



## SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR İÇİN YENİ ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ TOPOLOJİSİ

Esra KANDEMİR BEŞER\*, Ersoy BEŞER

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Çok Seviyeli Evirici, SMSM, THB, Motor Sürücüsü.</i>	Bu çalışmada, Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarda (SMSM) kullanılacak çok seviyeli evirici topolojisi önerilmektedir. Önerilen yapı çok seviyeli gerilim şeklini yapısındaki seviye modülleri ve modüller içerisindeki anahtarlama elemanlarına ait tetikleme sinyalleri ile elde etmektedir. Çıkış gerilimi harmonikleri düşüktür. Bu yüzden bu yapının SMSM gibi giriş akımının saf sinüs olduğu motor uygulamalarında kullanılması oldukça uygundur. Bu üstünlüğü göstermek için önerilen eviricinin SMSM ile birlikte değişken moment ve değişken hız durumları için benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre seviye sayısı arttıkça gerilim ve akım toplam harmonik bozunumu (THB) değerleri azalarak dalga şekilleri daha sinüsoidal hale gelmektedir. Önerilen eviricinin, SMSM sürücüsü olarak değişken yük ve değişken hız uygulamalarında kullanılması oldukça uygundur.

## A NEW MULTILEVEL INVERTER TOPOLOGY FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Keywords	Abstract
<i>Multilevel Inverter, PMSM, THB, Motor Drive.</i>	In this study, a multilevel inverter topology that can be used in Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) is proposed. The proposed structure achieves the multilevel voltage shape with the level modules in the structure and the switching signals of the switching elements in the modules. Output voltage harmonics are low. Therefore, it is very advantageous to use this structure in sinusoidal machines such as PMSM. In order to demonstrate this advantage, the proposed inverter is simulated for variable torque and variable speed conditions together with PMSM. According to the simulation results, as the number of levels increases, the voltage and current total harmonic distortion (THD) values decrease and the waveforms become more sinusoidal. It is very convenient to use the proposed inverter as an PMSM driver in variable load and variable speed applications.

### Alıntı / Cite

Kandemir Beşer, E., Beşer, E., (2021). Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar İçin Yeni Çok Seviyeli Evirici Topolojisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1), 99-107.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Kandemir Beşer, 0000-0002-4305-3415  
E. Beşer, 0000-0002-3200-0027

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	27.03.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	29.11.2021
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	03.02.2021
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	30.03.2021

### 1. Giriş (Introduction)

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) son yıllarda oldukça ilgi çeken makineler haline gelmiştir. Bunun sebebi bu makinelerin yüksek güç yoğunluğuna sahip olması ve yüksek verimli olmasından kaynaklanmaktadır (Chi and Sun, 2008; Chen vd., 2017; Purohit ve Dubey, 2015). SMSM'lerde geleneksel senkron makinada olan

\* İlgili yazar / Corresponding author: esrakandemir@kocaeli.edu.tr, +90-262-303-3497

uyarma sargılarının yerine rotorda sürekli mıknatısların kullanılması bu makinelerin güç yoğunluğunu ve verimini arttırmıştır (Jacob and Chitra, 2017).

Genellikle motor uygulamalarında geleneksel iki seviyeli darbe genişlik modülasyonlu (DGM) eviriciler kullanılmaktadır. Geleneksel eviriciler ile sürülen SMSM'lerde motor uçlarındaki (dv/dt) gerilim değişimi fazla olur (Rahman vd., 2018; Haris vd., 2014). Bu da sargı izolasyonunun bozulmasına neden olabilir (Rahman vd., 2018). Ayrıca geleneksel iki seviyeli eviricilerde gerilim harmonikleri yüksektir. Anahtarlama frekansları yüksek olduğundan anahtarlama kayıpları fazladır (Haris vd., 2014). Bu eksiklikler özellikle yüksek güçlü ve yüksek hızlı uygulamalarda daha da öne çıkmaktadır (Xia vd., 2018).

Bu problemleri aşmak için SMSM'lerde çok seviyeli eviricilerin kullanılması oldukça uygun bir seçenektir (Chen vd., 2017; Purohit and Dubey, 2015; Rahman vd., 2018; Haris vd., 2014). Çok seviyeli eviriciler basamaklı gerilim dalga şekli üretirler. Harmonikleri oldukça düşüktür. (dv/dt) gerilim değişimi azdır. Süzgeç devrelerine ihtiyaç duymazlar (Rahman vd., 2018). Literatürde çok seviyeli farklı evirici topolojileri önerilmektedir. Bu topolojiler genel olarak diyot kenetlemeli, kapasitör kenetlemeli ve kaskad bağlı eviriciler olarak 3 sınıfa ayrılabilir (Naumanen vd., 2009).

Çok seviyeli eviricileri SMSM yapılarında kullanan çalışmalar içerisinde Thielemans vd. (2009) SMSM için kapasitör kenetlemeli bir evirici yapısı önermektedir. Beş seviyeli eviricide, toplamda 24 anahtar kullanılmıştır. Purohit ve Dubey, (2015) SMSM sürücüsünde 3 fazlı 5 seviyeli kaskad bağlı H-köprü evirici kullanmıştır. Eviricide her fazda sekiz, toplamda 24 anahtar bulunmaktadır. Faz akımlarını sinüsoidal şekle yaklaştırmak için yüksek frekanslı DGM tekniği kullanılmıştır. Vargas vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada SMSM sürücüsü olarak üç seviyeli nötr kenetlemeli evirici kullanılmıştır. Bu eviricide 12 anahtar, 6 diyot bulunmaktadır.

