



Sabit mıknatıslı senkron motorlarda yeni eğilimler

Zeynep TÜFEK^{1*}, Emrah ÇETİN²

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

² Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

02.05.2024

Kabul tarihi

13.06.2024

Yayın tarihi

30.06.2024

Anahtar Kelimeler:

Mıknatıslı Motorlar

Tasarım

Kontrol

ÖZET

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM), endüstriyel uygulamalardan elektrikli taşıma araçlarına kadar geniş bir yelpazede kullanılan önemli bir motor türüdür. Bu motorlar, yüksek verimlilik, hız ve moment kontrolü başarısı, kompakt boyut ve hafiflik, yüksek güç faktörü, düşük bakım gereksinimi ve çevre dostu özellikleriyle tanınır. SMSM'lerin sunduğu avantajlar, tasarım ve kontrol yöntemlerinin sürekli olarak geliştirilmesini teşvik etmektedir. Bu geliştirmeler, daha yüksek verimlilik, daha etkili kontrol stratejileri ve geniş uygulama alanları gibi konularda daha fazla avantaj sağlamayı hedeflemektedir. Bu durum, enerji tasarrufu, çevresel sürdürülebilirlik ve daha yüksek performans gibi çeşitli faydaları beraberinde getirmektedir. Bu makale, literatürde SMSM üzerine yapılan çeşitli motor tasarımı ve kontrol yöntemleri çalışmalarını ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır. SMSM tasarımı ve kontrol yöntemleriyle ilgili yapılan bu derinlemesine inceleme, diğer araştırmacılar için güçlü bir referans kaynağı oluştururken, enerji verimliliğini artırma, çevresel sürdürülebilirliği destekleme ve motor performansını optimize etme gibi alanlarda önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca, etkili kontrol stratejileri geliştirme ve SMSM'lerin geniş uygulama alanlarını keşfetme konusunda da rehberlik sağlamaktadır. Kapsamlı literatür taraması, diğer araştırmacıların önceki çalışmalara kolayca erişmelerini ve bu çalışmalara atıfta bulunmalarını sağlar, bu da gelecekteki araştırmaların daha verimli ve yenilikçi olması açısından ışık tutar.

New trends in permanent magnet synchronous motors

ARTICLE INFO

Article history:

Received

02.05.2024

Accepted

13.06.2024

Published

30.06.2024

Keywords:

Motor

Desing

Control

ABSTRACT

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) are an important type of motor used in a wide range of applications, from industrial uses to electric transportation vehicles. These motors are known for their high efficiency, precise speed and torque control, compact size and light weight, high power factor, low maintenance requirements, and environmentally friendly features. The advantages offered by PMSMs continuously encourage the development of their design and control methods. These advancements aim to provide greater benefits in areas such as higher efficiency, more effective control strategies, and broader application ranges. This results in various advantages, including energy savings, environmental sustainability, and higher performance. This article provides a detailed examination of various studies in the literature on motor design and control methods for PMSMs. This in-depth review of PMSM design and control methods serves as a strong reference for other researchers, offering significant contributions in areas such as improving energy efficiency, supporting environmental sustainability, and optimizing motor performance. Furthermore, it provides guidance in developing effective control strategies and exploring the wide application areas of PMSMs. The comprehensive literature review facilitates other researchers in easily accessing and referencing previous studies, thereby shedding light on future research to be more efficient and innovative.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürüldüğü cihazlar, genel olarak "elektrik motorları" olarak adlandırılır. Elektrik motorları, çalışma prensiplerine ve kullanılan enerji türüne bağlı olarak genellikle Şekil 1'de görüldüğü üzere alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) olarak iki ana kategoriye ayrılır. DA makineleri, çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılır. Bu özellikler,

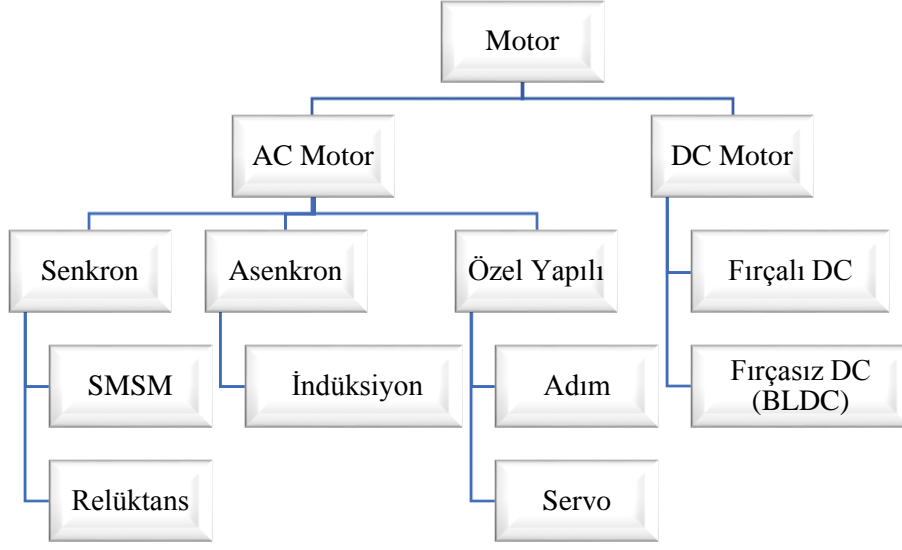
ORCID ID: Zeynep Tüfek: 0009-0008-6024-1830; Emrah Çetin: 0000-0002-7023-6604

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye.

