

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Low-Cost Alan Yönlendirmeli Kontrolü

Mehmet Emin SALLAHOĞLU^{1*}, Hulusi Karaca²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Türkiye

²Elektrik Elektronik Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Türkiye

*(m.emin.sallahoglu@gmail.com) Başlıca yazarın mail adresi

(Received: 18 May 2025, Accepted: 20 May 2025)

ATIF/REFERENCE: Sallahoglu, M. E. & Karaca, H. (2025). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Low-Cost Alan Yönlendirmeli Kontrolü. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(5), 304-311.

Özet – Bu çalışma, sabit mıknatıslı senkron motorların düşük hız ve değişken yük koşullarında alan yönlendirmeli kontrol yöntemi (FOC) için low-cost işlemcili bir çözümünü ele almaktadır. Uygulama kapsamında, STM32 tabanlı bir mikrodenetleyici üzerinde geliştirilen gömülü kontrol algoritması önerilmiştir. Rotor konumu için sin/cos enkoder, akım ölçümü için Hall etkili sensörler ve çıkış için entegre IPM modülü tercih edilmiştir. Sistem hem laboratuvar koşullarında yüksüz olarak hem de bir asansör düzeneğine entegre edilerek 600 kg, 800 kg ve 1000 kg gibi farklı yük seviyeleri altında test edilmiştir. Testlerde üç farklı hız seviyesi (160 rpm, 110 rpm, 50 rpm) denenmiş; yön geçişleri, frenleme süreleri, akım tepkileri ve koruma mekanizmaları gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen uygulama sonucunda, sistemin yük geçişlerinde kararlılığını koruduğu, PI denetleyicinin sapmaları kısa sürede düzelttiği ve koruma modunun yüksek akım senaryolarında başarıyla devreye girdiği doğrulanmıştır. PWM üretimi, geri besleme doğruluğu ve kullanıcı arayüz etkileşimi dahil olmak üzere tüm birimler entegre biçimde çalışmıştır. Elde edilen bulgular, FOC yönteminin sadece teorik düzeyde değil, gerçek zamanlı ve düşük devirli endüstriyel uygulamalarda da etkin biçimde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Sabit Mıknatıslı Senkron Motor, Alan Yönlendirmeli Kontrol, PI Denetleyici, Gömülü Sistem, Asansör Uygulamaları, Düşük Hızlı Sürüş.

I. GİRİŞ

Sabit mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), yüksek verimlilikleri, kompakt yapıları ve sessiz çalışmaları sayesinde endüstride hızla yaygınlaşmaktadır [1], [2]. Bu motorlar, özellikle hassas hareket kontrolü, enerji tasarrufu ve bakım gereksiniminin düşük olması gibi avantajları nedeniyle elektrikli araçlar, robotik sistemler, asansörler ve CNC uygulamalarında tercih edilmektedir [3]. SMSM'lerin kontrolü, klasik yöntemlerden farklı olarak daha karmaşık algoritmalar gerektirmektedir. Bunun başlıca nedeni, motorun hem torkunun hem de manyetik akısının birbirinden bağımsız şekilde yönetilme ihtiyacıdır [4].

Bu gereksinim doğrultusunda en çok tercih edilen yöntemlerden biri, vektör kontrol tekniği olan Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control – FOC) yöntemidir. FOC ile motor akımları, rotorun manyetik alanına göre dönüştürülerek d-q eksenlerinde kontrol edilmekte, bu sayede hem dinamik hem de statik performans artırılmaktadır [5]. Ancak literatürdeki birçok uygulama, bu yöntemi yalnızca

simülasyon ortamında ya da yüksek devirli testlerde değerlendirmiştir [6]. Düşük hız ve yüksek yük altındaki saha uygulamalarında hem kontrol kararlılığı hem de sistemin koruma tepkileri hakkında sınırlı sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır.

