



KKG kullanılan hız algılayıcısız SMSM için AYK ve DMK'nin karşılaştırılması

Comparison of FOC and DTC for speed sensorless PMSM using

Barış Çavuş^{1,*} , Mustafa Aktaş² 

^{1,2} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun Türkiye

Öz

Bu çalışmada hız sensörsüz sabit mıknatıslı senkron motorun (SMSM) doğrudan moment kontrolü (DMK) ve alan yönlendirmeli kontrol (AYK) benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Kontrol yöntemleri için gerekli olan hız sinyali kayan kipli gözlemci (KKG) ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda SMSM'nin akım, hız (ölçülen ve tahmin edilen) ve moment sinyalleri elde edilmiştir. DMK ve AYK performansının değerlendirilebilmesi için elde edilen sinyallerin toplam harmonik bozunum (THB) ve ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ölçülen ve tahmin edilen hız sinyalleri için hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK) kriteri kullanılarak DMK ve AYK karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışma ile DMK ve AYK yöntemlerinin birbirlerine göre üstün ve eksik oldukları durumlar belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: SMSM, DMK, AYK, KKG, THB, ADD, HKOK

1. Giriş

Sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM), endüstride olduğu kadar otomotiv ve robotik gibi uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. SMSM'nin yaygın olarak kullanılmasının nedenleri arasında küçük boyut olması, yüksek hızlı tepki vermesi, düşük atalet momenti ve bakım gerektirmemesi gibi özellikler sayılabilir [4]. Diğer makinelerle karşılaştırıldığı zaman, gelişmiş kontrol yöntemlerinin SMSM'ye uygulanması daha kolaydır [5].

SMSM'nin kontrolsüz olarak doğrudan sürülmesi durumunda başlangıç akımının yüksek olması, dinamik tepkilerinin düşük olması ve çalışma hatasının yüksek olması gibi olumsuzluklarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle daha yüksek dinamik performans ve verim elde edilebilmesi için vektör kontrol yöntemleri kullanılmalıdır [5, 6]. Bu şekilde SMSM, Doğru Akım (DA) motoruna benzetilerek motorun akısı ve momentini birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir [7]. Vektör kontrol yöntemlerinden biri olan alan yönlendirmeli kontrol (AYK), 1971 yılında F. Blaschke tarafından önerilmiştir [8]. AYK'de, park dönüşümü kullanılarak motorun 3 faz değişkenleri 2 faz değişkenlerine dönüştürülür. Dönüşüm sonucunda elde edilen fazlardan biri akı diğeri ise moment kontrolünde kullanılır. Böylece 3 fazlı SMSM DA motor gibi kontrol edilebilir [9]. Düşük anahtarlama frekansı, moment ve

Abstract

In this study, direct torque control (DTC) and field oriented control (FOC) simulation study of a speed sensorless permanent magnet synchronous motor (PMSM) is carried out. The speed signal required for the control methods was obtained with a sliding mode observer (SMO). As a result of the study, current, speed (measured and estimated) and torque signals of PMSM were obtained. Total harmonic distortion (THD) and discrete wavelet transform (DWT) analysis of the obtained signals were performed to evaluate the performance of DTC and FOC. In addition, DTC and FOC comparisons were made using the root mean square error (RMSE) criterion for the measured and estimated speed signals. In this study, it was determined that the DTC and FOC methods are superior and deficient compared to each other.

Keywords: PMSM, DTC, FOC, SMO, THD, DWT, RMSE

akıdaki dalgalanmanın az olması, yüksek kararlılıkta çalışma AYK'nin en belirgin avantajlarıdır. Fakat AYK'nin dinamik tepkisi hızlı değildir ve sistem değişkenlerine bağımlılığı daha fazladır [10]. Ayrıca bu kontrolde tüm motor değişkenlerine "park dönüşümü" uygulanır ve bu durum sistemin karmaşıklaşmasına ve yavaşlamasına neden olur [11]. Diğer bir vektör kontrol yöntemi olan doğrudan moment kontrolü (DMK), 1985 yılında Takahashi ve Noguchi tarafından önerilmiştir [12]. DMK'de, moment ve akı doğrudan motor değişkenleri kullanılarak hesaplanır. Devamında akı ve moment, referans değerleri ile karşılaştırılarak doğrudan kontrol edilir [13, 14]. DMK'nin avantajları arasında koordinat sistemi dönüşümünün ve akım kontrolörlerinin olmaması, yüksek dinamik tepki, motor parametrelerine bağımlılığın az olması, gösterilebilir [15, 16]. Ayrıca eksen dönüşümü olmadığı için DMK algoritmasının çalışması hızlıdır. Fakat DMK ile kontrol edilen motorun akı ve momentinde dalgalanma çok fazladır ve anahtarlama sinyalinin frekansı oldukça değişkendir [17, 18].