E-mail: zeyneptufek40@gmail.com

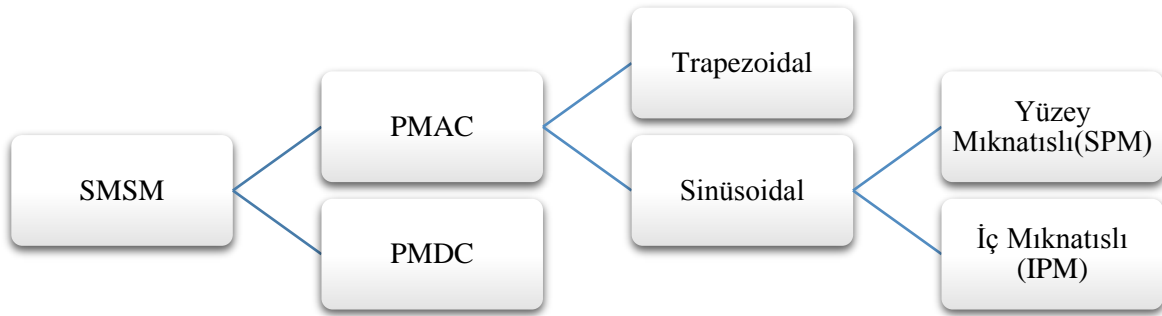
Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: Tüfek Z., Çetin E., "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Yeni Eğilimler", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 1, pp. 84-92, 2024.

makinelerin fırçalı veya fırçasız, alan sargılı veya sabit mıknatıslı olmasını içerir. Alternatif akım makineleri ise genellikle senkron ve asenkron olarak iki ana gruba ayrılır. Senkron motorlar, alternatif akım motorları içinde geniş bir motor ailesini temsil eder ve günümüzde en çok çalışma yapılan motor türünden biridir. SMSM, senkron motorlar kategorisinde öne çıkan bir alt türdür.



Şekil 1. Motorların Genel Sınıflandırılması

SMSG, 1900'lerin ortalarında tanıtılmış ve 1980'lerin başlarında nadir toprak mıknatıslarının (NdFeB ve SmCo) keşfi ile yaygınlaşmıştır. Bu motorlar, mıknatıs teknolojisindeki ilerlemelerle enerji verimliliği ve performans açısından avantajlar sağlayarak endüstride önemli bir rol oynamıştır. SMSG'ler, yüksek verimlilik, uzun ömür, sabit moment-hız karakteristiği, yüksek moment yoğunluğu ve düşük bakım ihtiyacı ile öne çıkar. Ancak, SMSG motorların kullanımında bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Birincisi, rotorlarda bulunan mıknatıs maliyetinin ve motorun kontrolünü sağlayan motor kontrol kartının maliyetinin yüksek olmasıdır. İkinci dezavantaj ise genellikle mıknatıs konumundaki hassasiyet eksikliği ya da manyetik alanın bozulmasından dolayı meydana gelen vuruş momentidir. Vuruş momenti, motorun düzenli çalışmasını bozar ve mekanik bileşenlere zarar verir [1]. Elektrik motorları, geniş bir endüstriyel yelpazede kullanılan temel bileşenlerdir. Gün geçtikçe enerjiye olan ihtiyacın artması elektrik motorların tasarımını ve motor kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu bağlamda, motor türleri üzerine yapılan çalışmalarda enerji verimliliği, kontrol hassasiyeti ve sistem dayanıklılığı gibi kritik faktörleri ele alınmıştır. SMSG motorlarda kendi içerisinde Şekil 2'de gösterildiği gibi sürüş tekniklerine ve zıt EMK dalga şekillerine göre sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2. SMSG'nin Sınıflandırılması

Bu çalışma kapsamında SMSG'lerin performans optimizasyonunu hedefleyerek gerçekleştirilen farklı tasarımlar ve motor kontrol yöntemlerini incelemekte ve mevcut bilgi birikimine genel bir bakış sunmaktadır. Motorlarının tasarımı ve kontrol yöntemi alanında yapılan çalışmalar, SMSG'lerini daha güvenilir ve verimli hale getirilmesi amacıyla nasıl katkı sağladığını anlamak, bu makalenin temel amacını oluşturmaktadır.

1.1. SMSM Tasarımları

SMSM, elektrikli motor teknolojisinin önemli bir bileşeni olarak sürekli geliştirilmektedir. Bu motorlar, yüksek verimlilik, düşük bakım gereksinimi ve çevre dostu olmasıyla sebebiyle tercih edilirler. SMSM’deki gelişmeler, motorların daha güçlü, daha verimli ve çeşitli uygulamalara uygun hale getirilmesini amaçlar. Bu gelişmeler, enerji verimliliğini artırır, motor performansını optimize eder ve çeşitli endüstri sektörlerinde kullanım alanını genişleterek elektrikli motor teknolojisini hızlandırır. Bu nedenle, SMSM’in tasarımlarının sürekli olarak geliştirilmesi, elektrikli araçlar, endüstriyel makineler ve diğer uygulamalarda daha etkin ve sürdürülebilir enerji kullanımını destekler. SMSM ‘den daha etkin bir şekilde faydalanmak amacıyla gerçekleştirilmiş birçok önemli çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan biri Soyaslan’ın çalışmasıdır. Soyaslan, dış rotorlu bir SMSM tasarımını gerçekleştirmiş ve bu tasarım asansör tahrik motoru olarak geliştirmiştir. Çalışma doğrultusunda, dış rotorlu SMSM’nin rotorundaki dönme hareketi flaşlı bir mil kasnağına aktarılarak, ortaya çıkan tasarım ile hem kayışlı hem de halatlı motor olarak kullanılabilen bir motor tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarım doğrultusunda asansörün daha hassas şekilde durması ve konumlandırılması sağlanarak konfor artırılmıştır. Soyaslan tarafından tasarlanan tahrik motoru Şekil 3’de yer almaktadır [2]. Tasarım ile yüksek performans ve yüksek verimlilik elde edilmiştir.