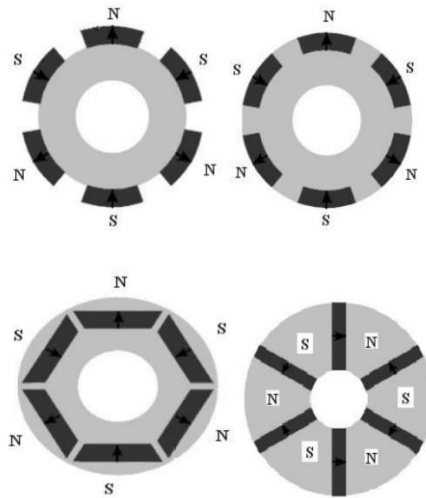
Bu çalışmada, sabit mıknatıslı senkron motorların düşük hız ve değişken yük koşullarında FOC tabanlı bir gömülü kontrol sistemi ile gerçek zamanlı olarak sürülmesi hedeflenmiştir. Sistem, gerçek bir asansör düzenğinde, dört farklı motor ve üç farklı yük senaryosu altında test edilerek değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, FOC yönteminin düşük devirli uygulamalardaki geçerliliğini sahaya dayalı bir yapıda ortaya koymakta; aynı zamanda donanım entegre edilmiş bir kontrolörün kararlılık, güvenlik ve izlenebilirlik açılarından performansını göstermektedir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

II. I. Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

Sabit mıknatıslı senkron motorlar (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM), rotorlarında sabit mıknatıslar bulunan ve senkron hızda dönen elektrik makineleridir. Bu motorlar, yüksek verimlilik, kompakt yapı ve sessiz çalışma gibi avantajlarıyla özellikle elektrikli araçlar, hassas sürücüler ve robotik uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır [1], [2].

PMSM'ler, klasik senkron motorlardan farklı olarak rotor akımına ihtiyaç duymaz. Bu yapı sayesinde daha düşük ısı üretimi ve daha az enerji kaybı ile çalışırlar [3]. Mıknatısların yüzeye yerleştirildiği SPMSM (Surface PMSM) ve gömülü olarak yerleştirildiği IPMSM (Interior PMSM) olmak üzere iki ana tipi vardır. IPMSM'ler, relüktans momentinden de faydalanabildikleri için özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilir [7]. Şekil 1'de SPMSM ve IPMSM örnekleri verilmiştir.



Şekil 1 SPMSM ve IPMSM örnekleri

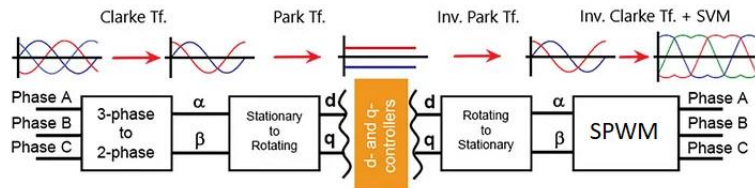
Bu motorların kontrolü oldukça hassas ve gelişmiş algoritmalar gerektirir. Özellikle Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control - FOC) yöntemi, sabit mıknatıslı senkron motorlarda en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. FOC sayesinde stator akımları d-q koordinat sistemine dönüştürülerek tork ve akı bileşenleri birbirinden bağımsız kontrol edilebilir [4]. Bu yöntem ilk kez Blaschke tarafından AC motorlar için önerilmiş ve sonradan PMSM'ler için uyarlanmıştır [5].

Modern sürücü sistemlerinde, PMSM'lerin kontrolünde çoğunlukla PI (Proportional-Integral) akım denetleyicileri kullanılmakta ve motorun tork-tepki hızı artırılmaktadır. Ayrıca, yüksek performanslı uygulamalarda vektör kontrol ve doğrudan tork kontrolü (DTC) gibi alternatif yöntemler de değerlendirilmekte, bu yöntemlerin avantaj-dezavantaj karşılaştırmaları yapılmaktadır [8], [9].

