

Asenkron motorun stator q-eksen gerilimini kullanan alan yönlendirmeli vektör kontrollü gerilim sensörü kullanmadan sensörsüz hız tahmini

Stator q-axis voltage error based sensorless speed estimation of field oriented vector controlled induction motor without using voltage transducer

Sadık ÖZDEMİR^{1*} 

¹Elektrik-Enerji Bölümü, Denizli Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
sadikozdemir@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 01.11.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 27.04.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 06.04.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.68252
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmanın amacı, asenkron motorlar (ASM) için sensörsüz, dolaylı, alan yönlendirmeli vektör kontrollü bir hız tahmin yönteminin geliştirilmesidir. Önerilen yöntem, yeni bir Model referans adaptif sistemdir (MRAS) ve motorun hızını hesaplamak için sadece kararlı hal alan yönlendirme durumunda stator q-eksen gerilim denklemine ihtiyaç duyar. Hesaplanan gerilim doğrudan kontrol algoritması içerisinde üretilen q-ekseni referans gerilimi ile karşılaştırıldığından, bu yöntem bir referans modele ihtiyaç duymaz, ayrıca gerilim sensörü gereksinimini ortadan kaldırır. Bu basit denklemde herhangi bir rotor parametresi yoktur ve bu sistemin rotor parametrelerinin değişimine karşı bağımsızlık kazandırır. Dahası, bu basitleştirilmiş hesaplama akı tahmini gerekliliğini ortadan kaldırdığı için yöntem saf entegrasyon sorunlarına karşı daha az duyarlıdır. Böylece önerilen MRAS çok düşük ve sıfır hızlarda oldukça doğru hız tahmini yapabilir. Ayrıca, önerilen MRAS yöntemi gerilim sensörü gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. Bu sayede özellikle düşük hızlarda gerilim sensörünün ölçüm gürültülerinin sebep olabileceği tahmin hatalarının önüne geçilmiş ve sistemin düşük ve sıfır hız performansları iyileştirilmiş olmaktadır. Bu çalışmada simülasyon çalışmaları MATLAB / SIMULINK ortamında tamamlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Sensörsüz hız tahmini, Asenkron motor, Alan yönlendirmeli kontrol.

Abstract

The purpose of the study is to develop a high-performance speed sensorless indirect field oriented control for induction motors (IMs). The proposed method is a novel Model Reference Adaptive System (MRAS) and needs only steady-state stator q-axis voltage equation to estimate rotor speed. And also, the proposed speed estimator algorithm removes the voltage transducer requirement in calculations since the algorithm compares the current regulator PI controller output with the calculated q-axis stator voltage. So the system does not need a reference loop since the calculated voltage I adaptive sub-model is directly compared with controller output. This simple equation does not require any rotor parameter and this makes the system immune to the variation of rotor parameters. Moreover, this unique calculation eliminates the requirement of flux estimation thus, the method is less sensitive to pure integration problems. This makes the estimator quite accurate at very low and zero speeds. Moreover, the suggested MRAS technique eliminates the voltage transducer measurement noises so, the low speed accuracy of the speed estimator is increased. Which are validated in simulations using MATLAB/SIMULINK.

Keywords: Speed sensorless Control, Induction motor, Vector control.

1 Giriş

Endüstriyel uygulamalarda ve elektrikli araç çekiş motoru uygulamalarında sincap kafesli üç faz ASM yoğun olarak kullanılmaktadır. Asenkron motorlar güvenilir, sağlam, üretimi kolay ve ucuz motorlardır. IE4 ve IE5 verimlilik standartlarında üretilen modelleri geniş güç ve hız aralığında yüksek verimle çalışabilmektedir [1]. Miknatıslı motorlar gibi nadir bulunan materyellere bağımlı olmaması, bu motorların daha kolay üretilebilir ve ucuz bir motor tipi olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, asenkron motorlar, bakım gereksinimi çok az olan, zorlu çalışma şartlarına dayanıklı ve yanıcı ve patlayıcı ortamlarda kullanılabilen bir motor türüdür.

Alan yönlendirmeli kontrol (FOC) alternatif akım (AA) motorlar için ayarlanabilir bir frekans kontrol tekniğidir. Bu yöntemde, üç fazlı AA makinesinin stator akımı iki dikey vektör bileşenine dönüştürülür bunlar: motorun akı ve torqu olarak tanımlanır. FOC, yüksek performanslı uygulamalar için ASM kontrol etmek için kullanılır. Bu kontrol tekniği ile ASM sıfır

hızda tam yük altında kontrol edilebilir. Ayrıca bu yöntem ile ASM geniş hız aralığında makine kontrol edilebilir ve kontrolün dinamik tepkisi yüksektir. FOC'de doğrudan ve dolaylı alan yönlendirmeli kontrol (IFOC) olmak üzere alan yönlendirme koşulunun sağlanması için iki temel yöntem bulunmaktadır. IFOC yönteminde, kayma frekansı hesaplanarak stator frekansı ve rotor mekanik hızı arasında geçiş yapılabilir.

Bununla birlikte, bazı vektör kontrol uygulamalarında, özellikle zorlu çalışma koşulları, yüksek hızlı uygulamalar ve boyut kısıtlamaları vb. gibi koşullarda konum bilgisi alabilmek için enkoder, takometre gibi sensörlerin motora monte edilebilmesi mümkün değildir. Motor içerisine sensör yerleştirmek yüksek gürültülü çalışma bölgelerinde enkoder sinyali bozunumları sistem güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu gürültülerin azaltılarak sistem güvenliğine yönelik yapılacak her ek işlem maliyet ve tasarım zamanını arttıracaktır. Bu nedenle, sensörsüz konum tahmini ASM'nin kontrolünde bir tercih ve gereksinim haline gelmiştir [2]-[4].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

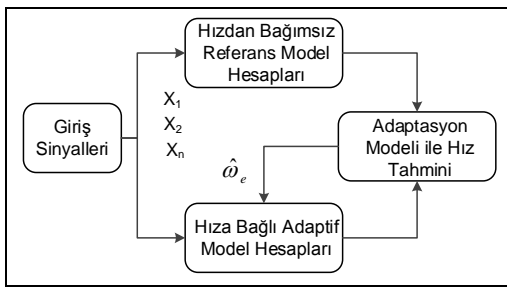
Sensörsüz terimi, yalnızca hız ve konum sensörlerinin kullanılmadığını gösterir. Başka bir deyişle, stator akımları ve gerilimleri akım ve gerilim sensörleri yardımıyla okunmaya devam etmektedir. Hız sensörsüz kontrolün başlıca avantajı maliyetin düşürülmesidir. Aynı zamanda sensör kablolarının ortadan kaldırılmasıyla sistemin karmaşıklığı azaltılır ve sistemin boyutu en aza indirgenebilir. Enkoderi olmayan sistem daha iyi gürültü toleransına sahiptir, bu nedenle güvenilirlik ve dayanıklılık artırılabilir.

Dolayısıyla mekanik hız sensörlerinin dezavantajları, makinenin "sensörsüz" bir şekilde hızlarının tahmin ederek üstesinden gelir. Hız tahmini için makinenin akım ve gerilim değerleri kullanılır. Makinenin hızının sensörsüz bir şekilde tahmin edilebilmesi makinenin zorlu çalışma koşulları altında kullanmaya uygun hale getirir.