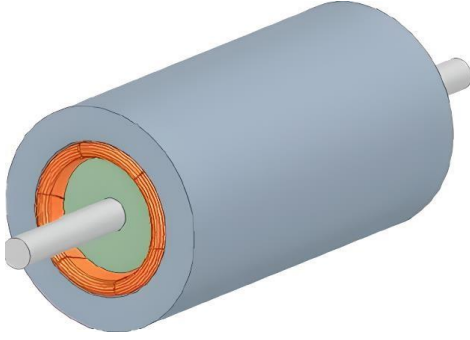


Şekil 3. Asansör tahrik motoru olarak tasarımı gerçekleştirilen dıştan rotorlu SMSM [2]

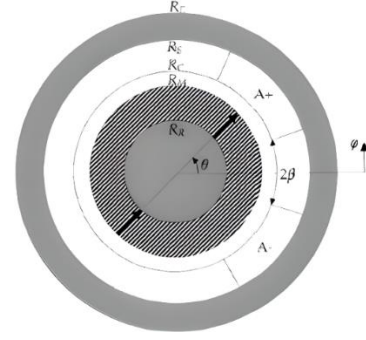
İndüksiyon motorlar, fanlar, kompresörler ve pompa uygulamalarında kullanılırlar. İndüksiyon motorların bu alanlarda gösterdikleri verimlilik değeri düşüktür. Gülçin tez çalışmasında tek fazlı indüksiyon motorlarının yerini alacak Tek Fazlı Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Motor (TF-ŞKSM) tasarımı gerçekleştirmiştir. TF-ŞKSM, indüksiyon motorlara kıyasen küçük boyutlarda daha yüksek verimlilik sunar fakat kalkış yeteneği indüksiyon motorlardan düşüktür. Gülçin, motorun stator yapısı ve sargı özellikleri tek fazlı indüksiyon motor ile aynı olan tasarımı gerçekleştirmiştir. Motorun rotor yapısında motor performansını pozitif etkileyecek ve tasarım olarak farklı olan iki farklı oluk tipi kullanmıştır. Motor verimliliği %72.7’dir. Verim değeri indüksiyon motora göre yaklaşık %8 daha iyidir. Motor kalkışı 300 ms’dir. Tasarımı gerçekleştirilen motor kalkışı asenkron motor gibi olmasına rağmen sürekli halde çalışması senkron hızda senkron motor olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan rotor olukları motor performansını arttırmış böylece motor verimliliği yükselmiştir [3].

Vuruntu momenti SMSM için en önemli yapısal sorunlardan biridir. Mıknatısların ya da olukların düzgün ve pürüzsüz olması vuruntu momentini azaltmanın en etkili yollarından biridir. Fakat bu işlem, motor maliyetini artırır ve üretim süresini uzatır. Vuruntu momentini azaltmanın diğer bir yöntemi ise motor tasarımında yaralan hava boşluğu relüktansını etkileyen parametreleri incelemektir. Mutluer ‘in çalışmasında dış rotorlu yüzeye monteli SMSM’lerin hava boşluğu relüktans değerlerini etkileyen beş parametre belirlenerek düşük vuruntu momentine sahip yüksek verimli motor elde hava edilmiştir [4].

SMSM, stator yapılarına göre oluklu ve oluksuz olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Oluklu SMSM’de vuruntu momentini sorunu, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren sistemlerde kullanımlarını sınırlayabilir. Bu bağlamda, vuruntu momentinin oluşmadığı ve hassas kontrol sağlayan sabit mıknatıslı oluksuz doğru akım motorlarının tasarımına yönelik bir ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Çiftçi’nin çalışmasında, Şekil 3’teki kesit görünümüne sahip Şekil 4’deki motor tasarımını gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motorun kesit görünümü Şekil 5’te yer almaktadır. Bu çalışma, 22 mm çapında, 3 fazlı, 2 kutuplu, nominal hızı 36600 d/dk, nominal gerilimi 32 V, nominal momentini 30.6 mNm olan bir oluksuz SMSM tasarımını ve analizini detaylı bir şekilde sunmaktadır [5].



Şekil 4. Gerçekleştirilen motor tasarımı [5]



Şekil 5. Tasarlanan 2 kutuplu 3 fazlı motorun kesit görünümü [5]

Araz ve Yılmaz 'ın çalışmasında gömülü mıknatıslı senkron motora ilişkin birçok elektriksel ve mekanik parametrelerin optimize edildiği tasarım süreci özgün yaklaşımlarla kapsamlı olarak ele alınmış ve özgün bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımda seçilen 57 oluk ve 8 kutup sayısı ile faz- kutup başına düşen oluk sayısı 2.375 olarak belirlenmiştir. Tasarım sayesinde simetrik olmayan yapıda istenmeyen etkiler azalmıştır. Tasarlanmış olan elektrik motoru ve sürücü sistemi, test aracına entegre edilerek başarılı bir şekilde elektrikli araca dönüştürülmüş ve araç üzerinde performans ile yol testleri başarıyla tamamlanmıştır [6].

