

Doğrudan moment kontrolüne stator direncinin etkisinin incelenmesi ve sürekli mıknatıslı senkron motora uygulaması

Investigation of the effect of stator resistance on direct torque control and application of permanent magnet synchronous motor

Ebubekir BOZKURT*^{1,a}, Mehmet POLAT^{2,b}

¹ Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 12000, Bingöl

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 23000, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 04.01.2022

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 05.08.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 30.08.2022

Öz

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar güç elektroniğindeki teknolojik gelişmelerle birlikte bazı üstün özellikleri sebebiyle kullanımı gittikçe yaygınlaşan bir motor türüdür. Bu motorların sıfır hızda bile maksimum moment üretebilmeleri, bakım maliyetlerinin düşük, güç/ağırlık oranının yüksek olması kullanımını artırmıştır. Bu çalışmada vektör kontrol yöntemlerinden doğrudan moment kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem motorun çalışmasına bağlı olarak sıcaklık artışı sonucunda meydana gelen stator sargı direncinin değişimi göz önünde bulundurularak incelenmiş ve gerilim kaynaklı gerilim kontrollü bir everici devresi kullanılarak sürekli mıknatıslı senkron motora uygulanmıştır. Motorun modellenmesi d-q modeli ile yapılmış ve benzetim çalışmasında bu model kullanılmıştır. Motorun doğrudan moment kontrolünü gerçekleştirmek için motora uygulanan akım ve gerilim bilgileri kullanılarak moment ve akı hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen akı ve moment hataları histerezis karşılaştırıcıya giriş olarak uygulanmıştır. Evirici kontrolünde kullanılan darbe genişlik modülasyon yöntemindeki anahtarlama stratejileri histerezis çıkıştan elde edilen veriler kullanılarak sürekli mıknatıslı senkron motorun moment ve hız kontrolünü gerçekleştirmiştir. Sargı direncinin sıcaklıkla değişimi, motorun farklı hız ve moment kontrolü üzerindeki etkisi diğer tüm motor parametreleri sabit tutularak incelenmiştir. Benzetim çalışmaları ile stator sargı direncinin motorun hız ve moment kontrolü üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Doğrudan moment kontrolü, Hız kontrolü, Modelleme, Sargı direncinin etkisi, Sürekli mıknatıslı senkron motor

Abstract

Permanent magnet synchronous motors are a type of motor that is becoming more and more popular due to some superior features together with the technological developments in power electronics. The fact that these motors can produce maximum torque even at zero speed, low maintenance costs and high power/weight ratio has increased their use. In this study, the direct torque control method from vector control methods was used. This method has been investigated by considering the change in the stator winding resistance caused by the temperature increase depending on the operation of the motor and has been applied to a permanent magnet synchronous motor by using a voltage-sourced voltage-controlled inverter circuit. The modeling of the electric motor has done with the d-q model and this model has used in the simulation study. In order to realize the direct torque control of the motor, torque and flux calculations have been made using the current and voltage data applied to the motor. The obtained flux and torque errors have been applied as input to the hysteresis comparator. The switching strategies in the pulse width modulation method used in the inverter control have realized the torque and speed control of the permanent magnet synchronous motor by using the data obtained from the hysteresis output. The variation of winding resistance with temperature and its effect on different speeds and torque control of the motor has been investigated by keeping all other motor parameters constant. The effect of the stator winding resistance on the speed and torque control of the motor has been shown in simulation studies.

Keywords: Direct torque control, Speed control, Modelling, Effect of winding resistance, Permanent magnet synchronous motor

*a Ebubekir Bozkurt; ebozkurt@bingol.edu.tr, orcid.org/0000-0001-9335-7188

^b orcid.org/0000-0001-6188-8726

1. Giriş

1. Introduction

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), yüksek verimlilikleri, güç yoğunluğu ve kontrol performansları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Asenkron motorun yapısına benzer yapıda olan SMSM, asenkron motorun rotor yapısı kaldırılıp yerine mıknatısların yerleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu durum asenkron motorlarda kullanılan kısa devre çubuklarının kullanılmasını ortadan kaldırarak asenkron motorun rotorunda meydana gelen demir ve bakır kayıplarını ortadan kaldırmış ve bu yönüyle önemli sayılabilecek düzeyde verim artışı sağlayarak SMSM kendini ön plana çıkarmıştır (Asker, 2009; Çelik 2012).

Günümüzde SMSM'lerin yüksek verimlilik ve moment yoğunluğu, güç/ağırlık oranının büyüklüğü ve güvenilir çalışması sayesinde kullanımı yaygınlaşmıştır. SMSM'ler çoğunlukla yüksek performans gerektiren robot teknolojileri başta olmak üzere, CNC makinelerde, asansör kapılarında ve ana tahrik sistemlerinde, raylı sistemlerde, gemilerin elektrikli tahrik sistemlerinde, çamaşır ve bulaşık makinelerinde, servo sistemlerde, elektrikli araçlarda, döner salınlı mikro matkaplarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Araz & Yılmaz, 2020; Dalcalı & Ocak, 2018, Kıvanc & Öztürk, 2018; Zhang vd, 2020).

Zhang ve Liu 2019 yaptıkları çalışmada yüksek kararlı performans elde etmek ve geleneksel anahtarlama tablolı doğrudan moment kontrolünde (ATDMK) göz ardı edilen stator akı dalgalanmalarını azaltmak için yeni bir görev oranı modülasyonlu doğrudan moment kontrolünü önermişlerdir. Önerilen yöntemde moment ve stator akısından elde edilebilen makine açılma hızı, d ve q eksenli akım hatası bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. Farklı gerilim vektörleri altındaki d ve q eksenli akım eğrileri, görev oranının belirlenmesinde temel oluşturmak üzere sunulmuştur. Sunulan yöntemin performansı, simülasyonlar ve deneylerle geleneksel ATDMK ile karşılaştırılmış, moment ve stator akısının olağanüstü sabit durum performansı sunduğu gösterilmiştir (Zhang & Liu, 2019).

SMSM'ler doğrudan şebeke bağlantısı ile çalıştırılmadıklarından dolayı skaler veya vektör kontrol yöntemlerinden birine ihtiyaç duymaktadırlar. Vektör kontrol yöntemi alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan moment kontrolü (DMK) olmak üzere iki farklı metotta

uygulanmaktadır. DMK'nın temel fikri, stator akısını ve momentini bir histerezis bant içerisinde tutmak için anahtarlama tablosundan uygun gerilim vektörlerinden birini seçerek motor momentini ve stator akısını kontrol etmeye dayanmaktadır. DMK, alan yönlendirmeli kontrol ile karşılaştırıldığında karmaşıklığının ve parametre bağımlılığının daha az olması avantajının yanı sıra sisteme kolay uygulamasını, mükemmel dinamik performans ve sağlam kontrolün yapılmasını sağlamaktadır. Bu avantajlarından dolayı iki seviyeli evirici, üç seviyeli evirici ve matris dönüştürücü gibi dönüştürücüler tarafından beslenen motor sürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Vaez, 2018; Deng vd, 2021; Wang vd, 2017).

Zhong ve arkadaşları ise ilk olarak stator akısı ile rotor akısı arasındaki açığı dikkate alarak moment ifadesini türetmişlerdir. Daha sonra stator akısının genliğinin ve dönme hızının kontrolü analiz edilmiştir. Son olarak, DMK'lı bir SMSM sürücüsü önerilmiş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarıyla önerilen kontrol yöntemini doğrulayıp DMK altındaki moment yanıtının akım kontrolü altındakinden çok daha hızlı olduğunu göstermişlerdir (Zhong vd, 1997).

DMK'nın en büyük dezavantajlarından biri moment dalgalanması, temel olarak sınırlı sayıda uygulanabilen gerilim vektörü ile histerezis karşılaştırıcılarının varlığından kaynaklanmaktadır. DMK kullanılmaya başladığından beri özellikle moment dalgalanması üzerine pek çok araştırma yapılmış ve bu problem çözülmeye çalışılmıştır. Akıyı ve momentini kontrol etmek için çok seviyeli evirici kullanarak daha fazla sayıda gerilim vektörü ile moment dalgalanmaları azaltılabilir. Bu durumda ise anahtarlama performansı çok iyi olan anahtarlama elemanlarına ihtiyaç duyulmakta ve maliyet artmaktadır. DMK, elektrikli sürücülerin hareket kontrolünde, özellikle geleneksel anahtarlama tablolı DMK (AT-DMK) ve uzay vektör modülasyonu (UVM) tabanlı DMK (UVM-DMK) için yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda, AT-DMK ile ilişkili sorunları ele almak için çok sayıda iyileştirilmiş DMK şeması önerilmiş ve geliştirilmiştir. Klasik AT-DMK şeması taraması hızlı dinamik yanıt sağlar, ancak kararlı durumda çalışma sırasında farklı moment ve akı dalgalanmalarından zarar görebilir. Öte yandan, klasik UVM-DMK şemaları moment ve akıda daha düşük dalgalanmalara sahiptir, ancak bu yöntemler DMK'nın dinamik yanıtını yavaşlatır. Bunların dışında sezgisel yöntemler kullanılarak, değiştirilmiş anahtarlama tablolarını dâhil ederek

veya çok seviyeli eviriciler kullanarak mevcut gerilim vektörlerinin sayısını artırarak bu problemin üstesinden gelinmiştir. Ancak bu iyileştirmeler, artan devre karmaşıklığı ve ekstra donanım maliyeti ortaya çıkarmaktadır (Ye vd, 2010; Hartani, 2013; Wang vd, 2020).