Vektör kontrolü uygulayabilmek için konum ve hız bilgisine ihtiyaç vardır [19, 20]. Kontrol için gerekli olan hız bilgisi, motora bağlanacak hız sensörü vasıtasıyla ölçülebileceği gibi motor değişkenleri kullanılarak hesaplanabilir [21-23]. Motor kontrolünde sensör kullanılması uygulananabilirliğinin zorluğu, maliyeti ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: baris.cavus@omu.edu.tr (B. Çavuş)

Geliş / Received: 09.05.2022 Kabul / Accepted: 16.07.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1114082

gürültülü çalışmaya sebep olması gibi dezavantajları vardır [24, 25]. Bu nedenle motor modeli kullanılarak hız kestiriminin yapıldığı sensörsüz motor kontrol yöntemleri önerilmiştir [26, 27]. Bu yöntemlerden biri farklı kontrol uygulamalarında başarısını ortaya koymuş olan kayan kipli gözlemcidir (KKG) [28, 29].

Bu çalışmada KKG ile sensörsüz çalıştırılan SMSM'nin en çok kullanılan motor kontrol yöntemleri olan DMK ve AYK performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Şekil 1, 2 ve Denklem (1)-(6) kullanılarak MATLAB m-file ortamında sistem modellemesi yapılmıştır. Her iki kontrol yöntemi, için motor üç faz akımı, momenti, kestirilen ve gerçek motor hız sinyalleri elde edilmiştir. Her iki kontrol yönteminde elde edilen hız sinyalleri ile hız hatası elde edilmiştir. Bunun yanı sıra elde edilen sinyaller kullanılarak Toplam Harmonik Bozunum (THB) ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) standart sapma değerleri elde edilmiş ve iki yöntemin performansı değerlendirilmiştir. Böylece DMK ve AYK yöntemlerinin birbirlerine göre üstün ve eksik oldukları durumlar belirlenmiştir.

2. Sürekli mıknatıslı senkron motor

Sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) iki parçadan (bir rotor ve üç fazlı stator sargıları) oluşur. Stator sargılarına üç fazlı gerilim uygulanır ve bu sargılar tarafından dönel manyetik alan oluşturulur. Ayrıca rotorda kalıcı mıknatıslar bulunur ve bu mıknatıslar rotor manyetik alanı üretir. Rotor manyetik alanı, stator sargıları tarafından üretilen dönel manyetik alanı takip eder ve böylece SMSM çalışır [30].

2.1. SMSM'nin matematiksel modeli

SMSM'nin dinamik denklemleri aşağıdaki verilmiştir [31].

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L_d}i_d + \frac{\omega_r L_q i_q}{L_d} + \frac{V_d}{L_d} \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q}i_q - \frac{\omega_r L_d i_d}{L_q} - \frac{\psi_m}{L_q} + \frac{V_q}{L_q} \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d I_d + \psi_m \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q I_q \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3p}{2}(\psi_m I_q + (L_d - L_q)I_d I_q) \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - B\omega_r - T_L) \quad (6)$$

Yukarıda verilen denklemlerde V_d ve V_q stator geriliminin d ve q bileşenleri, I_d ve I_q stator akımının d ve q bileşenleri, ψ_d ve ψ_q stator akısının d ve q bileşenleri, ψ_m kalıcı mıknatısın akı değeridir, T_e indüklenen moment, T_L yük momenti ve ω_r rotor hızıdır. Bu çalışmada kullanılan SMSM'nin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. SMSM parametreleri

