



Sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrol tekniklerinin incelenmesi ve sürücü tasarımı

İbrahim Özdin^{1,2*}, Nurettin Üstkoyuncu³

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim dalı, Kayseri, Türkiye

² Envest Enerji ve Su Teknolojileri Ltd. Şti., Erciyes Teknopark, Kayseri, Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Kayseri, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

17.07.2024

Kabul tarihi

01.10.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

SMSM,

AYK,

MOSFET,

SiC,

IPM

ÖZET

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) yüksek güç yoğunlukları, enerji verimlilikleri ve düşük bakım gereksinimleri sayesinde endüstriyel otomasyon sistemleri ve elektrikli araçlar gibi çok farklı alanlarda kendilerine kullanım alanı bulmaktadır. Bu çalışmada, ilgili motorların kontrolünde kullanılmakta olan yöntemler karşılaştırılmış ve alan yönlendirmeli kontrol (AYK) başta olmak üzere bu yöntemlerin kullanılabilceği bir sürücü devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen sürücü devresinde Silisyum Karbür (SiC: Silicon Carbide) tabanlı Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) Akıllı Güç Modülü (IPM: Intelligent Power Module) kullanılarak yüksek verimli ve birçok avantajı üzerinde barındıran bir yapı elde edilmiştir.

Investigation of control techniques for permanent magnet synchronous motors and a driver design

ARTICLE INFO

Article history:

Received

17.07.2024

Accepted

01.10.2024

Published

31.12.2024

Keywords:

SMSM,

AYK,

MOSFET,

SiC,

IPM

ABSTRACT

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are used in many fields such as industrial automation systems and electric vehicles due to their high power densities, energy efficiencies, and low maintenance requirements. In this study, various methods used in the control of PMSMs have been compared and a driver circuit design has been realized to apply these control techniques, especially the Field Oriented Control (FOC). The designed driver circuit utilizes Silicon Carbide (SiC) Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) based Intelligent Power Modules (IPMs) to achieve a high-efficiency structure with many advantages.

1. GİRİŞ

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) günümüzde elektrikli ev cihazlarından endüstriyel uygulamalara ve elektrikli araçlara kadar çok farklı alanlarda kullanılmakta ve diğer elektrik motorlarına çok iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. SMSM'ler hızlı dinamik tepkileri, istikrarlı çalışmaları, yüksek verimlilikleri ve kompakt boyutlarıyla önem kazanmaktadır [1].

ORCID ID: İbrahim Özdin: 0009-0007-9045-5859; Nurettin Üstkoyuncu: 0000-0001-9054-8851

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı, Kayseri, TÜRKİYE

Tel: +90 352 224 01 80

E-mail: ibrahimozdin@gmail.com

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: Özdin İ., Üstkoyuncu N., "Sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrol tekniklerinin incelenmesi ve sürücü tasarımı", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 22-32, 2024.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlara ait bileşenlerin tasarımı, motorun verimliliğini, moment üretimini ve hız kontrol yeteneklerini önemli ölçüde etkilemektedir [2]. Dolayısıyla bu amaçla literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda SMSM'lerin işletim özelliklerini geliştirmek için tasarım ve optimizasyonun önemi vurgulanmaktadır [3]. Bununla birlikte bazı çalışmalarda sürekli mıknatıslı yapılarının motor performansı üzerindeki etkisi araştırılmış ve optimum verimlilik ile moment özelliklerine ulaşmada mıknatıslı konfigürasyonunun öneminin altı çizilmiştir [4, 5]. Aynı zamanda elektromanyetik alan simülasyonu ve modellemesindeki gelişmelerin SMSM tasarımlarının analizini ve iyileştirilmesini kolaylaştırdığını vurgulayan çalışmalar da literatürde yer almaktadır [6].

Simülasyon çalışmaları beraberinde yapılan tasarımsal değişiklikler ile elde edilen iyileştirmelerin yanında, ilgili motorların kontrolü hususunda da literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda genel olarak motorun verimli ve etkili bir şekilde kontrol edilebilmesi için geliştirilen skaler ve özellikle de vektörel kontrol yöntemlerine sıkça rastlanılmaktadır [7-11].

SMSM'lerde V/F kontrolünün uygulanması, salınım tepkilerini azaltmayı ve değişen hız referansları ile yük momenti koşulları altında senkronizasyonu korumayı, böylece güvenilir ve verimli motor performansı sağlamayı amaçlamaktadır [7]. Ayrıca, V/F kontrol teknolojisindeki gelişmeler, motor verimliliğini ve tepki sürelerini optimize eden sağlam kontrol algoritmalarının geliştirilmesini de sağlamıştır [8].