Li ve ekibi ise geri beslemeli doğrusallaştırma tabanlı doğrudan moment kontrolünü (FL-DMK) geniş hız aralıklı işlemler için gömülü miknatıslı SMSM sürücüler için önermişlerdir. Parametre hatalarını göz önünde bulundurarak, bu kontrol yapısını yani genel FL-DMK tasarımını tamamlamak için PI FL-DMK ve geleneksel AT-FL-DMK olmak üzere iki farklı kontrolör tasarımı sunulmuştur. Farklı yük ve hız koşulları altında, önerilen şema sadece iyi sabit durum ve dinamik performanslar değil, aynı zamanda parametre hatalarına karşı dayanıklılık da göstermiştir. Çalışmanın sonucu olarak parametre hataları geçici tepki süresini biraz etkilese de, kararlı durum momentinin ve akımın dalgalanma içermediğini göstermişlerdir (Li vd, 2021).

Wang ve Xu tarafından üç fazlı SMSM sürücüler için yeni bir hibrit DMK şeması önerilmiştir. Dinamik durum ve sabit durum altındaki çalışma modlarında inverter anahtarlamaları için farklı moment kontrol yöntemleri önermişlerdir. Moment ve stator akısı için yeni bir ayrıştırılmış kontrol modeli tasarlanmıştır. Gerilim vektörünün momenti değiştirme yeteneği, dinamik işlem sırasında ayrıştırılmış kontrol ile tam olarak kullanılmıştır. Bu nedenle, önerilen hibrit DMK şeması tarafından hem hızlı dinamik yanıt hem de iyi sabit durum performansı sunulmuşlardır. Ek olarak, iki çalışma modu arasında sorunsuz geçişi sağlamak için üstün mod geçiş yöntemi tasarlanmıştır. Bu yolla, dinamik süreç altındaki çalışma modu, zaman içinde sabit durumdaki çalışma moduna geri döndürülebilir ve böylece momentin aşılması önlenmiştir (Wang vd, 2017).

Cao ve arkadaşları ise güvenilir elektrikli ulaşım uygulamalarıyla çok fazlı ISMSM sürücüler için yeni bir doğrudan moment modeli tahmini kontrol (DMK-MÖK) tekniği sunulmuştur. Önerilen kestirimci kontrol tekniği, motorun geliştirilmiş momentini ve net stator akısını önceden ayarlanmış tolerans sınırları içinde korurken sistem düzeyinde kayıpları en aza indirgenmektedir. Geliştirilen yaklaşımın etkinliğini ve potansiyelini doğrulamak için hem bilgisayar benzetim çalışmaları hem de dSPACE DS1104 HIL uygulamaları ortaklaşa kullanılmıştır. Başarılı deneysel sonuçlar, önerilen DMK-MÖK yönteminin yüksek performanslı elektrikli ulaşım için umut verici bir çözüm olarak

hizmet edebileceğini kanıtlamışlardır (Cao vd, 2021).

Motor kontrolünde; moment ve hız, sıcaklığın artmasıyla stator direncinde meydana gelen değişimlerden etkilenmektedir. Motor moment ve hızında meydana gelen hataları ve dalgalanmaları azaltmak için stator direncinin motor çalışma esnasında güncellenmesi ve sisteme uygulanması gerekmektedir (Kürüm & Akın, 2018). Bu sebeple direnç hatasını azaltarak sistemin performansını arttırmak için genişletilmiş kalman filtresi ile stator direnç tahmini (Zhu vd, 2007), doğru akım sinyal enjeksiyonuna dayalı stator sargı direnci tahmini (Baneira vd, 2019), akım enjeksiyonu yoluyla sargı direnci tespit etme teknikleri kullanılan yöntemlerden bazıları olmuştur (Wilson vd, 2010).

Bu çalışmada DMK teknikleri incelendikten sonra SMSM'ye ait matematiksel denklemler elde edilerek motor modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu model kullanılarak motorun MATLAB/Simulink üzerindeki modellemesi ve motor kontrolünün gerçekleştirilmesi için AT-DMK modeli oluşturulmuş, motor sıcaklığına bağlı olarak stator sargısında meydana gelen direnç değişimleri hesaplanmış, kontrole uygulanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Bu model üzerinde çeşitli moment ve açısal hızlarda motor benzetimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetimin doğruluğunun incelenmesi için motora sabit veya değişken moment ile farklı zamanlarda değişen açısal hız uygulanarak motorun verdiği akım tepkisi incelenmiştir. Aynı zamanda motorun değişken hız ve moment ile benzetimi gerçekleştirilerek verilen referans değerleri sağlayabildiği durumu ve moment değişimlerinde motor akımında meydana gelen tepkiler incelenmiştir. Son olarak motorun stator direnç değişimlerinin kontrol üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kontrolörde kullanılan stator direnç parametresi motor sıcaklığına göre güncellendiği veya sabit tutulduğu durumlardaki kontrolünün davranışları analiz edilmiştir.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

2.1 Yöntem

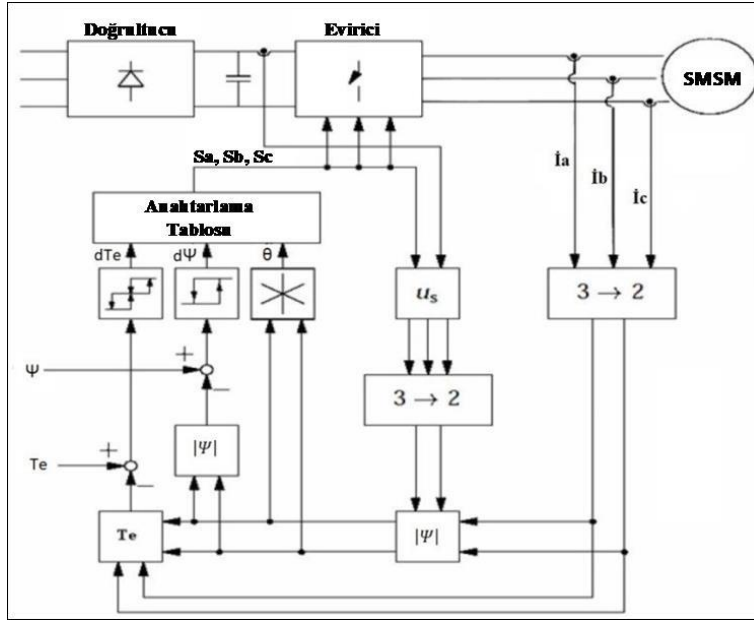
2.1. Method

SMSM içeren ürünlerin sürülmesinde kontrol kartına ve kontrol yazılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda SMSM kontrolü üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Deneysel çalışmanın doğrudan motor üzerinde uygulanması yüksek maliyet ve zaman kaybına yol açacağından

dolayı maliyeti düşürecek ve zaman kazanmayı sağlayacak benzetim çalışmalarından yararlanılmaktadır. Simülasyon çalışmaları motoru gerçek ortamda kontrol ediyormuş gibi çalışmamızı sağlayan sanal bir ortamdır. Bu ortamın oluşturulması için matematiksel denklemlerden yararlanılmaktadır.

Bu çalışmada SMSM'nin MATLAB/Simulink üzerinde benzetimi gerçekleştirilerek AT-DMK yöntemi uygulanıp sıcaklığın kontrol üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu yüzden motorun ve AT-

DMK için gerekli hesaplamaları yapan matematiksel denklemlerden yararlanılmıştır. Şekil 1'de AT-DMK sürücü sistemi gerilim modeline ait kontrol şeması verilmiştir. Bu şema incelendiğinde SMSM'nin matematiksel modeli kullanılarak benzetiminin oluşturulması ve AT-DMK hesaplama denklemleri kullanılarak kontrol benzetimine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu iki benzetim çalışması sonucunda SMSM'nin kontrolü vektör kontrol yöntemlerinden AT-DMK kullanılarak benzetim çalışması gerçekleştirilebilecektir.



Şekil 1. Anahtarlama tablolı doğrudan moment kontrol sürücü sisteminin gerilim modeline ait kontrol şeması.

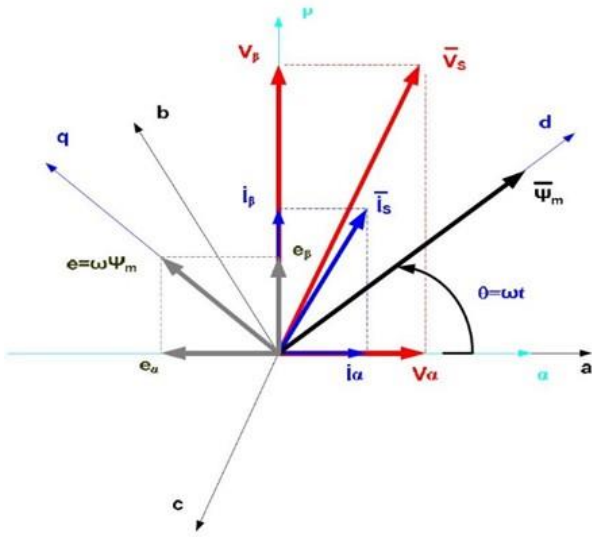
Figure 1. The control diagram of voltage model of direct torque control drive system with switching table.

