldaki seviye modülü sayısı kadar anahtarlama fonksiyonu kullanılmalıdır. Bu nedenle anahtarlama fonksiyonları seviye modülü numarasına göre isimlendirilerek anahtarlama sinyalleri kolaylıkla elde edilebilir.



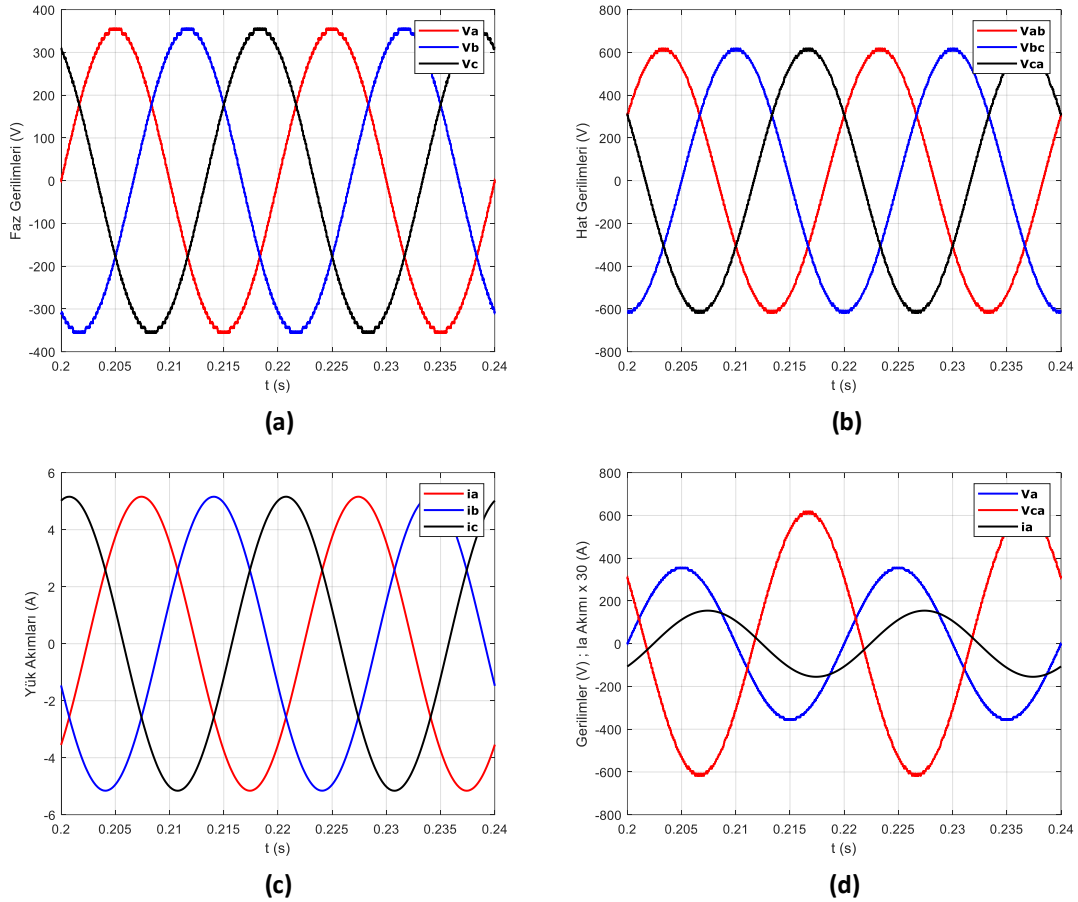
Şekil 2. 16 seviyeli eviricinin simülasyon sonuçları (a) Faz gerilimleri (b) Hat gerilimleri (c) Hat akımları (d) V_a faz gerilimi, V_{ca} hat gerilimi, i_a hat akımı.

3. Yarım H-Köprü Modüllü Üç Fazlı Çok Seviyeli Eviricinin Simülasyonu

Evirici yapısı simülasyon programında oluşturularak üç fazlı bir yük evirici çıkışına bağlanır. Bu çalışmada bir R-L yük tercih edilmiştir. İlk olarak çıkışta istenen gerilimin tepe değerine göre seviye modülleri içerisinde yer alan kaynak gerilimleri hesaplanır ve kaynaklar bu değerlere ayarlanır. Daha sonra üç fazlı referans gerilimler üretilerek anahtarlama sinyallerine ait formüller kullanılarak anahtarlama sinyalleri oluşturulur. Anahtarlama sinyalleri uygun elemanlara uygulanarak çıkışta çok seviyeli bir gerilim şekli elde edilir. Seviye modüllerinin sayısı

değiştirilerek yük üzerinde farklı değerlerde çok seviyeli gerilim dalga şekilleri elde edilir.

Bu çalışmada bir faz için 16 ve 64 seviyeli gerilim dalga şekilleri evirici çıkışında oluşturulmuştur. Bir fazda 16 ve 64 seviyeli gerilim oluşurken faz arası gerilim değerleri sırasıyla 31 ve 127 seviyeli olmaktadır. 16 seviyeli gerilim için eviricide toplam 24 anahtar, 64 seviyeli eviricide ise toplam 36 anahtar kullanılmıştır. Bu da literatürdeki benzerlerine göre önerilen eviriciyi anahtarlama elemanı sayısı bakımından avantajlı hale getirmektedir.