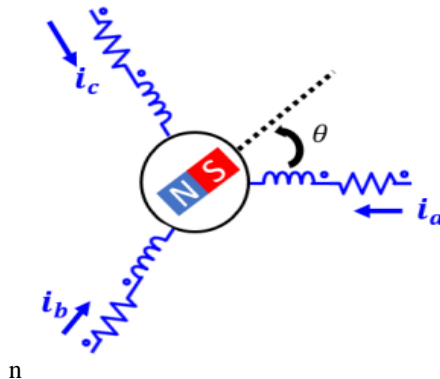
Skaler kontrol beraberinde alternatif akım motorlarının momentini ve akısını bağımsız olarak düzenlemek, verimliliği ve dinamik yanıtı artırmak için vektör kontrol teknikleri geliştirilmiştir [9-11]. Bu kontrol teknikleri arasında en yaygın olarak kullanılan Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK, FOC: Field Oriented Control). Alan yönlendirmeli kontrol, alternatif akım motorlarında moment ve akı bileşenlerinin kontrolünün ayrıştırılmasını içermekte ve optimum motor çalışması için bu parametrelerin bağımsız olarak düzenlenmesine olanak sağlamaktadır. Alan yönlendirmeli kontrol, stator tarafından üretilen manyetik alanı rotor akısı ile hizalayarak verimli moment üretimi ve hassas hız kontrolü sağlamaktadır [9]. Bu kontrol stratejisinin hızlı tepki süreleri ve yüksek verimlilik sunduğu literatürde çokça gösterilmiş olup bu durum, AYK'yi Doğrudan Moment Kontrol (DMK) yöntemi ile birlikte sıkça tercih edilen birer seçenek haline getirmektedir [9, 10]. Kontrol yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar dışında sürücü sistemlerde yer alan diğer elemanların da incelendiği çalışmalar ve ortaya konan ticari ürünler de bulunmaktadır. Sonuç olarak bir bütün olarak düşünüldüğünde, temel amacın düşük maliyetli ve yüksek verimli motor ile sürücülerin geliştirilmesi olduğu söylenebilir. Dolayısıyla bu makalede hem SMSM'lerin kontrolünde kullanılan yöntemler avantaj ve dezavantajları ile karşılaştırılmış hem de ilgili motorların sürücülerinde yeni nesil güç elektroniği elemanları kullanımının beraberinde getirdiği avantajlar sunulmuştur.

Bu çalışmada, öncelikle SMSM'lerin kontrolünde kullanılmakta olan kontrol tekniklerinin incelenebilmesi için SMSM'lerin matematiksel modeli üzerinde durulacak ve devamında ise ilgili kontrol tekniklerinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılacaktır. Ardından ise bu kontrol teknikleri ile kullanılacak Silisyum Karbür (SiC: Silicon Carbide) tabanlı Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) Akıllı Güç Modülü (IPM: Intelligent Power Module) ile tasarımı gerçekleştirilen güç devresi avantajları ile birlikte sunulacaktır.

2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR

2.1 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Matematiksel Modeli

Dengede olan üç fazlı bir SMSM'nin kavramsal diyagramı Şekil 1'de verilmiştir [12].



Şekil 1. Dengeli Üç Fazlı SMSM'nin Kavramsal Diyagramı [12]

Burada faz gerilimleri sırası ile Eşitlik 1, 2 ve 3 ile verilebilmektedir.

$$V_a = R \cdot i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (1)$$

$$V_b = R \cdot i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (2)$$

$$V_c = R \cdot i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (3)$$

Bu eşitliklerde

$$\lambda_a = L \cdot \frac{di_a}{dt} + \phi \cdot \cos(\theta) \quad (4)$$

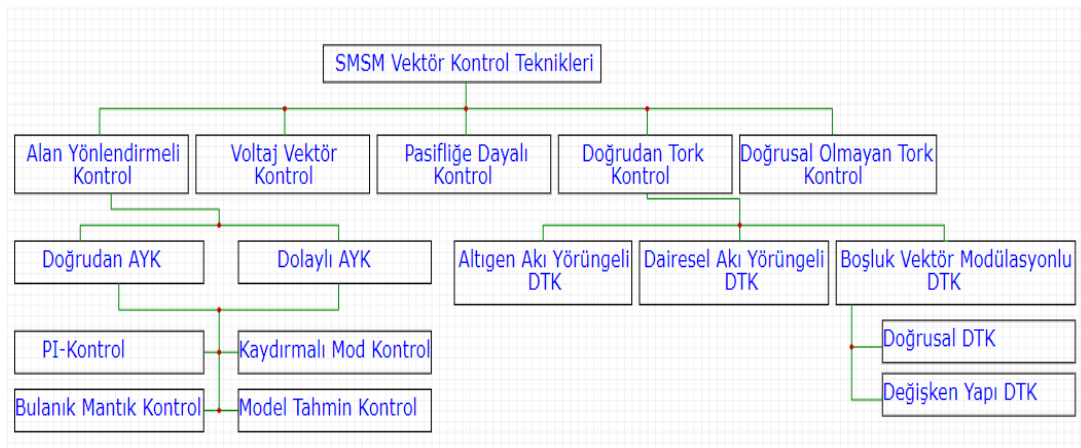
$$\lambda_b = L \cdot \frac{di_b}{dt} + \phi \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (5)$$

$$\lambda_c = L \cdot \frac{di_c}{dt} + \phi \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (6)$$

olarak tanımlanmakta olup. i_a , i_b ve i_c faz akımlarını göstermektedir [12].