2.2. Sürekli mıknatıslı senkron motorun matematiksel modeli

2.2. Mathematical model of permanent magnet synchronous motor

Motorların stator indüktansları rotorun açısal konumuna(θ_r) bağlı olarak değişmektedir. Bu durum motor moment ve gerilim denklemlerinin çözümünü zorlaştırması nedeniyle indüktans değerlerinin zamanla değişmediği d-q eksen takımına dönüşüm gerektirmektedir (Çelik & Kürüm, 2013; Çitçi & Dursun, 2017; Bilgin & Kazan, 2008; Akyol & Söylemez, 2017). Üç fazlı sistemlerin d-q eksen dönüşümünü gerçekleştirmek amacıyla öncelikle sabit stator düzlemine(α - β) dönüşüm yapılması gerekmektedir. Bu dönüşüm Clark dönüşüm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Böylece üç fazlı motor denklemleri iki fazlı α - β sabit eksen takımına indirgenmiş olur. Clark dönüşümünün

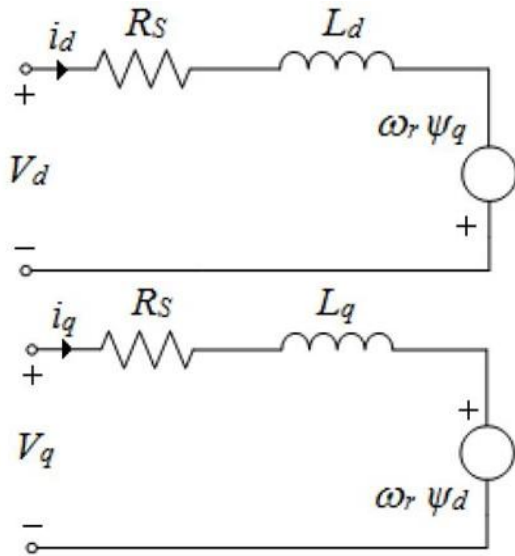
yapılması ile stator akımları iki fazlı stator referans düzlemine indirgenir. Ancak rotor açısal konum değişiminden moment ve gerilim denklemlerinin etkilenmemesi için motor değişkenlerinin rotor referans düzlemine (d-q) indirgenmesi gerekmektedir. Değişkenler d-q ekseninde yani rotor referans düzlemi üzerinde ifade edildiğinde rotor dönmesinden moment ve gerilim denklemleri etkilenmeyecektir. Ancak bu durumda motorun rotor pozisyonunun bilinmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Şekil 2'de verilen SMSM vektör diyagramında iki fazlı rotor referans düzlemi (d-q) görülmektedir.



Şekil 2. Sürekli mıknatıslı senkron motorun vektör diyagramı (abc, α - β ve d-q referans düzlemleri) (Asker, 2009).

Figure 2. Vector diagram of permanent magnet synchronous motor (abc, α - β and d-q reference planes) (Asker, 2009).

SMSM'ye ait d-q eşdeğer devresi dönüşüm denklemleri kullanılarak Şekil 3'te verildiği gibi elde edilir.



Şekil 3. Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q eşdeğer devresi.

Figure 3. The d-q equivalent circuit of permanent magnet synchronous motor.

SMSM d-q eşdeğer devresi kullanılarak aşağıdaki gerilim denklemleri yazılır.

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d \quad (2)$$

Burada d-q eksen gerilimleri V_d ve V_q ile, d-q eksen akımları i_d ve i_q ile, d-q eksen akıları Ψ_d ve Ψ_q ile ifade edilir.

Ψ_d ve Ψ_q akı denklemleri aşağıdaki gibi yazılır;

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_M \quad (3)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

Burada ifade edilen Ψ_M mıknatıs akısını, L_d ve L_q değişkenleri ise sırasıyla d ve q eksenine indirgenmiş endüktans değerlerini ifade etmektedir. Denklem 3 ile verilen ifade Denklem 1'de ve Denklem 4 ile verilen ifade Denklem 2'de yerine yazılarak denklem genişletilirse d-q eksen gerilimlerinin yeni denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r L_q i_q \quad (5)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_M \quad (6)$$

SMSM'nin elektriksel momenti d-q eksen takımına göre aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_d i_q - \Psi_q i_d] \quad (7)$$

Denklem 3 ile verilen Ψ_d eksen akısı ve Denklem 4 ile verilen Ψ_q eksen akısı Denklem 7 ile verilen T_e moment denkleminde yerine yazılırsa, Denklem 8 elde edilir.

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_M i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (8)$$

Denklem 8 ile verilen SMSM elektriksel moment denkleminde $\Psi_M i_q$ ifadesi mıknatıslar tarafından üretilen momenti, $(L_d - L_q) i_q i_d$ ifadesi relüktans momentini göstermektedir. Yüzey mıknatıslı SMSM'lerde L_d ve L_q indüktans değerleri $L_d = L_q$ birbirine eşittir. Bu yüzden yüzey mıknatıslı SMSM'ler için elektriksel moment denkleminin Denklem 9'daki gibi ifade edilir.

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_M i_q] \quad (9)$$

Gömülü mıknatıslı SMSM'lerde L_d ve L_q indüktans değerleri farklı olduğundan bu tür motorlarda Denklem 8 ile verilen elektriksel moment denkleminin kullanılır. Newton'un ikinci

yasası kullanılarak SMSM'ye ait hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_e - T_y = J \cdot \left(\frac{1}{p}\right) \frac{d\omega_e}{dt} + B_m \left(\frac{1}{p}\right) \omega_e \quad (10)$$

Bu denklemde J motor atalet momentini, T_y motor yük momentini, B_m motorun hareketi esnasında meydana gelen sürtünme katsayısını ve p kutup çifti sayısını ifade etmektedir. θ_e 'nin motorun elektriksel konumunu ifade ederken ω_e motorun elektriksel açısal hızını ifade etmekte ve bu iki ifade arasındaki bağlantı Denklem 11'de yazıldığı gibi ifade edilmektedir.

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \quad (11)$$

θ_r motor açısal konumu ile θ_e motor elektriksel açısal konumu arasındaki bağıntı Denklem 12'de, ω_r motorun açısal hızını ifade etmekte olup motorun elektriksel açısal hızını ifade eden ω_e ile arasındaki bağıntı Denklem 13'te verilmiştir.

$$\theta_r = \frac{1}{p} \theta_e \quad (12)$$

$$\omega_r = \frac{1}{p} \omega_e \quad (13)$$

Denklem 1-8 ile verilen eşitlikler kullanılarak SMSM'nin benzetim modeli oluşturulur. Bu model gerçek bir deney setinde bulunan motorun kendisini temsil etmektedir. Bu sayede motorun kendisini kullanmak yerine benzetimi kullanılarak bilgisayar üzerinde kontrol işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

2.3. Anahtarlama tablolü doğrudan moment kontrolü yapısı

2.3. Direct torque control structure with switching table

DMK temelde üç etki tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu etkiler moment, stator akısı ve d-q eksen akılarından elde edilen rotor açısı değerleridir. AT-DMK'nın temel çalışma prensibi SMSM'den elde edilen faz akımlarını kullanarak motorun moment, akı ve motor konumunun tahmin edilmesiyle motora referans olarak verilen moment ve akının, tahmin edilen değerlerle arasındaki hataya bağlı olarak bir gerilim vektörü seçme mantığına dayanmaktadır.

Şekil 1'de görüldüğü gibi moment hatası, stator akı hatası histerezis kontrole girmekte ve histerezis kontrolden çıkan büyüklükler ile d-q eksen akılarından elde edilen açıyla hesaplanan sektör

anahtarlama tablosuna giriş olarak uygulanmaktadır. Anahtarlama tablosuna uygulanan büyüklüklere göre uygun anahtarlama gerilim vektörleri seçilerek evirici anahtarları tetiklenmekte ve motora uygun gerilim vektörleri gönderilmektedir.

Stator akı hesabı motorun α - β eksenindeki gerilim, akım ve direnç değerinden yararlanılarak Denklem 14- 16 kullanılarak hesaplanmaktadır. Akı hatasının bulunması için bu denklemlerden elde edilen Ψ_s kullanılmaktadır.

$$\Psi_\alpha = \int (V_\alpha - R i_\alpha) dt \quad (14)$$

$$\Psi_\beta = \int (V_\beta - R i_\beta) dt \quad (15)$$

$$\Psi_s = \sqrt{(\Psi_\alpha)^2 + (\Psi_\beta)^2} \quad (16)$$

Motor momenti motorun α - β eksenindeki akıları, akımları ve motorun kutup sayısı kullanılarak hesaplanmaktadır. T_e moment değeri Denklem 17'deki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$T_e = \frac{2}{3} p (\Psi_\alpha i_\beta - \Psi_\beta i_\alpha) \quad (17)$$

Sektör belirleme işlemi ise stator uzay vektör konumu dikkate alınarak yapılmaktadır. Her sektör aralığı 60 derece olmak üzere 6 sektörden oluşmaktadır.