Motor gücü	1.1 kW
Nominal moment	3 Nm
Nominal hız	3000 rpm
Kutup sayısı	8
Stator direnci	2.875 Ω
d eksenli indüktansı	8.5 mH
q eksenli indüktansı	8.5 mH
Mıknatıs akısı	0.175 Wb
Eylemsizlik momenti	0.0008 kgm ²

2.2. Doğrudan moment kontrol

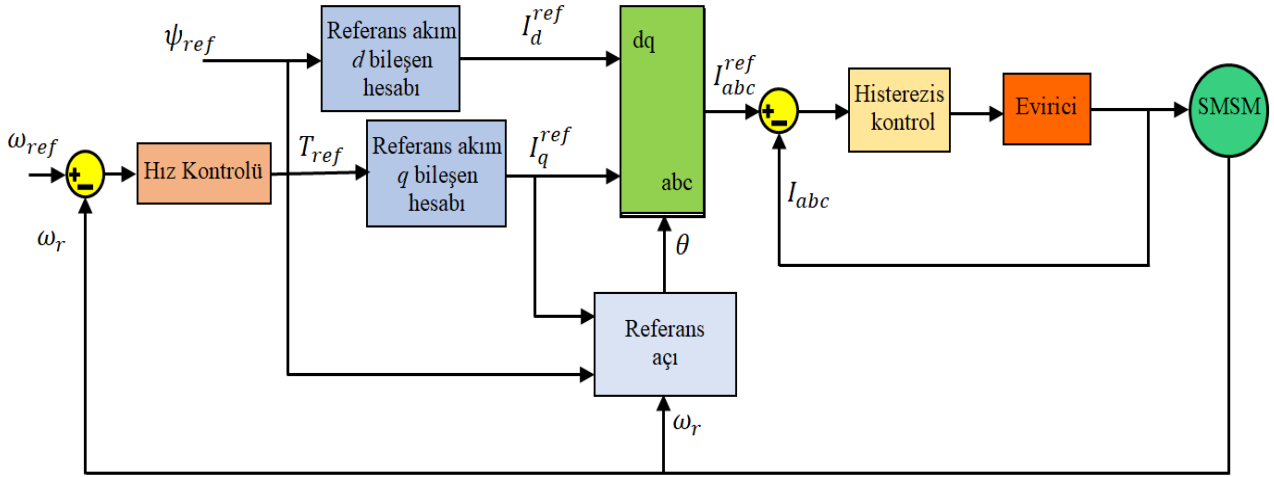
Geleneksel DMK modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu yöntemde SMSM'nin akımı ve gerilimi ölçülür. Ölçülen değerler kullanılarak motorun akı, moment ve akı sektörü hesaplanır. Tahmini ve referans akı arasındaki fark kullanılarak elde edilen akı hatası, iki seviyeli histerezis kontrolöründen geçirilir. Benzer şekilde, tahmini ve referans moment arasındaki fark kullanılarak elde edilen moment hatası, üç seviyeli histerezis kontrolöründen geçirilir. Histerezis kontrol birimlerinden elde edilen sinyaller ve tahmin edilen akı sektörü kullanılarak motorun eviricisine uygulamak üzere gerekli olan anahtarlama sinyalleri üretilir.