ASM sürücülerinin sensörsüz kontrolü konusunda literatürde araştırmacılar önemli çalışmalar yapmışlardır [5]-[7]. [5]-[7]. Vektör kontrollü ASM sürücülerinde rotor hızının sensörsüz olarak hesaplanması için bugüne kadar çeşitli stratejiler kabul edilmiştir. Temel makine modeli teknikleri, terminal bağlantılarını ve dolayısıyla ASM sürücülerinin hızını veya konumunu hesaplamak için makine gerilimlerini ve akımlarının anlık değerlerini göz önüne alır. Bu yöntem makine dinamik denklemlerini kullanır, alan harmoniklerini ihmal eder ve makinenin d - q modeli kullanır.

MRAS yöntemi ASM'nin hızını tahmin etmek ve motoru kontrol etmek için geliştirilmiş bir sensörsüz hız tahmin yöntemidir (5). Diğer tüm sensörsüz hız tahmin yöntemleri arasında basitliği ve doğrudan fiziksel yorumlanabilirliği ile çok dikkat çeken bir tekniktir. MRAS tekniğinin temeli, sistemin durum değişkenlerini, referans model ve adaptif model olmak üzere iki farklı alt model kullanarak ayarlamak ve iki model arasındaki hatayı en aza indirmek için bir adaptasyon mekanizması kullanarak istenen fiziksel büyüklüğü hesaplamaya dayanır [8]-[9]. Fakat MRAS yöntemleri makine denklemleri ve parametrelerini kullandığı için motor parametrelerindeki değişimlere karşı hassastır [10].

MRAS'ın temel bir yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Burada X_1, X_2, \dots, X_n sistemin durum değişkenini temsil eder.



Şekil 1. MRAS temel yapısı.

Figure 1. MRAS basic structure.

Referans modeli, tahmin edilecek parametreyi içermeyen bir dizi denkleme dayalıdır. Aksine, adaptif model, tahmin edilecek parametreyi içeren farklı girdileri kullanan farklı denklem takımlarıyla aynı durum değişkenlerini hesaplamak için kullanılır. Sisteminin kararlılığı, bu iki modelden elde edilen sinyaller arasındaki hatayı en aza indirmek için sağlanır. MRAS yöntemlerinde günümüze kadar rotor akısı, ters elektromotor kuvveti(EMK), reaktif güç, aktif güç, moment ya da $V \times I$ hesaplamaları referans ve adaptif modellerde kullanılmışlardır [11]-[14].

Literatürde MRAS ilk olarak 1979 yılında [15] tanıtıldı ve ASM sürücülerinde rotor akı-hatası tabanlı MRAS ilk kez 1985 yılında Tamai tarafından önerilmiştir [16]-[17]. Bu tekniğin temel ilkesi temel MRAS tekniği [18] ile aynıdır. Bu yöntemde referans model rotor hızından bağımsız olarak, adaptif model ise rotorun hızına bağlı olarak rotorun akı değerini hesaplar. Rotor akısı hesaplanırken makine terminal gerilim ve akımları ölçülür ve kullanılır. Bu iki durum değişkenleri yani referans model ve adaptif model arasındaki hata daha sonra tahmini hızı üretebilmek için bir adaptasyon mekanizması kullanılır. Tamai'nin önerdiği rotor akı-hatası tabanlı MRAS yöntemi basit olmakla birlikte, rotor parametrelerine bağımlı olması sebebiyle ve rotor zaman sabitinin hatalı tahmini nedeniyle, tahmin edilen hızın gerçek hız ile uyumu hatasından oluşmaktadır [19]. Buna ek olarak, stator ve rotor dirençlerinin sıcaklıkla değişimi, özellikle düşük çalışma hızlarında hatalı hız tahminlerine sebep olmaktadır. Ayrıca denklemlerde integral hesaplarının olması özellikle çok düşük hızlarda ve sıfır hızlarda yanlış tahminlere sebep olmaktadır.

Peng ve Fukao 1994 yılında, ASM ters EMK'sını kullanarak rotor hızını tahmin etmek için alternatif yeni bir MRAS yöntemi önerdi [20]-[21]. Referans ve adaptif modellerin durum değişkeni ASM'in ters EMK'sıdır. Ters EMK tabanlı MRAS tekniği, referans ve adaptif modellerinde akı hesabı içermediği için herhangi bir integrasyon işlemi gerektirmez [22]. Bu yöntemde referans ve adaptif modellerde ters EMK hesaplanır ve bir hız hata düzeltme sinyali üretmek için adaptif ve referans model sinyallerinin farkı adaptasyon modeli içerisinde kullanılır. Bu iki modelin sonuçları daha sonra, tahmini rotor hızını veren bir adaptasyon mekanizması kullanmak üzere karşılaştırılmıştır. Her ne kadar bu model ASM'nin ters EMK'sını hesaplamak için herhangi bir integral hesabı gerektirmese de stator akımlarının türevini içermektedir. Ayrıca model, parametre değişimlerine duyarlıdır. Bu teknikte motor yönünü belirlemek için özel bir koordinat sistemine ihtiyacı var. Stator direncine bağımlılığı nedeniyle sıfır hızlarda, düşük hızlı çalışma bölgelerinde ve devreye almada da dâhil olmak üzere denetleyicilerin artan doğrusal olmayan özelliklerinden dolayı hızın doğru bir şekilde tahmin edilmesinde başarısız olur.

Reaktif güç-hatası tabanlı MRAS ilk olarak 1994 yılında önerilmiştir [21]. Reaktif güç, referans ve adaptif modeller için durum değişkeni olarak kullanılmıştır [23]. MRAS'daki hata parametresi olarak reaktif gücün seçimi otomatik olarak sistemin stator dirençlerindeki değişimlere karşı bağımsızlık kazandırır [24]-[26]. Dahası, MRAS'ın anlık ve kararlı durum reaktif gücü yapısı, hesaplama sürecinde herhangi bir akı tahmini gerekliliğini tamamen ortadan kaldırır. Dolayısıyla, yöntem, doyunluk gibi integral ile ilgili sorunlara karşı daha az duyarlıdır [27]. Bu aynı zamanda sıfır hızında ve düşük hızlarda tahmin doğruluğunu artırır. Fakat düşük devirlerde, uygulanan stator gerilimi düşük olması sistemin kararlı bir şekilde çalışmasının sağlanmasında bir zorluk oluşturur. Bu zorluğun önüne geçmek için, anlık reaktif güç hatası temelli bir yaklaşımda hem referans ve adaptif modeller için bir durum değişkeni olarak seçilmesi hız tahmin algoritmasının performansını artırır.

ASM'nin ölçülen stator akımı (yani referans modeli) ile rotor akı vektörü ile oluşturulmuş stator akım modelinden elde edilen tahmini akım arasında bir stator akım-hata tabanlı MRAS kestiricisi [28]-[31]'de önerilmiştir. Bu modelin diğer MRAS tekniklerinden farkı, bu modelin tahmin edilen durum değişkenini doğrudan ölçülen ile karşılaştırmasıdır. Bu modelin

durum değişkeni stator akımı ve ölçülen değeri referans modeli olarak kabul edilmektedir. Aynı miktar adaptif modelde tahmin edilmektedir. Önerilen MRAS hız tahmincisinde, rotor akı vektörü, hız bağımlı akı modeli temel alınarak hesaplanır. Referans model ortadan kaldırılarak doğrudan ölçülen stator akımı, hesaplanan değer ile karşılaştırılarak hız tahmini için adaptasyon modeli içerisinde kullanılır.