2.4. Benzetim çalışması

2.4. Simulation study

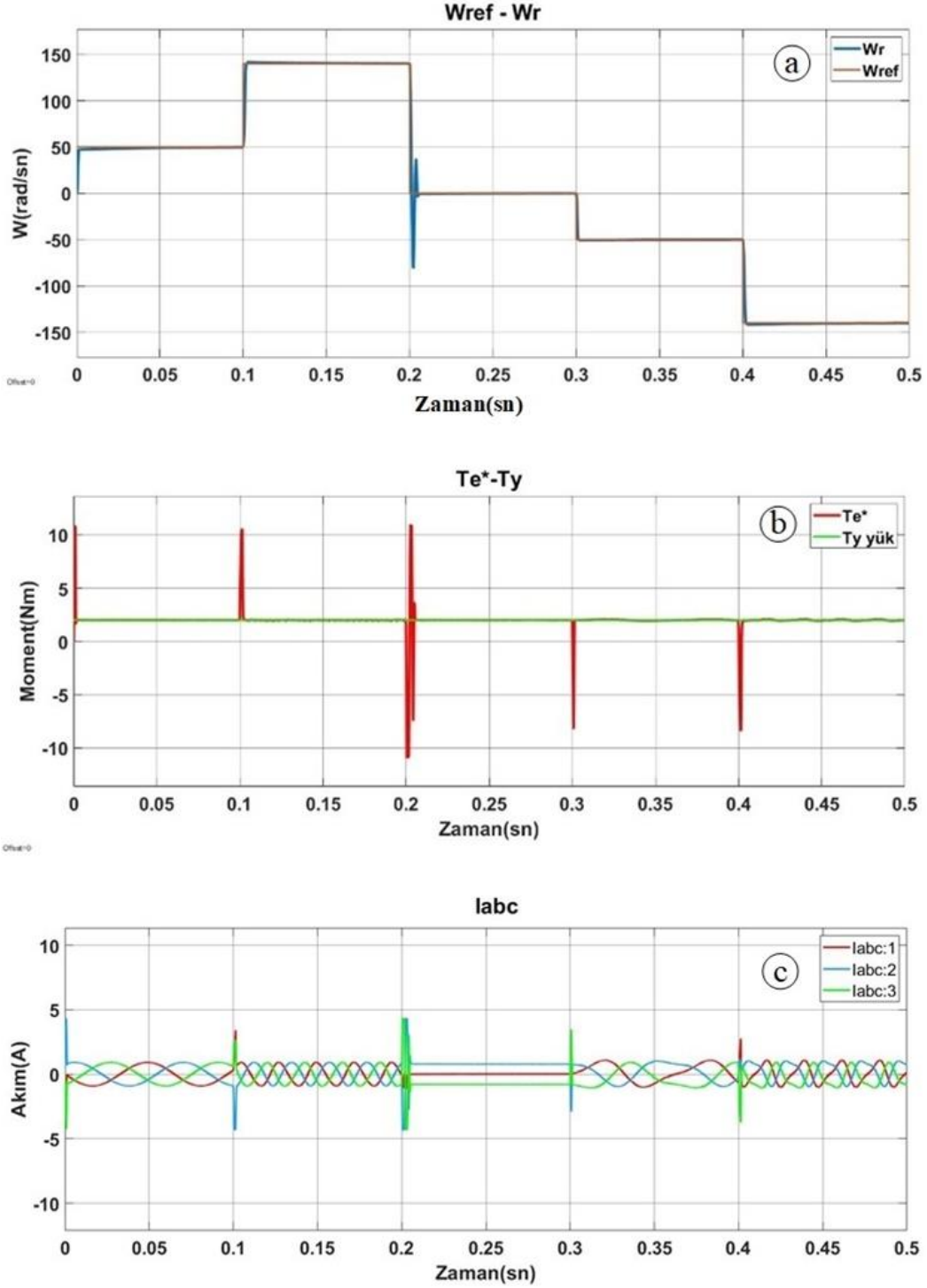
Şekil 1 ile verilen AT-DMK sürücü sistemi gerilim modeline ait kontrol şemasının benzetimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te verildiği gibi SMSM'nin AT-DMK Matlab/simulink modeli, Akı-moment-sektör hesabı, anahtarlama tablosu ve histerezis karşılaştırıcı, 3 faz evirici ve son olarak PI kontrol bloklarından meydana gelmektedir. Benzetimde de görüldüğü gibi motor modelinden akım ve gerilim bilgileri alınarak motorun akısı, elektriksel momenti ve sektör bilgileri hesaplanmaktadır. Ayrıca motorun açısal hız bilgisi alınarak referans hızla karşılaştırılmaktadır. Buradan elde edilen akı ve elektriksel moment hataları histerezis karşılaştırıcıya girmekte ve AT-DMK için akı histerezis karşılaştırıcıdan 1 veya 0 değerleri, moment histerezis karşılaştırıcıdan 1, 0, -1 değerleri çıkış olarak üretilmektedir. Motor hız kontrolü için klasik PI kullanılmıştır. Sabit oransal kp katsayısı ve sabit integral ki katsayısı kullanılarak farklı yük ve hız durumlarında motorun davranışı incelenmiştir.

3.1. Dört bölge AT-DMK benzetimi

3.1. Four-zone ST-DTC simulation

MATLAB/Simulink modeli oluşturulan SMSM'nin benzetim çalışmasında PI ($k_p=0.53$, $k_i=14$) parametreleri kullanılarak farklı zamanlarda değişen moment ve hız bilgisine göre motor tepkisi incelenmiştir.

Benzetim 0.5 sn boyunca gerçekleştirilmiştir. Motora çalışma süresince $T_y=2$ Nm yük altında farklı açısız hızlar uygulanarak motorun çalışma performansı incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5'teki grafiklerde sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde SMSM'nin istenilen referans moment ve hız değerlerinde çalışmasını sağladığı görülmüştür.

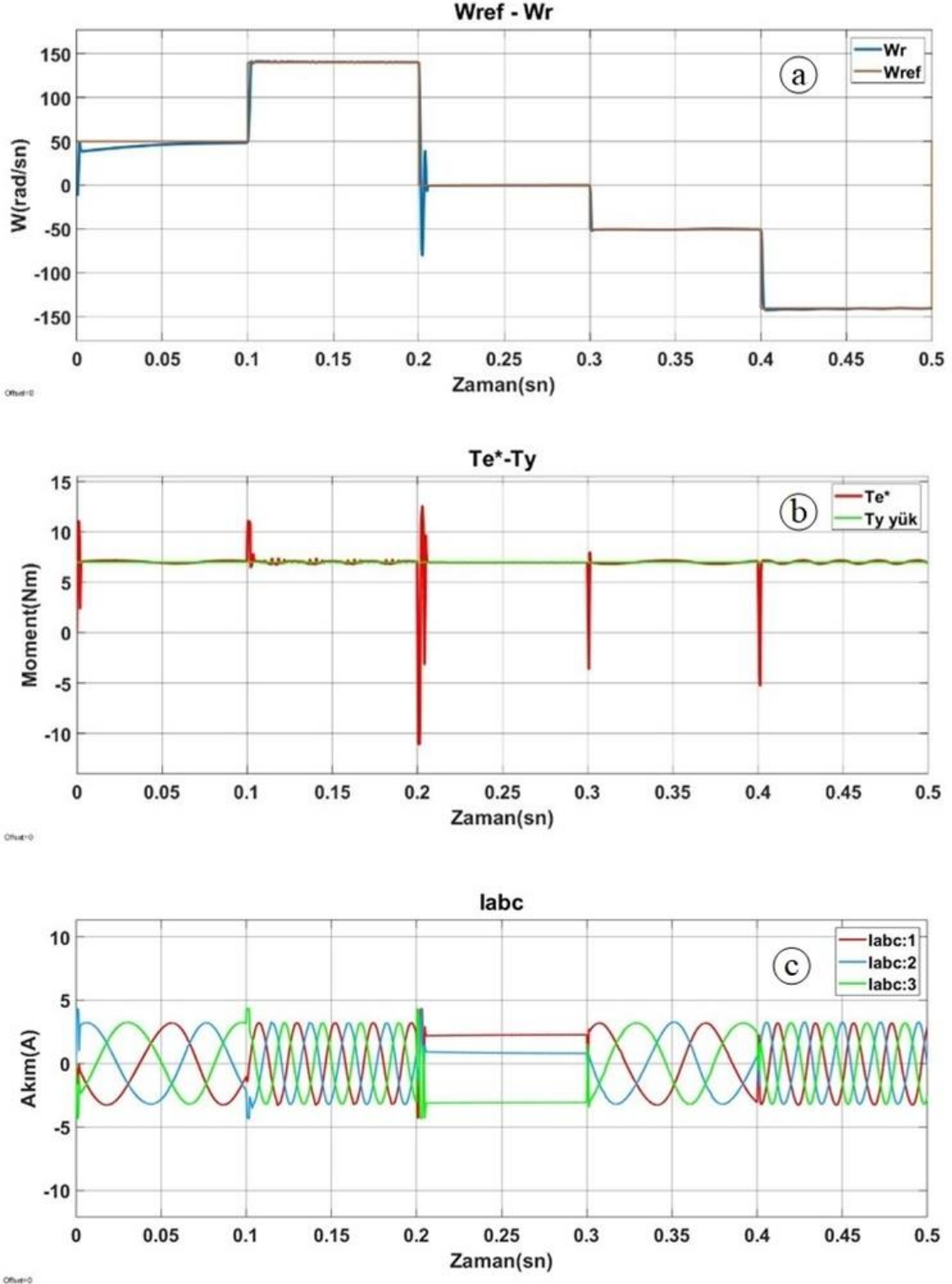


Şekil 5. Sürekli mıknatıslı senkron motorun dört bölge AT-DMK benzetim sonuçları ($T_y=2$ Nm) (a) Açısız hız grafiği, (b) Moment grafiği, (c) Iabc akımlarına ait grafik.

Figure 5. Four-zone ST-DTC simulation results of permanent magnet synchronous motor ($T_y=2$ Nm) (a) Angular velocity graph, (b) Torque graph, (c) Iabc current graph.

