



3 Fazlı 2 Seviyeli Evirici Kontrollü SMSM'de SDGM ve UVDGM Teknikleri için Alt Harmonikler ve DA Bileşenlerinin İncelenmesi

Investigation of Sub-Harmonics and DC Components for SPWM and SVPWM Methods in 3-Phase 2-Level Inverter Controlled PMSM

Buğra Yasir ARSLAN^{1,2}, Onur SATILMIŞ², Derya Ahmet KOCABAŞ¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

arslanbug19@itu.edu.tr, kocabasde@itu.edu.tr

²Radar Elektronik Harp Sistemleri Sektör Başkanlığı
ASELSAN A.Ş.

bugraarslan@aselsan.com.tr, osatilmis@aselsan.com.tr

Özet

Sürücü kontrollü yüksek hızlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) uygulamalarının kullanımı artmakta ve kullanılan modülasyon tekniği uygulamaya göre değişkenlik göstermektedir. Yaygın kullanılan Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) ve Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM), modülasyon frekansına (m_f) bağlı olarak motor faz geriliminde Doğru Akım (DA) bileşeni ve düşük mertebeli harmonikleri oluşturabilmektedir. Anahtarlama frekansının sabit tutulduğu yüksek elektriksel hızlı motor uygulamalarında m_f düşük değerlere ulaşabilmektedir. Modülasyon frekansının belli bir değerin altında kalması ve bu değerin tam sayı olmaması, 3 fazlı eviricilerin çıkış geriliminde ve dolayısıyla çıkış akımında incelenmesi gereken etkiler meydana getirir. Motorun elektriksel dönüş frekansında meydana gelen az miktardaki değişim modülasyon frekansının tam sayı olan değerinde sapmalara ve motor faz akımlarında istenmeyen işaretlere sebep olabilecek alt harmoniklere neden olur.

Bu çalışmada, yüksek hızlı bir SMSM'nin tam sayı olan ve olmayan m_f değerlerinde DA bileşen ve alt harmonikler, sistem bileşenleri modellenerek teorik olarak ve benzetim yöntemiyle incelenmiş olup sonuçlar karşılaştırmalı sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler—SDGM, UVDGM, modülasyon frekansı, eviriciler, alt harmonikler, DA bileşeni, SMSM

Abstract

Driver-based high speed Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) applications are increasingly used, and the modulation technique to be used varies depending on the application. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) and Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM), which are frequently used techniques, can cause DC component and low order harmonics on the motor phase voltage depending on the modulation frequency (m_f). The fact that the m_f is below a certain value and this value is non-integer causes undesirable effects on the output voltage of 3-phase inverters and therefore on the output current. A small change in the electrical frequency of the motor causes

deviations in the integer value of the m_f and sub-harmonics that can cause undesired signals in the motor phase currents.

In this study, DC component and sub-harmonics of a high speed SMSM applications that m_f values are integer and non-integer are examined by simulation and theoretically results

Keywords—SPWM, SVPWM, modulation frequency, inverters, sub-harmonics, DC Components, PMSM

1. Giriş

Düşük indüktanslı, yüksek hızlara çıkabilen SMSM kullanımı son yıllarda endüstride ve askeri uygulamalarda artış göstermiştir. Bu motorların boyutlarının küçük olması, güç yoğunluklarının yüksek olması, verimlilik açısından ön plana çıkması, kompakt ve yüksek verimlilik gerektiren uygulamalar için kullanım avantajı sunmaktadır [1],[2]. Değişken frekanslarda ve farklı güç seviyelerinde kullanımını sağlayabilmek için sürücü sistemine ihtiyaç duymaktadır [3]. Alternatif Akım (AA) motor sürücülerinde kullanılan eviriciler, bu değişken frekansları ve gerilimleri sağlarken, eviricide kullanılan yarı iletkenleri sürmek için farklı Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) teknikleri kullanılmaktadır.

UVDGM ve SDGM en yaygın kullanılan ve en çok bilinen DGM teknikleridir. UVDGM, SDGM'ye göre bara geriliminin kullanımında yaklaşık %15'lik kazanç sağlar ve toplam harmonik bozulma (THB) dikkate alındığında da daha üstündür [4]. Ancak her iki teknikte de eviriciler tarafından sağlanan faz gerilimlerinin ve dolayısıyla akımlarının harmonik içeriğinin ek bakır kayıplarına sebep olması, akım dalgalanmasından dolayı motor torkunda titreşim gibi bir dizi istenmeyen etkiye yol açmaktadır. Bu harmoniklerin UVDGM tarafından asenkron motorlar uygulamalarında oluşturduğu etki farklı birçok makalede ele alınmıştır [5],[6].