Bu çalışmada SMSM sürücüleri için yeni çok seviyeli evirici yapısı önerilmiştir. Önerilen evirici anahtarlama elemanı sayısı ve anahtarlama tekniği bakımından benzer çalışmalara göre üstün özelliklere sahiptir. Önerilen eviricinin gerilim harmonikleri çok düşüktür. Özellikle 32 ve üzerindeki seviyelerde çıkış geriliminin THB değeri % 5'in altındadır. Bu da önerilen eviricinin çıkış geriliminin sinüsoidal olduğunu gösterir. Dolayısıyla giriş geriliminin ve akımının sinüsoidal olduğu makineler için kullanımı oldukça uygundur. SMSM de sinüsoidal makinalardan biridir. Önerilen evirici topolojisinin SMSM ile birlikte kullanımı çalışmanın orijinalliğini oluşturmaktadır. Evirici detaylı olarak tanıtılarak SMSM ile benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları önerilen yapının SMSM sürücüleri için iyi bir aday olduğunu göstermektedir.

## 2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli (Mathematical Model of Permanent Magnet Synchronous Motor)

SMSM'nin matematiksel modeli a,b,c veya d-q faz sisteminde oluşturulabilir. Bu çalışmada a,b,c faz değişkenleri kullanılarak matematiksel model oluşturulmuştur. İlk olarak gerilim eşitlikleri, ardından moment eşitliği elde edilmiştir. Gerilim eşitlikleri matris olarak aşağıdaki gibidir.

$$[V]_{a,b,c} = [R]_{a,b,c}[I]_{a,b,c} + \frac{d}{dt}[\lambda]_{a,b,c} \quad (1)$$

Her bir fazdaki toplam halkalama akısı ifadeleri ayrıntılı yazılacak olursa,

$$[\lambda]_{a,b,c} = [L]_{a,b,c}[I]_{a,b,c} + [\lambda_m]_{a,b,c} \quad (2)$$

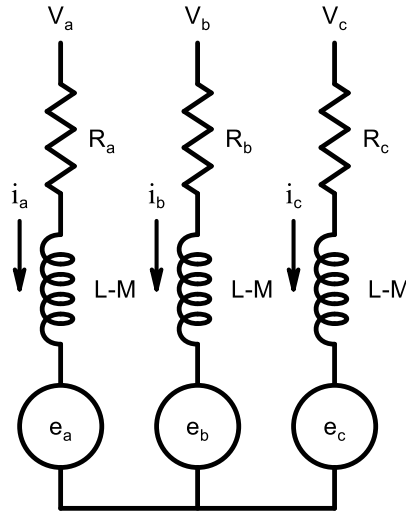
eşitliği elde edilir. Genellikler SMSM'lerde sargı endüktansları rotor konumuna bağlı olarak değişmez yada çok az değişiklik olur. Dolayısıyla sargıların öz ve sargılar arası karşılıklı endüktans değerleri eşit kabul edilebilir. Öz endüktans değerleri ( $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$  ve  $L_{cc}$ ) ve karşılıklı endüktans değerleri ( $L_{ab}$ ,  $L_{ac}$  ve  $L_{bc}$ ) sırasıyla endüktans matrisi içerisinde L ve M olarak alınabilir. Toplam halkalama akısının ( $\lambda_m$ ) türevi alınırken bu kabullere göre düzenleme yapılır ve gerilim eşitlikleri tekrar aşağıda olduğu gibi yazılabilir. Eşitliklerdeki R sargı direncini,  $\theta_r$  rotor açılal konumunu ifade eder.

$$[V]_{a,b,c} = [R]_{a,b,c}[I]_{a,b,c} + \frac{d}{dt}\{[L - M][I]_{a,b,c} + [\lambda_m]_{a,b,c}\} \quad (3)$$

$$[V]_{a,b,c} = [R]_{a,b,c}[I]_{a,b,c} + [L - M] \frac{d}{dt}[I]_{a,b,c} + \frac{\partial}{\partial \theta_r}[\lambda_m]_{a,b,c} \frac{\partial \theta_r}{\partial t} \quad (4)$$

$$[V]_{a,b,c} = [R]_{a,b,c}[I]_{a,b,c} + [L - M] \frac{d}{dt}[I]_{a,b,c} + e_{a,b,c} \quad (5)$$

Elde edilen gerilim eşitliklerine göre SMSM'nin eşdeğer devresi Şekil 1'deki gibi olur.



Şekil 1. SMSM'nin a,b,c faz sistemindeki eşdeğer devresi (Equivalent circuit of PMSM in a,b,c phase system)

Elektromanyetik moment ( $T_e$ ) de elektriksel ve mekanik büyüklükler ile Denklem (6) ve (7)'deki gibi ifade edilebilir. Burada  $j$  atalet momentini,  $p$  çift kutup sayısını,  $\omega_r$  açılmal hızı,  $T_L$  yük momentini belirtir.

$$T_e = p \left\{ [I]_{a,b,c}^T \frac{\partial [\lambda_m]_{a,b,c}}{\partial \theta_r} \right\} \quad (6)$$

$$T_e - T_L = \frac{d\omega_r}{dt} \frac{j}{p} \quad (7)$$

Gerilim denklemleri ile birlikte elektromanyetik moment denklemleri SMSM'nin matematiksel modelini oluşturur.

### 3. Üç Fazlı Çok Seviyeli Evirici ve Tetikleme Sinyallerinin Elde Edilmesi (Three Phase Multilevel Inverter and Obtaining Switching Signals)

Yapılan çalışmada 3 fazlı çok seviyeli eviricide yük olarak bir SMSM kullanılmıştır. Şekil 1'deki motor eşdeğer devresinde görülen  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  uçları çok seviyeli evirici ile beslenmektedir.