Benzetim çalışmaları motora sadece 2 Nm yük uygulanarak gerçekleştirildiğinden motorun farklı yük durumlarındaki kontrol başarısının incelenmesi için $T_y=7$ Nm yük altında Şekil 6a'da görüldüğü gibi aynı açısal hız değerlerinde benzetim gerçekleştirilmiştir. Maksimum motor

yükü altında gerçekleştirilen benzetim sonucundan elde edilen sonuçlar Şekil 6 b-c ile verilmiştir. Bu grafiklerden de görüldüğü üzere motor istenilen referans değerleri takip ederek başarılı kontrol performansını sunmuştur.



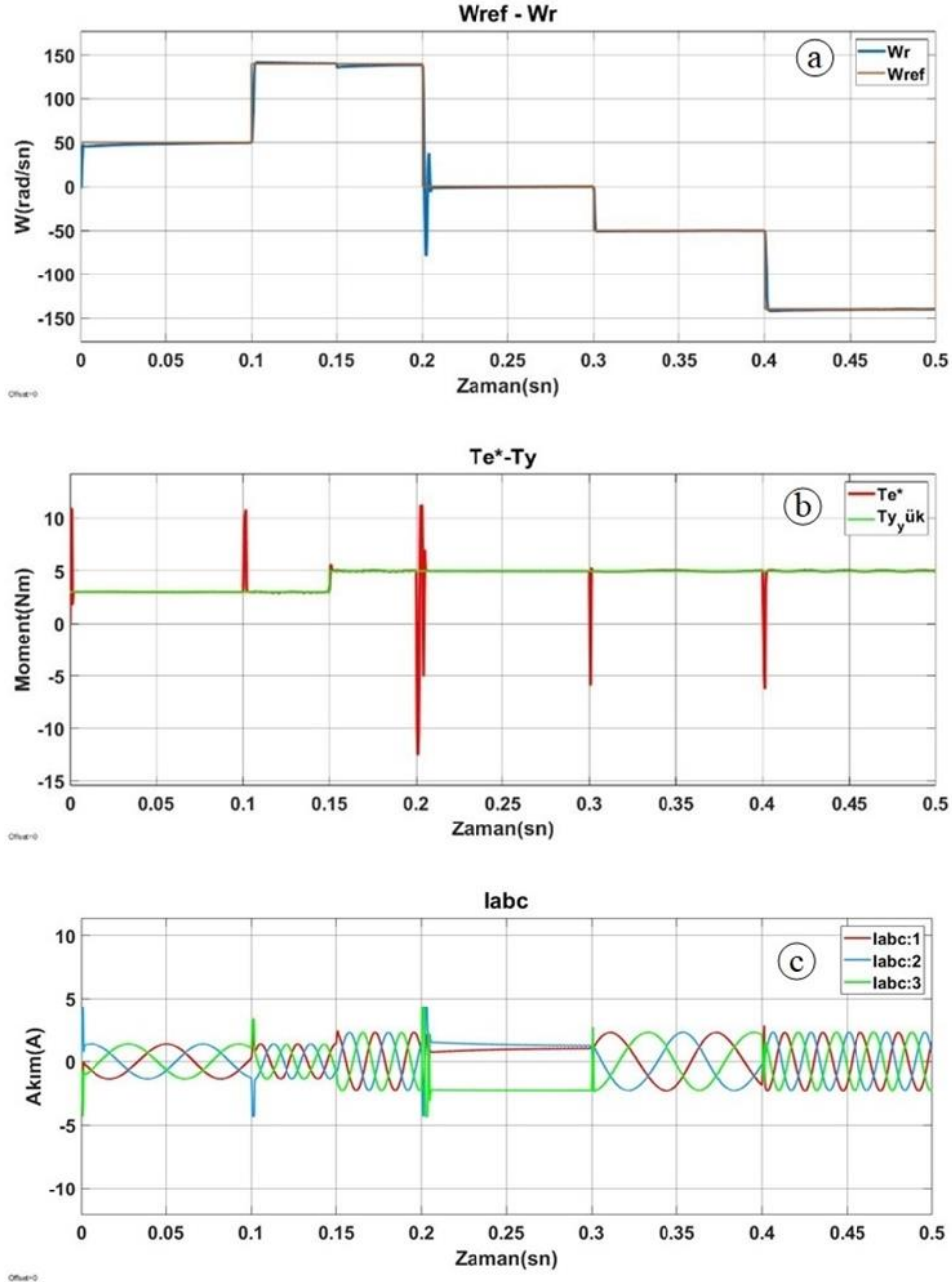
Şekil 6. Sürekli mıknatıslı senkron motorun dört bölgeyi AT-DMK benzetim sonuçları ($T_y=7$ Nm) (a) Açısal hız grafiği, (b) Moment grafiği, (c) İabc akımlarına ait grafik.

Figure 6. Four-zone ST-DTC simulation results of permanent magnet synchronous motor ($T_y=2$ Nm) (a) Angular velocity graph, (b) Moment graph, (c) Iabc current graph.

Motor çalışma esnasında meydana gelen moment değişiminin motor kontrolü üzerine olan etkisinin incelenmesi için aynı açısız hız değerleri kullanılmıştır. Şekil 7a'da motora 0.15 sn boyunca 3 Nm yük momenti uygulanmış, 0.15 sn'den sonra uygulanan yük momenti 5 Nm'ye çıkartılmıştır. Elde edilen kontrol sonuçları Şekil 7 b-c ile sunulmuştur.

Şekil 7c incelendiğinde 0.15'inci saniyede motora uygulanan yük momentinin artmasıyla birlikte

yükü karşılamak için motorun çektiği akımın da arttığı görülmüştür. Ayrıca motora uygulanan değişen açısız hız zamanlarında Şekil 7c'de verilen akım grafiğinde görüldüğü gibi açısız hız mutlak olarak arttığında her faz için akım frekansının arttığı, azaldığında ise akım frekansının azaldığı görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere motorun çektiği akımın frekansı arttığında motorun açısız hızı artmakta, frekansı azaldığında ise motorun açısız hızı azalmaktadır.



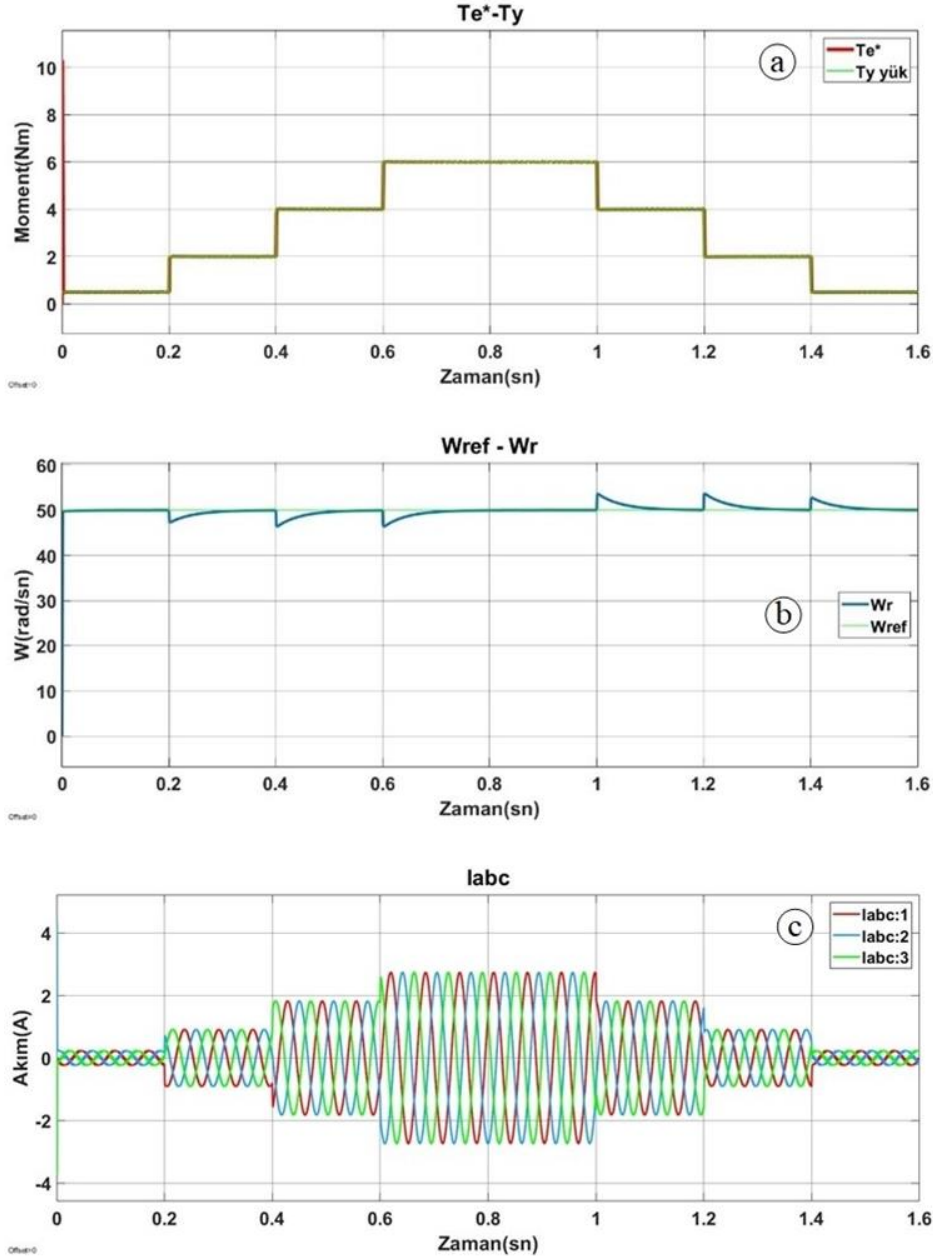
Şekil 7. Değişken hız ve yük koşullarında sürekli mıknatıslı senkron motorun dört bölge AT-DMK benzetim sonuçları ($T_y=3$ Nm'den 0.15'inci sn'de $T_y=5$ Nm'ye çıkartılmıştır) (a) Açısız hız grafiği, (b) Moment grafiği, (c) İabc akımlarına ait grafik.