X-MRAS yeni bir MRAS olarak ilk olarak 2010 yılında önerilmiştir. Bu teknikte referans ve adaptif modellerde durum değişkeni $V \times I$ (V =stator gerilim vektörü ve I =stator akım vektörü) anlık ve sabit durum değerleri ile tasarlanmıştır [32]-[33]. Burada 'X'ne bir reaktif güç ya da aktif güç olmayan uydurma bir birim olarak tanımlanmaktadır. X1 rotor hızından bağımsız olduğu için referans model olarak seçilirken, rotor hızı bağımlılığı nedeniyle X2 adaptif model olarak seçilmiştir. Bu denklemler hem akı tahmini hem de türev işlemlerin gerekliliğini ortadan kaldırır. Fakat bu yöntemin stator parametrelerine olan bağımlılığı tahmin kesinliğini azalttığı görülmektedir [34].

ASM d ve q eksen devre empedansları ve bunların etkin değerlerinin farkları kullanılarak sensörsüz hız tahmin algoritması [35]'de geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde kullanılan denklemlerde direnç değerleri kullanılsa da devre empedansını oluşturan çoklu parametrelerin değişimi tahmin kesinliğini etkileyebilecektir.

Asenkron motor stator gerilim hatasına dayalı hız tahmini yapan yöntem [36] çalışmada sunulmuştur. Burada kullanılan gerilim denklemi basit, rotor parametresi içermeye ve akı tahmini zorunluluğunu ortadan kaldıran bir denklem olduğu için yöntemin rotor parametre bağımlılığının olmadığı ve integral hesabı kaynaklı problemler içermediği görülmektedir. Fakat bu çalışmada adaptif model için hesaplanan gerilim değeri, referans model için doğrudan ölçülen motor gerilimi ile karşılaştırılmaktadır. Bu sebeple özellikle düşük motor hızları ve yüklerde stator geriliminin çok düşük olduğu yerlerde ölçüm hatası toplam gerilim değeri üzerinde önemli bir paya sahip olabileceği gözlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, dolaylı alan yönlendirme kontrollü 3 fazlı asenkron motorlar için yüksek performanslı bir hız tahmin algoritması geliştirmektir. Önerilen yöntem, yeni bir Model Referans Adaptif Kontrolördür.

ASM'da hızın sensörsüz olarak tahmini yapmada karşılaşılan başlıca problemler:

- Yöntemin parametre bağımlılığı, motor çalışması esnasında parametrelerde oluşan değişimler sonucu tahmin edilen hızın gerçek hızdan farklılık göstermesi,
- Yöntemin rotor direnci ve endüktansını denklemler içerisinde kullanması, rotor parametreleri doğrudan ölçülemediği, tahmin edilmesi gerektiği için doğruluğu etkiler,
- Tercih edilen yöntemdeki denklemin integral ve türev işlemlerinin olması, integral ve türevlerde kalıcı değerler oluşması sonucunda özellikle düşük ve sıfır hızlarda doğru hız tahmini yapılamaz,
- Yöntemin hız tahmini için gerekli işlem adımlarının çok fazla olması, yöntemin dinamik performans cevabını olumsuz etkiler,
- Yöntem içerisinde çok fazla filtre gereksinimi, sistemi yavaşlatır ve hız tahminini olumsuz etkiler.

Bu sebeple önerilen yöntemde literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, rotor hızını hesaplamak için kararlı hal alan yönlendirme durumunda stator q-eksen stator gerilim denklemi kullanılmıştır. Bu gerilim değeri adaptif model içerisinde basit bir denklem ile hesaplanabilmektedir.

Önerilen yöntemde kullanılan denklemlerde hesaplamalar herhangi bir rotor parametresi gerekmez ve bu da sistemin rotor parametrelerinin değişimine karşı bağımsızlık kazandırır. Dahası, bu basitleştirilmiş hesaplama akı tahmini gerekliliğini ortadan kaldırır, bu nedenle yöntem saf entegrasyon sorunlarına daha az duyarlıdır. Böylece, bu yöntem kullanılarak çok düşük ve sıfır hızlarda oldukça doğru hız tahmini yapılabilmektedir. Ayrıca, yöntemin düşük hızlardaki tahmin performansının artırılabilmesi için, alan yönlendirmeli kontrol algoritması içerisinde üretilen q-eksen gerilim referansı MRAS yöntemi içerisinde referans alt model olarak kullanılmıştır. Bu sayede sistemde gerilim sensörü gereksinimi ortadan kalkmış, özellikle düşük hızlarda stator gerilim değerinin düşük olduğu durumlarda sensör ölçüm hatalarının sebep olacağı hız tahmin hatalarının önüne geçilmiştir. Önerilen yöntem ile MRAS'ın ölçülen hızı sıfır hızda ve çok düşük hızlarda doğru tahmin edilmektedir. Matlab/Simulink ortamında simülasyon çalışmaları tamamlanmış ve 2.2KW bir 3-faz IM referans alınarak yöntemin performansı incelenmiştir.

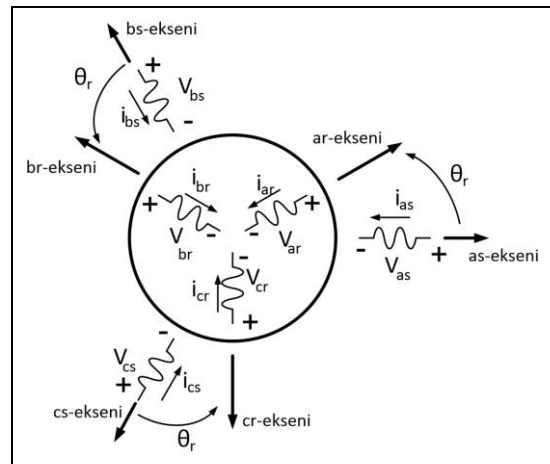
2 Önerilen MRAS yönteminin matematiksel denkleminin çıkartılması

Asenkron motor rotor ve stator denklemleri matris formatında (1) ve (2)'de verildiği gibi tanımlanabilir. Burada ρ türev operatörüdür. Denklemler içerisindeki 'abc' alt indisi faz eksenlerini, 's' alt indisi stator, 'r' alt indisi rotora ait büyüklüğü göstermektedir. Denklemler içerisindeki V_{abcs} stator üç faz gerilimlerini, i_{abcs} stator üç faz akımlarını, λ_{abcs} stator akılarını, r_s stator sarğı direncini göstermektedir. Aynı şekilde V_{abcr} rotor üç faz gerilimlerini, i_{abcr} rotor üç faz akımlarını, λ_{abcr} stator akılarını, r_r stator sarğı direncini göstermektedir.

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + \rho \lambda_{abcs} \quad (1)$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcr} + \rho \lambda_{abcr} \quad (2)$$

3-faz ASM rotor ve stator sarğı akım ve gerilimleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 3-Faz asenkron motor rotor ve stator eksenleri.

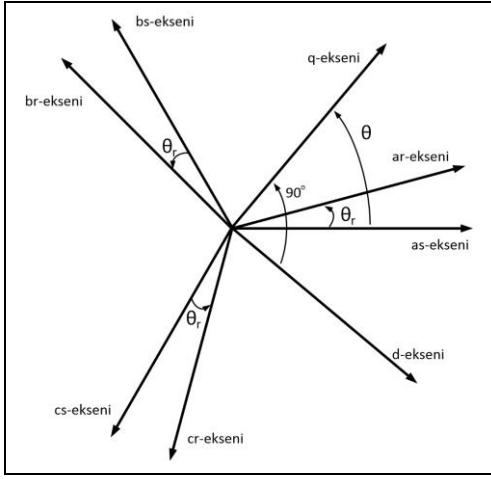
Figure 2. 3-phase induction motor stator and rotor axes.