2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Kontrol Yöntemleri

Sürekli mıknatıslı senkron motorlardan en iyi şekilde performans alabilmek için çeşitli vektör kontrol teknikleri geliştirilmiştir. Bu kontrol teknikleri genel olarak Şekil 2’de gösterilmiştir [13]. Her bir kontrol tekniğinin kendi avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Uygulama gereksinimlerine ve sistem koşullarına bağlı olarak uygun kontrol tekniği seçilmelidir. SMSM’ler için kullanılmakta olan bazı kontrol yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 1’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. SMSM Vektör Kontrol Teknikleri [13]

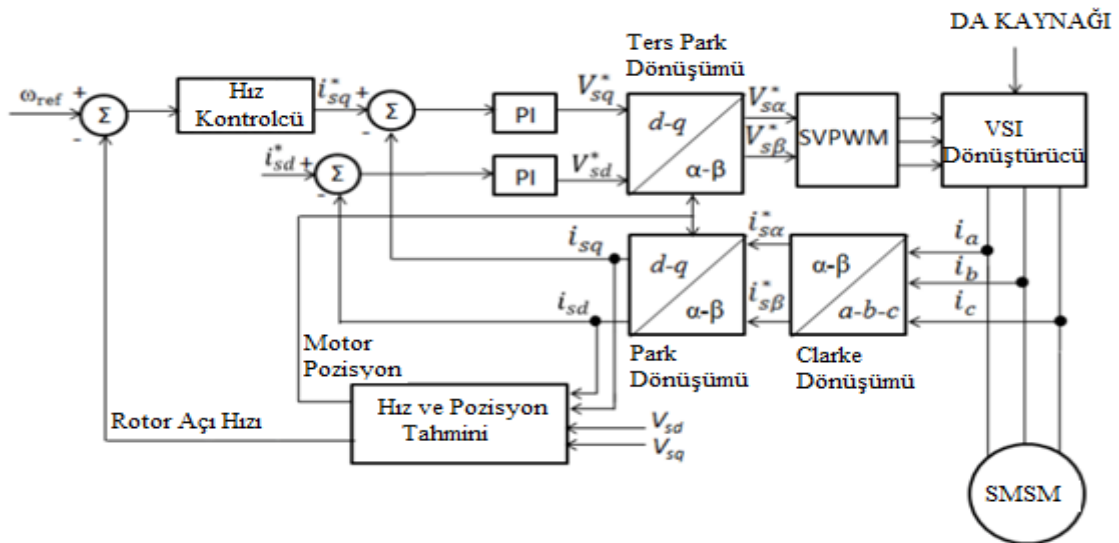
Tablo 1. Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırması

Kontrol Tekniği	Avantajlar	Dezavantajlar
V/F	<ul style="list-style-type: none"> Basitlik Düşük Maliyet Kolay Uygulama 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük Dinamik Performans Sınırlı Hız Aralığı Hassasiyet Eksikliği
Doğrudan Moment (Torque) Kontrol (DMK)	<ul style="list-style-type: none"> Hızlı Dinamik Yanıt Yüksek Moment Doğruluğu Basit Yapı Düşük Hesaplama Yükü 	<ul style="list-style-type: none"> Harmonik Bozulma Akı Dalgalanmaları Hassas Ölçümler Gerekli
Model Tahmin Kontrol (MTK)	<ul style="list-style-type: none"> Optimum Performans Kısıtları Dahil Etme Yeteneği Hızlı Dinamik Yanıt Esneklik 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Hesaplama Maliyeti Model Doğruluğu Uygulama Karmaşıklığı
Adaptif Kontrol	<ul style="list-style-type: none"> Parametre Belirsizliği Karşısında Dayanıklılık Geniş Uygulama Alanı Gerçek Zamanlı Ayarlamalar 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Hesaplama Maliyeti Uygulama Karmaşıklığı Stabilite Sorunları
Nonlinear Kontrol	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Hassasiyet ve Dinamik Performans Geniş Çalışma Aralığında Dayanıklılık Enerji Verimliliği 	<ul style="list-style-type: none"> Matematiksel Karmaşıklık Hesaplama Yükü Model Doğruluğu Sensör Gereksinimi
Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK)	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Performans Enerji Verimliliği Geniş Hız Aralığı Gelişmiş Moment Kontrolü 	<ul style="list-style-type: none"> Karmaşıklık Maliyet Hassasiyet

Herbir kontrol tekniğinin kendine göre avantaj ve dezavantajlarının bulunduğu Tablo 1’den açıkça görülmektedir. Buna karşın yapılan ve ortaya konan çalışmaların AYK ve DMK üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir [13]. Bunun en önemli nedenleri arasında DMK’nın basit yapısı ve düşük hesaplama gereksinimlerine karşın iyi bir şekilde moment kontrolünü sağlaması, AYK’nın ise nispeten daha karmaşık yapısına ve yavaş dinamik cevabına karşın daha gelişmiş ve hassas moment kontrolü ile sağladığı yüksek performans gösterilebilir.

