

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Öz-Ayarlamalı Bulanık-PID Denetleyici ile Benzetim Çalışması ve Hız Denetimi

Mustafa ŞEKKELİ^{1*}, Hakan AÇIKGÖZ², Ahmet GANI¹, Ö.Fatih KEÇECİOĞLU¹

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye

²Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Elektrik-Enerji Bölümü, Kilis, Türkiye

ÖZET: Son yıllarda sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) yüksek güç, moment ve verim gibi üstünlüklerinden dolayı küçük ve orta güçlü servo motor sürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, vektör denetim yöntemi uygulanan bir SMSM'un hız denetim çalışması Matlab/Simulink paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu denetim yönteminde, ilk olarak Öz-ayarlamalı bulanık-PID denetleyici ve PID denetleyici SMSM'nin hız denetim birimine uygulanmak için tasarlanmıştır. Öz-ayarlamalı bulanık-PID denetleyici MATLAB/Simulink-Fuzzy Logic Toolbox yardımıyla tasarlanmıştır. Her iki denetleyici için aynı koşullar altında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. PID denetleyiciden ve Öz-ayarlamalı bulanık-PID denetleyiciden elde edilen sonuçlar, referans hızı izleme, yük momenti gibi bozucu etkenlere göre incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre Öz-ayarlamalı bulanık-PID denetleyici PID denetleyiciye göre daha iyi hız cevabı verdiği gözlemlenmiştir

Anahtar Kelimeler: SMSM, Vektör Denetimi, PID Denetleyici, Öz-Ayarlamalı Bulanık-PID

Simulation Study and Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor By Using Self-Tuning Fuzzy-PID Controller

ABSTRACT: In recent years, permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in the mid-powerful servo motor drive because of their high power, torque and efficiency. Simulation study was carried for speed control of PMSM using Matlab/Simulink software package. In this control method, Self-tuning fuzzy-PID controller and PID controller is first designed to apply to speed control unit of PMSM. Self-tuning Fuzzy-PID controller is developed using MATLAB/Simulink Fuzzy Logic Toolbox. Simulation studies are implemented for both of the controllers under same conditions. The results obtained from conventional PID controller and Self-tuning fuzzy-PID controller are analyzed and compared according to disturbance effects such as tracing different references speed and load torque. According to obtained simulation results, it is observed that Self-tuning fuzzy-PID controller provides better speed response than PID controller.

Keywords: PMSM, Vector Control, PID Controller, Self-Tuning Fuzzy-PID

1. GİRİŞ

Yakın geçmişe kadar genel olarak endüstride, dinamik performanslarının çok iyi olması ve denetlenebilirliğinin basit olmasından dolayı doğru akım (DA) motorları tercih edilmekteydi. Fakat DA motorlarının komütatör ve fırça yapısı, motorun hem belirli aralıklarla bakım gereksinimine hem de fırça kollektör teması nedeniyle her ortamda kullanılmamasına neden olmaktadır [1-2]. Asenkron motorlar ise yüksek verim, az bakım istemesi, düşük üretim maliyetleri, basit ve dayanıklı yapıları nedeniyle endüstride sıklıkla kullanılmaktadır [3-5]. Son yıllarda, Mikroişlemciler, güç elektroniği devre elemanlarındaki hızlı ilerlemeler ve malzeme teknolojisindeki gelişmelerle alternatif akımla çalışan yüksek verimliliğe sahip SMSM'ler geliştirilmiştir. SMSM'ler, senkron motorların uyarım sargılarının

sürekli mıknatısla değiştirilmesi sonucu elde edilmiştir [1-5]. Bu motorlardaki en önemli özellik uyarım alanının sargı yerine sürekli mıknatıslar ile elde edilmesidir. Bu nedenle elektriksel uyarım yerine sürekli mıknatıs kullanımıyla bakır kayıpları yok edilmektedir. Sürekli mıknatıslar ile oluşturulan motorlar diğerlerine göre daha basit yapıdadırlar, aynı işlem için kullanılan diğer motorlardan daha hafif ve küçüktürler. Ayrıca kayıpları daha küçük ve verimleri daha yüksektir. Bu motorlarda kullanılan sürekli mıknatıs malzemelerinin pahalı olması ve yine bu malzemelerin manyetik karakteristiklerinin zamanla değişiyor olması ise bu motorların en büyük dezavantajlarıdır [5-10]. SMSM'ler asenkron motorlara benzetilmektedir. Bu nedenle asenkron motorlar için geliştirilen denetim yöntemleri SMSM'ler içinde kullanılabilir. Bilindiği gibi serbest uyarımlı DA motorunda endüvi ve uyarım sargıları birbirine diktir