Makinenin rotor ve stator akıları arasında karşılıklı bir kuplaj makine akımları sebebiyle oluşmaktadır. Makine akı denklemleri (3) ve (4)'te verilmiştir. Burada, $\lambda_{abcs(s)}$ stator akımlarının stator sargısı üzerinde oluşturduğu akı, $\lambda_{abcs(r)}$ rotor sargısı üzerindeki akımların stator üzerinde oluşturduğu akı, $\lambda_{abcr(s)}$ stator sargılarındaki akımın rotor sargıları üzerinde oluşturduğu akı, $\lambda_{abcr(r)}$ rotor sargısı üzerindeki akımları rotor sargıları üzerinde oluşturduğu akı denklemini göstermektedir.

$$\lambda_{abcs} = \lambda_{abcs(s)} + \lambda_{abcs(r)} \quad (3)$$

$$\lambda_{abcr} = \lambda_{abcr(r)} + \lambda_{abcr(s)} \quad (4)$$

Motor akım, gerilim ve akı denklemleri d,q dönen eksen takımı denklemleri ile yazılabilirler. Rotor ve stator manyetik eksenlerinin d,q eksenlerine göre konumları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Rotor ve stator manyetik eksenlerine göre d-q eksenlerinin konumu.

Figure 3. d-q axis positions of rotor and stator magnetic axes.

Stator ve rotor akılarının q,d eksen takımında denklemleri (5)-(8)'de verilmiştir. Burada 'q' alt indisi q eksen, 'd' alt indisi d eksen, 'l' kaçak akı, 'm' mıknatıslanma endüktanslarını ifade etmektedir. L_{ls} stator kaçak endüktansı, L_m makinenin mıknatıslanma endüktansıdır.

$$\lambda_{qs} = L_{ls}i_{qs} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (5)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls}i_{ds} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) \quad (6)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr}i_{qr} + L_m(i_{qr} + i_{qs}) \quad (7)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr}i_{dr} + L_m(i_{dr} + i_{ds}) \quad (8)$$

Akı denklemleri kullanılarak stator ve rotor gerilim denklemleri (9)-(12) olarak tekrar yazılabilir. Burada, ω elektriksel açısal frekansı göstermektedir.

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \rho \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \quad (9)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \rho \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \quad (10)$$

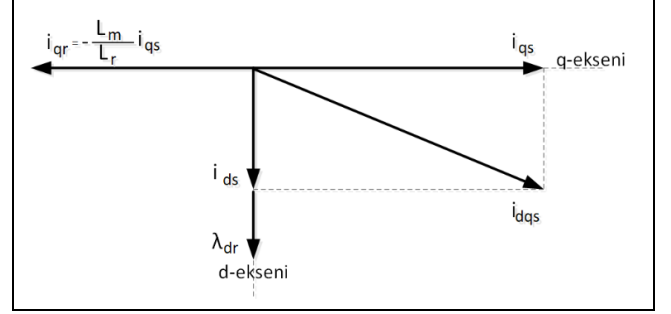
$$V_{qr} = r_r i_{qr} + \rho \lambda_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{ds} = 0 \quad (11)$$

$$V_{dr} = r_r i_{dr} + \rho \lambda_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qs} = 0 \quad (12)$$

Alan yönlendirmeli vektör kontrol yönteminde temel amaç motor moment ve akısının birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesidir. Bu sebeple motora verilen akımlar q,d eksenlerine yönlendirilir. Rotor akı vektörünün anlık hızı stator elektriksel frekansı ω_e olarak seçilir ve rotor akısı d-ekseni üzerinde tanımlanır. Böylece q-ekseninde rotor akısı (13)'te verildiği gibi sifıra eşittir.

$$\lambda_{qr} = 0 \quad (13)$$

Bu referans seçimi ile d,q akımları ve rotor akısı Şekil 4'te verildiği gibi görünür.



Şekil 4. Stator ve rotor akıları ve rotor akısı.

Figure 4. Stator and rotor currents with rotor flux.

Rotor akısı yönelimli alan yönlendirmeye göre yeniden tanımlanan d,q eksen rotor gerilim denklemleri (14),(15)'te verilmiştir.

$$V_{qr} = 0 = r_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (14)$$

$$V_{dr} = 0 = r_r i_{dr} + p \lambda_{dr} \quad (15)$$

Denklem (15) dikkate alınarak rotor ve stator q-ekseni akımları arasındaki bağıntı (16),(17)'de verilmiştir.

$$\lambda_{dr} = 0 = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (16)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (17)$$

Denklem (14) dikkate alınarak kayma frekansı (18)'de görüldüğü gibi hesaplanabilir.

$$\omega_e - \omega_r = S \omega_e = -\frac{r_r i_{qr}}{\lambda_{dr}} = \frac{r_r L_m i_{qs}}{L_r \lambda_{dr}} \quad (18)$$

Denklem (16) dikkate alınarak, karalı hal durumunda rotor d-eksen geriliminin sifıra eşit olması ($i_{dr} = 0$) olması ile sağlanabilir. Bu durumda d-eksen rotor endüktans denklemi (19)'da görüldüğü gibi ifade edilebilir.

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (19)$$

Böylece kayma frekansı alan yönlendirme ve karalı hal durumu için (20)'de görüldüğü gibi hesaplanabilir.

$$S \omega_e = \frac{r_r L_m i_{qs}}{L_r L_m i_{ds}} = \frac{r_r i_{qs}}{L_r i_{ds}} \quad (20)$$

Kararlı hal durumunda türev ifadeleri sifıra eşit olacağı için stator q-eksen gerilimi (21)'de görüldüğü gibi yeniden yazılabilir.

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (21)$$

Kararlı hal ve alan yönlendirme durumunda d-eksen rotor akımı sıfıra eşit olmalıdır. Bu durumda d-ekseni stator endüktans ifadesi (22)'de verildiği gibi yazılabilir.

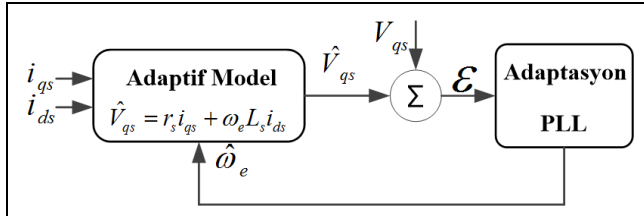
$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} = L_s i_{ds} \quad (22)$$

Böylece q-eksen stator gerilimi (23)'te verildiği gibi rotor değişkenlerinden arındırılmış olarak sadece stator değişkenleri ile yazılabilir. Bu denklem kararlı hal alan yönlendirme durumunda elde edilmiş q-eksen stator gerilim denklemdir.

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_e L_s i_{ds} \quad (23)$$

Şekil 5'te önerilen MRAS sisteminin blok diyagramı verilmektedir. Alan yönlendirmeli kontrol içerisinde stator gerilim referansları q,d referans eksen takımında hesaplanmaktadır. Bu değerlerden q-eksen stator gerilimi (V_{qs}^*) referans model olarak kullanıldığı için, bu MRAS modelinin referans modeli için herhangi bir işlem yükü yoktur. Adaptif modelde ise stator q-ekseni gerilimi matematiksel olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar için q,d eksen akımları adaptif model girdileridir. Model içerisinde (24) denklemini kullanılmaktadır. Kullanılan denklem içerisinde rotor direnç ve endüktans değerleri yoktur. Burada hesaplanan gerilim değeri ölçülen aynı değer ile karşılaştırılarak adaptasyon modeli, faz kilitlemeli çevrim (PLL) içerisinde stator elektriksel frekansı tahmin edilebilmektedir. PLL modeli referans değer ve hesaplanan değer arasındaki farkı en aza indirerek hızın doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlayan kontrol mekanizmasıdır. Hesaplanan elektriksel frekans, adaptif model denklemini için bir geri besleme olarak kullanılmaktadır.

$$\varepsilon = V_{qs}^* - \hat{V}_{qs} \quad (24)$$



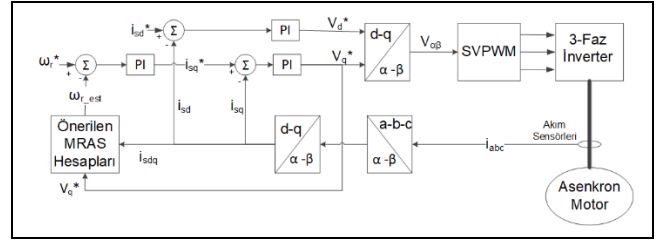
Şekil 5. Önerilen V_{qs} -hatası tabanlı MRAS ile hız tahmin yöntemi blok diyagramı.