Figure 7. Four-zone ST-DTC simulation results of permanent magnet synchronous motor under variable speed and load conditions (Increased from $T_y=3$ Nm to $T_y=5$ Nm in 0.15 sec) (a) Angular velocity graph, (b) Moment graph, (c) Iabc current graph.

Motor sabit açısal hız ile çalışırken motora uygulanan yükün artması ve azalması durumunda motor kontrolü üzerine olan etkisinin incelenmesi için açısal hız değerleri 50 rad/sn kullanılarak Şekil 8a ile verilen grafikte görüldüğü gibi farklı zamanlarda motora uygulanan yük değiştirilmiştir. Elde edilen kontrol sonuçları Şekil 8 b-c ile sunulmuştur.

Şekil 8b ile verilen grafik incelendiğinde motora uygulanan ani yük artışında motor hızında geçici süreli düşüş olduğu, ani yük azalması durumunda

ise motor hızında geçici süreli artış olduğu görülmektedir. Genel olarak moment değişim durumunda motor sabit hızda çalışmasını sürdürmüştür. Hız değişiminin motorun akım frekansını, moment değişiminin ise akım genliğini değiştirdiğini göz önüne alarak Şekil 8c incelendiğinde motorun sabit hızda çalışmasından dolayı akım frekansını değişmediği, değişken moment uygulandığından dolayı motor akımının genliğinin uygulanan moment değerine göre değiştiği görülmektedir.



Şekil 8. Sabit hız ve değişken yük koşullarında sürekli mıknatıslı senkron motorun dört bölgeli AT-DMK benzetim sonuçları ($w= 50$ rad/sn) (a) Moment grafiği, (b) Açısal hız grafiği, (c) I_{abc} akımlarına ait grafik.

Figure 8. Four-zone DT-DTC simulation results of permanent magnet synchronous motor under constant speed and variable load conditions. ($w= 50$ rad/sn) (a) Moment graph, (b) Angular velocity graph, (c) I_{abc} current graph.

3.2. Stator sargı direncinin etkisi

3.2. Effect of stator winding resistance

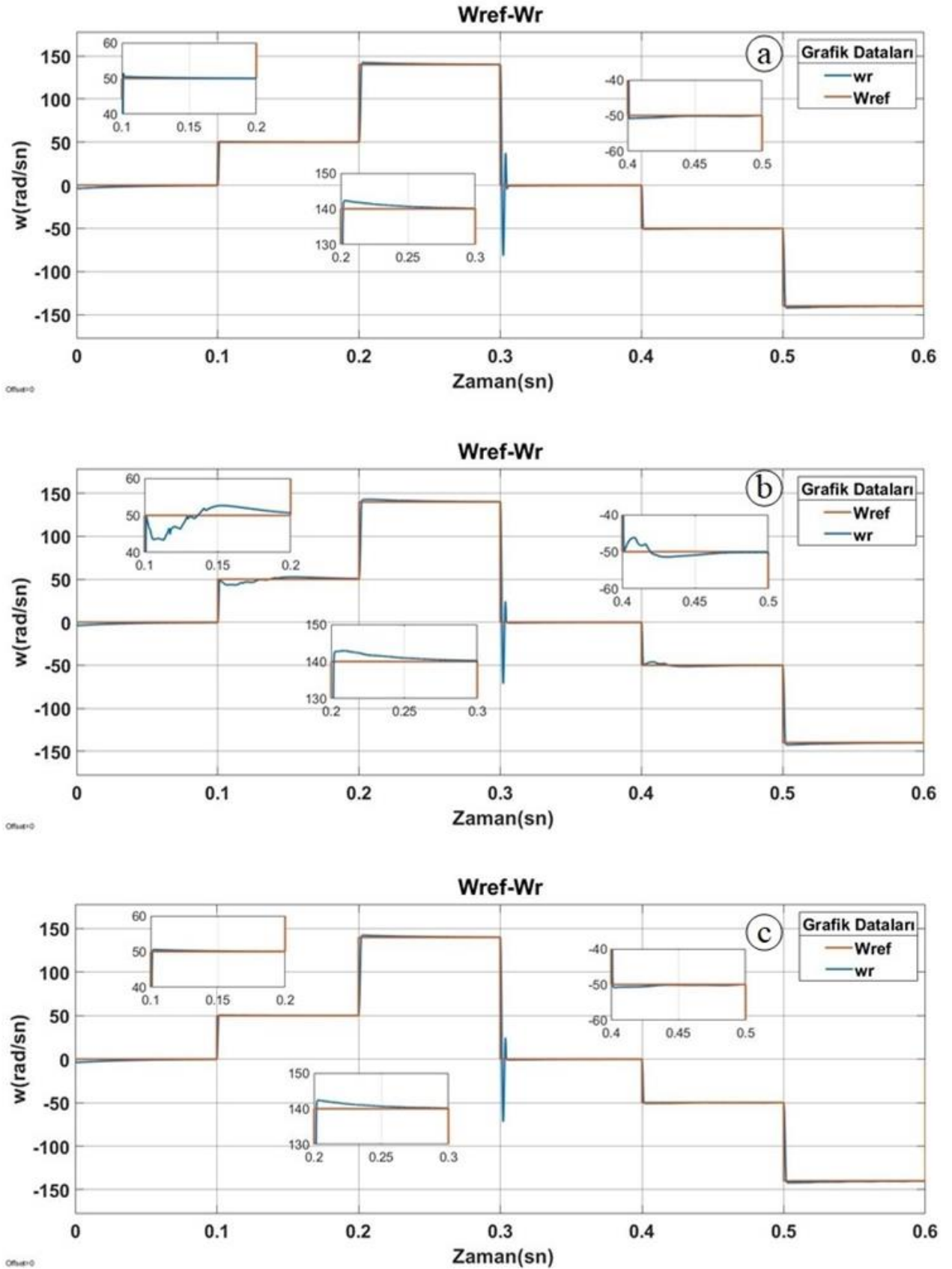
Tipik bir elektrik motorunda stator sargısı birkaç yalıtımlı bakır bobinden meydana gelmektedir. Sıcaklığa göre motorun bakır bobin sargılarının direnç değişim fonksiyonu Denklem 18'deki gibi tanımlanabilmektedir (Wilson vd, 2010).

$$R_s = R_{s0} + \gamma R_{s0}(T_s - T_0) \quad (18)$$

Burada R_{s0} direnci motorun T_0 sıcaklığındaki direncini, R_s motorun T_s sıcaklığında çalıştığı andaki direncini ve γ bakırın sıcaklık katsayısını ($\gamma = 3.93 \times 10^{-3}$) ifade etmektedir. Örneğin motor 25°C olduğunda $R_{s0} = 8.46 \text{ ohm}$ iken 120°C 'de $R_s = 11.618 \text{ ohm}$ olmaktadır.

Şekil 4'te verilen SMSM'nin AT-DMK Matlab/simulink Akı-Moment-Sektör hesaplama bloğunda kullanılan kontrol direncine farklı direnç değerleri atamak için R_k olarak tanımlanmıştır. Bu sayede motor ısındığında motor direncinin değiştiği durumu gerçek bir uygulamaya benzer olarak simülasyon üzerinde uygulanabilmiş ve

stator direnç değişiminin kontrol üzerinde oluşturduğu etki gözlemlenebilir hale getirilmiştir. İlk olarak motorun 25°C 'de sabit sıcaklıkta olduğu senaryosu göz önünde bulundurularak motor direnci $R_s=8.46 \text{ ohm}$ ve kontrol direnci $R_k=8.46 \text{ ohm}$ olarak alınmıştır. Stator ve kontrol dirençleri aynı değerde olduğunda elde edilen açısal hız kontrol sonucu Şekil 9 a'da görüldüğü gibi başarılı olmuştur. İkinci olarak motorun sıcaklığının 25°C 'den 120°C 'ye çıktığı varsayılmış ve motorun anlık direnci Denklem 18 ile $R_s=11.61 \text{ ohm}$ olduğu hesaplanmış ancak R_k 'da herhangi bir güncelleme yapılmamıştır. Bu durumda $R_s=11.61 \text{ ohm}$ ve $R_k=8.46 \text{ ohm}$ olarak alınmıştır. Simülasyon çalışmasından elde edilen sonuç grafiği Şekil 9 b ile verilmiştir. Grafik incelendiğinde motorun sıcaklıkla direnç değişimi hız kontrolü üzerinde yüksek dalgalanmalara ve yerleşme zamanının artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak R_k ile R_s aynı değere getirilerek güncelleme yapılmıştır. Bu durumda $R_s=11.61 \text{ ohm}$ ve $R_k=11.61 \text{ ohm}$ olarak alınmıştır. Simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar Şekil 9c'de verilmiştir. R_k ile R_s 'nin aynı değerde tutulması direnç değişiminin kontrol üzerindeki olumsuz davranışını ortadan kaldırdığı görülmüştür.