Çalışmada kullanılan çok seviyeli eviricinin motoru beslediği durumu gösteren devre şeması Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2'de görülen eviricinin bir faz çıkış gerilimi 8 seviyelidir. Her faz seri bağlı modüllerden oluşmaktadır. Bir fazdaki gerilimin seviye sayısı o fazdaki seri bağlı modül sayısı ile değişmektedir. Her modülde iki yarıiletken anahtarlama elemanı ve bir doğru akım kaynağı bulunmaktadır. Daha önce yapılan çalışmamızda (Kandemir Beser ve Beser, 2018), her fazda seri bağlı modüllere ek olarak ters seri bağlı bir doğru akım kaynağı bulunmaktadır. Bu çalışmada anahtarlama tekniği geliştirilerek ters seri bağlı kaynaklar elimine edilmiştir. Yeni geliştirilen anahtarlama mantığına göre önceki topolojiye kıyasla 3 kaynak daha az kullanılmıştır ve faz gerilimi seviye sayısı aynı anahtar sayısı için iki katına çıkarılmıştır. Seviye modülleri önerilen eviricideki en küçük birimlerdir. Modül sayısının artmasına bağlı olarak çıkış gerilimi seviye sayısı da artmaktadır. Eğer  $m$  bir fazdaki modül sayısı ise, faz başına seviye sayısı  $2^{m+1}$  şeklinde değişir.

Örnek olarak Şekil 2'de görülen eviricide bir fazda 2 modül sayısı bulunduğundan çıkış gerilimi 8 seviyelidir. Her modüldeki gerilim kaynakları da  $V_d$  değeri hesaplandıktan sonra 2 nin üstel katları olarak değişmektedir.  $V_d$  değeri, eğer  $n$  seviye sayısı ise Denklem (8)'deki gibi bulunabilir.

$$V_d \cong \frac{4V_m}{n-2} \quad (8)$$

SMSM'nin denetimi için kullanılan çok seviyeli eviricinin modül sayısına göre faz gerilimindeki seviye sayısı, eviricideki toplam kaynak ve anahtar sayısı bir tablo ile özetlenebilir. Tablo 1'de eviriciye ait bu bilgiler görülmektedir.

Çok seviyeli evirici yapısının en önemli özelliği çıkış geriliminin basamak şeklinde olmasıdır. Bu durumun birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Evirici yapısındaki anahtarlar geleneksel eviricilere göre daha az gerilim değişimi altında kalır. Gerilim harmonikleri yine geleneksel eviricilere göre düşük olur. Dolayısıyla çıkışta daha küçük

boyutta süzgeç devrelerine gereksinim duyarlar. Yüksek gerilim seviyelerinde bu tip eviriciler daha da öne çıkar. SMSM gibi giriş akımının saf sinüs olduğu makinaların sürülmesi için oldukça elverişlidir.

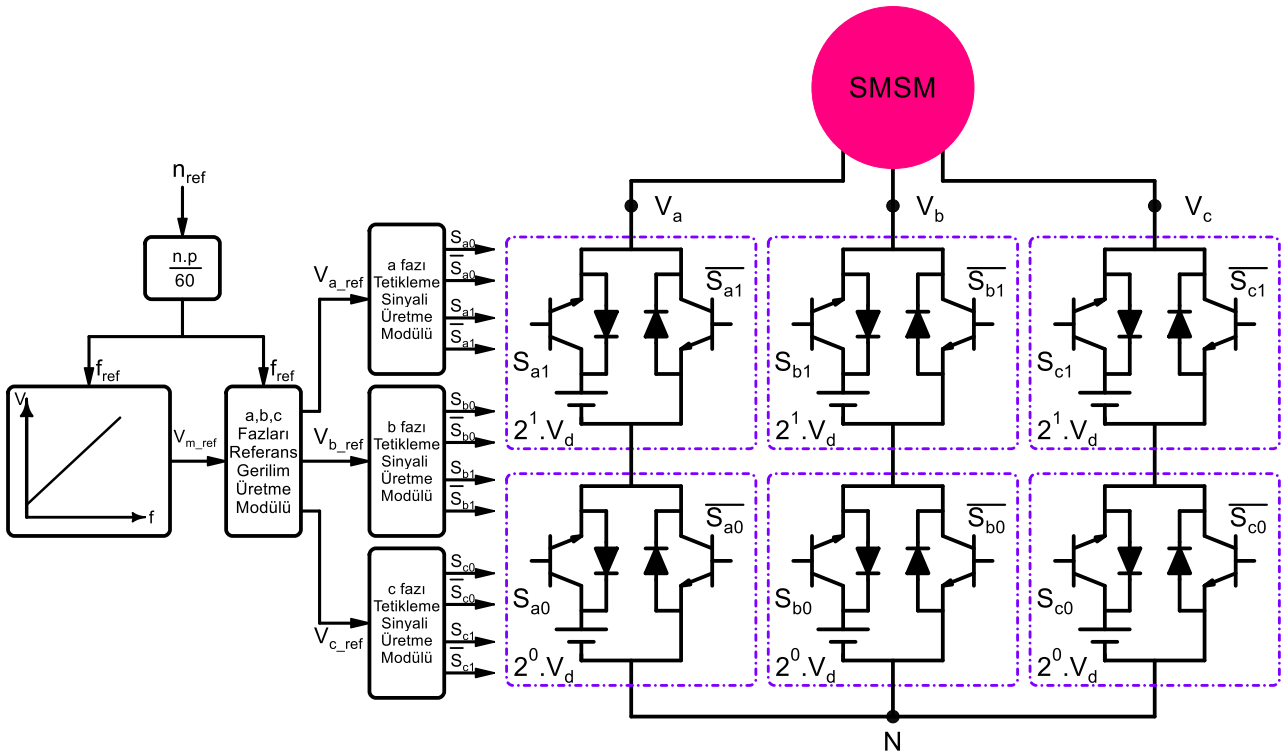
Çıkış geriliminin çok seviyeli olarak elde edilmesi için en önemli parametre uygun tetikleme sinyallerinin elde edilmesidir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi tetikleme sinyalleri referans devir sayısına ( $n_{ref}$ ) bağlı olarak değişmektedir. SMSM hangi devir sayısında döndürülmek isteniyorsa bu referans değeri  $n_{ref}$  değeri olarak kontrol girişine uygulanır. Belirlenen  $n_{ref}$  değerine karşılık kontrol algoritmasından  $f_{ref}$  değeri hesaplanır. Hesaplanan  $f_{ref}$  değeri için V/f tablosundan uygulanacak gerilimin maksimum değeri ( $V_{m\_ref}$ ) bulunur.  $f_{ref}$  ve  $V_{m\_ref}$  değerleri ile a,b,c fazları referans gerilim üretme modülü içerisinde Denklem (9) kullanılarak a,b,c fazlarına ait referans gerilimler elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_{a\_ref} \\ V_{b\_ref} \\ V_{c\_ref} \end{bmatrix} = \left( \frac{V_{m\_ref}}{V_d} \right) \begin{bmatrix} 1 + \sin(2\pi ft) \\ 1 + \sin(2\pi ft + 120) \\ 1 + \sin(2\pi ft - 120) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Elde edilen referans gerilimler kullanılarak a,b,c fazları tetikleme sinyali üretme modüllerinde Denklem (10) temel alınarak eviricideki anahtarlama elemanlarına ait tetikleme sinyalleri bulunur. Böylelikle, Şekil 2' de görülen kontrol algoritması ile devir sayısının değişen değerlerine göre anahtarlama elemanlarının tetikleme sinyalleri anlık olarak bulunur. Denklem (10)'daki k, bir fazdaki modül numarasını ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} S_{abc,0} \\ S_{abc,1} \\ S_{abc,2} \\ \vdots \\ S_{abc,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (V_{abc\_ref}) \bmod 2 \\ ((V_{abc\_ref}) - (V_{abc\_ref} \bmod 2^1))2^{-1} \bmod 2 \\ ((V_{abc\_ref}) - (V_{abc\_ref} \bmod 2^2))2^{-2} \bmod 2 \\ \vdots \\ ((V_{abc\_ref}) - (V_{abc\_ref} \bmod 2^k))2^{-k} \bmod 2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Makalede önerilen evirici topolojisi, SMSM'den herhangi bir geri besleme almadan anlatılan açık çevrim denetim ile bir SMSM sürücüsü olarak kullanılmaktadır. Sürücü ve uygulanan denetim algoritması ile SMSM değişken hızlı uygulamalarda da çalıştırılabilmektedir. Önerilen evirici topolojisinde bir değişiklik yapmadan sadece denetim algoritması değiştirilerek SMSM'nin aynı evirici ile farklı denetim yöntemlerinde çalıştırılması mümkündür.