II. II. Alan Yönlendirmeli Kontrol Yöntemi

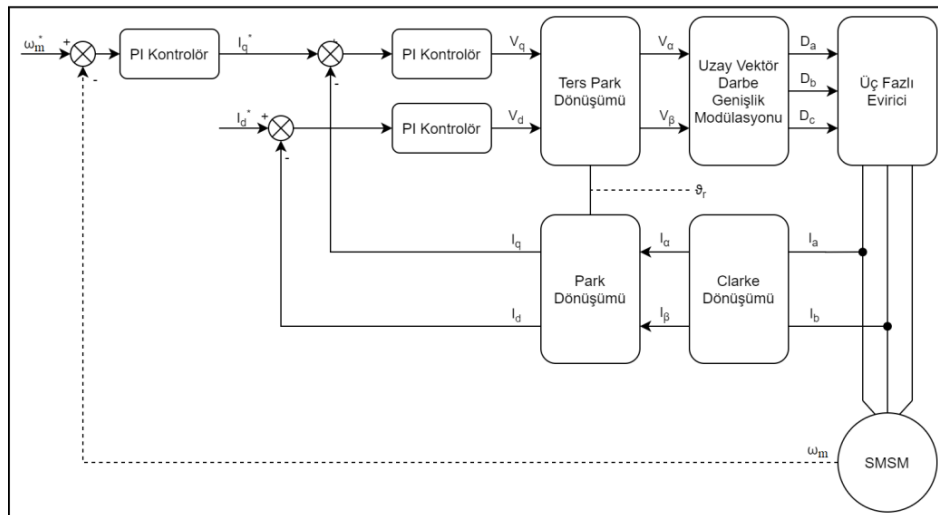
Sabit mıknatıslı senkron motorların (PMSM) etkin ve hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi için, klasik skaler kontrol tekniklerinin ötesine geçilmesi gerekir. Bu noktada, Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control - FOC) yöntemi, hem dinamik hem de statik performansı optimize etmek amacıyla geliştirilmiş güçlü bir vektör kontrol tekniğidir [4].

FOC tekniğinin temel amacı, PMSM'nin üç fazlı zaman domenindeki stator akımlarını, rotor manyetik alanıyla hizalanmış olan d-q (doğru-çapraz) eksenlerine dönüştürerek kontrol etmektir. Bu dönüşüm sayesinde motorun tork (q-ekseni) ve akı (d-ekseni) bileşenleri birbirinden bağımsız olarak yönetilebilir. Bu yapı, doğru akım motorlarındaki ayrı ayrı tork ve alan kontrolünün senkron motorlara uygulanmasına imkân tanır [5]. FOC tekniğinin matematiksel blok şeması Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2 FOC tekniğinin matematiksel blok şeması

Blaschke tarafından 1971 yılında geliştirilen bu yöntem, ilk olarak asenkron motorlarda uygulanmış ve daha sonra PMSM'lere uyarlanmıştır [5]. FOC, Clarke ve Park dönüşümleri yardımıyla üç fazlı sistemden iki eksenli (d-q) sistemine geçişi sağlar. Bu dönüşümün ardından elde edilen akı ve tork bileşenleri, PI (Proportional-Integral) denetleyiciler yardımıyla kontrol edilir ve tekrar üç fazlı sisteme dönüştürülerek inverter üzerinden motora uygulanır [4], [8]. Bu yöntemin kontrol şeması Şekil 3' de verilmiştir.



Şekil 3 FOC yönteminin kontrol şeması

FOC'nin en büyük avantajlarından biri, tork kontrolünü yüksek doğrulukla ve ani yük değişimlerine hızlı tepki vererek gerçekleştirebilmesidir. Bu sayede özellikle hassas pozisyonlama ve hız denetimi gerektiren uygulamalarda yüksek performans sağlar [9]. Bununla birlikte, FOC sistemleri yüksek işlem gücü ve hassas sensörler (örneğin enkoder veya resolver) gerektirdiğinden dolayı donanım karmaşıklığı artar.

Son yıllarda, sistem maliyetini düşürmek ve güvenilirliği artırmak amacıyla sensörsüz FOC yöntemleri geliştirilmektedir. Bu yöntemlerde rotor konumu ve hızı tahmin algoritmaları (örneğin Kayma Gözlemcisi, Uzatılmış Kalmana Filtresi) kullanılarak geri besleme ihtiyacı ortadan kaldırılır [9].