2.3. Alan yönlendirmeli kontrol

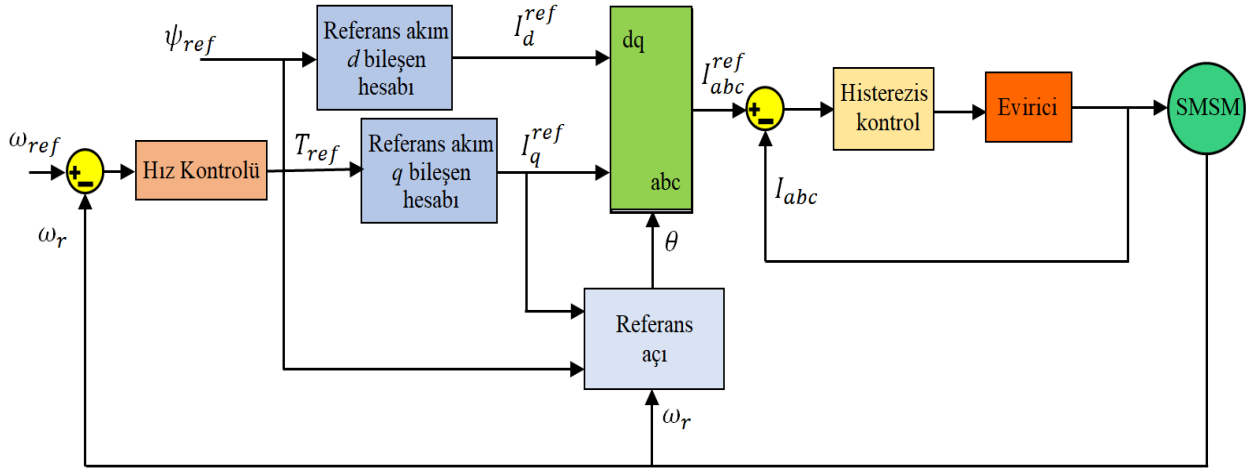
SMSM'nin kontrolü için en başarılı yöntemlerden biri AYK'dir. Şekil 2, geleneksel AYK'nin blok şemasını göstermektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi moment referansı, Oransal-Integral kontrolörü ve referans hız ile gerçek motor karşılaştırılarak elde edilen hız hatası kullanılarak hesaplanır. Referans akımının d bileşeni, referans akı ve moment kullanılarak hesaplanabilir. Ayrıca bu iki referans değeri kullanılarak referans akımının q bileşeni ve dönüşüm açısı hesaplanır. Üç fazlı referans akımları, referans akımların d ve q bileşeni ve Park dönüşümü kullanılarak hesaplanır. Park dönüşümü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

Stator sargılarında akan akımlar ile referans akımlar karşılaştırılır ve her faz için akım hata sinyalleri elde edilir. Anahtarlama sinyalleri, akım hata sinyali ve histerezis kontrolörü kullanılarak elde edilir. Sonuç olarak, anahtarlama sinyalleri eviriciye uygulanır ve SMSM istenen hız ve momentte çalıştırır [12].



Şekil 1. DMK blok şeması



Şekil 2. AYK blok şeması

2.4. Kayan kipli gözlemci

Kayan kip değişken yapılu bir sistemdir ve kullanıldığı yapının parametrelerine bağımlılığı oldukça azdır. Bu nedenle sistem içindeki belirsizlikler ve bozucu etkiler kayan kipli sistemin çalışmasını etkilemez. Alternatif akım motorları çalıştığı zaman rotor zaman sabiti ve stator direnci gibi parametreler zamanla değişir. Kayan kip yapısı, motor kontrolü sırasında bu değişikliklerin olumsuz etkilerinden kaçınmak ve daha dayanıklı kontrol için çok uygundur.

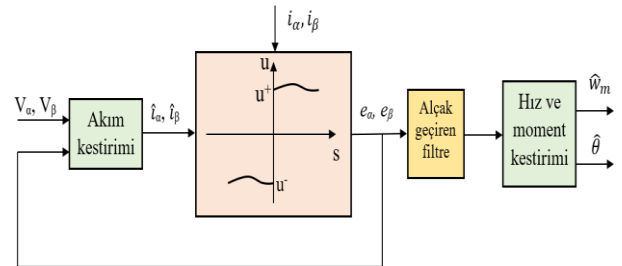
Kayan kip, değişken yapılu sistemler için kullanılan alternatif bir yoldur. Değişken yapılu bir sistem aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Burada durum değişken matrisi, \dot{x} ise x 'in türevi anlamına gelir.

$$\dot{x} = f(x, t, u), x \in R^n, u \in R^m \quad (10)$$

$$u = \begin{cases} u^+(x, t) & \sigma(x) > 0 \\ u^-(x, t) & \sigma(x) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma^T = (\sigma_1, \dots, \sigma_m) \quad (10)$$

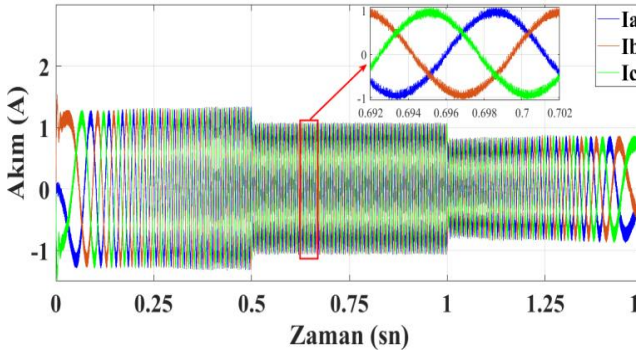
Bu sistem için durum uzayında $\sigma = 0$ için süreksiz kontrol girişi, kayan yüzeyler oluşturur. KKG kullanılarak hız kestirimi, Şekil 3 ve yukarıda verilen (8), (9) ve (10) eşitlikleri kullanılarak yapılabilir.