Şekil 2. SMSM ile birlikte çalışan çok seviyeli eviricinin şeması (Scheme of multilevel inverter operating with a PMSM)

**Tablo 1.** Modül sayısına göre çıkış gerilimi seviye sayıları değişimi, kaynak ve anahtarlama elemanı sayıları (Output voltage level number variation, source and switching elements number by number of level modules)

Seviye Modülü Sayısı	(m)	.	2	3	4	5	....	m
Faz Gerilimi Seviye Sayısı	(n)	.	8	16	32	64	.	$2^{m+1}$
Kaynak Sayısı	(S)	.	6	9	12	15	....	3m
Toplam Anahtar Sayısı	(R)	.	12	18	24	30	.	6m

Geleneksel çok seviyeli eviriciler içerisinde; Thielemans vd. (2009)' in çalışmasında beş seviyeli kapasitör kenetlemeli evirici yapısında 24 anahtar, Purohit ve Dubey, (2015)' in SMSM sürücüsünde 3 fazlı 5 seviyeli kaskad bağlı H-köprü evirici yapısında 24 anahtar, Vargas vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada SMSM sürücüsü olarak üç seviyeli nötr kenetlemeli evirici yapısında 12 anahtar bulunmaktadır. Önerilen evirici yapısında Tablo 1' den de görüldüğü gibi 12 anahtar kullanıldığında 8 seviyeli, 24 anahtar kullanıldığında ise 32 seviyeli çıkış gerilimi elde edilmektedir. Dolayısıyla önerilen evirici belirli bir gerilim seviye için daha az anahtar kullanmakta yada belirli bir anahtar sayısı için daha fazla seviyeli çıkış gerilimi üretmektedir. Seviye sayısı arttıkça ise gerilim sinüs sinyaline daha çok benzemekte ve THB değeri düşmektedir.

#### 4. Çok Seviyeli Evirici ile Beslenen SMSM'nin Benzetim Çalışması (Simulations of PMSM Fed by the Multilevel Inverter)

Benzetim çalışmaları için ilk olarak motor modeli ve çok seviyeli evirici modeli benzetim programında (MATLAB) oluşturulmuştur. Tetikleme sinyalleri Denklem (10)'daki eşitlikler yardımıyla bulunmuştur. Benzetim çalışmasında kullanılan SMSM'nin parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** SMSM'nin parametreleri (Parameters of PMSM)

Stator faz direnci	R [ $\Omega$ ]	0.80
Stator öz endüktans	L [mH]	6.35
Stator ortak endüktans	M [mH]	0.35
Eylemsizlik momenti	J [kgm <sup>2</sup> ]	0.004
Sürtünme katsayısı	B [Nms]	0.005
Kutup sayısı	2p	4
Mıknatıs akısı maksimum değeri	$\lambda_m$ [Wb]	0.48