Eviriciler tarafından üretilen bir başka etki de alt harmoniklerdir. Anahtarlama kayıplarını arttırmamak için anahtarlama frekansı belli değerlere kadar arttırılabilir. Bu da ister istemez yüksek hızlı uygulamalarda anahtarlama frekansının yani taşıyıcı dalganın frekansının (f_{td}), kontrol sinyalin frekansına (f_{kont}) oranı olarak

ifade edilen modülasyon frekansının (m_f) düşük değerlerde olmasına sebep olur. Yüksek hız gerektiren uygulamalarda, m_f değeri 10-12'den düşük olabilir. Yüksek hız gerektirmeyen uygulamalarda ise bu oran genellikle 40-50'den yüksek olabilmektedir. Bu oranın tam sayı, 3'ün katı ve 3'ün katı olup çift sayı olup olmaması motor faz gerilimi, faz akımlarının harmonik içerikleri ve DA bileşenleri konusunda farklılıklar yaratmaktadır.

Besleme geriliminin içerdiği alt harmoniklerin, ses ve titreşim açısından 3kW'lık SMSM' de incelemesini yapan bir araştırma yapılmıştır [7]. Ancak SDGM ve UVDGM tekniklerinin SMSM uygulamalarında harmonikler ve DA bileşeni açısından karşılaştırılması yapılmamıştır.

Bu çalışmada, 3 fazlı 2 seviyeli eviricinin çıkışında yük olarak SMSM bulunurken, f_{td} sabit tutularak m_f 'in değiştirilmesiyle motor faz gerilimi üzerinde alt harmoniklerin ve DA bileşeninin oluşumu gösterilmiştir. LTSPICE ortamında yapılan benzetim çalışmasının sonuçları ile birlikte teorik hesaplamalar da sunulmuştur. Gerilimdeki bozucu etkilerin akım üzerindeki etkisi de ayrıca gösterilmektedir.

2. bölümde harmonikler ve DA bileşenlerin oluşumu hakkında genel bilgiler verilecek olup 3. bölümde teorik ve benzetim çalışmaları sunulacaktır.

2. Harmonikler ve DA Bileşeni Oluşumu

Güç sistemlerinde harmonikler, temel frekansın dışında kalan gerilim ve akımlardır. Çoğunlukla, güç sistemlerindeki harmonikler temel frekansın tam katındaki frekanslarda oluşur, ancak bu her zaman böyle değildir [10],[11]. Güç sinyalleri, tamsayı olmayan frekanslara sahip bileşenler de içerebilir. Bu bileşenlere ara harmonikler denir. Güç sistemlerinde, ara harmoniklere benzer şekilde temel frekansın altında oluşan alt harmonikler de bulunabilir.

2.1. Alt Harmonikler

m_f 'in tam sayı olmadığı durumlarda alt harmonikler meydana gelmektedir [5]. Hangi frekansta alt harmoniklerin oluştuğu (1)'de belirtildiği üzere f_{kont} ile m_f 'in tam sayı olmaktan ne kadar uzaklaştığı ile ilişkilidir.

$$f_{alt} = (\Delta m_f) \times (f_{kont}) \quad (1)$$

f_{td} 20 kHz, motorun elektriksel dönüş frekansı yani f_{kont} 5 kHz olarak belirlendiğinde m_f değeri 4 olmaktadır. Alt harmoniklerin oluşumunun incelenmesi için f_{kont} değerinde 1 Hz'lik bir fark oluşturularak 4999 Hz olarak belirlersen bu değişim m_f değerini 4.0008 yapar ve tam sayı olmaktan uzaklaştırmış olur. Yani f_{kont} değerinde 1 Hz'lik değişim m_f değerini tam sayı olmaktan yaklaşık olarak 0.0008 (Δm_f) uzaklaştırmıştır. 1 Hz'lik değişimin (1) ile hesabı yapıldığında yaklaşık olarak 4 Hz'de bir alt harmonik oluşturduğu (2)'de hesaplanmıştır.