2.3 Alan Yönlendirmeli Kontrol

SMSM’ların kontrolünde kullanılan en önemli yöntemlerden birisi alan yönlendirmeli kontrolüdür. Bu kontrol tekniği, motorun stator akımlarını birbirine dik iki eksen olan d-ekseni ve q-eksenine çeviren Park Dönüşümüne dayanır. Literatürde uygulanmış olan bir AYK blok diyagramı Şekil 3’te verilmiştir [14].



Şekil 3. Alan Yönlendirmeli Kontrol Blok Diyagramı [14]

AYK yöntemi, stator akımlarının iki dik bileşene ayrılmasını gerektirir. Bu ayrım, sırasıyla Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilir. Clarke Dönüşümü, üç fazlı sistemdeki akımları iki fazlı bir sistemde α - β bileşenlerine dönüştürürken Park Dönüşümü, bu bileşenleri d-q referans çerçevesine taşıyarak kontrol edilebilir hale getirmektedir.

Clarke Dönüşümünün temel amacı, AYK algoritmasında kolaylık sağlamak ve motor kontrol sistemlerinde kullanılan matematiksel işlemleri basitleştirmektir. Bu dönüşüm, Eşitlik 7 ve 8'de verildiği üzere üç fazlı bir sistemdeki akımları (i_a , i_b ve i_c) kullanarak, bu akımları iki eksen üzerinde temsil eden i_α ve i_β akımlarının elde edilmesini sağlamaktadır.

$$i_\alpha = \frac{2}{3} \cdot i_a - \frac{1}{3} \cdot (i_b - i_c) \quad (7)$$

$$i_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (i_b - i_c) \quad (8)$$

Sistem üç fazlı dengede ise;

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (9)$$

olduğundan bu koşul altında Clarke Dönüşümüne ait eşitlikler, Eşitlik 10 ve 11 ile verildiği gibi yazılabilir:

$$i_\alpha = i_a \quad (10)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a + 2 \cdot i_b) \quad (11)$$

Park Dönüşümü ise bu α - β bileşenlerini d-q eksenine bileşenlerine dönüştürür ki bu, motorun manyetik alanına göre hizalanmış bir referans çerçevesidir. Park Dönüşümüne ait temel eşitlikler Eşitlik 12, 13, 14 ve 15'te verilmiştir.

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos(\theta) + i_\beta \cdot \sin(\theta) \quad (12)$$

$$i_q = i_\beta \cdot \cos(\theta) - i_\alpha \cdot \sin(\theta) \quad (13)$$

$$V_d = i_d \cdot R + L_d \frac{di_d}{dt} - i_q \cdot \omega \cdot L_q \quad (14)$$

$$V_q = i_q \cdot R + L_q \frac{di_q}{dt} + i_d \cdot \omega \cdot L_d + \omega \cdot \phi_a \quad (15)$$

Burada

$$\phi_a = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \phi \quad (16)$$

şeklinde ifade edilebilir ve eşitliklerde yer alan i_d ve i_q sırasıyla d ve q eksenlerine ait akım bileşenleri olup, θ rotor akısı açılal pozisyonudur.

Park dönüşümü, AYK algoritmasının merkezi bir bileşenidir ve motorun torkunu ve akısını ayrı ayrı kontrol etmeyi mümkün kılar. Motorun manyetik akısının kontrolünü d-ekseni akımı olan i_d gerçekleştirirken, q-ekseni akımı olan i_q , tork üretiminden sorumludur.

Ters Park Dönüşümü, d-q döner referans çerçevesindeki sinyalleri α - β durağan referans çerçevesine geri dönüştürürken Ters Clarke Dönüşümü ise α - β çerçevesindeki akımları üç fazlı akımlara dönüştürmektedir.

3. MOSFET YARIİLETKEN TEKNOLOJİLERİ

Elektronik devrelerde kullanılan yarıiletken malzemeler, cihazların performansı, verimliliği ve güvenilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Silikon (Si), SiC ve Galyum Nitrit (GaN), yarıiletken elemanlar için en yaygın kullanılan malzemeler arasındadır. Bu yarıiletken malzemelerin teknolojik ve performans değerlendirmeleri sırasıyla Tablo 2 ve 3'te verilmiştir [15].