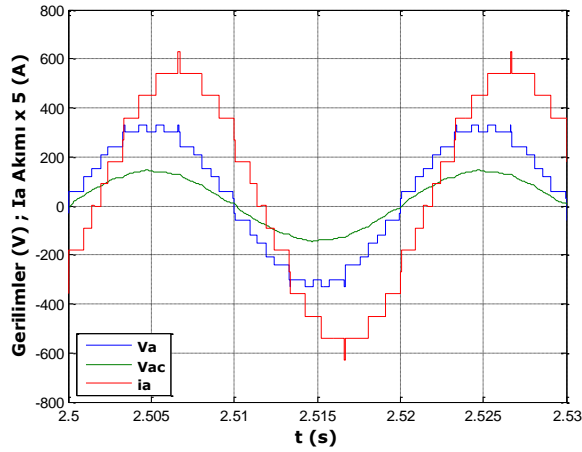
Benzetim çalışmalarında değişken yük durumu için 16 ve 32 seviyeli evirici topolojileri kullanılmıştır. 16 ve 32 seviyeli evirici yapılarında faz başına sırasıyla 3 ve 4 seviye modülü kullanılmıştır. Şekil 3 ve 4'te değişken yüklü bir SMSM'nin 16 ve 32 seviyeli evirici yapıları ile beslenmesi durumundaki benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Burada önerilen eviriciyle frekans ve gerilim nominal değerlerde sabit tutularak makina yüklenmiştir. Benzetim sonuçlarında seviye sayısı arttıkça gerilimin daha sinüsoidal hale geldiği görülmektedir. Bunun sonucunda akım da sinüsoidal hale gelmektedir. Bu durum Tablo 3'teki THB sonuçlarından da belli olmaktadır. Dolayısıyla moment titreşimleri de azalmaktadır.

Benzetim çalışmalarında son olarak SMSM'nin sabit yükte iken değişken hızda çalıştırılması amaçlanmıştır. Bunun için 5 modüllü evirici yapısı kullanılarak, değişken hız için gerektiği kadar modül devreye alınarak 10Nm yükte SMSM değişken hızlarda çalıştırılmıştır. Bu duruma ait benzetim sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Benzetim sonuçları önerilen eviricinin değişken hız uygulamaları için de kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

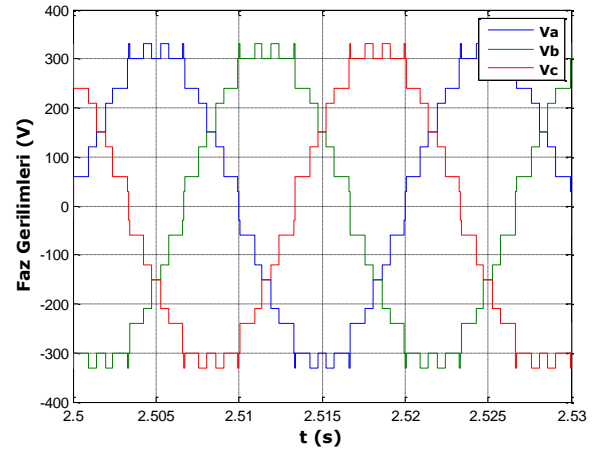
16 ve 32 seviye durumu için faz gerilimi ve faz akımlarının THB değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlara Tablo 3'te yer verilmiştir. Seviye sayısı arttıkça gerilim ve akım harmoniklerinin oldukça azaldığı görülmektedir. Sonuçlar, önerilen eviricinin gerilim harmoniği bakımından geleneksel iki seviyeli DGM eviricilere göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Seviye sayısı arttıkça THB değeri düşmektedir. Önerilen evirici birim anahtar sayısı bakımından en yüksek seviye sayısını vermektedir. Dolayısıyla geleneksel çok seviyeli eviricilere göre birim anahtarda daha yüksek seviye elde edildiğinden dolayı en düşük THB değerini vermektedir.

**Tablo 3.** Farklı seviye sayılarında faz gerilimi ve akımındaki THB değerleri (THD values at phase voltage and current for different level number)

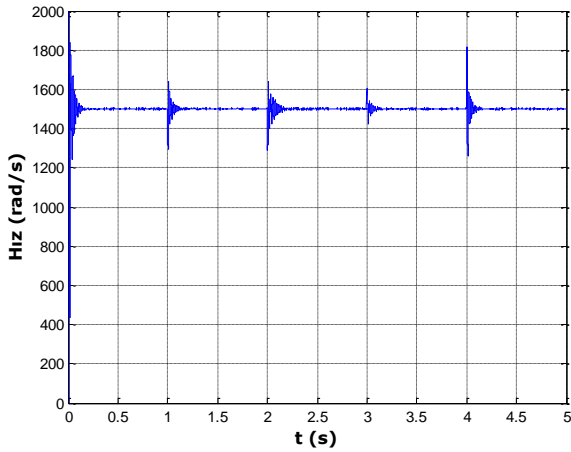
Seviye Sayısı (n)	16	32
Faz Gerilimi THB Değeri (%)	8.30	4.10
Hat Akımı THB Değeri (%)	2.50	1.10



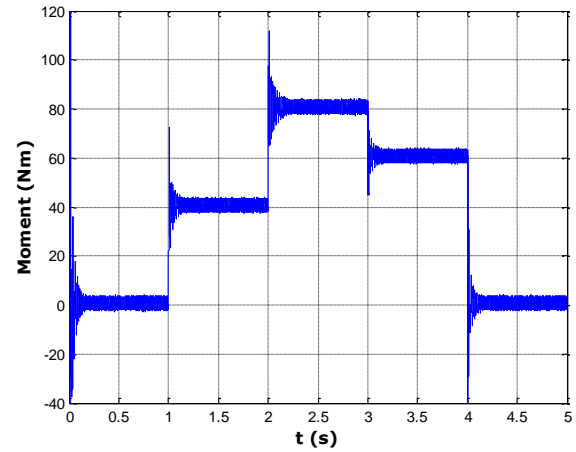
(a)



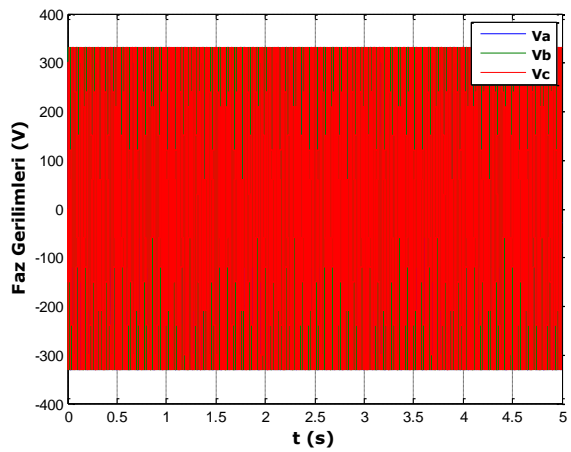
(b)