Şekil 3. 64 seviyeli eviricinin simülasyon sonuçları (a) Faz gerilimleri (b) Hat gerilimleri (c) Hat akımları (d) V_a faz gerilimi, V_{ca} hat gerilimi, i_a hat akımı.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada önerilen çok seviyeli evirici yapısı yapılan simülasyon çalışmaları ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'te verilen simülasyon sonuçlarında elde edilen gerilim dalga şekilleri tasarlanan eviricinin çok seviyeli gerilim formunu başarılı bir şekilde üretebildiğini göstermektedir. Sistemdeki seviye modülü sayısı arttıkça çıkışta elde

edilen gerilim şeklindeki seviye sayısı artmakta ve gerilim şekli saf sinüsoidal forma yaklaşmaktadır.

Evirici simülasyonları tamamlandıktan sonra faz ve hat gerilimleri ile hat akımındaki toplam harmonik bozunumu (THB) değerleri hesaplanmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen değerler Çizelge 2'de görülmektedir.

Çizelge 2. Seviye sayısına göre hesaplanan THB değerleri.

Seviye Sayısı (n)	16	64
Faz Gerilimi Toplam Harmonik Bozunumu (%)	5,15	1,03
Hat Gerilimi Toplam Harmonik Bozunumu (%)	3,95	0,85
Hat Akımı Toplam Harmonik Bozunumu (%)	0,34	0,08

Simülasyonlarda hesaplanan THB değerleri de seviye sayısı arttıkça gerilim şeklinin saf sinüsoidal forma yaklaştığını ortaya koymaktadır. Gerilim şekli sinüsoidal forma yaklaştıkça akım dalga şekli de sinüsoidal formda olmaktadır. Önerilen eviricinin klasik eviricilere göre en büyük avantajı yük gerilimindeki harmoniklerin düşük olmasıdır.

5. Sonuç

Bu çalışmada üç fazlı yarım H-köprü modüllü çok seviyeli evirici yapısı önerilmiştir. Evirici yapısında bulunan seviye modülleri aracılığıyla çıkış geriliminin seviye sayısı kolayca değiştirilebilmektedir.

Akım harmonikleri, klasik UVM ve DGM eviricilerde düşüktür fakat bu tip eviricilerde gerilim harmonikleri yüksek olmaktadır. Önerilen eviricide ise akım ve gerilim harmoniklerinin ikisi birden düşük değerli çıkmaktadır. Farklı seviye modülü sayıları için yapılan simülasyonlarda seviye sayısı arttıkça gerilim ve akımdaki THB değerlerinin azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla çıkış filtresine gereksinim duyulmaz ve eviricinin anahtarlama frekansı düşüktür.

Ek olarak anahtarlama elemanları üzerindeki dv/dt gerilim stresleri, klasik UVM ve DGM eviricilerde oldukça yüksektir. Önerilen eviricinin yapısında seri bağlı seviye modülleri bulunduğu ve çıkış gerilimi basamak şeklinde üretildiğinden dolayı yarıiletken elemanlar üzerindeki gerilim stresi düşüktür. Bu durum özellikle yüksek gerilimli uygulamalar için avantaj sağlamaktadır.

Ayrıca anahtar sayısı bakımından incelendiğinde önerilen evirici topolojisi literatürdeki benzer çalışmalara göre avantajlıdır.

Yapılan simülasyonlar, önerilen 3 fazlı evirici topolojisinin, elektrik makinaları ve elektrik tesislerinde yer alan endüstriyel uygulamalar için oldukça elverişli olduğunu göstermektedir.

5. Kaynaklar

- Boora, K. and Kumar, J., 2019. A novel cascaded asymmetrical multilevel inverter with reduced number of switches. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **55 (6)**, 7389-7399.
- Dhanamjayulu, C., Arunkumar and G. and Elangovan, D., 2019. Real-time implementation of novel 49-level asymmetric cascaded multilevel inverter. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 1-5.
- Islam, N.J., Sarker, S., Merazul Islam N.M. and Reza, S., 2019. Implementation of finite control set model predictive control on 7-level flying capacitor multilevel inverter using space vector. *1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT 2019)*.
- Majareh, S.H.L., Sedaghati, F., Hosseinpour, M. and Mousavi-Aghdam, S. R., 2019. Design, analysis and implementation of a generalised topology for multilevel inverters with reduced circuit devices. *IET Power Electronics*, **12 (14)**, 3724-3731.
- Majumdar S., Mahato, B. and Jana, K.C., 2020. Implementation of an optimum reduced components multicell multilevel inverter (MC-MLI) for lower standing voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67 (4)**, 2765-2775.
- Pore, T.R., Rathod, A.A. and Patil, S.K., 2019. Performance analysis of cascaded H-bridge multilevel inverter with variable frequency ISPWM technique. *Innovations in Power and Advanced Computing Technology(i-PACT)*, 1-5.
- Ray, R., Shadh, M.A. and Reza, S., 2019. Cascaded H-Bridge multilevel inverter using SVPWM modulation. *1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT 2019)*.
- Rodriguez, J., Jih-Sheng, L. and Fang Zheng, P., 2002. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **49 (4)**, 724-738.
- Sabyasachi, S., Borghate, V.B., Karasani, R.R., Maddugari, S.K. and Suryawanshi, H.M., 2017. Hybrid control technique-based three-phase cascaded multilevel inverter topology. *IEEE Access*, **5**, 26912-26921.
- Saeidabadi, S., Gandomi, A.A., Hosseini, S.H., Sabahi, M. and Gandomi, Y.A., 2017. New improved three-phase hybrid multilevel inverter with reduced number of components. *IET Power Electronics*, **10 (12)**, 1403-1412.

- Salem, A., Ahmed, E.M., Orabi, M. and Ahmed, M., 2016. Study and analysis of new three-phase modular multilevel inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63 (12)**, 7804- 7813.
- Sutar, M.S., More, D. S. and Kumar, A., 2019. Mixed multilevel inverter topology for high power medium voltage applications. *International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 69-74.