Tablo 2. Yarıiletken Malzemelerin Teknolojik Açıdan Değerlendirmesi

Teknoloji	Teknoloji Özellikleri	Faydaları
Si	<ul style="list-style-type: none"> En iyi RDS(on)/Paket Oranı Yenilikçi Paket Konseptleri Düşük Anahtarlama Kayıpları (Eoss) ve Kapı Yüğü (Qg) 	<ul style="list-style-type: none"> Çoğu Verimlilik Gereksinimi için En İyi Fiyat/Performans Oranı Pazardaki En Büyük MOSFET Portföyü Olgun ve Stabil Yapı
SiC	<ul style="list-style-type: none"> Düşük Geri Dönüş Toparlama (Qrr) ile Hızlı Gövde Diyotu Üstün Kapı-Oksit Güvenilirliği Mükemmel Termal, Çıg ve Kısa Devre Yeteneği Standart Sürücülerle Çalışabilme 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Performans ve Kullanım Kolaylığı Yüksek Sıcaklık ve Zorlu Ortam Koşullarında Yüksek Sağlamlık, Daha Küçük Eleman Boyutu
GaN	<ul style="list-style-type: none"> Sıfır Geri Dönüş Toparlama (Qrr) Hızlı Gövde Diyotu En İyi FOM (Figures-of-Merit) Hızlı Anahtarlama 	<ul style="list-style-type: none"> En Yüksek Verimlilik ve Güç Yoğunluğu En Yüksek Anahtarlama Frekansları Kolay Sistem Entegrasyonu

Tablo 3. Yarıiletken Malzemelerin Performans Açısından Değerlendirmesi

Özellik	Yarıiletken Malzeme		
	Si	SiC	GaN
Verimlilik	İyi	Çok İyi	Çok İyi
Frekans	İyi	Çok İyi	Çok İyi
Güç Yoğunluğu	İyi	Çok İyi	Çok İyi
Maksimum Güç Yoğunluğu	Orta	İyi	Çok İyi
Sağlamlık	İyi	Çok İyi	Orta
Sıcaklık Dayanımı	İyi	Çok İyi	İyi
Çift Yönlü Topoloji Uyumluluğu	Orta	Çok İyi	Çok İyi
Kullanım Kolaylığı	İyi	Çok İyi	İyi
Fiyat/Performans	Çok İyi	Orta	Orta
Portföy Çeşitliliği	Çok İyi	Orta	Orta

4. SÜRÜCÜ TASARIMI

Bu çalışmada, SMSM'ler için kullanılacak bir sürücü tasarımı ele alınmıştır. Tasarım gerçekleştirilirken Infineon Technologies firmasının geliştirmiş olduğu EVAL-M1-IM828-A sürücü geliştirme kiti temel alınmış ve kontrolcü birimi olarak da ilgili firmanın geliştirmiş olduğu EVAL-M1-101T motor kontrol işlemci ünitesi kullanılmıştır. Kontrol komutlarının iletilmesi ve kritik durum değişkenlerinin izlenmesi amacıyla, Nextion firması tarafından üretilmiş olan programlanabilir dokunmatik ekran, sürücü sistemine entegre edilmiştir. Dokunmatik ekrana ait görsel Şekil 4'te sunulmuştur.



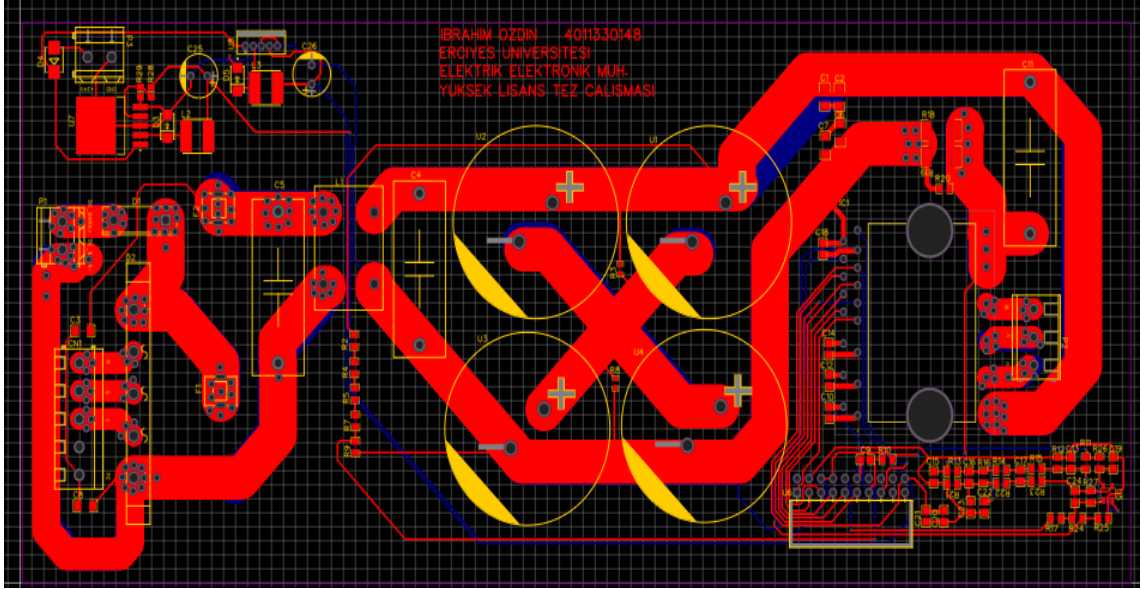
Şekil 4. Dokunmatik Motor Kontrol ve İzleme Ekranı Görseli