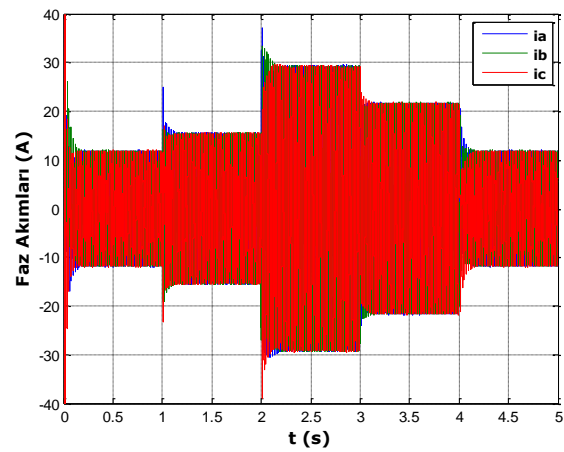
(c)



(d)

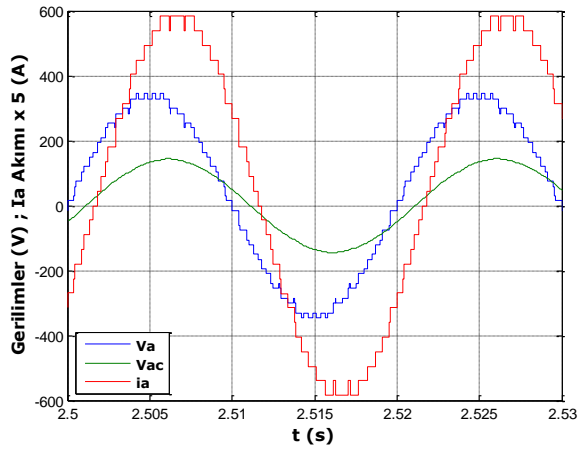


(e)

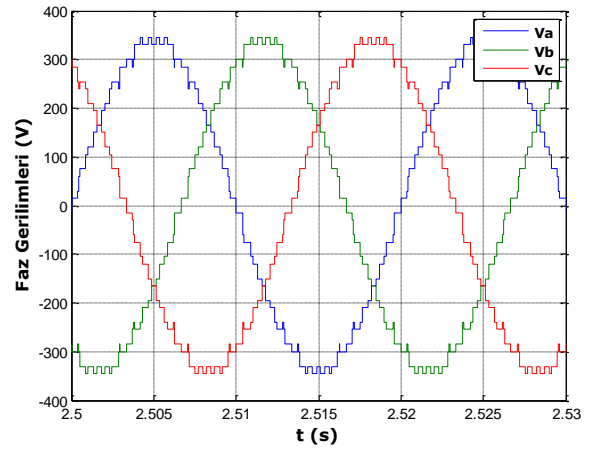


(f)

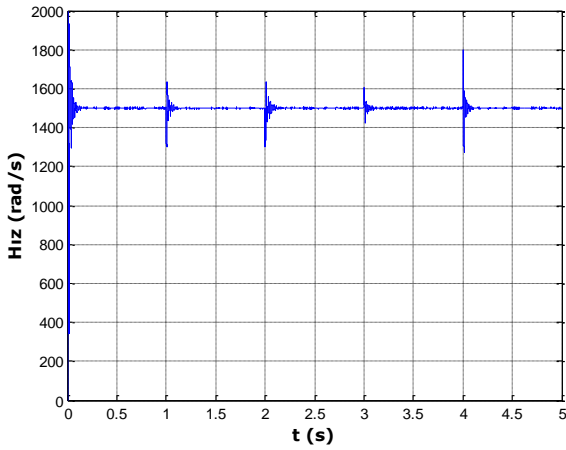
**Şekil 3.** 16 seviyeli evirici ile beslenen SMSM'nin değişken yük durumundaki benzetim sonuçları (a) Faz gerilimi, hat gerilimi ve faz akımı, (b) 3 faz gerilimleri, (c) Hız değişimi, (d) Moment değişimi, (e) 0 - 5 saniye arası faz gerilimleri, (f) 0 - 5 saniye arası faz akımları, (Simulation results of PMSM fed by a 16 level inverter at variable load. (a) Phase voltage, line voltage and phase current, (b) 3 phase voltages, (c) Speed variation, (d) Torque variation, (e) Phase voltages from 0 to 5 seconds, (f) Phase currents from 0 to 5 seconds)



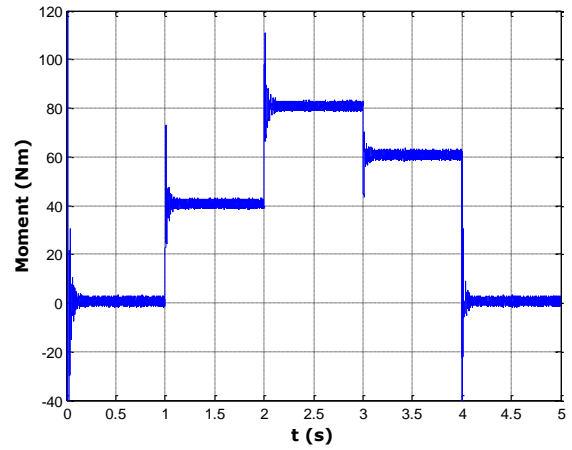
(a)



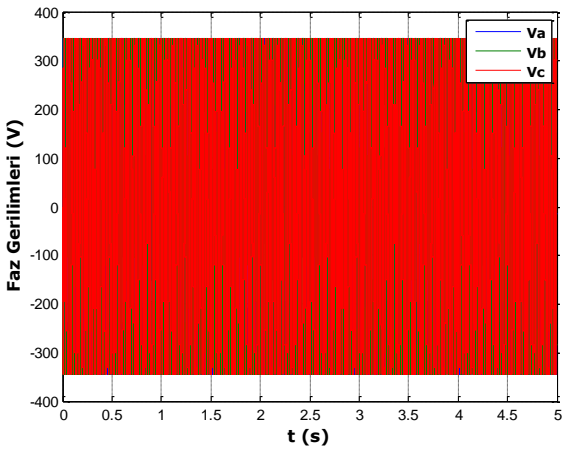
(b)