$$f_{alt} = (0.0008) \times \left(\frac{20000}{4.0008} \right) \cong 4 \text{ Hz} \quad (2)$$

2.2. DA Bileşeni Oluşumu

DGM esnasında taşıyıcı dalga ile kontrol sinyali arasında sıfır geçişlerinde oluşacak herhangi bir faz farkı DA bileşeninin oluşumuna sebep olmaktadır. Dijital ortamda üretilen sinyallerde bu gecikme yaşanabileceği gibi, m_f değerinin 3'ün katı olmadığı durumlarda da bu fark oluşmaktadır. Genelde bu faz açısının sıfır

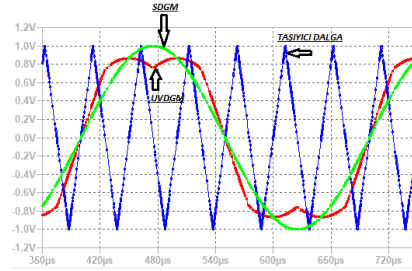
olduğu düşünülerek DA bileşeninin oluşmadığı söylenmiştir [8]. Fakat bu gecikmenin oluşması sonucunda çıkış geriliminde DA bileşeni oluşabileceği gösterilmiştir [9]. (3)'de belirtilen formüle dayanarak, çıkış geriliminde oluşacak DA bileşeni hesaplanabilir.

$$V_{da_bilesen} = \frac{1}{4m_f} (V_{ref@da}) V_{DC} \quad (3)$$

$V_{ref@da}$ = DA Bileşeni oluşturan kısımdaki referans sinyalin değeri (Bknz. Şekil 5)

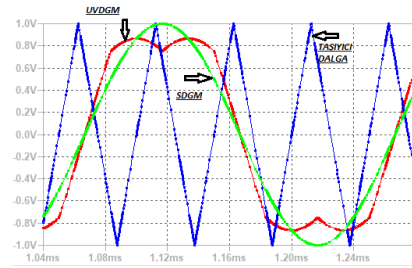
V_{DC} = Evirici bara gerilimi

Şekil 1'de görüldüğü üzere m_f değeri 3'ün katı seçildiğinde, sıfır geçişleri esnasında herhangi bir faz gecikmesi gözükmemektedir.



Şekil 1: $m_f = 6$, Kontrol Sinyali ve Taşıyıcı Dalganın Karşılaştırılması

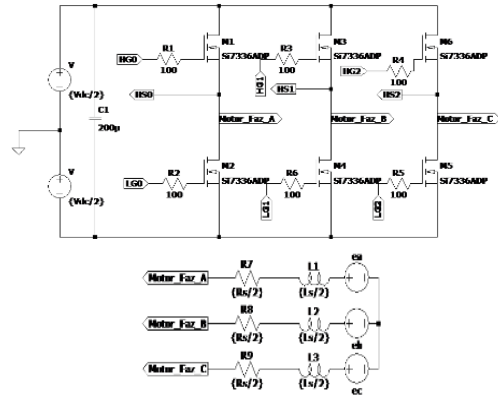
Ancak m_f 3'ün katı değilse bu gecikmenin ortaya çıktığı Şekil 2'de gözükmemektedir.



Şekil 2: $m_f = 4$, Kontrol Sinyali ve Taşıyıcı Dalganın Karşılaştırılması

3. SMSM Kontrolünde SDGM ile UVDGM Karşılaştırılması

SMSM'i kontrol etmek için kullanılan eviriciler, SDGM ve UVDGM gibi tekniklerle değişken frekans ve değişken gerilim



Şekil 3: 3 fazlı 2 seviyeli Evirici ve SMSM modeli

sağlamaktadır. Motor faz gerilimlerinde ve faz akımlarında, alt harmoniklerin ve de DA bileşenlerinin oluşumu açısından modülasyon tekniklerinin birbirlerinden farkları vardır. Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2’de bu farklar modülasyon tekniği bazında incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 3’te benzetim çalışması yapılan 3 fazlı 2 seviyeli bara gerilimi 24 V olan Evirici ile yük olarak evirici çıkışına bağlanan 24 V, 100W’lık SMSM’nin verilen katalog değerleri ile kurulan elektriksel devresinin modeli gösterilmiştir. Benzetim çalışmasında kullanılan SMSM’nin parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1: Motor Parametreleri