Yazılımı gerçekleştirilen ekran üzerinden sistemi kontrol etme ve izleme süreci RS232 haberleşme protokolü kullanılarak motor kontrol işlemci birimi ile ekran tarafından sağlanmaktadır. Bunun yanında sürücüye ait güç ünitesi tasarımı öncesinde ilk deneysel çalışmalar firmanın kendi tasarımları olan modüller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te ilgili düzeneğe ait bir görüntü verilmiştir.

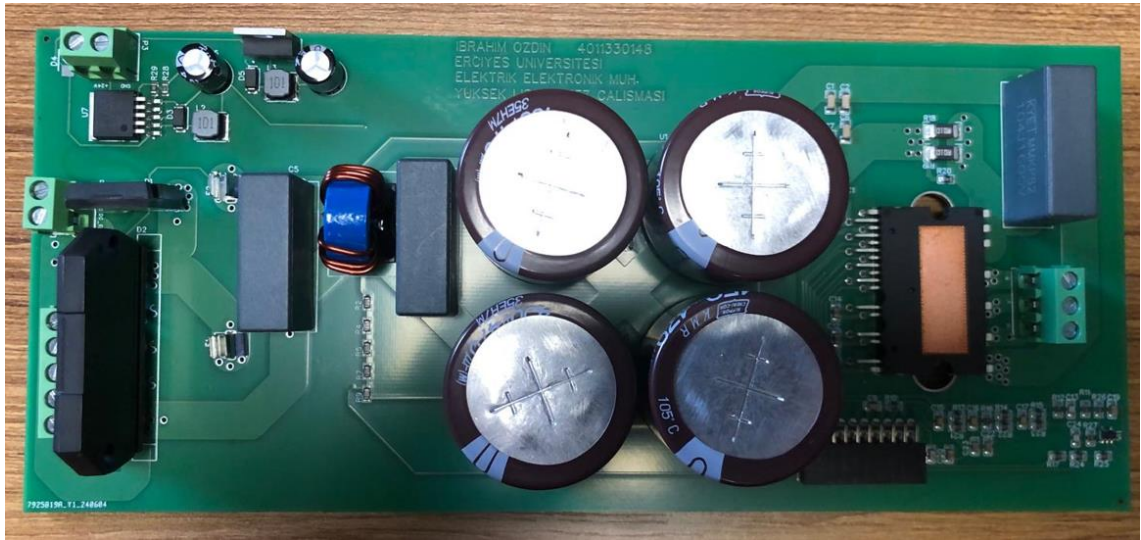


Şekil 5. Deney Düzeneği

Tasarımı gerçekleştirilen güç ünitesinde IM828-XCC SiC IPM temel alınmakta olup bu sayede 8 kW nominal çıkış gücüne sahip bir sürücü sistemi elde edilmiştir. Devrenin beslemesi, endüstri standartlarına uygun olarak 380 V Alternatif Akım (AA) gerilim ile sağlanmakta ve bu gerilim, bir doğrultucu devresi aracılığıyla Doğru Akım (DA) link voltajına dönüştürülmektedir. Bunun yanı sıra harici bir DA bara beslemesine de sistemde yer verilmiştir. Oluşturulan DA bara voltajı, empedans karakteristiklerine uygun olarak seçilmiş bobinler ve kapasitörler kullanılarak elektromanyetik girişim filtreleme işleminden geçirilmiş ve böylece gürültüsüz bir DA bara voltajı elde edilmiştir. Sürücüde kullanılan kontrolcü birimi ve IPM, bu DA bara voltajından türetilen ve regüle edilen 15V DA yardımcı beslemesi ile çalışmaktadır. Kontrol biriminin yazılım geliştirmesinde, üretici firmanın sunmuş olduğu MCE Designer yazılımından faydalanılmıştır. Şekil 6 ve 7'de sırasıyla tasarımı yapılan güç sisteminin baskı devre kartı (PCB: Printed Circuit Board) çizimine ait görüntü ve devrenin gerçekleştirilmiş hali verilmiştir.