Figure 5. Proposed MRAS block diagram.

3 Önerilen MRAS Yönteminin Simülasyon Performans İncelemesi

Simülasyon çalışmaları Matlab/Simulink ortamında tamamlanmıştır. Önerilen MRAS sistemi ile 3-faz ASM hız tahin ve vektör kontrol algoritması simülasyon modeli Şekil 6'da gösterilmiştir. Burada ASM dinamik denklemleri ile motor tasarlanmıştır. Motora ait a,b,c faz akım ve gerilimlerinin eksen takım dönüşümleri yapılmıştır. Önerilen MRAS yöntemi ile rotor hız tahmini kapalı çevrim olarak kullanılmıştır. Alan yönlendirmeli kontrol ve uzay vektör modülasyonu ile anahtarlama sinyalleri üretilmiştir.

Simülasyonlarda kullanılan asenkron motor parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6. Önerilen MRAS yöntemi ile hız tahmin sistemi blok diyagramı.

Figure 6. Proposed speed estimation block diagram.

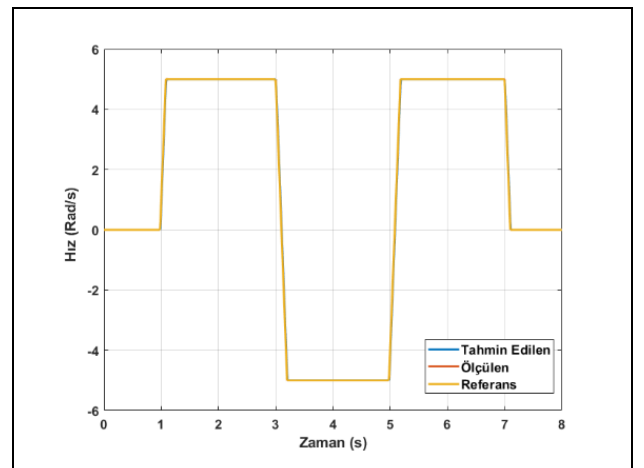
Tablo 1. Simülasyonlarda kullanılan asenkron motor parametreleri.

Table 1. Induction motor parameters.

Motor Modeli	ABB 3GAA 092 004-ASE	
Sembol	Açıklaması	Değeri
P	Nominal Güç	2.2 kW
p	Kutup Sayısı	4
L_m	Mıknatıslanma Endüktansı	0.3119 H
L_s	Stator Öz Endüktansı	0.3228 H
R_s	Stator Direnci	4.2 Ω
L_r	Rotor Öz endüktansı	0.3193 H
R_r	Rotor Direnci	4.2 Ω

Hız sensörü olmayan vektör kontrol sürücüler için bahsedilen zorlukların ilki sıfır, çok düşük hızlarda makinenin hızını, yüksüz koşullarda doğru bir şekilde tahmin etmektir. Bu bölümde, önerilen yöntemin performansı simülasyon ortamında incelenmektedir.

Sistemin çok düşük hızda (± 5 Rad/s) performansı Şekil 7'de gösterilmektedir. Tahmin edilen ve gerçek hız neredeyse aynıdır. Bu, önerilen MRAS sisteminin, hızın her iki yönde de çok düşük ve sıfır hızlarda kesin olarak tahmin edilebileceğini doğrulamaktadır. Hızın yönünün belirlenmesinde kullanılan (23) denklemin polaritesi kullanılmaktadır.

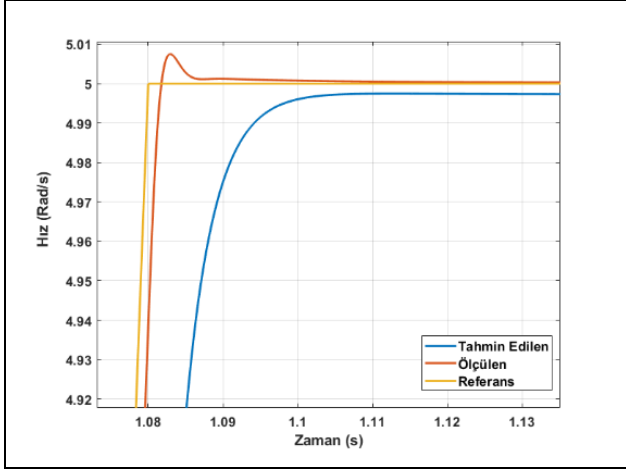


Şekil 7. Önerilen MRAS yönteminin çok düşük hızlarda performans incelemesi.

Figure 7. Very low speed responses of the proposed MRAS.

Şekil 7'deki sonucu daha yakından inceleyebilmek için Şekil 8'deki figür verilmiştir. Burada referans hızın 1. sn'den itibaren sıfır hızdan 5 Rad/s'ye hızlanması, buna bağlı olarak

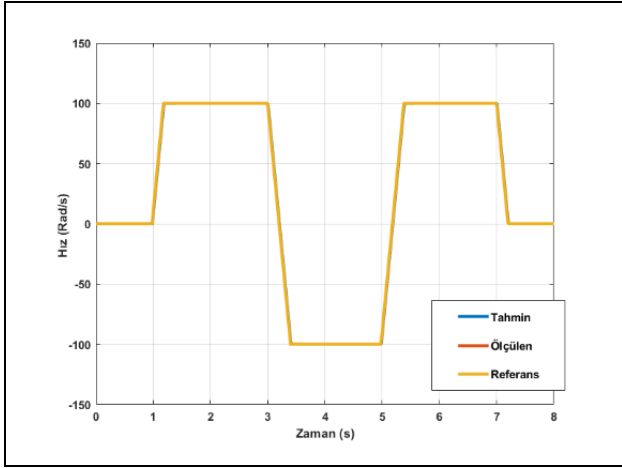
ölçülen ve önerilen MRAS ile tahmin edilen hızlar daha yakından görülebilmektedir. Şekil 8'de görüldüğü gibi önerilen, gerilim hatası tabanlı MRAS hız tahmin algoritması çok düşük hızda ve sıfır hızda gerçeğe oldukça yakın tahmin yapabildiği görülmektedir.



Şekil 8. Önerilen MRAS yönteminin çok düşük hızlarda geçici ve kararlı hal durum performans incelemesi.

Figure 8. Transient performance of the proposed MRAS.

Önerilen MRAS tabanlı hız tahmin algoritmasının motorun nominal hız bölgesindeki performansı Şekil 9'da gösterilmiştir. Burada ± 100 Rad/s hızlarda sistem performansı motorun her iki yönde de incelenmiştir. Şekil 9'da görüldüğü gibi sensörsüz hız tahmin algoritmasının motorun hızını tahmin edebildiği görülmektedir.