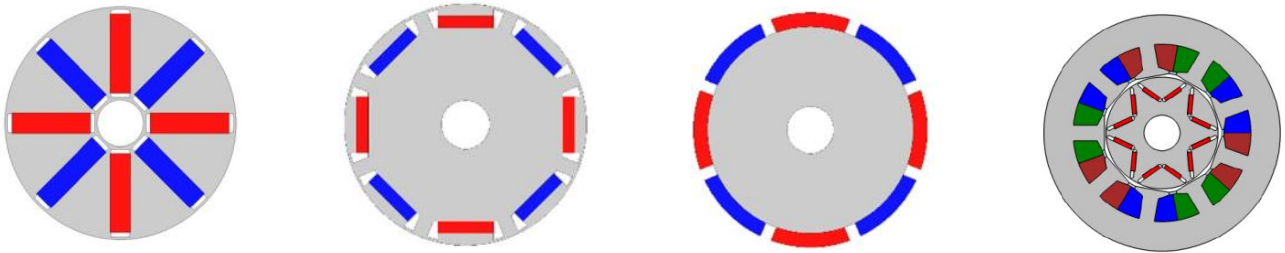
SMSM'ler, rotor yapılarına göre genellikle üç ana kategoriye ayrılır[7]:

Konuş Tipi (Spoke-Type) SMSM: Bu motorlarda, rotor disk üzerine yerleştirilmiş mıknatıslar, konuşlara benzer bir düzenlemeyle yer alır. Bu yapı, mıknatısların etkili bir şekilde yerleştirilmesini ve rotorun mekanik sağlamlığını artırır.

İç Kısmen Gömülü (Interior Buried) SMSM: Bu motorlarda, mıknatıslar rotorun iç kısmına kısmen gömülüdür. Rotor disk üzerinde mıknatısların doğrudan görünmediği ancak iç kısımda yer aldığı bir yapıya sahiptirler. Bu tasarım, mıknatısların korunmasına ve mekanik dayanıklılığın artmasına katkı sağlar.

Yüzey Montajlı (Surface Mounted) SMSM: Bu motorlarda, mıknatıslar rotor diskinin yüzeyine doğrudan monte edilir. Mıknatıslar, rotor diskinin dış yüzeyinde açıkça görünür. Bu yapı, mıknatısların kolayca erişilebilir olmasını sağlar ve montaj sürecini basitleştirir.

Her rotor tipinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır ve genellikle belirli uygulamalara göre tercih edilirler. Örneğin, konuş tipi rotorlar genellikle yüksek performanslı uygulamalar için tercih edilirken, iç kısmen gömülü rotorlar daha fazla koruma ve dayanıklılık sağlamak için tercih edilir. Yüzey montajlı rotorlar ise kolay montaj ve erişilebilirlikleri nedeniyle genellikle tercih edilirler.



a-Konuş Tipi SMSM

b- İç Kısmen Gömülü SMSM

c- Yüzey Montajlı SMSM

d-NdFeB mıknatıslı VPMSM

Şekil 6. SMSM motorlarda rotor tipleri a) Konuş Tipi SMSM b) İç Kısmen Gömülü SMSM c)Yüzey Montajlı SMSM

d) NdFeB-mıknatıslarıyla VPMSM. [7-8]

İç mıknatıslı SMSM (IPMSM), alan zayıflatma aralığında yüzey montajlı SMSM'ye (SPMSM) göre daha üstün bir performansa sahiptir. Bu nedenle, IPMSM, geniş bir sabit güç aralığına sahip uygulamalar için SPMSM'den daha cazip bir seçenektir. Nadir toprak mıknatıslardan oluşan V-şekilli mıknatıslara sahip IPMSM'ler (VPMSM), özellikle Neodimyum-Demir-Boron (NdFeB) gibi nadir toprak mıknatıslarının kombinasyonuyla çeşitli uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tür makineler, temel hız aralığında yüksek senkron ve dirençli tork sağlar ve aynı zamanda akı zayıflatma yeteneğine sahiptir[8].SMSM motorların rotor tipleri Konuş Tipi , İç Kısmen Gömülü , Yüzey Montajlı ve NdFeB mıknatıslı VPMSM'nin görselleri Şekil 6'da yer almaktadır.

Motor verimlilikleri Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından standart verimli (IE1), yüksek verimli (IE2), çok yüksek verimli (IE3) ve süper çok yüksek verimli (IE4) olmak üzere dört sınıfa ayrılır [3].

Gedik tez çalışmasında IE3 verim seviyesinde 3 fazlı, 100 gövde, 4 kutup, 3 kW asenkron motor gövdesi kullanılarak sadece baralı ve mıknatıslı rotor laminasyon tasarımı gerçekleştirmiştir. Üretim sırasında minimum müdahale ve maliyet ile en optimum IE4-Süper Çok Yüksek Verim Sınıfı seviyesinde bir elektrik motoru tasarlanması hedeflenmiştir. Tasarlanan motorun doğrudan kalkış yapabilmesi için alüminyum rotor baralarından faydalanılmıştır ayrıca yüksek kalkış momentinin karşılanması açısından derin oluklu motor baraları kullanılmıştır. Tasarımın manyetik analiz sonucu verim değeri %90,6 olan prototip motora dönüşecek olan tasarım oluşturulmuştur[9].

Zöhra, piyasada bulunan IE2 yüksek verimlilik sınıfı asenkron motorun rotorunda yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıs kullanarak Şebeke Kalkış Radyal Akıllı Senkron Motor (ŞK-RASM) tasarlamıştır. Yüzey yerleştirmeli sabit mıknatısların yer aldığı yeni bir rotor topolojisi önermiş ve Genetik Algoritma kullanılarak tasarımın genetik optimizasyonunu sağlamıştır. Sabit mıknatıslı motorların önemli bir problemi olan tork dalgalanması, tasarımda kaykılı stator yapısı kullanılarak azaltılmıştır. Çalışma sonucunda şebekeye doğrudan bağlanarak yüksek verim ve güç faktörü ile çalışan ŞK-RASM tasarlanmış ve üretilmiştir [10].

Tesla, Ford ve Fiat gibi şirketler kendi elektrikli araç modellerinde genellikle asenkron motorları tercih ederken, Toyota, Nissan ve Honda gibi firmalar ise elektrikli araç üretiminde çoğunlukla sürekli mıknatıslı senkron motorlara yönelmektedirler [11].