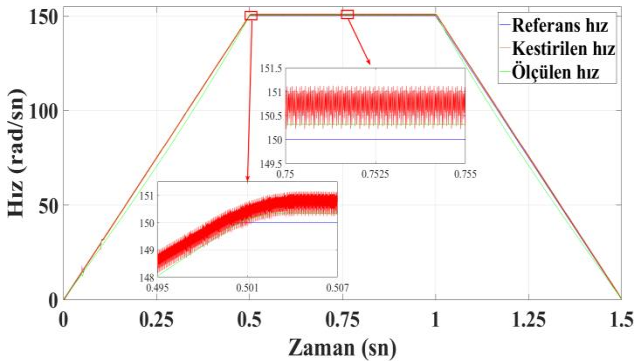
Şekil 3. KKG blok şeması

3. Simülasyon sonuçları

Bu çalışmada parametreleri Tablo 1'de verilen SMSM'nin KKG ile sensörsüz DMK ve AYK kontrolünün simülasyonu gerçekleştirilmiştir. SMSM'nin AYK kontrol uygulaması sonucu elde edilen üç faz stator akımı grafiği Şekil 4, hız grafiği ise Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 4. AYK için stator akımı

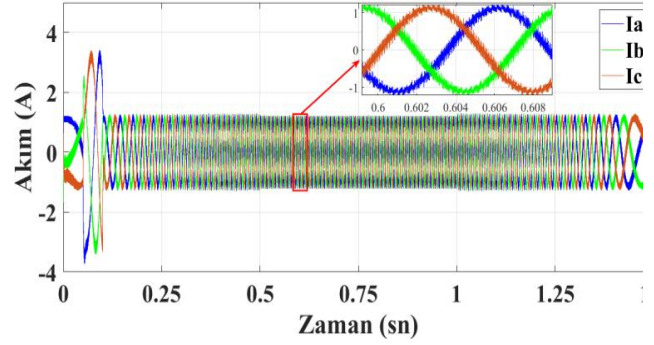


Şekil 5. AYK için motor hızı

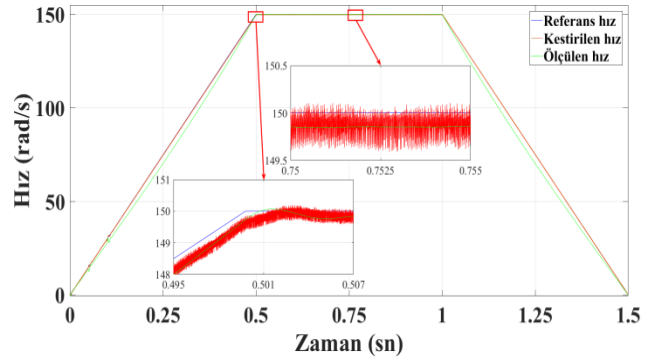
SMSM'nin DMK kontrol uygulaması sonucu elde edilen üç faz stator akımı grafiği Şekil 6, hız grafiği ise Şekil 7'de görülmektedir. Her iki kontrol yöntemi sonucu elde edilen moment grafiği ise Şekil 8'de görülmektedir. AYK ve DMK uygulaması sonucu elde edilen akım, hız ve moment sinyallerinin toplam harmonik bozunum (THB) değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca AYK ve DMK yöntemlerinin hız kontrol performansını değerlendirebilmek için referans hız ile ölçülen motor hızı arasındaki hız hata sinyali için hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK) kriteri uygulanmış ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Son olarak iki kontrol yönteminin geçici durumu (ilk sürekli duruma oturma süreci) ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) ile incelenmiş ve akım, moment ve hız sinyallerinin standart sapması hesaplanmıştır. ADD, bir işaretin zaman-frekans analizi için kullanılan bir dönüşüm türüdür. Sinyallerin birbirleri ile karşılaştırılmasında ADD dönüşümünden elde edilen dalgacıklar kullanılmaktadır. Her iki kontrol yöntemi için hız sinyali ADD analizi Şekil 9'da görülmektedir. Tüm sinyallerin ADD analizi sonucu elde edilen standart sapma değerleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