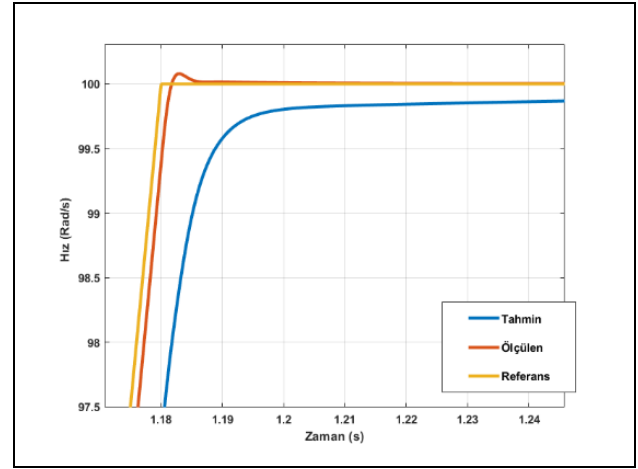
Şekil 9. Önerilen MRAS yönteminin nominal hızlarda performans incelemesi.

Figure 9. Rated speed performance of the proposed MRAS.

Şekil 9'daki sonucu daha yakından inceleyebilmek için Şekil 10'daki figür verilmiştir. Burada referans hızın 1 saniyeden itibaren sıfır hızdan 100 Rad/s'ye hızlanması, buna bağlı olarak ölçülen ve önerilen MRAS ile tahmin edilen hızlar daha yakından görülebilmektedir. Şekil 10'da görüldüğü gibi önerilen, gerilim hatası tabanlı MRAS hız tahmin algoritması motorun nominal hızında ve sıfır hızda gerçeğe oldukça yakın tahmin yapabildiği görülmektedir.

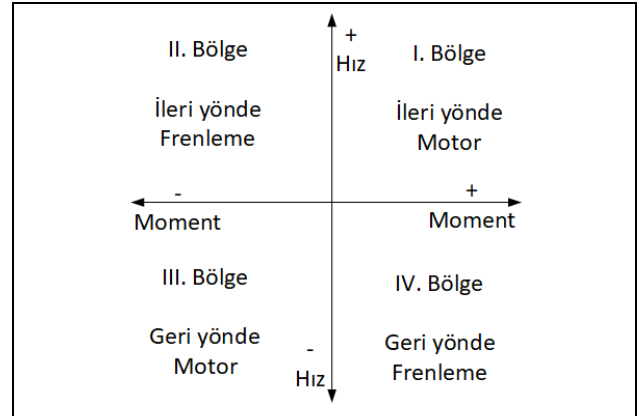
Önerilen hız tahmin yöntemin dört bölge çalışma performansı, R_s direncinin %100 oranında hatalı olarak kullanılması

durumunda incelenmiş ve simülasyon sonuçları Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekil 11'de motor dört-bölge çalışma yönleri ve yüklenme yönleri verilmiştir.



Şekil 10. Önerilen MRAS yönteminin nominal hızlarda geçici ve kararlı hal durum performans incelemesi.

Figure 10. Rated speed transient performance of the proposed MRAS.

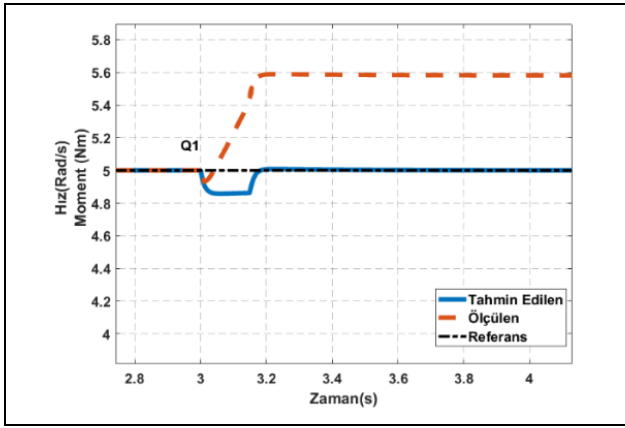


Şekil 11. Motor dört-bölge çalışma yön ve yükleri.

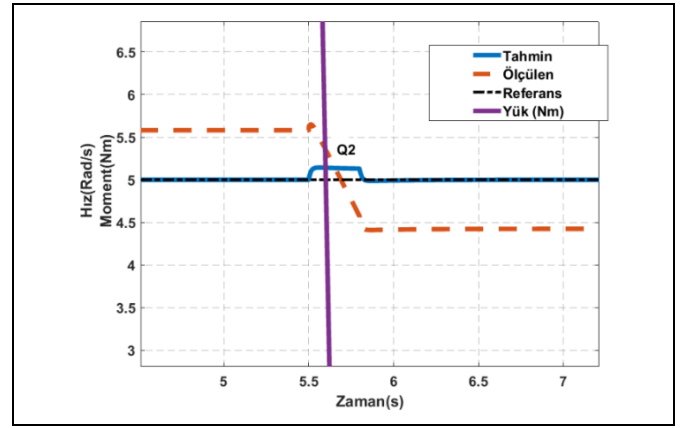
Figure 11. Four-quadrant operation of the induction motor.

Şekil 12'de görüldüğü gibi, 1. sn.'de motor 5 Rad/s hızına çıkmış ve 3. sn.'de 15 Nm pozitif yönde yük uygulanmıştır (1. Bölge: ileri yönde motor). 5. Sn.'de motor yönü aynı iken yükün yönü değiştirilmiştir (2. Bölge: ileri yönde frenleme). 8. sn.'de yük kaldırılmış ve 10. sn.'de motorun dönme yönü değiştirilmiştir. 13. sn.'de motor -5 Rad/s hız ile dönerken pozitif yönde yük uygulanmıştır (4. Bölge: geri yönde frenleme). Motor aynı yönde dönmeye devam ederken 15. sn.'de yükün yönü değiştirilmiş -15 Nm yük uygulanmıştır (3. Bölge: geri yönde motor). Tüm bu analizlerin sonucunda görüldüğü gibi önerilen yöntem dört-bölgede çalışabilmekte ve stator direnç verisi hatalı olması durumunda tahmin hatası kabul edilebilir seviyelerde kalmaktadır.

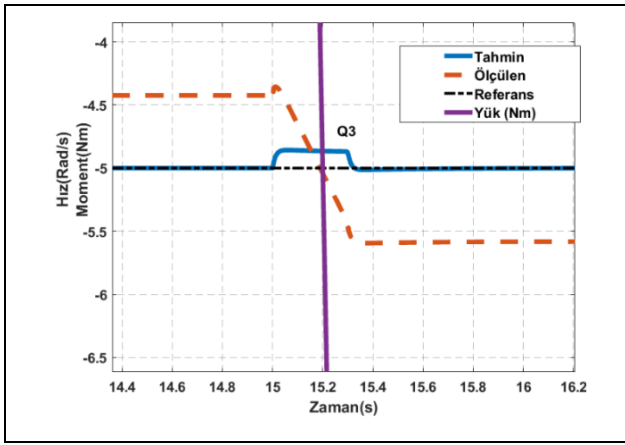
Literatürde incelenen MRAS tabanlı hız tahmin yöntemlerini önerilen stator q-eksen gerilimi tabanlı yöntem ile karşılaştırması Tablo 2'de verilmiştir. Tabloda hız sensörsüz olarak asenkron motorlarda hız tahmin yöntemlerinde karşılaşılan başlıca problemler ve bu yöntemlerin performans karşılaştırmaları yapılmıştır.