*Sorumlu Yazar: Mustafa ŞEKKELİ, msekkeli@ksu.edu.tr

ve bu durum endüvi ve uyarım akımlarının birbirinden bağımsız olarak denetlenmesine olanak verir. Son yıllarda, mikroişlemciler ve güç elektroniği devre elemanlarındaki hızlı ilerlemeler ve yapılan çalışmaların daha da geliştirilmesiyle asenkron ve senkron motorların serbest uyarımlı doğru akım motorları gibi denetlenebileceği vektör denetim yöntemi ortaya çıkmıştır ve ilk olarak 1971 yılında Blashcke [7] tarafından ileri sürülmüştür. Vektör denetimin amacı moment ve akı arasındaki kenetlenme etkisini ortadan kaldırarak momentin ve akının birbirinden bağımsız denetlenmesini sağlamaktır. Akı sabitse ve senkron eksen takımının d-ekseni üzerine yönlendirilmiş ise, moment akımın q-ekseni bileşeni tarafından denetlenir. Senkron eksen takımı rotor akısı, stator akısı veya hava aralığı akısı eksen takımı olabilir [7-8].

Vektör denetim yöntemi alternatif akım motorlarında kullanılmaya başladığından beri, bu yöntemin performansını arttırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri de, 1965 yılında Lotfi A.Zadeh [11] tarafından ileri sürülen bulanık mantık denetleyici (BMD) tekniğidir. Bu teknik birçok alanda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu özellik BMD'yi ilgi çekici hale getirmiş ve birçok endüstriyel uygulamada kullanılmasını sağlamıştır. Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyici ise PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d kazanç parametrelerinin sabit olmadan sistemin cevabına göre BMD tarafından bulunması prensibine dayanır[11-21]. Bu çalışmada vektör denetim yöntemi uygulanan bir SMSM'nin benzetim çalışması anlatılmaktadır. İkinci bölümde SMSM'nin matematiksel modeli ve vektör denetim yöntemi anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde ise Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyici ve PID denetleyici ile elde edilen benzetim çalışması sonuçları verilmiştir. Dördüncü bölümde ise yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır.

2. SMSM'nin MATEMATİKSEL MODELİNİN ÇIKARTILMASI

Üç fazlı alternatif akım motorların modelleri iki fazlı ($\alpha\beta$) modele çevrilerek motorun dinamik denklemlerindeki karmaşıklık azaltılır. Stator büyüklüklerinin rotor referans düzleminde ifade edildiği 2 fazlı d-q modeli, serbest uyarımlı DA motor modeline benzemekte olup bu model kullanıldığında motorun denetimi kolaylaştırılmış olur. İyi tasarlanmış vektör denetim teorisi moment ve akı arasında bağımsız denetim sağlamaktadır. Akı sabitse ve senkron eksen takımının d-ekseni üzerine yönlendirilmiş ise, moment akımın q-ekseni bileşeni tarafından denetlenir. SMSM'nin rotor referans çatısındaki matematiksel modeli şekil 1 ve 2'den aşağıdaki gibi elde edilebilir [1-10]:

$$V_d = RI_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega_r \lambda_q \quad (1)$$

$$V_q = RI_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega_r \lambda_d \quad (2)$$

Burada; R:stator sargı direnci, V_d , V_q : d-q eksenindeki stator gerilimlerini, I_d , I_q : d-q eksenindeki stator akımlarını, L_d , L_q : d-q eksenindeki stator endüktanslarını, λ_d , λ_q :d-q eksenindeki stator akı halkalanmalarını ve ω_r ise rotor hızını temsil etmektedir. Motorun d ve q eksen manyetik akıları sırasıyla denklem (3) ve (4)'te verilmiştir.