Şek il 6. Tasarımı Gerçekleştirilen Güç Birimine Ait PCB Çizim Görüntüsü



Şek il 7. Tasarımı Gerçekleştirilen Elektronik Kart

Tasarımı gerçekleştirilen devrede temel alınan IM828-XCC SiC MOSFET IPM'in avantajlarını daha net bir şekilde gösterebilmek adına üretici firmanın kendi simülasyon araçları kullanılarak ilgili SiC IPM'in diğer yarıiletken alternatifleri olabilecek IGBT ve FREDFET sürücü entegreleri ile verimlilik ve sıcaklık karşılaştırmaları yapılmıştır [16]. Şekil 8'de söz konusu IPM modüllerin test koşullarına ait değerler, Şekil 9'da ise bu değerlere göre uygulanan akım ve gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir. Bu şartlar altında modül verimlilikleri, modül çıkış güçleri ve modül sıcaklıkları ise tablo halinde Şekil 10'da gösterilmiştir.

System Frequency: Hz

Switching Frequency: kHz

Modulation Scheme: ▼

DC Bus Voltage: V

Output Voltage by: ▼

Modulation Index:

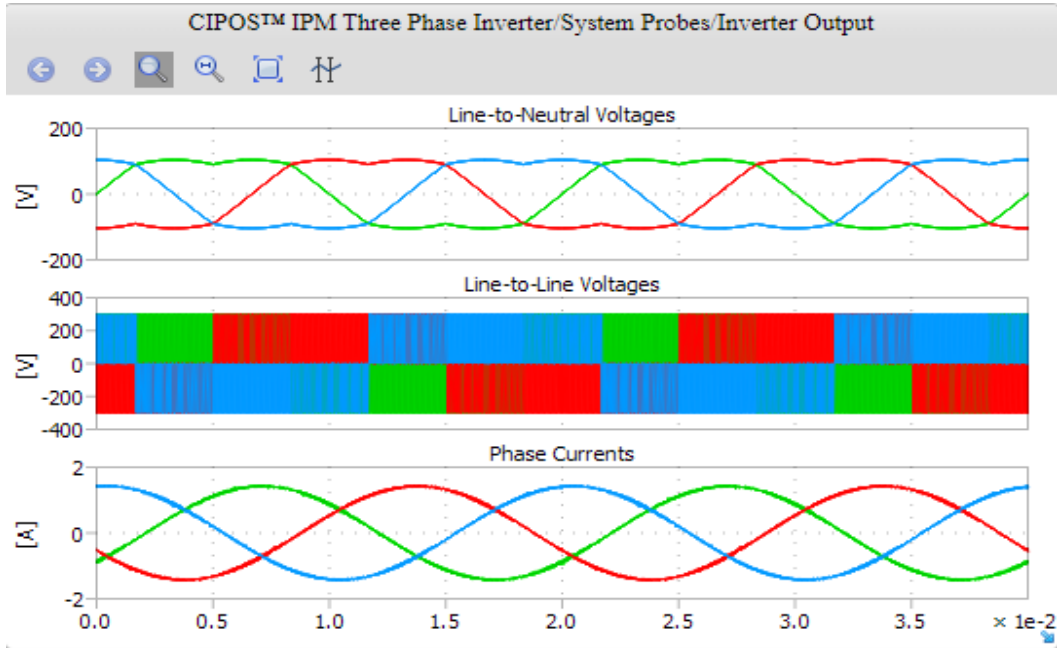
Phase Current: Arms

Power Factor:

Ambient Temperature: °C

Rth (Case to Ambient): °C/W

Şekil 8. Test Değerleri



Şekil 9. Test Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri

Inverter Losses					
	Partnumber	P_{loss}	η	P_{out}	$T_{c,avg}$
All Switches	IMI111T-046H	4.81 W			
	IMM101T-056M	4.56 W			
	IRSM807-105MH	4.33 W			
	IM241-L6xxB	3.72 W			
	IKCM15L60GD	3.63 W			
	IKCM30F60GA	6.21 W			
	IM535-U6D	3.20 W			
	IM818-LCC	5.28 W			
	IM828-XCC	1.96 W			
All Diodes	IMI111T-046H	1.49 W			
	IMM101T-056M	0.70 W			
	IRSM807-105MH	1.67 W			
	IM241-L6xxB	1.34 W			
	IKCM15L60GD	0.89 W			
	IKCM30F60GA	1.49 W			
	IM535-U6D	1.10 W			
	IM818-LCC	2.19 W			
	IM828-XCC	0.70 W			
Inverter	IMI111T-046H	6.31 W	96.90 %	203.4 W	56.52 °C
	IMM101T-056M	5.26 W	97.41 %	203.4 W	51.30 °C
	IRSM807-105MH	6.00 W	97.05 %	203.4 W	55.00 °C
	IM241-L6xxB	5.06 W	97.51 %	203.4 W	50.30 °C
	IKCM15L60GD	4.52 W	97.78 %	203.4 W	47.61 °C
	IKCM30F60GA	7.70 W	96.22 %	203.4 W	63.48 °C
	IM535-U6D	4.30 W	97.89 %	203.4 W	46.48 °C
	IM818-LCC	7.47 W	96.33 %	203.4 W	62.34 °C
	IM828-XCC	2.66 W	98.69 %	203.4 W	38.31 °C