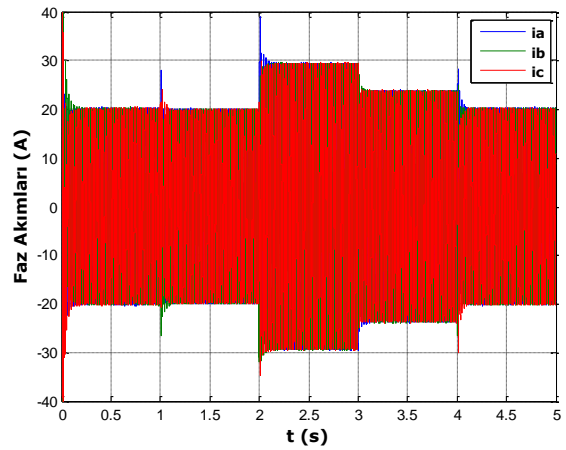
(c)



(d)

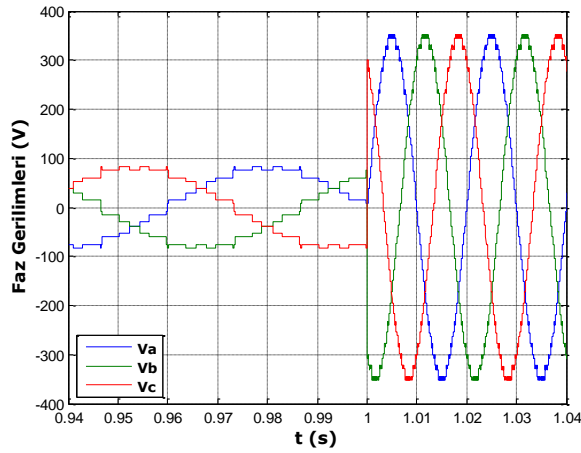


(e)

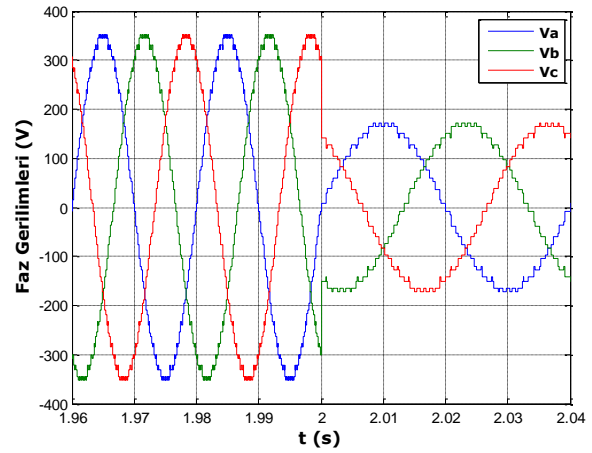


(f)

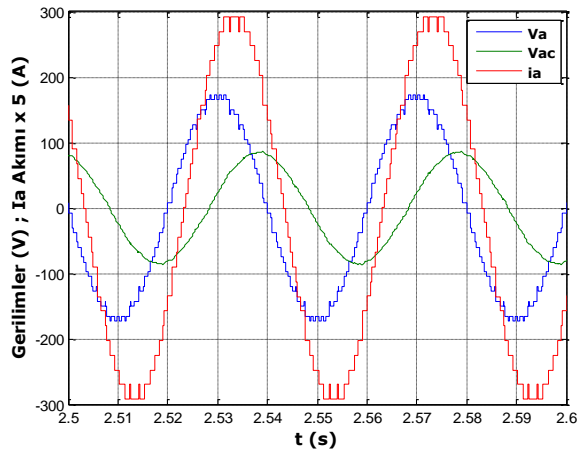
**Şekil 4.** 32 seviyeli evirici ile beslenen SMSM'nin değişken yük durumundaki benzetim sonuçları (a) Faz gerilimi, hat gerilimi ve faz akımı, (b) 3 faz gerilimleri, (c) Hız değişimi, (d) Moment değişimi, (e) 0 – 5 saniye arası faz gerilimleri, (f) 0 – 5 saniye arası faz akımları (Simulation results of PMSM fed by a 32 level inverter at variable load. (a) Phase voltage, line voltage and phase current, (b) 3 phase voltages, (c) Speed variation, (d) Torque variation, (e) Phase voltages from 0 to 5 seconds, (f) Phase currents from 0 to 5 seconds)



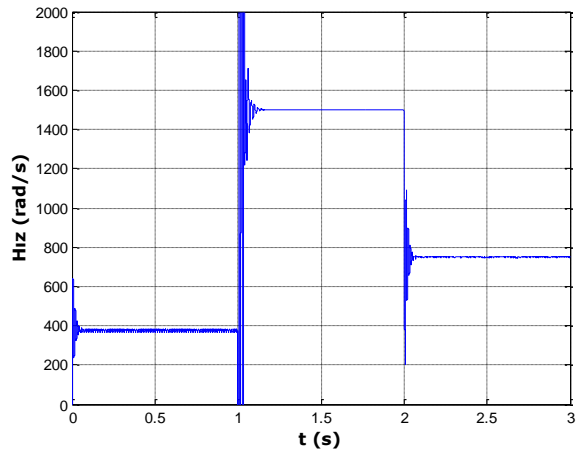
(a)