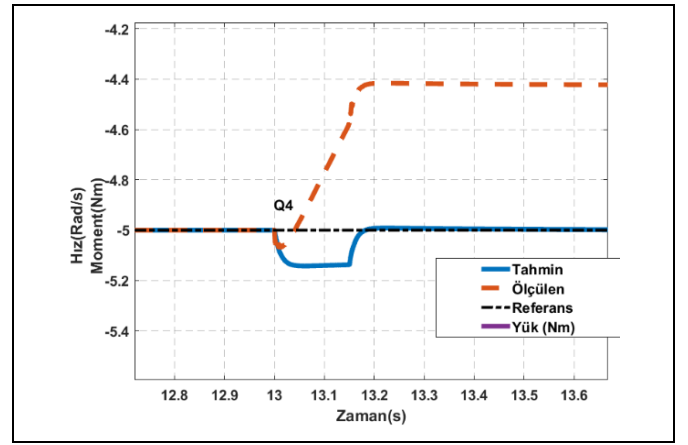
(a)



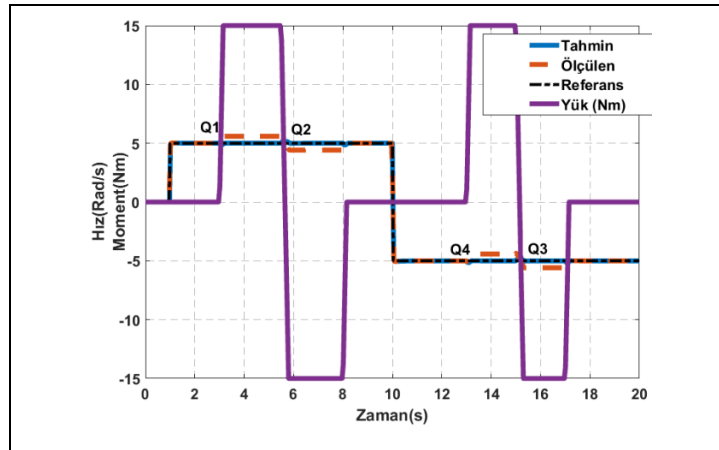
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 12. Önerilen MRAS yönteminin yük altında ve stator direnç hatası ile performans incelemesi. (a): Q1; 1st quadrant. (b): Q2; 2nd quadrant. (c): Q3; 3rd quadrant. (d): Q4; 4th quadrant. (e): Dört bölge çalışma.

Figure 12. Performance of the proposed MRAS under loaded and stator resistor mismatch condition. (a): Q1; 1st quadrant. (b): Q2; 2nd quadrant. (c): Q3; 3rd quadrant. (d): Q4; 4th quadrant. (e): Four quadrant operation.

Tablo 2. MRAS yöntemleri performans karşılaştırması.

Table 2. Performace comparison of the MRAS estimators.

Performans Parametreleri		MRAS Teknikleri					
		Rotor Akısı	Zıt EMK	Reaktif Güç	Stator Akımı	X-MRAS	Önerilen Yöntem
Yüksüz	Düşük Hız	Kötü	Orta	Orta	Orta	Yeterli	İyi
	Nominal Hız	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli	İyi	İyi
Yüklü	Düşük Hız	Kötü	Kötü	Yeterli	Orta	Yeterli	Yeterli
	Nominal Hız	Orta	Orta	İyi	Yeterli	İyi	İyi
Rotor Parametre Duyarlılığı		Var	Var	Yok	Var	Yok	Yok
Stator Parametre Duyarlılığı		Var	Var	Var	Var	Var	Var
Akı Hesabı		Var	Yok	Yok	Var	Yok	Yok
Hesap Yoğunluğu		Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Düşük
Dört Bölge Çalışabilme		Yok	Yok	Var	Var	Var	Var

4 Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada ASM'larda hız algılayıcısız olarak motorun hız ve pozisyonunu tahmin edebilmek için yeni bir MRAS yöntemi geliştirilmiş ve incelenmiştir. Önerilen MRAS yönteminde ASM stator q-eksen gerilimi durum değişkeni olarak tercih edilmiştir. Bunun başlıca iki sebebi vardır. Birinci sebep, ölçülebilir bir büyüklüğün seçilmesi MRAS içerisinde referans model olarak kullanılabilen ve bu da hesap yükünü azaltacaktır. İkinci sebep olarak, V_{qs} için adaptif model içerisinde hız geri beslemesine bağlı, rotor parametrelerinden arındırılmış, türev ve integral hesabı içermeyen bir denklem seti oluşturulmuştur. Bu sayede ölçülemeyen rotor parametrelerinin hatalı tahmininden kaynaklanan hız tahmin hataları giderilmiştir. Ayrıca, bu denklem seti türev ve integral hesabı içermediği için algoritmanın sıfır hız ve çok düşük hızlarda çalışmaya devam etmesine olanak sağlamıştır. ASM hız algılayıcısız olarak hızın doğru bir şekilde tahmin edilmesinde başlıca aşağıdaki zorluklarla karşılaşmaktadır. Önerilen yöntemin bu problemleri çözebilir olması gerekmektedir.

- Yöntemin sıfır hız ve çok düşük hızlarda çalışmaması,
- Motor dönüş yönünün algılanabilmesi için ek yöntemlere ihtiyaç duyması,
- Hesap yükünün fazla olması, türev, integral hesapları ve filtre kullanımı gibi sebeplerle gerçek hız ve tahmin edilen hız arasında gecikmenin yaşanması,
- Parametre hassasiyeti.

Stator q-eksen geriliminin seçilmesi yukarıda bahsi geçen sorunlara çözüm olduğu görülmektedir. Fakat, özellikle düşük stator gerilimlerinde gerilim sensörleriyle stator geriliminin ölçülmesi inverter kaynaklı anahtarlama gürültüleri ve sensörlerin doğrusal olmayan karakteristikleri sebebiyle zor olmaktadır. Hatta sıfır stator gerilimine yakın noktalarda çevresel gürültülerin okunan gerilim değeri üzerindeki etkisi oldukça yüksek olabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple bu çalışmada önerilen MRAS yönteminde kontrol içerisinde üretilen referans q-eksen gerilimi V_{qs}^* referans model için de referans model olarak kullanılmıştır. Bunun sonucunda

devrede gerilim sensörü gereksinimi yani gerilim okuma zorunluluğu ortadan kalkmıştır. Sistem performansı Matlab/Simulink ortamında incelenmiş ve yöntemin nominal, düşük ve sıfır hızlarda gerçeğe yakın hız tahmini yapabildiği görülmüştür.

5 Conclusion and recommendations

In this study, a new MRAS method has been developed and examined in induction motors (IMs) to estimate the speed and position of the motor without speed sensor. In the proposed MRAS method, the IM stator q-axis voltage is preferred as the state variable. There are two main reasons for this. The first reason is that a measurable state can be used as a reference model within the MRAS, which will reduce the computational burden. Secondly, for V_{qs} , an equation set is created in the adaptive model that depends on the speed feedback, is free of rotor parameters, and does not include derivative and integral calculations. In this way, speed estimation errors caused by incorrect estimation of rotor parameters that cannot be measured are eliminated. Also, since this set of equations does not include derivative and integral calculations, it allows the algorithm to continue to operate at zero speed and very low speeds. The following difficulties are encountered in accurately estimating speed without the IM speed sensor. The proposed method should be able to solve these problems.

- The method cannot operate at zero speed and very low speeds,
- Requires additional methods to detect motor rotation direction,
- A delay between actual speed and estimated speed due to reasons such as high calculation load, derivative, integral calculations and filter usage,
- Parameter sensitivity.