Şekil 10. Test Koşullarında Modül Verimlilikleri, Güç Çıktıları ve Sıcaklıkları

Elde edilen değerler, tasarımı yapılan güç biriminde temel alınan yeni nesil SiC MOSFET tabanlı IPM'in ciddi avantajlar sunduğunu göstermektedir. Aynı zamanda gerek SiC gerekse de GaN tabanlı yarıiletken güç elektroniği anahtarlama elemanlarının elektrikli araçlardan tüketici elektroniği ürünlerine kadar çok geniş bir yelpazede kullanımının giderek yaygınlaştığı görülmektedir. Klasik Si yarıiletken elemanlara göre daha düşük boyutlarda üretilebilen, daha düşük kayıplarla çalışabilen ve daha yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilme özelliğine sahip olan bu elemanların kullanımının gelecekte hızlanarak artacağını söylemek hiç de yanlış olmayacaktır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrol yöntemleri ile motor sürücülerinde kullanılan yarıiletken teknolojileri karşılaştırılmış ve ciddi avantajlara sahip olan SiC MOSFET IPM tabanlı bir sürücü sistemi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda motor sürücü kontrolünün kolay bir şekilde yapılabilmesi ve motor durumunun rahat bir şekilde izlenebilmesi için kullanıcı dostu bir dokunmatik ekran sisteme entegre edilerek yazılımı geliştirilmiştir. İlgili sürücü ünitesine bağlı kontrol biriminin yazılımının revizyonu ile farklı elektrik motorlarının çeşitli yöntemlerle kontrol edilebilmesi de mümkün olabilecektir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından FYL-2023-12383 kodlu proje ile desteklenmiştir.

YAZAR KATKILARI

Tüm yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] W. Lin, "Design and analysis of marine permanent magnet synchronous motor based on motor-cad," *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2631, no. 1, p. 012008, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2631/1/012008.
- [2] M. Rahman and P. Zhou, "Analysis of brushless permanent magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 256-267, 1996, doi: 10.1109/41.491349.
- [3] Y. Liu, "Torque response performance analysis of pmsm dtc," *International Journal of Mathematics and Statistics*, vol. 2, no. 2, 2023, doi: 10.53555/eijms.v2i2.3.
- [4] T. Thuy, "Effect of permanent magnet structure on working characteristics of lspmsm 3000 rpm," *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. 1275, no. 1, p. 012049, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1275/1/012049.
- [5] N. Anh, T. Le, and X. Ngo, "Effect of permanent magnet structure on the performance of lspmsm with a power of 22 kw and 3000 rpm," *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. 1111, no. 1, p. 012047, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1111/1/012047.
- [6] Q. Liu, T. Jing, Y. Chunhuizi, T. Liu, W. Quanxian, and X. Yu, "Research on electromagnetic field simulation of permanent magnet synchronous motor," *Journal of Software Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 99-108, 2015, doi: 10.3923/jse.2016.99.108.
- [7] G. Andreescu, C. Coman, A. Moldovan, and I. Boldea, "Stable v/f control system with unity power factor for pmsm drives," 2012, doi: 10.1109/optim.2012.6231937.
- [8] K. Lee and Y. Han, "Mtpa control strategy based on signal injection for v/f scalar-controlled surface permanent magnet synchronous machine drives," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 96036-96044, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2997087.
- [9] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 5, pp. 820-827, 1986, doi: 10.1109/tia.1986.4504799.
- [10] L. Zhong, M. Rahman, W. Hu, and K. Lim, "Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 528-536, 1997, doi: 10.1109/63.575680.
- [11] X. Xin-hua, X. Yan, and K. Zhang, "A novel servo motor vector technique for the control of industrial robots," *International Journal of Simulation Systems Science & Technology*, 2019, doi: 10.5013/ijssst.a.19.05.08.
- [12] S. Yıldırım, "A high power factor flux-weakening strategy for PMSMS without electrolytic capacitors," *Master of Science Thesis*, 2020.
- [13] V. M. Bida, D. V. Samokhvalov, and F. S. Al-Mahturi, "PMSM vector control techniques—A survey," in *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2018, pp. 577-581, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317170.
- [14] H. Aygün, M. Gökdag, M. Aktas, and M. Cernat, "A novel sensorless field oriented controller for Permanent Magnet Synchronous Motors," in *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2014, pp. 715-720, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864674.
- [15] Infineon, <https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/wide-bandgap-semiconductors-sic-gan/#!?fileId=5546d462636cc8fb0163fe86543408b0>, [erişim tarihi: 01.07.2024].
- [16] IMP Motor, <https://plex.infineon.com/plexim/ipmmotor.html>, [erişim tarihi: 01.07.2024].