II. III. PI Denetleyici

Alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yönteminde motorun tork ve akı bileşenlerini hassas bir şekilde kontrol etmek için kapalı çevrim akım ve hız kontrolörleri kullanılır. Bu kontrolörlerin en yaygın biçimi, Proportional-Integral (PI) denetleyicilerdir. PI denetleyiciler, hata sinyali (referans ile ölçülen değer arasındaki fark) orantılı ve integral terimleriyle müdahale ederek sistemi hızlı ve kararlı bir şekilde istenen değere yönlendirir [10].

FOC yapısında, genellikle iki ayrı PI kontrol döngüsü bulunur: biri q-ekseni (tork) için, diğeri d-ekseni (akı) için. Her iki eksenindeki PI denetleyici, referans akımı ile ölçülen akım arasındaki farkı minimize eder. Bu işlem, inverterin PWM sinyalleri üzerinden motor sargılarına uygulanacak gerilimi belirler [4], [8].

PI denetleyicilerin avantajı, matematiksel olarak sade olmaları ve dijital sistemlerde kolaylıkla uygulanabilmeleridir. Ancak uygun kazanç parametrelerinin belirlenmesi, sistemin dinamik performansı açısından kritik önem taşır. Aksi takdirde sistem ya yavaş tepki verir ya da kararsız davranış sergileyebilir [11].

Bazı uygulamalarda, PI denetleyicilerin yanına ek anti-windup yapıları veya besleme ileri (feed-forward) terimleri de eklenerek denetleyici performansı artırılır. Bu tür yapılar, özellikle doyumluk altında daha kararlı bir kontrol sağlar [12].

Son yıllarda PI kontrolünün yerine bulanık mantık, adaptif denetim veya yapay sinir ağı temelli yöntemlerin kullanıldığı örnekler artmakla birlikte, PI denetleyiciler hâlâ endüstriyel uygulamalarda standart olarak kullanılmaktadır [9], [11].

II. IV. Uygulama

Bu çalışmada geliştirilen alan yönlendirmeli kontrol sistemi, sabit mıknatıslı senkron motorların (SMSM) endüstriyel uygulamalarda güvenli ve yüksek performanslı biçimde sürülmesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Sistem hem donanım hem de yazılım düzeyinde modüler, izoleli ve sahada uygulanabilir bir yapıda geliştirilmiştir. FOC algoritmasının etkinliği, hassas ölçüm sistemleri, güçlü sürücü donanımı ve kullanıcı dostu arayüz desteğiyle desteklenmiştir.

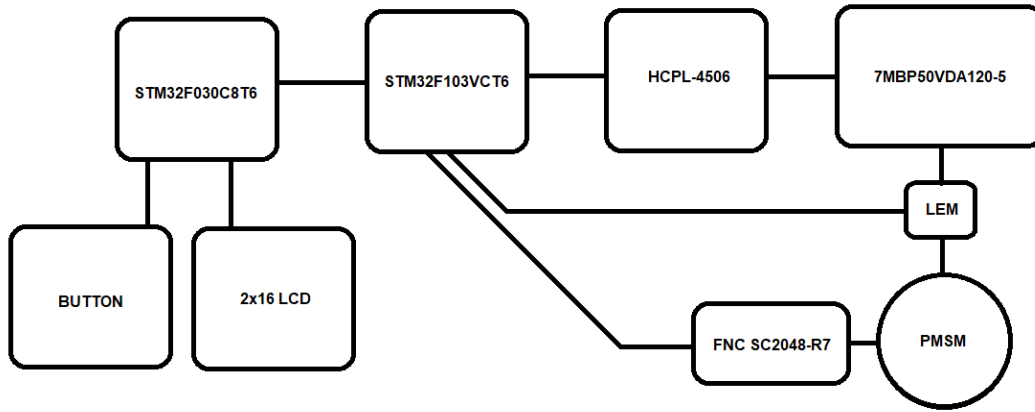
II. IV. I Donanım Bileşenleri

Kontrol sistemi; rotor konum algılayıcıları, üç fazlı akım ve gerilim ölçüm devreleri, akıllı güç modülü (IPM), izolasyon sistemleri ve kullanıcı etkileşim birimlerinden oluşmaktadır. Sistemin ana işlemcisi olarak STM32F103VCT6 mikrodenetleyicisi seçilmiş, PWM sinyalleri bu birim tarafından üretilmiştir.