$R_s(ff)$	0.248 Ω
$L_s(ff)$	0.06 mH
I_{anma}	5.56 A
$2p$	4

3.1. Alt Harmoniklerin Karşılaştırılması

Öncelikle UVDGM tekniği kullanılarak LTSPICE ortamında yapılan benzetim çalışmasında, m_f ’in tam sayı olması ya da olmamasının alt harmoniklere etkisini, hangi frekansta ne kadarlık bir akım harmoniğine etki ettiği gösterilmiştir.

f_{td} 20 kHz, f_{kont} 2.5 kHz olarak belirlendiğinde m_f değeri 8 olmaktadır. Alt harmoniklerin incelenmesi için motorun elektriksel dönüş frekansında 1 Hz’lik bir fark oluşturularak 2499 Hz olarak belirlenmiştir. Bu değişim ile m_f tam sayı olmaktan uzaklaşarak 8.0032 değerini almıştır.

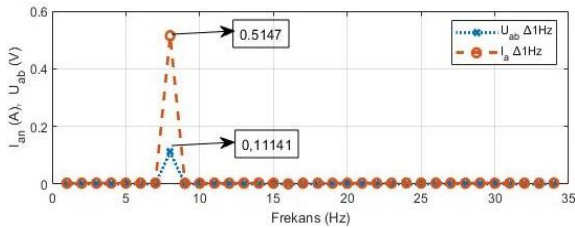
Benzetim çalışması sonucunda ortaya çıkan alt harmoniğin, teorik olarak hesabı (1) numaralı formül ile yapılarak doğruluğu kontrol edildiğinde;

$$f_{alt} = (0.0032) \times (2499) \cong 8 \text{ Hz} \quad (4)$$

Alt harmoniğin oluştuğu frekans değeri 8 Hz alınır. (5) numaralı formülü kullanarak empedans hesabı yapılırsa faz-nötr empedans değeri (Z_{fn}) 0.124 Ω olarak bulunur.

$$Z_{fn} = \sqrt{R_s(ff)^2 + (2\pi f L_s(ff))^2} \quad (5)$$

$$Z_{fn} = \sqrt{\left(\frac{R_s(ff)}{2}\right)^2 + \left(2\pi f_{alt} \left(\frac{L_s(ff)}{2}\right)\right)^2} \quad (6)$$



Şekil 4: $m_f = 8.008$, Faz akımı ve Faz Gerilim Alt Harmonikleri

Şekil 4’te gösterildiği gibi alt harmoniğin oluştuğu frekanstaki fazarası gerilimi ($U_{ab@8Hz}$) yaklaşık olarak 0.1114 V olup faz-nötr ($U_{an@8Hz}$) değeri 0.06432 V olarak hesaplanır. Hesaplanan Z_{fn} değeri ile 8 Hz’deki bir faz akımı değeri ($I_{an@8Hz}$) (7) ile 0.5187 A olarak hesaplanır.

$$I_{an@8Hz} = \frac{U_{an@8Hz}}{Z_{@8Hz}} \quad (7)$$

Her ne kadar evirici çıkışında ortaya çıkan alt harmonik gerilimleri çok düşük değerlerde olsa da oluştuğu frekanslarda

empedans değerini hesaplarken direnç değeri baskın haldedir ve motor direnci küçük bir değer olduğundan ciddi akım değerleri ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2 ve Tablo 3’te genlik modülasyonu (m_a) 0.99 seçilmiş ve bu değer sabit tutularak m_f ’in 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16 olduğu durumlarda f_{kont} değerindeki 1 Hz’lik ve 10 Hz’lik değişimlerin, gerilim alt harmoniklerine ve dolayısıyla da akım alt harmoniklerine olan etkisi incelendiğinde görüleceği üzere m_f değerinin tek veya 3’ün katı olduğu durumlarda alt harmoniklerin temel bileşene oranı göz ardı edilebilecek seviyelerdedir. Ancak m_f ’in çift bir değer olup 3’ün katı olmadığı durumlarda ise bu oran yüksek değerler almaktadır. Tablo 2’de $U_a@tf$ değeri temel frekanstaki faz gerilimi, Tablo 3 ve Tablo 4’te gösterilen $I_a@tf$ değeri ise temel frekanstaki faz akımı değerini göstermektedir.