Musayev tez çalışmasında Toyota 2004 model Prius elektrikli aracının SMSM tasarımı temel alınmış ve elektrik araç tahrik sistemleri için motor tasarlanmıştır. Rotor iç ve dış çapı, kutup sayısı, mıknatıs hacmi, mıknatıs hacmi sabit tutulup sürekli mıknatısların sınırlı çap, kanal kalınlığı, mıknatıslar arasındaki minimum mesafe gibi parametrelerin değişimiyle farklı rotor geometrileri çizilmiştir. 250 A tepe akım değeri için referans alınmış, tork dalgalanma değerinde %12.41 iken optimizasyon sonucunda tork dalgalanma değerinde maksimum %63.81 'lere varan iyileştirme sağlanmıştır. Referans alınan motorun tork değerinde %36.42'lere ulaşan iyileştirme elde edilmiştir [12].

1.2. Motor Kontrol Yöntemleri

Motorların verimli çalışabilmesi için uygun kontrol sistemi seçilmelidir. Vektör kontrolü, gerilim ve akımın büyüklüğünü, anlık konumu ve açıl frekansı parametreler aracılığıyla kontrol etme avantajına sahiptir. Bida ve ekibi, vektör kontrol tekniklerini sınıflandırmış ve bu teknikler karşılaştırılmıştır. Doğrudan moment kontrolü (DTC), Doğrudan Kendi Kendine Kontrol (DSC), uzay vektörü modülasyonu ile doğrudan moment kontrolü (DTC-SVM) ve alan odaklı kontrol (AYK) teknikleri, yaygın olarak bilinen ve kullanılan vektör kontrol teknikleridir. Yapılan inceleme makalesinde AYK tekniğinin, hedefleme, yüksek hassasiyetli izleme ve koordinasyon sürücüleri için en uygun teknik olduğu tespit edilmiştir [13].

AYK tekniği, stator akımlarını manyetize edici bir akım ve tork akımına ayırarak, bunların genlik ve fazlarını bir DC motor gibi kontrol ederek motor kontrolünden yüksek performans sağlamayı amaçlar. Gupta ve diğerleri tarafından yazılan makalede, SMSM'nin AYK tekniği, rejeneratif frenleme modunda çalışma özelliklerini açıklar. Bu modda kinetik enerji, frenleme sırasında tekrar elektrik enerjisine dönüştürülerek enerji güç kaynağı olan bataryaya geri kazandırılır, bu da ek enerji kaynağı içermediği için sistem maliyetini önemli ölçüde azaltır. Bu çalışma, SMSM'in daha iyi kontrolü ve maksimum enerji çıkışı elde etmek için önemli bir adımdır [14].

Zossak ve ekibi ise SMSM için sensörsüz AYK'de gecikme kaynaklarını tanımlar. Gecikme kaynakları, tahmin edilen çerçevenin kaymasına neden olur ve bu da üretilen momenti etkiler, bu sayede AYK motorun performansını ve verimliliğini etkiler. Gecikmeler üzerine yapılan araştırmada, yüksek hızlarda motor kontrol performansının önemli ölçüde iyileştirildiği gözlemlenmiştir [15].

SMSM'nin manyetik alan denklemi, rotor ve stator arasındaki manyetik akı yoğunluğu ile ifade edilir ve SMSM için manyetik alan denklemi şu şekildedir:

$$\Psi_d = L_d \cdot i_d \quad (1)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot i_q \quad (2)$$

Ψ_d ve Ψ_q , durağan ve döner manyetik akıları (Wb)

L_d ve L_q , durağan ve döner endüktansları (H)

i_d ve i_q , durağan ve döner akım bileşenleri (A)

Manyetik alan ve akım arasındaki etkileşimi ile manyetik moment meydana gelir. SMSM için, manyetik moment denklemi:

$$M_m = \frac{3}{2} p (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d) \quad (3)$$

M_m , manyetik moment (N.m)

p , kutup sayısını ifade eder. Denklemi daha da basitleştirmek için, Ψd ve Ψq terimlerini manyetik alan denklemlerinden çıkararak denklemi daha temel bir forma dönüştürebiliriz. Bu yaklaşım, analizimizi daha sade ve anlaşılır bir hale getirir.

$$M_m = \frac{3}{2} p (L_d \cdot i_q - L_q \cdot i_d) \quad (4)$$

SMSM'in senkron bir şekilde çalışabilmesi için rotorun hareket esnasındaki pozisyonunun bilinmesi gereklidir. Rotor konumunun tespit edilmesi amacıyla genellikle manyetik ya da optik sensörler kullanılmaktadır. Ancak, sisteme sensör eklenmesi sistem maliyetini artırır ve mekanik titreşim içeren bir sistemde sensör yerleştirmek, sistem ömrünü ve sağlamlığını azaltır. Bu sebeplerden dolayı, sensörsüz sürüş yöntemleri üzerine yapılan çalışmalara önem verilmektedir. Büyükabalı'nın tezinde, yüksek frekans voltaj enjeksiyonu yöntemi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu yöntemde sistem konum cevabı parametreden bağımsızdır, bu da kalıcı bir ek hafızaya ihtiyaç duyulmadığı anlamına gelir [16].

Sanjuan ve ekibinin çalışmasında, rotor konumunu sensörsüz bir yöntem olan pasiflik tekniği ile belirlemişlerdir ve SMSM'lerin sensörsüz kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Rotorun konumu ve hızı, rotor sensörü kullanılmadan motorun gerilim ve akımları kullanılarak tahmin edilmiştir. Önerilen algoritmanın doğruluğunu anlamak için simülasyon süresi uzatılmış ve hız ile moment referans sinyallerinin yeterli ölçüde takip edildiği gözlemlenmiştir [17].