SMSM'nin AYK ve DMK simülasyon sonucu elde edilen akım grafikleri (Şekil 4 ve Şekil 6) incelendiği zaman AYK kontrolü sonucu akımdaki dalgalanmanın daha az olduğu görülmektedir. Aynı zamanda hem sürekli duruma geçiş, hem de sürekli durum süreci incelendiği zaman, referans hızı takip etme DMK yöntemi ile daha başarılıdır. Benzer şekilde Tablo 2'de verilen I_a , I_b ve I_c faz akımlarının THB değerleri incelendiği zaman AYK kontrolünün daha düşük THB değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca indüklenen moment (T_e) ve motor hızı (ω) için AYK kontrolünün THB

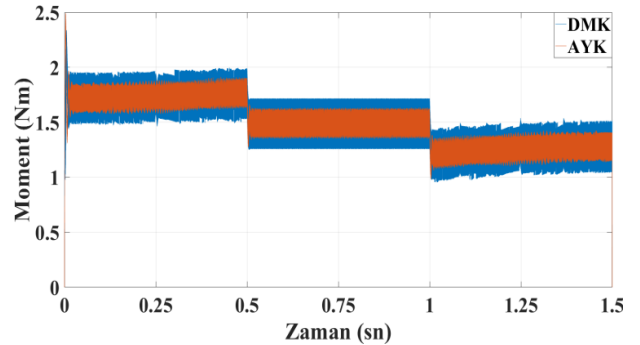
değerleri daha düşüktür. Ancak AYK ve DMK kontrolü sonucu elde edilen hız grafikleri (Şekil 5 ve Şekil 7) ve Tablo 3'te verilen HKOK değerleri incelendiği zaman DMK'nın daha az hata ile çalıştığı görülmektedir. ADD analizi sonuçları incelendiği zaman geçici durumlarda DMK kontrolü sonucu daha az standart sapma olduğu görülmüştür. DMK yöntemi AYK yöntemine göre geçiş durumlarında daha hızlı ve daha az hata ile tepki gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6. DMK için stator akımı



Şekil 7. DMK için motor hızı



Şekil 8. AYK ve DMK için moment

Tablo 2. THB değerleri

	I_a	I_b	I_c	T_e	ω
AYK	38.395	38.046	38.9287	7.132	10.6955
DMK	70.5011	72.1492	69.9132	7.223	10.8937