Rotor pozisyonunun hassas şekilde izlenebilmesi amacıyla, sin/cos çıkışlara sahip FNC SC2048-R7 model enkoder tercih edilmiştir. Bu enkoderden alınan analog sinyaller MCP6002 opamplar yardımıyla filtrelenmiş, dijital çıkışlar ise karşılaştırıcılar ile eşiğe dayalı sinyallere dönüştürülerek mikrodenetleyiciye uygulanmıştır.

Üç fazlı akım ölçümü için LEM HMSR Hall etkili sensörler kullanılmıştır. Bu sensörlerden alınan analog çıkışlar, RC filtre ve kazanç ayarlama devrelerinden geçirilmiş, aşırı gerilim koruması BAV99 diyotları ile sağlanmıştır. Gerilim ölçümleri ise direnç bölücü üzerinden HCPL-7840 izolasyonlu amplifikatöre uygulanmış ve sonrasında ADC seviyesine uygun hale getirilmiştir.

Motor sürme katı, Fuji Electric üretimi 7MBP50VDA120-50 model entegre güç modülü (IPM) ile oluşturulmuştur. PWM sinyalleri, kontrol katından HCPL-4506 optokuplörlerle izole edilerek IPM'ye aktarılmış; hata ve alarm sinyalleri ise PC817 optokuplörlerle mikrodenetleyiciye yönlendirilmiştir. Her bir faz için ayrı referans gerilimi gereksinimi nedeniyle beş ayrı 15V izoleli çıkış sağlanmıştır. Bu çıkışlar mini transformatör ve 7815 regülatör yapısıyla elde edilmiştir. Donanım bileşenlerinin blok şeması Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4 Donanım bileşenleri blok şeması

II. IV. II Gömülü Yazılım ve Kontrol Algoritması

Sistem kontrol algoritması olarak FOC yöntemi uygulanmıştır. Yazılım, STM32F103VCT6 mikrodeneleyicisi üzerinde gömülü C dili kullanılarak, Keil μ Vision geliştirme ortamında yazılmıştır. FOC algoritması; faz akımlarının örneklenmesi, Clarke ve Park dönüşümleri, PI denetleyici ile d-q bileşenlerinin işlenmesi, ters dönüşümler ve SVPWM üretiminden oluşmaktadır. Tüm bu işlemler sabit zamanlı bir timer kesmesi ile periyodik olarak yürütülmektedir.

Ayrıca, aşırı akım veya rotor pozisyon kaybı gibi durumlar kontrol algoritması sırasında sürekli izlenmekte ve gerekli durumlarda PWM çıkışları devre dışı bırakılarak sistem güvenliği sağlanmaktadır.

II. IV. III Kullanıcı Arayüzü ve Parametre Yönetimi

Kullanıcı etkileşimini sağlamak amacıyla, STM32F030C8T6 mikrodeneleyicisi kullanılarak bağımsız bir kullanıcı arayüzü modülü tasarlanmıştır. Bu birim, sistem parametrelerinin görüntülenmesi, kontrol komutlarının verilmesi ve hata durumlarının yönetilmesi görevlerini üstlenmektedir. Arayüz ile ana kontrolcü arasında UART tabanlı Modbus RTU haberleşmesi sağlanmıştır.

Arayüz, LCD ekran ve yön butonları ile donatılmıştır. Kullanıcı tarafından yapılan değişiklikler geçici olarak RAM üzerinde tutulmakta, onaylandığında EEPROM'a yazılmaktadır. Bu sayede sistem parametreleri (PI katsayıları, akım sınırı, rampa süresi vb.) sahada güncellenebilmekte ve sistem yeniden başlatıldığında bu ayarlar korunmaktadır.