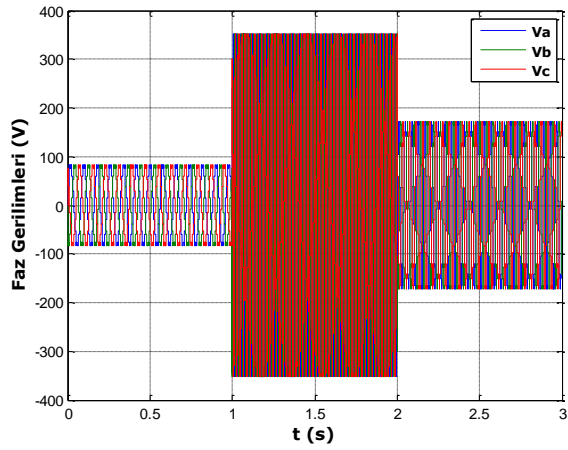
(b)



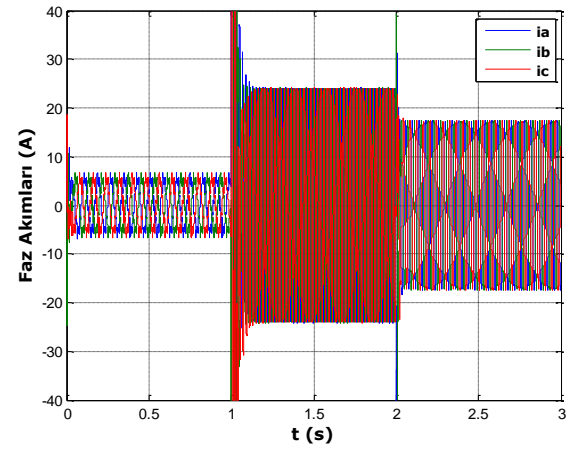
(c)



(d)



(e)



(f)

**Şekil 5.** 5 modüllü evirici ile beslenen SMSM'nin 10Nm yük durumundaki benzetim sonuçları (a) 1. saniyedeki hız değişimindeki faz gerilimleri, (b) 2. saniyedeki hız değişimindeki faz gerilimleri, (c) Faz, hat gerilimleri ve faz akımı, (d) Hız değişimi, (e) 0 – 3 saniye arası faz gerilimleri, (f) 0 – 3 saniye arası faz akımları (Simulation results of PMSM fed by the inverter having 5 level modules at 10Nm load. (a) Phase voltages at speed change in 1st second, (b) Phase voltages at speed change in 2nd second, (c) Phase, line voltages and phase current, (d) Speed variation, (e) Phase voltages from 0 to 3 seconds, (f) Phase currents from 0 to 3 seconds)

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, SMSM sürücü devreleri için yeni çok seviyeli evirici yapısı önerilmiştir. Önerilen evirici yapısının birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Çıkış gerilimi basamaklı olduğu için anahtarlar üzerindeki (dv/dt) gerilim



değişimi düşüktür. Çıkış gerilimindeki THB değerleri düşüktür. Bu da bu eviricinin özellikle yüksek güçlü ve gerilimli uygulamalar için geleneksel DGM eviricilere göre çok daha uygun olduğunu göstermektedir. Çıkışta daha küçük boyutta süzgeç devrelerine gereksinim duyarlar. Gerilimin sinüsoidal hale gelmesi akımı da sinüsoidal şekle getirmektedir. 32 ve üzerindeki seviyelerde çıkış geriliminin THB değeri % 5'in altındadır. Bu da önerilen eviricinin çıkış geriliminin sinüsoidal olduğunu gösterir. Dolayısıyla eviricinin SMSM gibi giriş gerilimi ve akımının sinüsoidal olduğu motor sürücüler için oldukça uygun olduğu söylenebilir. Eviricinin uygunluğu benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir. SMSM'nin değişken yük ve değişken hızlı uygulamaları için önerilen evirici motor sürücüsü olarak kullanılmaya elverişlidir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

### Kaynaklar (References)

- Chen, X., Gao, C., Liu, X., Dong, N., 2017. Research on The Multilevel-Switching-Linear Hybrid Scheme for PMSM Drives. IEEE 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- Chi, S., Sun, J., 2008. A Novel Sliding Mode Observer with Multilevel Discontinuous Control for Position Sensorless PMSM Drives. IEEE Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 127-131.
- Haris, M., Pathak, M.K., Agarwal, P., 2014. Comparison of SPWM Multilevel Inverter Fed PMSM Drive with Two Level Inverter Fed Drive. IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014).
- Jacob, J., Chitra, A., 2017. Field Oriented Control of Space Vector Modulated Multilevel Inverter Fed PMSM Drive. Energy Procedia, 117, 966-973.
- Kandemir Beser, E., Beser, E., 2018. Simulation of Multi-Level Inverter Fed Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), International Conference on Engineering Tencnologies.
- Naumanen, V., Luukko, J., Itkonen, T., Pyrhönen, O., Pyrhönen, J., 2009. Modulation Technique for Series-Connected H-Bridge Multilevel Converters with Equal Load Sharing. IET Power Electronics, 2, (3), 275-286.
- Purohit, P., Dubey, M., 2015. Modeling, Analysis and Design of SPWM Current Controlled Multilevel Inverter Fed PMSM Drive. IEEE International Conference on Computer, Communication and Control (IC4).
- Rahman, M.F., Niknejad, P., Barzegaran, M.R., 2018. Comparing the Performance of Si IGBT and SiC MOSFET Switches in Modular Multilevel Converters for Medium Voltage PMSM Speed Control. IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC).
- Thielemans, S., De Belie, F., Melkebeek, J., 2009. A Sensorless PMSM Drive Using Test Signals Generated by a Multilevel Converter. IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems.
- Xia, T., Huang, Y., Peng, F., Yao, Y., 2018. Discrete-Time Current Control of Modular Multilevel Converter for Medium Voltage High Power High-Speed PMSM. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1748-1754.
- Vargas, C., Feuersänger, S., Pacas, M., 2017. Finite Control Set Model Predictive Control of a PMSM Fed by a Multilevel Inverter", PCIM Europe 2017.