Şekil 9. Değişken hız ve sabit yük koşullarında sürekli mıknatıslı senkron motorun stator sargı direncinin kontrolöre olan etkisinin incelenmesi ($T_y = 2$ Nm) (a) $R_s = 8.46$ ohm, $R_k = 8.46$ ohm, (b) $R_s = 11.61$ ohm, $R_k = 8.46$ ohm, (c) $R_s = 11.61$ ohm, $R_k = 11.61$ ohm.

Figure 9. Investigation of the effect of stator winding resistance on the controller of permanent magnet synchronous motor under variable speed and constant load conditions ($T_y = 2$ Nm) (a) $R_s = 8.46$ ohm, $R_k = 8.46$ ohm, (b) $R_s = 11.61$ ohm, $R_k = 8.46$ ohm, (c) $R_s = 11.61$ ohm, $R_k = 11.61$ ohm.

Şekil 9(a-b-c) grafikleri ile ilgili motor açısız hızının 50, 140, -50, -140 rad/sn'de kontrol davranışına ait tepe değeri, yüzde aşma, yükselme ve yerleşme zamanları Tablo 3 ile sunulmuştur. Tabloda Rk ve Rs'nin aynı olduğu durumlarda tepe değeri, yüzde aşma, yükselme ve yerleşme zamanları birbirine çok yakın sonuçlar verirken, kontrol direncinin güncellenmediği durumda ise özellikle 50 rad/sn ve -50 rad/sn'de yüzde aşma ve tepe değeri artarken yükselme ve yerleşme zamanları da artmıştır. Motor kontrolünde direnç etkisinden kaynaklanan hata düşük açısız hızlarda artarken yüksek açısız hızlarda azalmaktadır. 140 rad/sn ve -140 rad/sn'de 50 rad/sn ve -50 rad/sn'de

meydana gelen bozulmalara benzer ancak daha az miktarda bozulmalar meydana geldiği Tablo 3'te açıkça görülmektedir. Tabloda verilen sonuçlardan da görüldüğü gibi stator direncinin kontrole olan etkisinin özellikle düşük açısız hızlarda fazla olduğu ve kontrol direnci güncellenmediği zamanda motor hız kontrolüne olumsuz yönde etki ettiğini, dinamik olarak güncellendiğinde ise bu etkinin ortadan kalkıp hız kontrolünün daha başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda geniş hız aralığında kullanılan özellikle servo sistemlerdeki SMSM'lerin direnç değişimi dinamik olarak güncellenmesi gerekmektedir.

Tablo 3. Sabit yük momentinde farklı açısız hızlar altında kontrol sonuçları

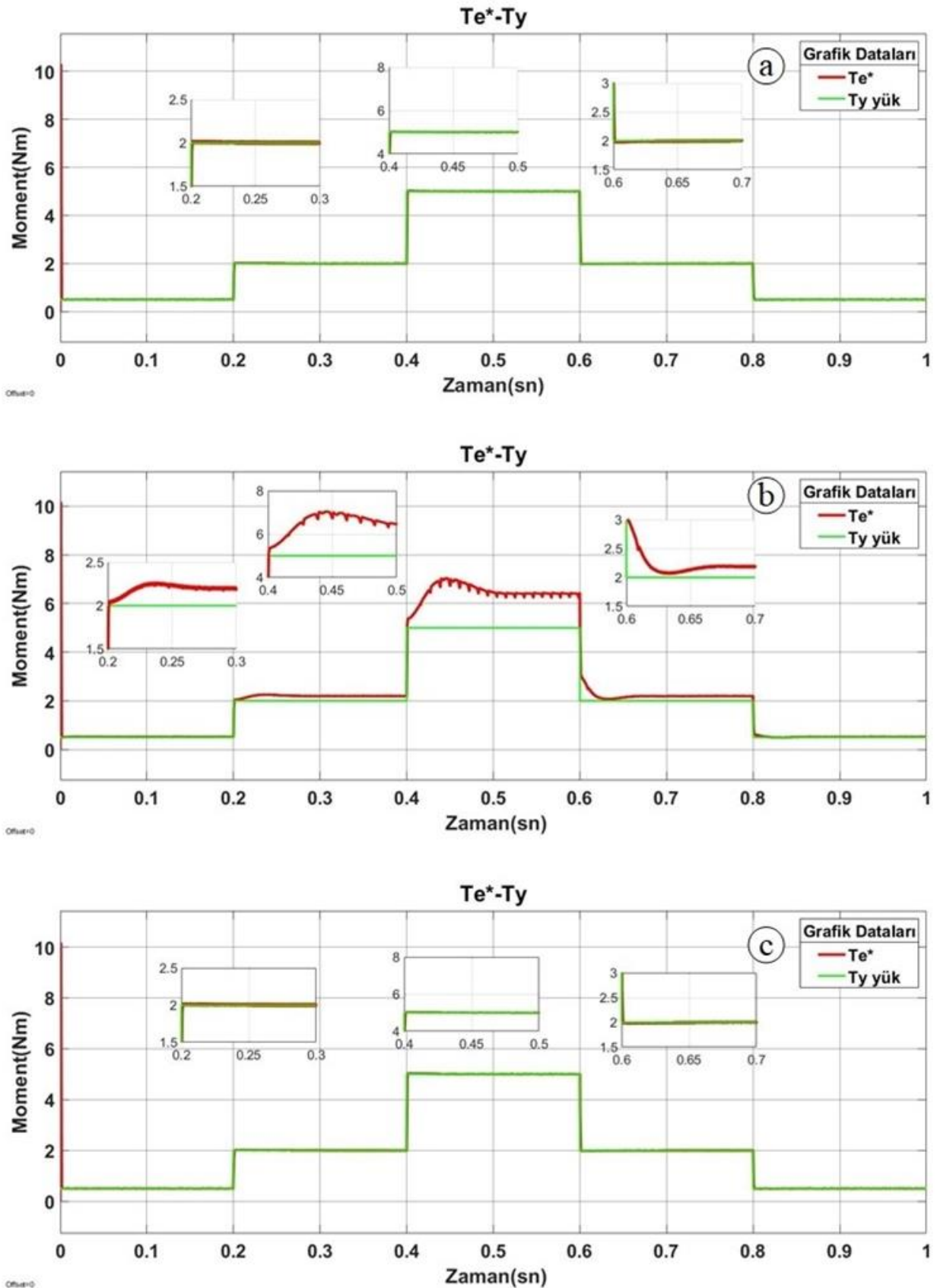
Table 3. Control results under variable angular speeds at constant load torque

Rs (ohm)	Rk (ohm)	Rk Durumu	Tepe Değeri	Yüzde Aşma(%)	Yükselme Zamanı(sn)	Yerleşme Zamanı(sn)
W=50 rad/sn, Tyük=2 Nm						
8,46	8,46	✓	51.570	3.140	6.5268e-04	0.0014
11,61	8,46	✗	52.6821	5.3643	7.2060e-04	0.0896
11,61	11,61	✓	50.5640	1.1281	6.7648e-04	0.0011
W=140 rad/sn, Tyük=2 Nm						
8,46	8,46	✓	142.3384	1.6703	0.0010	0.0130
11,61	8,46	✗	142.9068	2.0763	0.0011	0.0248
11,61	11,61	✓	142.4075	1.7196	0.0011	0.0146
W=-50 rad/sn, Tyük=2 Nm						
8,46	8,46	✓	50.9179	1.8359	6.4480e-04	0.0010
11,61	8,46	✗	51.3994	2.7989	6.6563e-04	0.0458
11,61	11,61	✓	50.8009	1.6017	6.5488e-04	0.0011
W=-140 rad/sn, Tyük=2 Nm						
8,46	8,46	✓	142.1508	1.5363	0.0010	0.0119
11,61	8,46	✗	142.5388	1.8134	0.0010	0.0173
11,61	11,61	✓	142.0910	1.4936	0.0010	0.0119

✓ = Rk güncel, ✗ = Rk güncel değil

Rs değişiminin moment kontrolü üzerindeki etkisini göstermek için ikinci bir çalışma yapılmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak Rs değişiminin motorun açısız hızı üzerine olan etkisinin moment üzerindeki durumunu incelemek için motor açısız hızı 50 rad/sn alınarak farklı yük momentleri altında simülasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuç grafikleri Şekil 10(a-b-c) ile sunulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde Rk'nın güncel olduğu Şekil 10a grafiğinde motor

momentinin referans momenti takip ederken Rk'nın güncel olmadığı durumda motor momentinde ciddi sapmalar meydana geldiği Şekil 10b'de açıkça görülmüştür. Rk güncellendiğinde motorun referans momenti takip ettiği Şekil 10c ile gösterilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere kontrol direncinin güncel tutulması motor momentinde meydana gelen olumsuzluğu azaltmıştır.



Şekil 10. Sabit hız ve değişken yük koşullarında sürekli mıknatıslı senkron motorun stator sargı direncinin kontrolöre olan etkisinin incelenmesi ($w=50$ rad/sn) (a) $R_s=8.46$ ohm, $R_k=8.46$ ohm (b) $R_s=11.61$ ohm, $R_k=8.46$ ohm (c) $R_s=11.61$ ohm, $R_k=11.61$ ohm.

Figure 10. Investigation of the effect of stator winding resistance on the controller of permanent magnet synchronous motor under constant speed and variable load conditions ($w=50$ rad/sn) (a) $R_s=8.46$ ohm, $R_k=8.46$ ohm (b) $R_s=11.61$ ohm, $R_k=8.46$ ohm (c) $R_s=11.61$ ohm, $R_k=11.61$ ohm.