Adam ve Elnady'nin çalışmalarında SMSM için moment dalgalanmasını en aza indireyen yeni bir uyarlanabilir sensörsüz moment kontrolü sunulmaktadır. Bu çalışma, sensörsüz histerezis doğrudan moment kontrolü ile aracın raydaki yönünü sürekli olarak sabitleyerek azaltılmış bir moment dalgalanması profili sağlamayı amaçlamaktadır. Algoritma, akış ve moment hatasını kullanarak sıfırdan farklı iki bitişik aktif vektörü seçmek için tasarlanmıştır. Vektörler için nihai anahtarlama süresi, minimum gerekli stator gerilimine ve rotor enerjisinden kaynaklanan eylemsizlik nedeniyle oluşan enerji şekline göre düzenlenir. Önerilen algoritma, ortalama moment dalgalanmasında %75 ve akış dalgalanmasında %65,6 azalma sağlamıştır [18].

Motor kontrol yöntemlerinden bir diğeri, birçok araştırmacı tarafından en etkili kontrol tekniklerinden biri olarak kabul edilen modele dayalı öngörülü kontrol (MPC) yöntemidir. MPC, bir optimizasyon temellidir ve gelecekteki kontrol aksiyonlarının belirlenme amaçlanır, bu nedenle beklenen sistem davranışı ile hedeflenen performans arasındaki farkı minimize etmeye odaklanır. Bu bağlamda, Akpunar'ın tezinde, SMSM'ler için Runge-Kutta Model öngörülü kontrol (RKMPC) olarak adlandırılan yeni bir model öngörülü kontrol mekanizması geliştirmiştir. Yapılan testlerde, 0.4 kW'lık bir SMSM üzerinde, RKMPC'nin geleneksel oransal integral (PI) yönteminden daha etkin bir performans sergilediği gözlemlenmiştir [19].

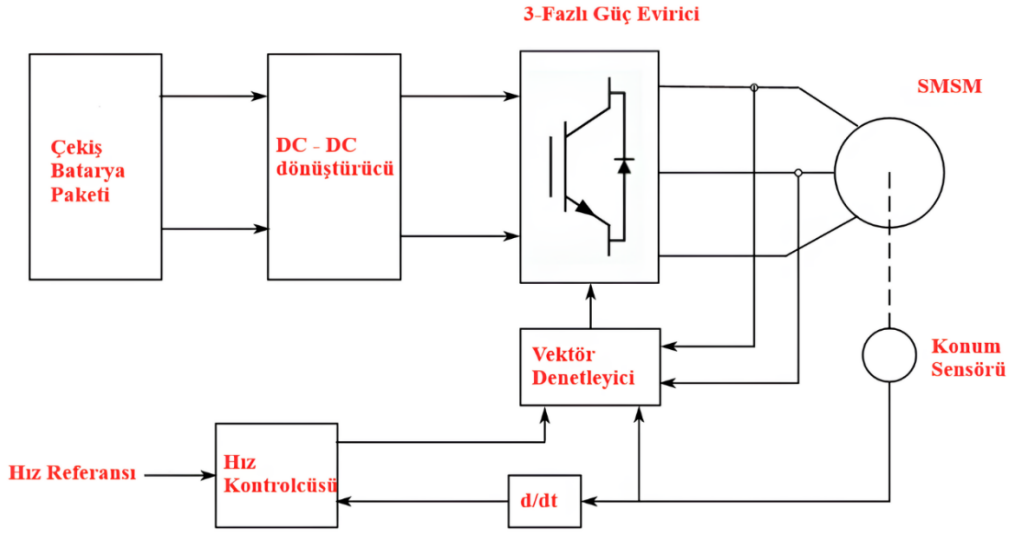
Ding ve arkadaşları tarafından SMSM için mevcut kapalı döngü durum gözlemcisine dayanan bir konum tahmini yöntemi önerilmiştir. Önerilen algoritmanın uygulanması çok kolay olduğu gözlemlenmiş ve bu algoritmanın düşük maliyet, iyi istikrar, geniş bir uygulama yelpazesine sahip ve yüksek güvenilirliğe sahip olduğu belirlenmiştir [20].

Demir çalışmasında, FCS model öngörülü akım kontrolü (FCS-MPCC) tabanlı hız ve konum sensörsüz PMSM sürücüler için LMS ve LMK algoritmalarını kullanan ve adaptasyon mekanizmasına sahip stator akımları temelli MRAS kestiriciler önermektedir. Önerilen MRAS kestiriciler, ölçülen stator akımları ile referans akımları arasındaki hatayı dikkate alarak PMSM'nin rotor hızını doğrudan tahmin eder. Bu makale, LMS ve LMK algoritmalarına dayanan MRAS hız kestiricilerinin, sabit kazançlı PI kontrolör gereksinimini ortadan kaldırdığını ve PMSM sürücülerinin hız sensörsüz kontrol performansını yüksek doğrulukla sağladığını göstermektedir. Bu çalışmanın amacı, FCS-MPCC tabanlı hız sensörsüz PMSM sürücüler için yeni MRAS kestiriciler geliştirmek ve bu kestiricilerin performansını değerlendirmektir. Elde edilen sonuçlar, önerilen LMS ve LMK algoritmalarının yüksek performans sergilediğini ve farklı yük torkları altında geniş hız aralıklarında başarılı hız tahmini sağladığını ortaya koymaktadır [21].