FreeRTOS işletim sistemi altında yapılandırılmış arayüz, haberleşme, ekran güncellemeleri, buton işlemleri ve EEPROM yazımı gibi görevleri bağımsız olarak yürütmektedir. Böylece sistem kararlılığı ve kullanıcı deneyimi aynı anda sağlanmaktadır.

II. V. Testler

Geliştirilen alan yönlendirmeli kontrol sistemi hem laboratuvar ortamında yüksüz hem de gerçek kullanım senaryosuna uygun şekilde yük altında test edilmiştir. Testler, sistemin dinamik performansını, kontrol algoritmasının kararlılığını ve donanım-yazılım bütünlüğünü değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Uygulama iki ayrı ortamda yürütülmüştür: İlki, motorların serbest çalıştığı laboratuvar koşullarında yapılan yüksüz testler; ikincisi ise motorların asansör kabinine bağlı olarak gerçek yükler altında çalıştırıldığı saha testleridir. Deneylerde farklı güç seviyelerine sahip dört adet sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) kullanılmıştır. Tüm motorlar 160 rpm nominal hızda çalıştırılmış, testler sırasında ayrıca yaklaşık 110 rpm ve 50 rpm gibi daha düşük hız seviyeleri de denenmiştir. Gerçek yük testlerinde, motorlara bağlı asansör kabinine sırasıyla 600 kg, 800 kg ve 1000 kg ağırlıklar yerleştirilerek farklı moment koşulları oluşturulmuştur. Her bir testte motorlar her iki yönde çalıştırılmış; yön değişimlerinde sistemin mekanik fren kontrolü, rotor konum algılama doğruluğu, akım geçici tepkisi ve PI denetleyici kararlılığı gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek akım durumlarında sistemin güvenlik sınırlarına ulaşıldığında PWM çıkışını keserek kendini güvenli moda alması sağlanmış; tüm bu testler,

sistemin donanım ve yazılım güvenliğinin pratik koşullarda doğrulandığını göstermiştir. Ölçüm sistemleri, kullanıcı arayüzü ve kontrol algoritması gerçek zamanlı olarak gözlemlenmiş ve sistem, endüstriyel uygulamalara hazır biçimde yapılandırılmıştır. Test sistemlerinde kullanılan motorların özellikleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Motor özellikleri

Motor Markası	Güç (kW)	Gerilim (V)	Akım (A)	Devir (rpm)	Kutuplar	Frekans (Hz)
Akiş	2.9	360	7.8	160	20	26.66
Akiş	4.9	380	13.0	160	20	26.53
Volare	2.97	380	9.8	160	24	32.00
Volare	4.94	360	14.2	160	24	32.00

III. BULGULAR

Gerçekleştirilen testler sonucunda sistemin temel sürüş, yön değişimi ve yük altı davranışları gözlemlenmiştir. Motor, her üç hız seviyesinde (160 rpm, 110 rpm, 50 rpm) stabil biçimde sürülmüş, yön geçişlerinde kontrol kararsızlığı veya mekanik sarsıntı izlenmemiştir. 160 rpm’de yön değişimi sonrası nominal hıza ulaşma süresi ortalama 3.2 saniye, 110 rpm için 2.1 saniye, 50 rpm için 1.4 saniye olarak ölçülmüştür. Fren mekanizması yön sinyaliyle senkron şekilde çalışmış, fren açılma süresi yaklaşık 3 saniye, kapanma süresi ise 2.7 saniye olarak kaydedilmiştir.