Tablo 2: Modülasyon Frekansı Değişimi ile Motor Faz Gerilimi Alt Harmoniklerinin Değişimi (UVDGM)

m_f	$U_a/U_a@tf(\Delta 1\text{Hz})$	$U_a/U_a@tf(\Delta 10\text{Hz})$
4	0.20016	0.1356
5	2.03584e-5	2.80044e-6
6	7.29088e-5	1.1685e-5
7	1.35902e-4	7.73071e-4
8	1.8972e-2	1.4941163e-2
10	1.4063e-2	1.0196233e-2
12	7.83153e-4	6.45841e-5
14	3.6182e-3	3.40811e-4
16	3.49464e-3	2.38745e-4

m_f ’in çift ve 3’ün katı olmadığı durumlarda oluşan bu harmonikler doğrudan faz akımında, meydana geldikleri frekansta dalgalanmaya sebep olmaktadır. Gerilim alt harmoniklerinin motor faz akımı alt harmoniklerine olan etkisi de Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3: Modülasyon Frekansı Değişimi ile Motor Faz Akımı Alt Harmoniklerinin Değişimi (UVDGM)

m_f	$I_a/I_a@tf(\Delta 1\text{Hz})$	$I_a/I_a@tf(\Delta 10\text{Hz})$
4	1.51565	1.027392
5	1.3236e-2	1.0025e-2
6	1.412e-3	1.125e-3
7	2.561e-3	1.14747e-2
8	7.238e-2	5.819e-2
10	4.541e-2	3.1323e-2
12	9.291e-4	4.46712e-5
14	7.567e-3	3.644e-4
16	7.208e-3	2.48e-4

Tablo 3’e bakıldığında f_{kont} ’deki küçük değişimler m_f ’i tam sayı olmaktan uzaklaştırmakta ve motor performansını doğrudan etkileyecek harmonikleri ortaya çıkartmaktadır. Yüksek hız gerektiren uygulamalarda, motor sürücüsü tarafından belirlenen f_{td} değerine bağlı olarak çoğu zaman m_f 10’ın altında kalmaktadır. UVDGM’nin kullanıldığı ve m_f ’in 4 olduğu durumda temel frekansta oluşan akım değerinden daha fazlasının alt harmoniğin meydana geldiği frekansta oluşacağı dikkate alınmalıdır.

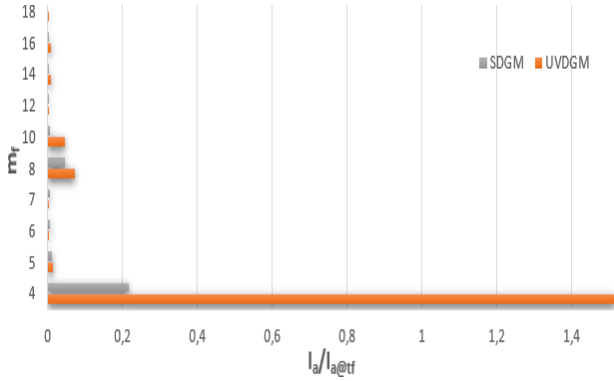
Aynı şekilde SDGM için motor faz gerilimi üzerinde oluşan alt harmoniklerin akım üzerinde oluşturduğu etki Tablo 4’te verilmiştir. UVDGM’de olduğu gibi m_f ’in çift sayı ve 3’ün katı

olmadığı durumlarda yüksek seviyede alt harmoniklerin oluştuğu görülmektedir.

Tablo 4: Modülasyon Frekansı Değişimi ile Motor Faz Akımı Alt Harmoniklerinin Değişimi (SDGM)

m_f	$I_a/I_a@tf(\Delta 1\text{Hz})$	$I_a/I_a@tf(\Delta 10\text{Hz})$
4	0.21596029	0.137022492
5	1.1096e-2	8.6519e-3
6	5.38416e-3	4.701563e-3
7	6.93163 e-3	4.386994e-3
8	4.548725e-2	3.0965536e-2
10	5.61745e-3	3.55921e-3
12	3.55921e-3	3.55921e-3
14	3.97758e-3	3.977576e-3
16	4.25117e-3	4.251165e-3