$$\lambda_d = L_d I_d + \lambda_m \quad (3)$$

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

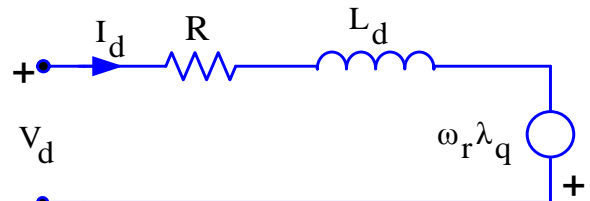
λ_m ifadesi sabit mıknatıstan dolayı meydana gelen karşılıklı manyetik akıyı simgelemektedir. L_d ve L_q ise d-q eksen endüktanslarını ifade etmektedir. Motorun üreteceği elektriksel moment ise denklem 5'te verilmiştir.

$$T_e = \frac{3}{2} P [\lambda_m I_q + I_q I_d (L_d - L_q)] \quad (5)$$

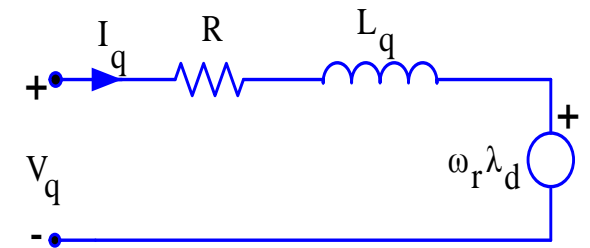
Burada; P, motorun çift kutup sayısını temsil etmektedir. Denkleme bakıldığında motorun üreteceği momentin d-q eksen akımlarına bağlı olduğu görülmektedir. Motorun dinamik denklemleri ise T_L : yük momenti, B:sürtünme katsayısı ve J:eylemsizlik ile aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$T_e = T_L + j \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r \quad (6)$$

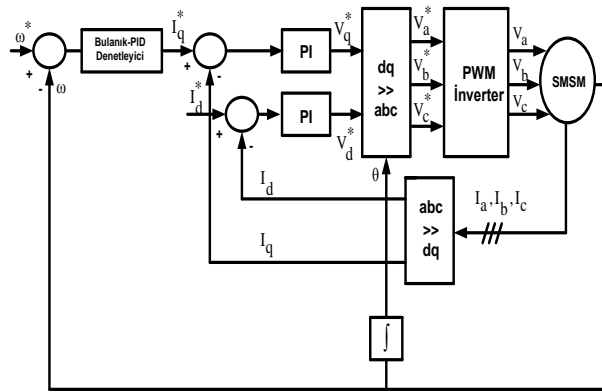
SMSM'nin hız denetiminin gerçekleştirilmesi amacıyla Şekil 3'te verilen denetim yapısı kullanılmıştır.