Şekil 10(a-b-c) grafikleri ile ilgili motor momentinin 0.5, 2 ve 5 Nm'deki anına ait tepe değeri, yüzde aşma, yükselme ve yerleşme zamanları Tablo 4 ile sunulmuştur. Tabloda 0.5 Nm değerinde geleneksel DMK moment dalgalanması nedeniyle yerleşme zamanı hesaplanamamıştır. Ancak genel olarak tabloda Rk'nın güncellendiği durumlarda tepe değeri, yüzde aşma, yükselme ve yerleşme zamanları birbirine yakın sonuçlar verirken, kontrol direncinin güncellenmediği durumda tepe

değerinin, yüzde aşmanın, yükselme zamanının arttığı ve Şekil 10b'de de görüldüğü üzere yerleşmenin gerçekleşmediğinden dolayı yerleşme zamanının hesaplanamadığı ortaya çıkmıştır. Bu sebeple Rk'nın güncel olmadığı motor moment kontrolüne olumsuz yönde etki ettiğini, güncel olduğunda ise motor moment kontrolünün daha başarılı sonuç verdiği ve özellikle momentin ön planda olduğu uygulamalarda Rk dinamik güncellemesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Tablo 4. Sabit açısal hızda farklı yük momentleri altında kontrol sonuçları

Table 4. Control results under variable load moments at constant angular speed

Rs (ohm)	Rk (ohm)	Zaman Aralığı(sn)	Rk Durumu	Tepe Değeri	Yüzde Aşma(%)	Yükselme Zamanı(sn)	Yerleşme Zamanı(sn)
Tyük=0.5 Nm, W=50 rad/sn							
8,46	8,46		✓	0.5184	3.6767	4.4102e-04	-
11,61	8,46	0.002-0.2	✗	0.5342	6.8471	4.4595e-04	-
11,61	11,61		✓	0.5184	1.6231	4.4800e-04	-
Tyük=2 Nm, W=50 rad/sn							
8,46	8,46		✓	2.0242	1.2087	4.7783e-04	0.0009
11,61	8,46	0.2-0.4	✗	2.2673	13.3638	4.4786e-04	-
11,61	11,61		✓	2.0243	1.2144	4.7749e-04	0.0009
Tyük=5 Nm, W=50 rad/sn							
8,46	8,46		✓	5.0329	0.6573	4.8798e-04	0.0009
11,61	8,46	0.4-0.6	✗	7.0476	40.9526	3.5905e-04	-
11,61	11,61		✓	5.0336	0.6718	4.8052e-04	0.0009

✓ = Rk güncel, ✗ = Rk güncel değil

4. Sonuç ve öneriler

4. Conclusion and recommendations

Bu çalışmada AT-DMK SMSM'ye uygulanarak SMSM'nin farklı yük, hız koşulları altındaki ve motorun ısınması sonucu meydana gelen stator direnç değişiminin kontrol üzerindeki davranışı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan benzetimlerle AT-DMK yöntemin başarısı ve stator direnç değişiminin kontrol üzerine olan etkisi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlarda da görüldüğü gibi stator direnç değişiminin özellikle aşma ve yerleşme sürelerinin artması ve moment kontrolünde sürekli durum hatalarının oluşması gibi kontrolör üzerinde azımsanmayacak bir etkisinin olduğunu ve bu etkinin giderilmesi içinde direnç değişiminin dinamik olarak takip edilmesi gerektiği gözlenmiştir. Böylece, özellikle düşük hızlarda dirençten kaynaklı yüksek kontrol hatasına sebep olan ve geleneksel DMK'nın kullanımını olumsuz etkileyen direnç faktörünün direncin izlenip hesaplanması ve kontrolörde eş zamanlı olarak güncellenmesiyle etkisinin ortadan kaldırılabileceği gösterilmiştir. Bundan sonraki çalışmada direnç değişimi etkisini göz önüne alan

dinamik kontrol yöntemleri üzerinde çalışmalar yapılacaktır.

Yazar katkısı

Author contribution

Araştırmacıardan Bozkurt; makale fikrinin oluşturulması, literatür verilerin elde edilmesi, bulgular ve sonuç kısmının şekillendirilmesine yönelik katkı sunmuştur. Polat ise, makalenin düzenlenmesi, ilerleyişinin denetlenmesi, ilgili tabloların/bulguların ve sonuç kısmının değerlendirilmesi hususunda katkı sunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar**References**

- Akyol, I. E., & Soylemez, M. T. (2017). Position sensorless field oriented control of IPMSM under parameter Uncertainties. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14501-14506.
- Araz, H. K., & Yilmaz, M. (2020). 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*, 35(2), 1089-1109.
- Asker, M. E. (2009). *Sürekli mıknatıslı senkron motorlara vektör ve doğrudan moment kontrol yöntemlerinin uygulanması*. [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Baneira F., Asiminoaei L., Doval-Gandoy J., Delpino H., Yepes A. G., & Godbersen J. (2019). Estimation method of stator winding resistance for induction motor drives based on dc-signal injection suitable for low inertia. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(6), 5646-5654. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2869412>
- Bilgin O., & Kazan F. A. (2008). Sabit mıknatıslı senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolü ve simülasyonu. *2008 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)* (pp. 1-5), Bursa.
- Cao, B., Grainger, B. M., Wang, X., Zou, Y., Reed, G. F., & Mao, Z. H. (2020). Direct torque model predictive control of a five-phase permanent magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2346-2360. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3011312>
- Çelik, H. (2012). *Sabit mıknatıslı senkron motorun DSP tabanlı doğrudan moment kontrolü*. [Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Çelik, H., & KÜRÜM, H. (2013). Sabit mıknatıslı senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolü. *Engineering Sciences*, 8(1), 67-85. <https://doi.org/10.12739/nwsaes.v8i1.5000066828>
- Çiftçi, A., & Dursun, M. (2017). Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan sürekli mıknatıslı senkron generatörün maksimum güç izleme algoritması ile vektör kontrolü. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(2), 356-369.
- Dalcalı, A., & Ocak C. (2018). Farklı mıknatıslı malzemelerinin yüzey mıknatıslı doğrudan tahrikli sabit mıknatıslı senkron motor performansına etkisi. *Journal Of Awareness*, 3(5), 217-224.
- Deng, W., Li, H., & Rong, J. (2020). A novel direct torque control of matrix converter-fed PMSM drives using dynamic sector boundary for common-mode voltage minimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(1), 70-80. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2962408>
- Hartani, K., Sekour, M. H., & Draou, A. (2013). *A new direct torque control scheme for PMSM with on-line stator resistance tuning*. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (ss. 721-726). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635699>
- Kivanc, O. C., & Ozturk, S. B. (2018). Sensorless PMSM drive based on stator feedforward voltage estimation improved with MRAS multiparameter estimation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(3), 1326-1337.
- Kürüm, H. Y., & Akın, E. (2018). Sabit mıknatıslı senkron motorun parametre tespiti. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 183-191.
- Li, H., Wang, Z., Xu, Z., Wang, X., & Hu, Y. (2020). Feedback linearization based direct torque control for IPMSMs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(3), 3135-3148.
- Vaez-Zadeh, S. (2018). Analysis of a DTC with back EMF oriented voltage for PMS motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(3), 1594-1596.
- Wang, M., Sun, D., Ke, W., & Nian, H. (2020). A universal lookup table-based direct torque control for OW-PMSM drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(6), 6188-6191. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3037202>
- Wang, X., Wang, Z., & Xu, Z. (2018). A hybrid direct torque control scheme for dual three-phase PMSM drives with improved operation performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1622-1634. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2835454>
- Wang, Z., Wang, X., Cao, J., Cheng, M., & Hu, Y. (2017). Direct torque control of T-NPC inverters-fed double-stator-winding PMSM drives with SVM. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(2), 1541-1553. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2689008>
- Wilson, S. D., Stewart, P., & Taylor, B. P. (2010). Methods of resistance estimation in permanent magnet synchronous motors for real-time thermal management. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 698-707. <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2051811>
- Ye, X., & Zhang, T. (2010). Direct torque control of permanent magnet synchronous motor using

space vector modulation. *2010 Chinese Control and Decision Conference* (ss. 1450-1453). IEEE. [https://doi: 10.1109/CCDC.2010.5498221](https://doi.org/10.1109/CCDC.2010.5498221)

Zhang, Z., & Liu, X. (2019). A duty ratio control strategy to reduce both torque and flux ripples of DTC for permanent magnet synchronous machines. *IEEE Access* 7 (ss. 11820-11828). [https://doi: 10.1109/ACCESS.2019.2892121](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892121)

Zhang, K., Fan, M., Yang, Y., Chen, R., Zhu, Z., Garcia, C., & Rodriguez, J. (2020). Tolerant sequential model predictive direct torque control of permanent magnet synchronous machine drives. *IEEE Transactions on Transportation*

Electrification, 6(3), 1167-1176. [https://doi: 10.1109/TTE.2020.3008828](https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3008828)

Zhong, L., Rahman, M. F., Hu, W. Y., & Lim, K. W. (1997). Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives. *IEEE transactions on power electronics*, 12(3), 528-536. [https://doi: 10.1109/63.575680](https://doi.org/10.1109/63.575680)

Zhu, Z. Q., Zhu, X., Sun, P. D., & Howe, D. (2007). Estimation of winding resistance and PM flux-linkage in brushless AC machines by reduced-order extended Kalman Filter. *2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control* (ss. 740-745). IEEE. [https://doi: 10.1109/ICNSC.2007.372872](https://doi.org/10.1109/ICNSC.2007.372872)