Tablo 3. Referans hız ile ölçülen hız farkı için HKOK değerleri

	HKOK
AYK	2.8627
DMK	2.6171

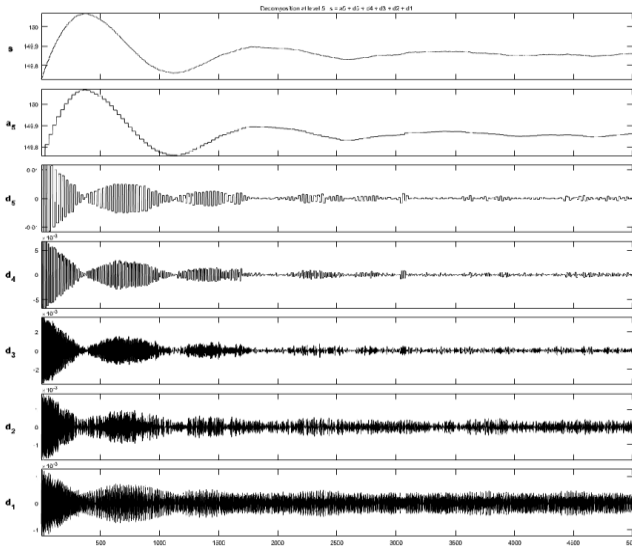
Tablo 4. ADD standart sapma değerleri

	Ia	Ib	Ic	Te	ω
AYK	3.478	5.063	4.556	3.362	2.3
DMK	3.633	4.978	4.138	3.383	2.08

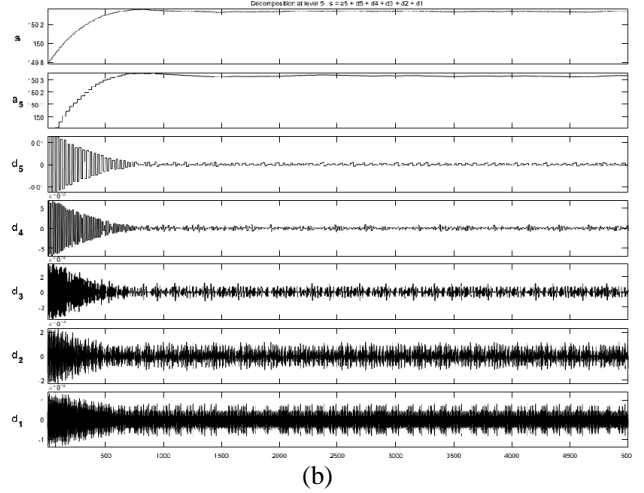
4. Değerlendirme

Bu çalışmada SMSM'nin hız sensörsüz olarak AYK ve DMK kontrolü simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Kontrol yöntemlerinde gerekli olan hız bilgisi ise KKG ile kestirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen akım, moment ve hız grafikleri incelendiği zaman, AYK uygulanması sonucunda bu grafiklerin daha az dalgalanmaya sahip olduğu görülmektedir. Örneğin moment grafiğindeki dalgalanma AYT için 0.2 Nm iken DMK için 0.3 Nm'dir. Ancak DMK uygulanması durumunda hız hatasının daha düşük olduğu görülmüştür. Sürekli durumda hız hatası AYK için 0.3 rad/s iken DMK için 0.2 rad/s'dir. Benzer durum ADD analizi sonucunda da görülmüştür. Hız, akım ve moment grafiklerinin standart sapması DMK için daha düşüktür.

İleriki çalışmalarda hem DMK hem de AYK'nin KKG ile sensörsüz çalışma performansı daha geniş hız aralığı için değerlendirilebilir. Ayrıca, diğer hız gözlemcileri kullanılarak SMSM'nin sensörsüz çalışması durumunda hem DMK'nin hem de AKY'nin ayrıntılı karşılaştırması yapılabilir.



(a)



(b)

Şekil 9. Motor hızı ADD analizi (a) AYK (b) DMK

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 12

Kaynaklar

- [1] Saadaoui, O., A. Khlaief, A. Chaari and M. Boussak. A new approach rotor speed estimation for PMSM based on sliding mode observer. in 2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2014.
- [2] L. Harnfors, S.E. Saarakkala, and M. Hinkkanen, Speed control of electrical drives using classical control methods. IEEE Transactions on Industry Applications, 49 (2), 889-898, 2013. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2914647>.
- [3] D.-W. Seo, Y. Bak, and K.-B. Lee, An improved rotating restart method for a sensorless permanent magnet synchronous motor drive system using repetitive zero voltage vectors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67 (5), 3496-3504, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2914647>.
- [4] M. Abassi, A. Khlaief, O. Saadaoui, A. Chaari and M. Boussak. Performance analysis of FOC and DTC for PMSM drives using SVPWM technique. in 2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). 2015.
- [5] A. Kronberg, Design and simulation of field oriented control and direct torque control for a permanent magnet synchronous motor with positive saliency. Master Thesis, Uppsala University, 2012.
- [6] G. Chandaka and G. Prasanth, Direct torque control and field oriented control of PMSM using SVPWM Technique. Int. J. Adv. Res. Sci. Eng, 3 (11), 2014.
- [7] Z. Boulghasoul, A. Elbacha, E. Elwarraki and D. Yousfi. Combined vector control and direct torque control an experimental review and evaluation. in 2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems. 2011.