Şekil 1. SMSM'un d-ekseni eşdeğer devresi



Şekil 2. SMSM'un q-ekseni eşdeğer devresi

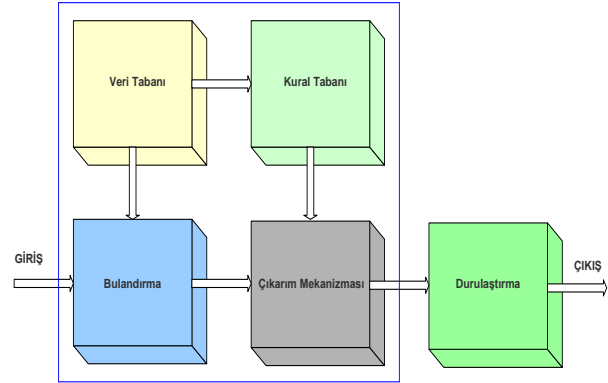


Şekil 3. SSM'nin Bulanık-PID denetleyici ile hız denetim bloğu

3. PID VE ÖZ-AYARLAMALI BUNALIK-PID DENETLEYİCİ TASARIMI

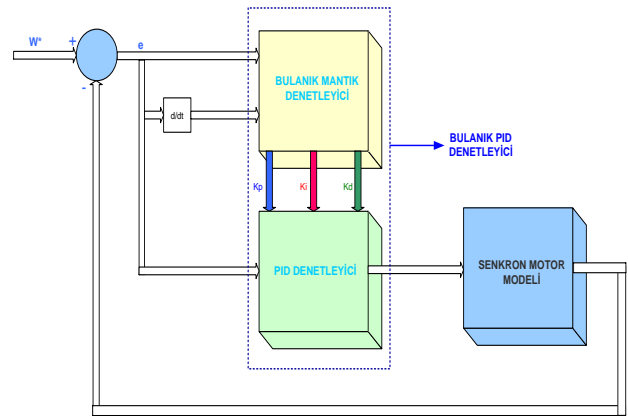
PID denetleyiciler dayanıklı performans ve basit yapıları nedeniyle denetim sistemlerinde en sık kullanılan denetleyicilerdir. PID denetleyiciler oransal (P), integral (I), türev (D) kazançlarından oluşmaktadır ve PID denetleyici bu üç temel kazançların üstünlüklerini tek bir birim içinde birleştiren bir denetleyicidir. Bu kazançların her biri denetlenecek sistemler için farklı değerler alır ve PID denetleyicinin kazanç değerleri sistem üzerine farklı etkiye sahiptir. PID denetleyiciler endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanıldıkları için PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d değerlerinin en uygun değerde olması sistemin performansı için çok önemlidir. Bu amaç için PID denetleyici kazanç parametrelerini belirlemeye yönelik birçok optimizasyon yöntemi mevcuttur [1-5].

Bulanık mantık ilk olarak 1965 yılında Lütfi Zadeh tarafından ortaya atılmıştır [11]. O tarihten sonra önemi gittikçe artarak günümüze kadar gelen bulanık mantık, belirsizliklerin anlatımı ve belirsizliklerle çalışılabilmesi için kurulmuş katı bir matematik düzen olarak tanımlanabilir. Klasik mantıkta bir eleman bir kümenin elemanıdır ya da değildir mantığına sahip olduğu için klasik mantık yöntemleriyle karmaşık sistemleri modellemek ve denetlemek zordur. Çünkü veriler tam ve net olmalıdır [11-13]. Bulanık mantık da ise kesinlik yoktur ve daha niteliksel tanımlama mevcuttur. Bulanık mantığın en ilgi çeken tarafı ise uzman kişinin bilgileri denetleyicinin içerisine gömülerek sistem denetlenir. Yani sistemin herhangi bir matematiksel modeline ihtiyaç yoktur. BMD, genel olarak bulandırma, çıkarım mekanizması, durulaştırma ve bilgi tabanı (veri ve kural tabanı) olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bu yapı Şekil 4'te verilmiştir.



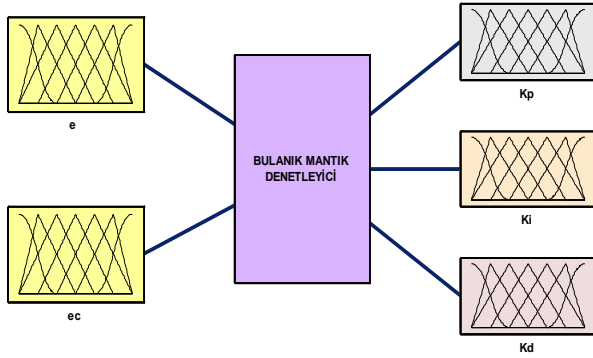
Şekil 4. Genel BMD Yapısı

Şekil 5'de bulanık-PID denetleyici yapısına ait blok diyagramı verilmiştir. Bulanık-PID denetleyicideki amaç, PID kazanç parametrelerinin BMD ile oluşturularak online olarak sisteme uygun PID kazanç değerlerinin bulunmasıdır. PID denetleyicinin kazanç parametreleri sabit olduğu için zamanla değişen ve lineer olmayan sistemler için başarılı sonuçlar vermeyebilir. Bulanık-PID denetleyici ile PID kazanç değerleri otomatik olarak ayarlanarak PID denetleyicinin bu olumsuz durumu ortadan kaldırılır [15-21]. Tasarlanan denetleyicide kullanılan dilsel değişkenleri NB (Negatif Büyük), N (Negatif), Z (Sıfır), P (Pozitif), PB (Pozitif Büyük) olmak üzere beş değişken kullanılmıştır.