Motor sürücüler, elektrik motorlarının performansını artırmak ve kontrol etmek için kullanılan elektronik aygıtlardır. Bu aygıtlar, motorun hızı, momenti ve dönüş yönü gibi değişkenleri düzenlemek için gerekli olan güç ve sinyalleri sağlar. Şekil 7'de SMSM sürücülerin genel şablonu yer almaktadır. SMSM sürücülerin genel şablonunda yer alan bileşenler, motorun etkili ve hassas kontrolünü sağlamak amacıyla birbirleriyle entegre bir şekilde çalışır. Çekiş batarya paketi, motorun güç kaynağını sağlayarak elektrik enerjisini depolar ve motorun gereksinim duyduğu enerjiyi temin eder. Ardından, DC-DC dönüştürücü, bataryadan gelen doğru akımı belirli bir gerilim seviyesine ve uygun çıkış gerilimine dönüştürerek kontrol elektroniği için gerekli gücü sağlar. Bu noktada devreye giren 3 fazlı güç eviricisi, doğru akımı alternatif akıma dönüştürerek motorun rotorunda manyetik alanı değiştirir ve motorun dönmesini sağlayan üç fazlı AC gücünü üretir. Vektör denetleyicisi, motorun hızını, momentini ve yönünü hassas bir şekilde kontrol eder ve motorun çalışma koşullarını sürekli olarak izler. Son olarak, hız kontrolcüsü, motorun hızını belirli bir hedefe sabitleyerek veya belirli bir hız profili boyunca kontrol ederek, motorun belirli bir uygulama gereksinimine ya da kullanıcının isteğine göre ayarlanmasını sağlar. Bu bileşenler bir araya gelerek, motorun verimli ve istikrarlı bir şekilde çalışması sağlanır.

Geliştirme kartları ise mikrodenetleyiciler veya diğer kontrol bileşenlerini içeren platformlardır ve motor sürücülerinin kontrolünü gerçekleştirmek için kullanılırlar. Bu kartlar, yazılım tabanlı motor kontrol algoritmalarının geliştirilmesine olanak sağlamanın yanı sıra motor sürücülerinin test edilmesi ve optimize edilmesini de sağlarlar. Bu bağlamda, geliştirme kartları motor sürücülerinin kontrolünü sağlayarak motor kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve test edilmesinde önemli bir rol oynarlar.

Hisar, elektrikli araçlarda bulunan SMSM'ler için geniş aralıklarda doğrusal olmayan hız yörüngeleri üretme yeteneğine sahip olduğu bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu hız yörüngelerini izlemek üzere bir denetleyici tasarlanmıştır. Denetleyici, içerisinde çift çekirdekli 32 bit kayar noktalı işlemci barındıran ve "LAUNCHXL-F28379D" geliştirme kartını kullanmıştır. Çalışma kapsamında, S eğrisi biçiminde bir hız profili oluşturulmuş ve AYK tekniği kullanılarak, hem vuruşu oluşturmadan bileşenlerin ömrü uzatılmış hem de konfor etkisi iyileştirilmiştir. Farklı yörünge planları üzerinde kontrol yöntemi uygulanarak, motorun performans sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir [22].



Şekil 7. SMSM motor sürücülerin genel şablonu

SMSM'lerde sistemin arıza durumunda devam edebilmesi için etkili bir hata toleransı tekniği geliştirmek önemlidir. Bu bağlamda, hata toleransının etkili bir şekilde uygulanabilmesi için hata yerlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Bu nedenle, hata toleransı ve hata tespiti birbirleriyle bağlantılı iki prosedürdür. Hatalar genellikle elektrik ve mekanik olmak üzere iki kategoride değerlendirilir. Wangguang ve ekibinin yaptığı çalışmada, motor hatalarının %90'ının elektriksel hatalar olduğu belirlenmiştir. Normal çalışma sırasında, iki tahrik sistemi toplam gücü sağlar ve her evirici modülü nominal gücün yarısını temin eder. Bir evirici de kısa devre ya da açık devre hatası meydana geldiğinde, arızalı evirici izole edilir ve vektör kontrolü ile sağlam evirici, SMSM için güç sağlamaya devam eder, ancak nominal güç normalin yarısına düşer [23]. SMSM'lerde döngü verimliliğini artırmak ve potansiyel arızaları önlemek için elektrikli motorların termal davranışlarını anlamak önemlidir. Paramoji ve Pyati'nin çalışmasında, elektrikli motor sensör verilerinin çeşitli yük koşullarında analizi yapılarak çeşitli parametreler arasında korelasyon matrisi oluşturulmuştur. Bu sayede stator ve rotor sıcaklıkları bağımlı parametreler aracılığıyla belirlenmiştir. Hiperparametre ayarlama tekniğine sahip Derin Öğrenme Modelleri, %95 regresyon puanı olarak başarı elde etmiştir [24].

2. SONUÇLAR

Bu makalede, SMSM tasarımı ve kontrol yöntemleri üzerine yapılan çalışmalara genel bir bakış sunulmuştur. SMSM'ler, elektrik motoru teknolojisindeki önemli bir bileşen olarak sürekli olarak geliştirilmektedir. Yüksek verimlilikleri, düşük bakım gereksinimleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler.

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, SMSM'lerin tasarımında ve kontrolünde bir dizi yenilikçi yaklaşım ve teknik önerilmiştir. Bu çalışmalar, motorların verimliliğini artırmak, kontrol hassasiyetini iyileştirmek ve sistem dayanıklılığını sağlamak için önemli adımlar atmaktadır. Ayrıca, motorların enerji verimliliği sınıflandırılması ve motorların endüstriyel uygulamadaki kullanımını da ele alınmıştır. Bu sınıflandırma, motorların farklı verim seviyelerine göre sınıflandırılmasını ve enerji tüketiminin optimizasyonunu sağlamaktadır.