Yük testlerinde kabine 600 kg, 800 kg ve 1000 kg ağırlıklar yerleştirilmiş; artan yüklerle birlikte motor akımının sırasıyla 9.6 A, 11.3 A ve 13.9 A seviyelerine ulaştığı tespit edilmiştir. 1000 kg yük altında sistemin tanımlı akım sınırına ulaşması durumunda PWM çıkışları otomatik olarak devre dışı bırakılmış, bu koruma modunda sistemin tekrar çalıştırılabilmesi için hata sıfırlama komutu gerekmiştir. PI denetleyici yapısı, d-ekseni ve q-ekseni akım hatalarını ± 0.4 A sınırında tutmuş, geçici yük dalgalanmalarında sapmalar oluşsa da sistem kısa sürede dengeye ulaşmıştır.

Rotor pozisyonu, 2048 pulse/rev çözünürlüklü enkoder aracılığıyla izlenmiş ve testler boyunca herhangi bir konum sapması ya da izleme hatası gözlenmemiştir. PWM üretimi, SVPWM algoritması ile her çevrimde istikrarlı biçimde çalışmış, PWM darbe sürelerinde salınım veya zamanlama hatasına rastlanmamıştır. Uygulama boyunca toplam 7 PWM kesme olayı gerçekleşmiş, bunların büyük çoğunluğu yüksek yük altında gözlenmiş ve sistemin koruma algoritmaları bu durumlarda başarıyla devreye girmiştir.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada geliştirilen alan yönlendirmeli kontrol sistemi, sabit mıknatıslı senkron motorların düşük hız ve değişken yük koşullarında kararlı biçimde sürülebildiğini göstermiştir. Literatürde sabit mıknatıslı motorlara yönelik birçok kontrol yaklaşımı, özellikle yüksek hız ve düşük yük senaryolarında simülasyon bazlı olarak ele alınmıştır [4], [5]. Bu bağlamda, sistemin 50–160 rpm gibi düşük devirli çalışmalarda stabil performans göstermesi, alan yönlendirmeli kontrol yönteminin yavaş ve hassas uygulamalarda da etkinliğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle asansör, vinç ve robotik sistemlerde kullanılabilirlik açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

Literatürde sıklıkla tercih edilen sensörsüz kontrol yaklaşımları, rotor pozisyonunu çeşitli tahmin algoritmalarıyla elde etmeyi hedeflerken, bu çalışmada yüksek çözünürlüklü enkoder ile doğrudan geri besleme yapılması sayesinde rotor konumu ± 2 elektriksel derece hassasiyetle izlenebilmiştir. Bu, düşük

hız bölgelerinde konum tahmininde yaşanabilecek sapmaların önüne geçilmesini sağlamış ve motorun daha kararlı bir şekilde sürülmesine imkân tanımıştır. Bu yönüyle çalışma, sensörsüz sistemlerin karşılaştığı düşük devir zorluklarını bertaraf eden bir çözüm sunmaktadır.

Klasik skaler kontrol yöntemlerinde akı ve tork bileşenleri ayrı ayrı kontrol edilemediği için ani yük geçişlerinde sistemde tork dalgalanması ya da geçici dengesizlikler gözlenebilir. Bu çalışmada uygulanan alan yönlendirmeli kontrol algoritması, d-ekseni ve q-ekseni bileşenlerini bağımsız şekilde yönettiğinden dolayı hem yük geçişlerinde hem de yön değişimlerinde motorun dengeli çalışması sağlanabilmiştir. Literatürde bildirilen benzer PI denetleyici tabanlı sistemlerde genellikle $\pm 5\%$ 'lik hata payı raporlanırken, bu uygulamada q-ekseni akım hatasının ± 0.4 A seviyelerinde sınırlandığı gözlemlenmiştir [9], [11].