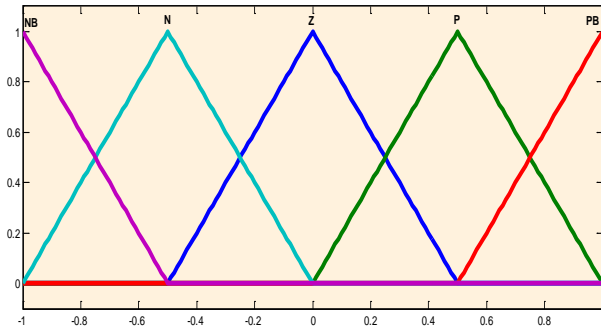


Şekil 5. Bulanık-PID Denetleyici Blok Diyagramı

Şekil 6'da ise 2 giriş ve 3 çıkışa sahip bulanık mantık sistemi gösterilmektedir. Şekilde BMD'nin 2 girişi vardır. Bunlar hata (e) ve hata değişimi (Δe) olarak tanımlanabilir. Çıktılar ise K_p , K_i ve K_d için oluşturulmuştur. Hata ve hata değişimi, K_p , K_i ve K_p için oluşturulan üçgen üyelik fonksiyonları Şekil 7'de verilmiştir [10-14]. K_p , K_i ve K_d çıktıları için oluşturulan kural tabanları ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6. Bulanık Mantık Denetim Sistemi



Şekil 7. Bulanık-PID Denetleyici için Üyelik Fonksiyonları

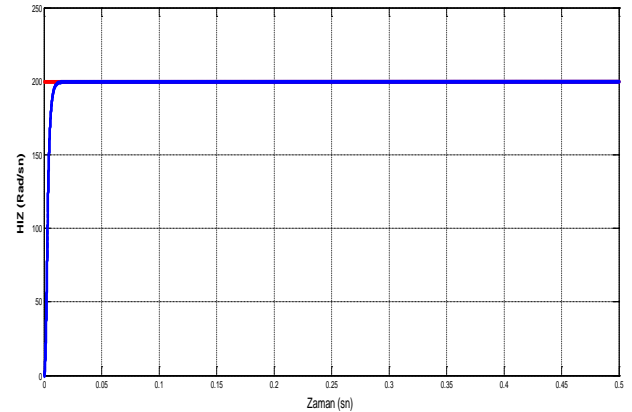
Tablo 1. Kp, Ki ve Kd Kazançları için Kural Tablosu

Kp	de					
	NB	N	Z	P	PB	
e	NB	NB/PB/NB	NB/PB/NB	NB/PB/NB	N/N/P	Z/NB/PB
	N	NB/PB/NB	N/P/N	N/P/N	N/Z/Z	Z/NB/PB
	Z	NB/P/Z	N/P/N	Z/Z/Z	P/N/P	Z/NB/PB
	PS	Z/P/Z	N/P/N	P/N/P	P/N/P	Z/NB/PB
	PM	Z/Z/Z	P/N/P	PB/NB/PB	PB/NB/PB	Z/NB/PB

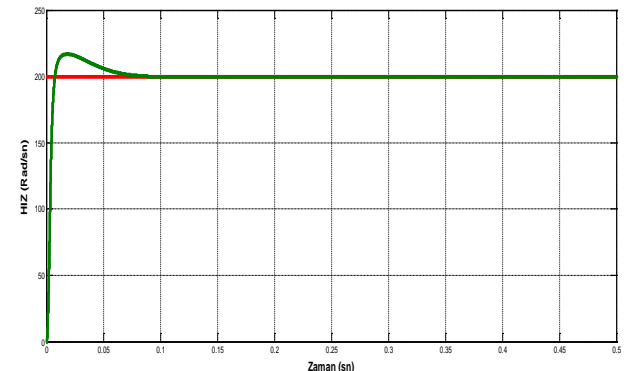
4. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI

SMSM'nin hız denetiminin gerçekleştirilmesi amacıyla şekil 3'de verilen denetim yapısı, motorun rotor referans çatısındaki denklemleri kullanılarak ve vektör denetim yöntemi ilkesine göre MATLAB programında tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Vektör denetimli SMSM'nin hız denetim ünitesine Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyici ve PID denetleyici uygulanmıştır. Her iki denetleyici MATLAB/simulink paket programı yardımıyla oluşturulmuştur. Bu kısımda vektör denetim yöntemi uygulanan SMSM'nin hız denetim başarımı incelenmiştir. Şekil 8'de motor yüksüz durumda iken motor hızının Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyici ile sabit 200 rad/sn'lik referans hızı izleme başarımı gösterilmiştir. Öz-ayarlamalı

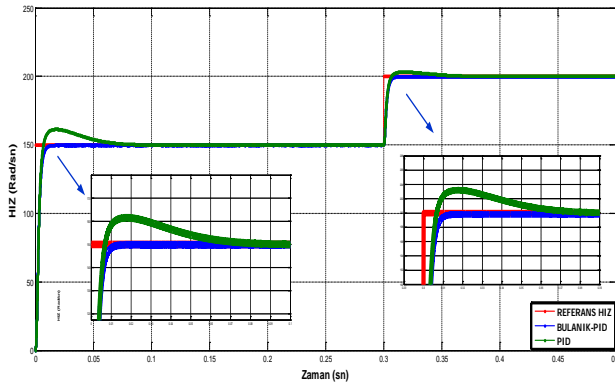
Bulanık-PID denetleyici aşma yapmadan yaklaşık olarak 0.01 saniye sonra referans hızı yakalamış ve kalıcı durum hatası yapmadan referans hızı başarılı bir şekilde izlemektedir. Şekil 9'da ise PID denetleyiciden elde edilen hız cevabı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi PID denetleyici yaklaşık olarak %8 aşma yapmış ve 0.1 saniye sonra referans hızı yakalamıştır. Her iki denetleyicide de motor hızı, arzu edilen hızı sürekli durum hatası olmaksızın başarılı bir şekilde izlemektedir. Şekil 10'da ise motor başlangıçtan itibaren yüksüz durumda iken motor hızının PID ve Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyici ile 150/200 rad/sn'lik değişik sabit referans hızları izleme başarımı gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi PID denetleyici yaklaşık olarak %8'lik aşma yaptıktan sonra sürekli durum hatası olmadan başarılı bir şekilde referans hızı izlemektedir. Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyici ise tüm değişik sabit referans hızları aşma yapmadan izlemiştir. Motorun bozucu girişlere karşı başarımının incelenebilmesi amacıyla, motora $t=0.3$ sn'den 3 N.m'lik sabit yük momenti uygulanmıştır. Her iki denetleyiciden elde edilen hız cevabının detaylı karşılaştırılması şekil 11'de verilmiştir. $t=0.3$ saniyede her iki denetleyicide yaklaşık olarak 194 rad/sn'ye düşmüş ve çok hızlı bir şekilde tekrardan referans hızı izlemeye başlamışlardır. Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyici referans hızı 0.32 saniyede yakalarken PID denetleyici 0.34 saniyede yakalamıştır.



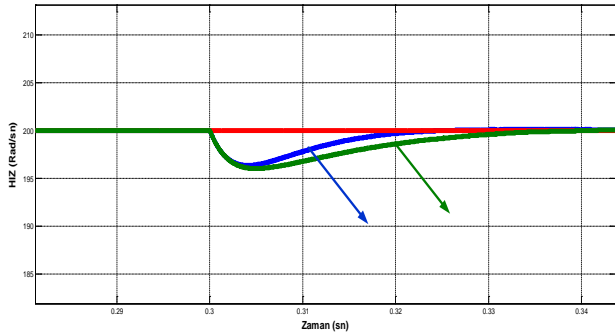
Şekil 8. 200 rad/sn basamak hızda ve yüksüz durumda Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyiciden elde edilen sonuçlar



Şekil 9. 200 rad/sn basamak hızda ve yüksüz durumda PID denetleyiciden elde edilen sonuçlar



Şekil 10. 100/200 rad/sn sabit basamak hızlarda ve yüksüz durumda her iki denetleyiciden elde edilen sonuçlar



Şekil 11. 200 rad/sn sabit hızda ve $t=0.3$ sn'den itibaren 3 N.m yüklü durumda her iki denetleyiciden elde edilen sonuçlar