- [8] F. Blaschke A new method for the structural decoupling of AC induction machines. in Conf. Rec. IFAC. 1971.
- [9] D. Casadei, et al., FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control. IEEE transactions on Power Electronics, 17 (5), 779-787, 2002. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.802183..>
- [10] S. Rezgui, A. Mehdi, S. Legrioui, H. Meddouce, A.M. Boulahia and H. Benalla. IRFOC vs DTC performance comparison analysis. in 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. 2013.
- [11] S. Zaid, O. Mahgoub, and K. El-Metwally, Implementation of a new fast direct torque control algorithm for induction motor drives. IET Electric Power Applications, 4 (5), 305-313, 2010. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2009.0059>.
- [12] I. Takahashi and T. Noguchi, A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. IEEE Transactions on Industry applications, (5), 820-827, 1986. <https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504799>.
- [13] Z. Zhang, R. Tang, B. Bai and D. Xie, Novel direct torque control based on space vector modulation with adaptive stator flux observer for induction motors. IEEE transactions on Magnetics, 46 (8) 3133-3136, 2010. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2051142>.
- [14] G.S. Buja and M.P. Kazmierkowski, Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey. IEEE Transactions on industrial electronics, 51 (4), 744-757, 2004. <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.831717>.
- [15] Y. S. Lai and J.-H. Chen, A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction. IEEE Transactions on Energy Conversion, 16 (3), 220-227, 2001. <https://doi.org/10.1109/60.937200>.
- [16] K. -K. Shyu, J. -K. Lin, V. -T. Pham, M. -J. Yang and T. -W. Wang, Global minimum torque ripple design for direct torque control of induction motor drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57 (9) 3148-3156, 2009. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2038401>.
- [17] Y. Li, Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Machine 2010, Universitat München.
- [18] L. Yaohua, D. Gerling, and L. Weiguo. A novel switching table to suppress unreasonable torque ripple for the PMSM DTC drives. in 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. 2008.
- [19] A. Khlaief, et al. Field-oriented control of interior permanent magnet synchronous motor with a space vector modulation. in Conference international STA'2008. 2008.
- [20] B. ÇAVUŞ and M. Aktaş, Direct torque control of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 9 (2), 58-65, 2020. <https://doi.org/10.18245/ijaet.633252>
- [21] M. Aktaş and B. Çavuş, A computer-aided educational tool for vector control of AC motors in graduate courses. Computer Applications in Engineering Education, 28 (3), 705-723, 2020. <https://doi.org/10.1002/cae.22241>.
- [22] G. Shahgholian, M. H. Rezaei, A. Etesami and M. R. Yousefi. Simulation of speed sensor less control of PMSM based on DTC method with MRAS. Conference Proceedings IPEC. 2010.
- [23] L. Yongdong and Z. Hao. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor—a survey. in 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2008.
- [24] V. Dutt and R. Dhiman, Comparative study of direct torque control of induction motor using intelligent techniques. Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, 2 (11), 550-556, 2011.
- [25] M. S. Basar, M. M. Bech, T. O. Andersen, P. Scavenius and T. T.-Basar. Comparison of sensorless FOC and SVM-DTFC of PMSM for low-speed applications. in 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2013.
- [26] M.C. Paicu, I. Boldea, G.-D. Andreescu and F. Blaabjerg, Very low speed performance of active flux based sensorless control: interior permanent magnet synchronous motor vector control versus direct torque and flux control. IET electric power applications, 3 (6), 551-561, 2009. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2008.0290>.
- [27] D. Xiao, S. Nalakath, S. R. Filho, G. Fang, A. Dong, Y. Sun, J. Wiseman, and A. Emadi, Universal full-speed sensorless control scheme for interior permanent magnet synchronous motors. IEEE Transactions on Power Electronics, 36 (4), 4723-4737, 2020. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3023140>.
- [28] S. Ye, Fuzzy sliding mode observer with dual SOGI-FLL in sensorless control of PMSM drives. Isa Transactions, 85, 161-176, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.10.004>.
- [29] M. Ghanes and G. Zheng, On sensorless induction motor drives: Sliding-mode observer and output feedback controller. IEEE transactions on industrial electronics, 56 (9), 3404-3413, 2009. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2026387>.
- [30] Y. Yue, et al. Direct torque control method of PMSM based on fractional order PID controller. in 2017 6th Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS). 2017.
- [31] D. Y. Ohm, J.W. Brown, and V.B. Chava. Modeling and parameter characterization of permanent magnet synchronous motors. in Proceeding of the 24th Annual Symposium of Incremental Motion Control Systems and Devices, San Jose. 1995.