Choosing the stator q-axis voltage seems to be the solution to the problems mentioned above. However, measuring the stator voltage with voltage sensors, especially at low stator voltages, is difficult due to inverter switching noise and non-linear characteristics of the sensors. Even at points close to zero stator voltage, it is thought that the effect of noise on the measured

voltage value may be quite high. For this reason, in the MRAS method proposed in this study, the reference q-axis voltage V_{qs}^* produced within the control is also used as a reference model for the reference model. As a result, the need for a voltage sensor in the circuit, that is, the requirement for voltage measurement has been removed. System performance has been examined in Matlab / Simulink environment and it has been seen that the method can make an accurate speed estimation at nominal, low and zero speeds.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Sadık Özdemir tek yazar olarak tüm başlıklarda katkı sunmuştur.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır

8 Kaynaklar

- [1] Lipo T. *Vector control and dynamics of AC drives*. 1st ed. New York, USA, Oxford, 1996.
- [2] Holtz J, Thimm T. "Identification of the machine parameters in a vector controlled induction motor drive" *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, San Diego, USA, 1-5 October 1989.
- [3] Holtz J. "State of the art of controlled AC drives without speed sensor". *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, 21-24 February 1995.
- [4] Holtz J. "Sensorless control of induction machines-with or without signal injection?". *IEEE Transaction Industrial Electronics*, 53(1), 7-30, 2006.
- [5] Syam P, Kumar R, Das S, Chattopadhyay A.K. "Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives". *IET Electric Power Applications*, 9(7), 496-511, 2015.
- [6] Lascu C, Boldea I, Blaabjerg F. "Very-Low-Speed variable-structure control of sensorless induction machine drives without signal injection". *IEEE Transaction Industrial Applications*, 41(2), 591-598, 2005.
- [7] Schauder C. "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers". *IEEE Transaction Industrial Application*, 28(5), 1054-1061, 1992.
- [8] Landau Y.D. "Adaptive control: The model reference approach". *IEEE Transactions on Systems and Cybernetics*, 14(1), 169-170, 1984.
- [9] Shoudao H, Yaonan W, Jian G, Jiantao L, Sihai Q. "The vector control based on mras speed sensorless induction motor drive". *Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, China, 15-19 June 2004.
- [10] Shoudao H, Yaonan W, Jian G, Jiantao L, Sihai Q. "The vector control based on MRAS speed sensorless induction motor drive". *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, China, 15-19 June 2004.
- [11] Dehghan-Azad E, Gadoue S, Atkinson D, Slater H, Barrass P, Blaabjerg F. "Sensorless control of IM based on stator-voltage MRAS for Limp-Home EV Applications". *IEEE Transaction Power Electronics*, 33(3), 1911-1921, 2018.
- [12] Maiti S, Chakraborty C. "A new instantaneous reactive power based MRAS for sensorless induction motor drive". *Simulation Model Practice Theory*, 18(9), 1314-1326, 2010.
- [13] Shinnaka S. "Sensorless vector control of induction motors using minimum dimensional flux d-state observer with instantaneous speed estimation". *Electric Engineering in Japan*, 196(1), 31-41, 2016.
- [14] Pal A, Das S, Chattopadhyay A.K. "An improved rotor flux space vector based MRAS for field-oriented control of induction motor drives". *IEEE Transaction Power Electronics*, 33(6), 5131-5141, 2018.
- [15] Elbuluk M, Husain I. "Neural-Network-based model reference adaptive systems for high-performance motor drives and motion controls". *IEEE Transaction Industrial Applications*, 38(3), 879-886, 2002.
- [16] Abu-Rub H, Khan M, Iqbal A, Ahmed S. "MRAS-Based sensorless control of a five-phase induction motor drive with a predictive adaptive model". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, Italy, 4-7 July 2010.
- [17] Armstrong G, Atkinson D, and Acarnley P. "A comparison of estimation techniques for sensorless vector controlled induction motor drives". *Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, 26-29 May 1997.
- [18] Vas P. *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. 1st ed. New York, USA, Oxford, 1998.
- [19] Soltani J, Mizaeian B. "Simultaneous speed and rotor time constant identification of an induction motor drive based on the model reference adaptive system combined with a fuzzy resistance estimator". *1998 International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, Perth, WA, Australia, 1-3 December 1998
- [20] Garcia P, Briz F, Degner M, Diaz-Reigosa D. "Accuracy, bandwidth, and stability limits of carrier-signal-injection-based sensorless control methods". *IEEE Transaction Industrial Applications*, 43(4), 990-1000, 2007.
- [21] Fang-Zheng P, Fukao F. "Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors". *IEEE Transaction Industrial Applications*, 30(5), 1234-1240, 1994.
- [22] Holtz J. "Sensorless control of induction motor drives". *Proceedings of the IEEE*, 90(8), 1359-1394, 2002.
- [23] Young-Real K, Seung-Ki S, Min-Ho P. "Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter". *IEEE Transaction Industrial Applications*, 30(5), 1225-1233, 1994.
- [24] Kubota H, Matsuse K, Nakano T. "New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives". *16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Pacific Grove, CA, USA, 27-30 November 1990.
- [25] Vas P. "Implementation of ANN-based sensorless induction motor drives". *9th International Conference on Electrical Machines and Drives*, Canterbury, UK, 1-3 September 1999.
- [26] Rai R, Shukla S, Singh B. "Reactive power based MRAS for speed estimation of solar fed induction motor with improved feedback linearization for water pumping". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(7), 4714-4725, 2020.

- [27] Cacciato M, Scarcella G, Scelba G, Bille S, Costanzo D, Cucuccio A. "Comparison of low-cost-implementation sensorless schemes in vector controlled adjustable speed drives". *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, Italy, 11-13 June 2008.
- [28] Dybkowski M, Orłowska-Kowalska T. "Low-speed performance of the stator current-based MRAS estimator with FL controller in the sensorless induction motor drive". *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Romania, 22-24 May 2008.
- [29] Orłowska-Kowalska T, Dybkowski M. "Stator-Current-based MRAS estimator for a wide range speed-sensorless induction-motor drive". *IEEE Transaction Industrial Electronics*, 57(4), 1296-1308, 2010.
- [30] Zerdali E, Menguc E. "Novel complex-valued stator current-based MRAS estimators with different adaptation mechanisms". *IEEE Transaction Instrumentation Measurement*, 68(10), 3793-3795, 2019.
- [31] Korzonek M, Tarchala G, Orłowska-Kowalska T. "Simple stability enhancement method for stator current error-based MRAS-Type speed estimator for induction motor". *IEEE Transaction Industrial Electronics*, 67(7), 5854-5866, 2020.
- [32] Ravi-Teja A, Chakraborty C. "A novel model reference adaptive controller for estimation of speed and stator resistance for vector controlled induction motor drives". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, Italy, 4-7 July 2010.
- [33] Ravi-Teja A, Chakraborty C, Maiti S, Hori Y. "A new model reference adaptive controller for four quadrant vector controlled induction motor drives". *IEEE Transaction Industrial Electronics*, 59(10), 3757-3767, 2012.
- [34] Verma V, Chakraborty C, Maiti S, Hori Y. "Speed sensorless vector controlled induction motor drive using single current sensor". *IEEE Transaction Energy Conversion*, 28(4), 938-950, 2013.
- [35] Das S, Kumar R, Pal A. "MRAS-Based speed estimation of induction motor drive utilizing machines' d- and q-circuit impedances". *IEEE Transaction Industrial Electronics*, 66(6), 4286-4295, 2019.
- [36] Özdemir S, Sozer Y, Umurkan N. "Voltage error phase locked loop (PLL) based model adaptive sensorless vector control algorithm for induction motors". *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa, USA, 26-30 March 2017.