Şekil 5'te farklı m_f değerlerinde elektriksel frekansın 1 Hz'lik değişiminin SDGM ve UVDGM için karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 5: Faz Akımı Alt Harmoniklerinin Karşılaştırılması (SDGM – UVDGM ($\Delta 1\text{Hz}$))

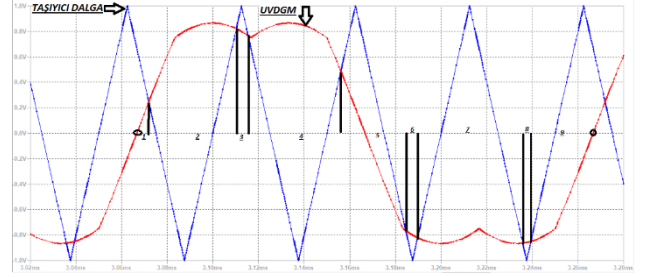
UVDGM ile SDGM, alt harmoniklerin oluşumu açısından karşılaştırıldığında, UVDGM kullanıldığında daha fazla akım harmoniklerine sebep olduğu Şekil 5'te görülmektedir. Bu durum motor kontrol uygulamalarında akım dalgalanmasının artmasına, dolayısıyla moment dalgalanmasına sebep olup ses ve titreşim açısından ciddi etki oluşturabilmektedir [7].

3.2. DA Bileşenlerinin Karşılaştırılması

Bölüm 2.2'de bahsedildiği gibi evirici çıkışında motor faz geriliminde oluşan DA bileşeni, motor fazlarından daha yüksek akım geçmesine ve dolayısıyla sargıların daha fazla ısınmasına ve verim kaybına sebep olur. DA bileşeninin değeri (3)'te belirtilen formül kullanılarak hesaplanır. 3 fazlı sistemde, m_f değeri 3'ün katı olduğunda her bir fazda oluşan DA bileşenler birbirini yok eder ve herhangi bir olumsuz etki yaratmazlar. Çünkü her faz için çıkış gerilimi ve DC bara orta noktası arasında oluşan DA bileşeni aynı değerdedir. Ancak m_f değerinin 3'ün katı olmadığı durumlarda, A fazına bakıldığında taşıyıcı dalga ile kontrol sinyali arasında faz farkı olmamasına rağmen B ve C fazlarında oluşan bu faz farkı nedeniyle ortaya çıkan DA bileşeni değeri, anahtarlama durumları da dikkate alınarak bir periyot için integral hesabı yapılarak bulunabilir.

Örneğin; UVDGM'de f_{td} 20 kHz, f_{kont} 5 kHz ve m_f değeri 4 olduğunda A fazında kontrol sinyali ile testere dişi sinyal arasında bir faz farkı olmadığından DA bileşeni değeri sıfır iken B ve C fazlarında oluşan faz farkı nedeniyle bir DA bileşeni

oluşmaktadır. Burada B fazı için detaylı inceleme yapılmış olup aynı işlem C fazı için de yapılabilir.

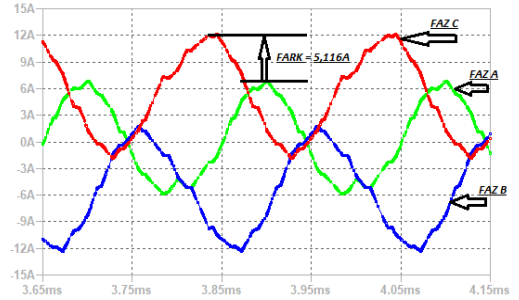


Şekil 6: $m_f = 4$, Referans ve Taşıyıcı Dalganın gösterimi (UVDGM)

Bir tam periyot özelinde taşıyıcı dalga ile B fazına ait kontrol sinyalinin kesiştiği noktalar dikkate alındığında 9 bölge oluşmaktadır. (Şekil 6) İlgili bölgeye ait süre ve çıkış gerilimi çarpılarak ortaya çıkan değerler toplandığında ilk 8 bölgenin toplamının sıfır olduğu görülür. Bu durumda 9. bölgenin DA bileşeni oluşturan kısmın başlangıcı olduğu sonucu elde edilir. Buradan yola çıkarak (3) denklemi kullanıldığında oluşacak DA bileşeninin gerilim değeri 1.275 V olur. Bu gerilim sebebi ile motor fazında oluşan akım (8) kullanılarak 5.14113 A olarak hesaplanır.