Yine benzer çalışmalarda yük testleri çoğunlukla laboratuvar tipi test yükleriyle sınırlandırılmışken, bu çalışmada gerçek bir kabin yapısı üzerinde 600 kg, 800 kg ve 1000 kg gibi değerlerle yapılan uygulamalar sayesinde daha gerçekçi performans verilerine ulaşılmıştır. Bu sayede elde edilen bulgular, sadece akademik düzeyde değil, aynı zamanda saha uygulamalarında da referans alınabilecek niteliktedir. PWM kesme, hata sıfırlama, frenleme gecikmeleri gibi detaylı sistem tepkilerinin belgelenmiş olması, bu çalışmayı uygulama temelli literatür içinde anlamlı bir konuma yerleştirmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma; sensörlü yapı kullanımı, düşük hız başarımı, gerçek yük test ortamı ve entegre koruma algoritmaları ile sabit mıknatıslı senkron motorların alan yönlendirmeli kontrolüne ilişkin uygulamalı literatüre hem teknik hem de sahaya yönelik katkı sağlamıştır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sabit mıknatıslı senkron motorların alan yönlendirmeli kontrol yöntemi ile düşük hız ve değişken yük koşullarında kararlı biçimde sürülmesi amaçlanmıştır. Sistem, STM32 tabanlı bir mikrodenetleyici ile gerçek zamanlı olarak tasarlanmış; sin/cos enkoder, Hall etkili akım sensörleri ve IPM tabanlı güç sürücü devresi ile entegre bir kontrol yapısı oluşturulmuştur.

Gerçekleştirilen uygulama sonucunda; motorların farklı hız seviyelerinde yön geçişleri sırasında kararlılığını koruduğu, yük altındaki akım tepkilerinin izlenebilir şekilde kontrol edildiği ve sistemin tanımlı sınır koşullarda güvenli moda geçebildiği doğrulanmıştır. FOC algoritması, PI denetleyici yapısıyla birlikte hem akı hem de tork bileşenlerini ayrı ayrı kontrol etmiş; sistemin yönlendirme, durdurma, frenleme ve hata yönetimi gibi temel fonksiyonları entegre biçimde çalıştırılmıştır.

Yapılan testler, literatürde teorik olarak tanımlanan alan yönlendirmeli kontrol yapısının, düşük devirli ve yük değişkenliği yüksek olan uygulamalarda da başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, sabit mıknatıslı senkron motorların endüstriyel uygulamalarda etkin ve güvenilir bir şekilde kontrol edilmesine katkı sunmakta; aynı zamanda donanım temelli bir uygulama olarak sahaya doğrudan aktarılabilir çözüm örneği oluşturmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, yazarın yüksek lisans tezinin bir parçası olarak yürütülmüştür. Yazar, danışmanı Doç. Dr. Hulusi Karaca'ya çalışmanın her aşamasındaki değerli katkıları ve akademik rehberliği için teşekkür eder. Ayrıca biricik eşim Lütfiye Sallahoğlu'na tüm destekleri için teşekkür edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Chiasson, J.N., *Modeling and High-Performance Control of Electric Machines*, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Hendershot, J.R., & Miller, T.J.E., *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Oxford Science Publications, 1994.
- [3] Krause, P.C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S.D., *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, 1995.
- [4] Akin, B., & Bhardwaj, M., *Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors*, Texas Instruments, 2013.

- [5] Blaschke, F., "A New Method for the Structural Decoupling of AC Induction Machines," IFAC Conference Record, Düsseldorf, Germany, 1971.
- [6] S. Dwari, L. Parsa, "An Optimal Control Technique for PM Synchronous Motors Based on Field Orientation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 7, pp. 2446-2455, July 2009.
- [7] Gross, J.H.H., Hamann, J., & Wiegartner, G., *Electrical Feed Drives in Automation: Basics, Computation, Dimensioning*, Siemens AG, 2001.
- [8] Chiasson, J.N., *Modeling and High-Performance Control of Electric Machines*, John Wiley & Sons, 2005.
- [9] Mohd, M., Reaz, M., Rahman, M., & Ali, M., "Hardware Prototyping of an Intelligent Current dq PI Controller for FOC PMSM Drive," 6th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), Dhaka, Bangladesh, 2010.
- [10] Krause, P.C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S.D., *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, 1995.
- [11] Casadei, D., Serra, G., & Tani, A., "FOC and DTC: Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, no. 5, pp. 779–787, Sep. 2002.
- [12] Chiasson, J.N., *Modeling and High-Performance Control of Electric Machines*, John Wiley & Sons, 2005.