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada vektör denetim yöntemi uygulanan SMSM'nin hız denetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Denetim sistemi MATLAB/Simulink paket programı yardımıyla oluşturulmuştur. SMSM'nin hız denetiminde ilk olarak klasik PID ve Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyici tasarlanmıştır. Daha sonra her iki denetleyici SMSM'nin hız denetim ünitesine uygulanmıştır. PID ve Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyiciden elde edilen sonuçlar incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre Öz-ayarlamalı Bulanık-PID denetleyiciden elde edilen hız cevabının yükseme zamanı, yerleşme zamanı ve aşma PID denetleyiciden daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- [1] S.A.Nasar, I. Boldea, and L. E. Unnewhr, Permanent magnet, reluctance and self-synchronous motors, CRC Pres, New York 1993.
- [2] Spooner E, Chalmers BJ, El-Missiry MM, Wei W, Renfrew AC. Motoring Performance of the Toroidal Permanent Magnet Machine. 5th IEEE

International Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 36–40, 1991.

- [3] Bogani T, Lidozzi A, Solero L, Di Napoli A. Synergetic control of PMSM drives for high dynamic applications. IEEE Conf. Electric Machines and Drives, pp. 710–717, Dec., 2005.
- [4] Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [5] Ozcira, S., Bekiroglu, N., Aycicek E., “Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Direct Torque Control Method, Proceedings on International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM, pp. Ischia, 268-272, 2008.
- [6] Boldea, I., Nasar, S.A., Vector Control of AC Drives, CRC Pres, New York, 1992.
- [7] F.Blaschke., “The principle of field orientation as applied to the new Transvector closed loop control system for rotating field machines,” Siemens Rev., vol. 34, pp. 217–220, 1972.
- [8] Y. S. Lai, “ Machine Modeling and Universal Controller for Vector Controlled Induction Motor Drives,” in Proc. IEEE Trans.energy con., Vol.18, No.1, March.2003.
- [9] Y. S. Lai, J. H. Chen, and C. H. Liu, “A universal vector controller for induction motor drives fed by voltage-controlled voltage source inverter,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, 2000, pp. 2493–2498
- [10] Y. S. Lai., “Modeling and vector control of induction machine-a new unified approach,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, 1999, pp. 47–52.
- [11] L. A. Zadeh, “fuzzy sets,” Inform, Control, Vol.8, pp.338-353, 1965.
- [12] Ross, T. J., “Fuzzy Logic with Engineering Applications”, McGraw-Hill Inc., ISBN 0-07-053917-0, 1995.
- [13] Dandıl B., Gökbulut M., “Sabit Miknatıslı Senkron Motorların Bulanık Sinir Ağı Denetleyici ile Dayanıkl Hız Denetimi”, F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(4), 725-734, 2004
- [14] G. Zigeler, N.B. Nichols, “Optimization Setting for Automatic Controller”, Trans. ASME, Vol. 64, pp. 756- 769, 1942.
- [15] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” Inform, Control, Vol.8, 1965, pp.338-353.
- [16] D. Hu, Linhang Li, “The research of fuzzy PID controller based on DSP”, Sichuan: Xihua University, pp. 21-24, 2007.
- [17] Gunes Mahit, “Fuzzy and three-step control of refiner system to get stable freeness for recycled paper” Scientific Research and Essays Vol. 6(1), pp. 110-117, 4 January, 2011.

- [18]J. Kim, S. Oh, “A Fuzzy PID Controller for Nonlinear and Uncertain. Systems”, *Soft Computing*, 4: 123-129, 2000.
- [19]Zhiqiang Gao, Thomas A. Trautzsch and James G. Dawson, “A Stable Self-Tuning Fuzzy Logic Control System for Industrial Temperature Regulation”, *Industry Application IEEE*, Vol.38 No.2, pg 414-424, 2002.
- [20]Cao G., Lou C., and D. An, “Application of fuzzy self-tuning PID control to air conditioning system”, *Heat Ventilating and Air Conditioning*, vol. 34, No.10, 106-109, October 2004.
- [21]Açıköz H., Keçioğlu O.F, Güneş M., Şekeli M., “Simulation Study Of Hydraulic Turbine By Using Self-Tuning Fuzzy PID Controller”,*Academic Platform Journal of Engineering and Science*, Vol.3-1, 2015.