$$I_{dabilesen} = V_{dabilesen} / R_S(f-f) \quad (8)$$

Hesaplanan bu değere göre, motor faz akımına neredeyse anma akımına eşit bir DA bileşeni eklediği Şekil 7'de görülmektedir. Bu değer, benzetim çalışması ile elde edilen değer ile yaklaşık aynıdır. Farklı m_f değerleri için ortaya çıkan DA bileşenleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 7: $m_f = 4$, Faz Akımı DA Bileşeni Değerleri(UVDGM)

Tablo 5: Modülasyon Frekansı Değişimi ile Motor Faz Gerilimi ve Akımı DA Bileşeni Değişimi (UVDGM)

m_f	V_{DA}^{UVDGM}	I_{DA}^{UVDGM}
4	$5.5178e-2 V_{dc}$	$0.9604 I_{anma}$
6	$4.14e-5 V_{dc}$	$7.1942e-4 I_{anma}$
8	$6.57e-3 V_{dc}$	$1.1436e-1 I_{anma}$
10	$4.922e-3 V_{dc}$	$8.5653e-2 I_{anma}$
12	$1.564e-5 V_{dc}$	$2.72302e-4 I_{anma}$
14	$2.046e-3 V_{dc}$	$3.5612e-2 I_{anma}$
16	$1.584e-3 V_{dc}$	$2.7562e-2 I_{anma}$

Aynı şekilde SDGM için de DA bileşeni hesabı ve benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışması sonuçları farklı m_f değerleri için Tablo 6'da gösterilmiştir.

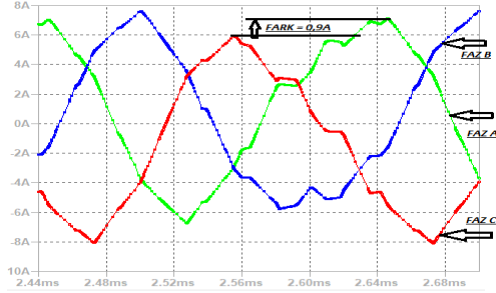
UVDGM'de olduğu gibi DA bileşeni hesabı için (3) denklemi kullanıldığında oluşacak DA bileşeninin gerilim değeri 0.21 V

olur. Bu gerilim sebebi ile motor fazında oluşan akım (8) denklemi kullanılarak 0.8468 A olarak hesaplanır. Hesaplanan bu değere göre, motor anma akımı cinsinden $0.1523I_{anma}$ kadar bir DA bileşeni eklediği Şekil 8'de görülmektedir.

Tablo 6: Modülasyon Frekansı Değişimi ile Motor Faz Gerilimi ve Akımı DA Bileşen Değişimi (SDGM)

m_f	V_{DCSDGM}	I_{DCSDGM}
4	$9.3e-3 V_{dc}$	$1.6187e-1 I_{anma}$
6	0	0
8	$1.5e-3 V_{dc}$	$2.600e-2 I_{anma}$
10	$8.26e-4 V_{dc}$	$1.439e-2 I_{anma}$
12	$2.48e-6 V_{dc}$	$4.320e-5 I_{anma}$
14	$4.34e-4 V_{dc}$	$7.554e-3 I_{anma}$
16	$2.3766e-4 V_{dc}$	$4.137e-3 I_{anma}$

Tablo 5 ve 6'ya bakıldığında DA bileşeni değerlerinin m_f 'in artmasıyla hızla düştüğü görülmektedir. m_f değeri 4'ten büyükken SDGM için göz ardı edilebilecek kadar düşük DA bileşeni faz akımı oluşmakta iken UVDGM için 8 ve 8'den büyük 3'ün katı olmayan çift değerlerde nispeten bu durum geçerli değildir.



Şekil 8: $m_f=4$, Faz Akımı DA Bileşenin Oluşumu(SDGM)

3.3. Sonuçların Yorumlanması

Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2'de alt harmonikler ve DA bileşenlerinin oluşumu hem de benzetim çalışmasıyla ortaya konulmuştur.