Sonuç olarak, SMSM'lerin tasarımı ve kontrolü alanındaki çalışmalar, elektrik motoru teknolojisinin sürekli olarak gelişmesine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmaların sonuçları, elektrikli araçlar, endüstriyel makineler ve diğer uygulamalarda daha verimli ve sürdürülebilir enerji kullanımını desteklemektedir. Gelecekteki araştırmaların, SMSM'lerin performansını daha da artırmak ve endüstriyel uygulamalardaki kullanımını genişletmek için odaklanması beklenmektedir.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] K. Yılmaz And T. Dindar, "Radyal Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Vuruntu Momentinin Azaltılması," *Uluslararası Mühendislik Araştırma Ve Geliştirme Dergisi*, Apr. 2023, Doi: 10.29137/Umagd.1235442.
- [2] Soyaslan M, "Asansör Tahrik Sistemleri İçin Dıştan Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Bir Senkron Motor Tasarımı," Doktora Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, 2020.
- [3] E. A. Gülçin, "Tek Fazlı Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı," Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, 2018.
- [4] M. Mutluer, "Dış Rotorlu Yüzeve Monte Pmsm İçin Vuruntu Momentinin İncelenmesi," *European Journal Of Science And Technology*, Apr. 2021, Doi: 10.31590/Ejosat.898903.
- [5] Çiftçi F, "Yerli Ve Milli Yüksek Hızlı Oluksuz Sabit Mıknatıslı Senkron Elektrik Motor Tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2021
- [6] H. K. Araz and M. Yılmaz, "Design procedure and implementation of a high-efficiency PMSM with reduced magnet-mass and torque-ripple for electric vehicles," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 35, no. 2, pp. 1089–1109, 2020, doi: 10.17341/gazimmfd.458515.
- [7] H. Ahn, H. Park, C. Kim, and H. Lee, "A Review of State-of-the-art Techniques for PMSM Parameter Identification," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 1177–1187, May 2020, doi: 10.1007/s42835-020-00398-6.
- [8] A. K. Putri, M. Nell, M. Hombitzer, D. Franck and K. Hameyer, "On the Design of a PMSM Rotor with Ferrite Magnets to Substitute a Rare Earth Permanent Magnet System," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018, pp. 304-310, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506682.
- [9] Durak Gedik B, "İe4 Verim Sınıfı Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı Burcu Durak Gedik," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- [10] Zöhra B, "Şebeke Kalkışlı Radyal Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı Ve Prototip Üretimi," Doktora Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, 2019.
- [11] Oğuz A. H, "Elektrikli Araçlar İçin Gömülü Sürekli Mıknatıslı Senkron Makine Tasarımının En Uygunlaştırılmasına Katkıları," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- [12] Musayev A, "Elektrikli Araç Tahrik Sistemleri İçin Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2021.
- [13] S. Shaposhnikov "PMSM Vector Control Techniques – a Survey" (Russia), Institute of Electrical and Electronics Engineers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, and Institute of Electrical and Electronics Engineers., Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) : January 29 - February 01, 2018, St. Petersburg and Moscow, Russia.
- [14] Gupta U. Yadav D.K. Panchauli D. "Field Oriented Control of PMSM during Regenerative Braking" Nagarjuna College of Engineering and Technology and Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT) : Bangalore, India, Oct 18-20, 2019.
- [15] S.Zossak M.Musak M.Stulrajter P.Makys "Challenges of Sensorless Controlled High-speed PMSM Drives" IEEE Industry Applications Society, IEEE Power Electronics Society, IEEE Industrial Electronics Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019 IEEE 10th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED).
- [16] S. Büyükabali, "Düşük Hız Bölgesi İçin Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (Pmsm) Kontrolü." Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2021
- [17] V. Sanjuan L.Flores Y. Mendoza "A Sensorless Passivity-based Control for PMSM" Universidad de las Américas Puebla and Institute of Electrical and Electronics Engineers., 2018 International Conference on Electronics, Communications and Computers : 28th International Conference on Electronics, Communications and Computers CONIELECOMP : Universidad de las Américas Puebla, 21-23 Feb 2018.
- [18] A. A. Adam and A. Elnady, "Adaptive steering-based HDTC algorithm for PMSM," *Asian J Control*, vol. 23, no. 1, pp. 209–227, Jan. 2021, doi: 10.1002/asjc.2229.
- [19] A. Akpunar, "Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar İçin Runge-Kutta Model Öngörülü Kontrol Yaklaşımı" Doktora Tezi Ağustos, 2020
- [20] X.Ding J.Su J.Lai "A Position Estimate Method For PMSM" China Power Supply Society, IEEE Power Electronics Society, Power Sources Manufacturers Association, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC) : conference proceedings : Crowne Plaza Shenzhen Longgang City Centre, Shenzhen, China, November 4-7, 2018.

- [21] R. Demir, "Speed-sensorless Predictive Current Controlled PMSM Drive With Adaptive Filtering-based MRAS Speed Estimators," *Int J Control Autom Syst*, vol. 21, no. 8, pp. 2577–2586, Aug. 2023, doi: 10.1007/s12555-022-0698-z.
- [22] Ç. Hisar "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar İçin Hız Yörüngesi Denetleyicisi Tasarımı" Yüksek Lisans Tezi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [23] Z. Wang, D. Wang, Y. Li, and M. Li, "A Review on Fault-Tolerant Control of PMSM." School of electrical engineering, University of Jinan, Jinan 250022, Chinese Automation Congress (CAC), 2017
- [24] S. L. Paramoji And B. N. Pyati, "Application Of AI To Predict Pmsm Temperature," In *2021 Ieee Transportation Electrification Conference, Itec-India 2021*, Institute Of Electrical And Electronics Engineers Inc., 2021. Doi: 10.1109/Itec-India53713.2021.9932484.