Bölüm 3.1'de UVDGM ve SGDM için m_f 'in tam sayı olmadığı, m_f 'in çift sayı olup 3'ün katı olmadığı durumlarda yüksek seviyede alt harmoniklerin oluştuğu, Bölüm 3.2'de ise UVDGM ve SGDM için DA bileşenin, m_f düşük olduğunda yüksek değerlere ulaştığı, m_f 'in artmasıyla da hızla düştüğü gösterilmiştir. Ayrıca SDGM tekniğinde UVDGM tekniğine göre daha az alt harmonik ve DA bileşeni oluştuğu bu bölümde görülmektedir. Teorik hesaplamalar ile benzetim sonuçları arasında UVDGM'de yaklaşık olarak %4'lük, SDGM'de ise %6'lık bir fark oluşmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, SDGM ve UVDGM tekniklerinin kullanıldığı yüksek hızlı SMSM uygulamalarında, eviricinin çıkış geriliminde farklı modülasyon frekanslarında oluşan alt harmonikler ve DA bileşenleri, sayısal hesap yöntemi ve kurulan benzetim modeli ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Gerilim alt harmoniklerinin ve DA bileşenlerinin değerleri çok küçük olsa da empedans değerinin düşük frekanslarda düşük değerler almasından dolayı önemli bozucu genliklerde akımlar meydana

getirdiği görülmüştür. Bu akımların ek bakır kayıplarına sebep olması, akım dalgalanmasından dolayı motor mil momentinde titreşim gibi olumsuz sonuçlar yaratmaktadır. Literatürde, UVDGM'nin SDGM'ye göre bara gerilimi kullanımı ve THB açısından belli avantajları olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, bu çalışmada matematiksel yöntem ve benzetim çalışmasıyla elde edilen sonuçlarla kullanılan modülasyon tekniği ve modülasyon frekansının da oluşan olumsuz etkileri değiştirdiği teyit edilmiş, yukarıda belirtilen avantajlarına rağmen UVDGM'nin düşük m_f değerlerinin görülebileceği yüksek hız uygulamalarında SDGM'ye göre DA bileşeni ve alt harmonik oluşumu açısından dezavantajlı olduğu, motor dönüş frekansındaki küçük değişikliklerin büyük sorunlara sebep olacağı tespit edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

5. Kaynaklar

- [1] P. Purohit and M. Dubey, "Modeling, Analysis and Design of SPWM Current Controlled Multilevel Inverter Fed PMSM Drive," 2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4), Indore, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/IC4.2015.7375594.
- [2] B. Li and C. Wang, "Comparative Analysis on PMSM Control System Based on SPWM and SVPWM," 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yinchuan, 2016, pp. 5071-5075, doi: 10.1109/CCDC.2016.7531902.
- [3] J. Pradeep and R. Devanathan, "Comparative Analysis and Simulation of PWM and SVPWM Inverter Fed Permanent Magnet Synchronous Motor," 2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM), Chennai, 2012, pp. 299-305, doi: 10.1109/ICETEEEM.2012.6494517.
- [4] T. Lipo and D. Holmes, Pulse Width Modulation for Power Converters (Principles and Practice). Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [5] R. K. Jordan, P. Stumpf, Z. Varga, P. Bartal, and I. Nagy, "A Novel Approach in Studying the Effects of Subharmonics on Ultrahigh-speed Ac Motor Drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 4, pp. 1274-1281, Apr. 2011.
- [6] P. Stumpf, Z. Varga, P. Bartal, R. K. Jordan, and I. Nagy, "Effect of Subharmonics on the Operation of Ultrahigh Speed Induction Machines," in Proc. IEEE IECON, Porto, Portugal, 2009, pp. 426-431.
- [7] P. Gnaciński, A. Muc and M. Pepliński, "Influence of Voltage Subharmonics on Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor," in IEEE Access, vol. 9, pp. 164275-164281, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3133279.
- [8] Lipo and D. Holmes, Pulse Width Modulation for Power Converters (Principles and Practice). Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [9] P. Stumpf, R. K. Járđán and I. Nagy, "DC Components and Subharmonics Generated by Naturally Sampled PWM Techniques," IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 327-332, doi: 10.1109/IECON.2012.6388625.
- [10] Kushare, B.E., A.A. Ghatol, and M.S. Aphale. Survey of Interharmonics in Indian Power System Network. in Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International. 2007.
- [11] Arrillaga, J. and N.R. Watson, Power System Harmonics. 2nd ed2003, West Sussex, England ; Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons. x, 399 p.