

# Bulanık Resetlemeli PI kontrolcü ile Fırçasız Doğru Akım Motorunun Hız Kontrolü

## Speed Control of Brushless Direct Current Motor with Fuzzy Resetting Rate PI Controller

Muhammed Salih SARIKAYA  
Mekatronik Mühendisliği  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi  
Sakarya, Türkiye  
salihsarikaya@subu.edu.tr

Adnan DERDİYOK  
Mekatronik Mühendisliği  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi  
Sakarya, Türkiye  
derdiyok@sakarya.edu.tr

**Özetçe**— Bu çalışmada fırçasız doğru akım motorunun hız kontrolü, PI kontrolcü ve Bulanık Resetlemeli PI kontrolcü kullanılarak simülasyon ortamında ve gerçek zamanda gerçekleştirilmiştir. PI kontrolcü ile kontrol edilen motorun hız cevabını iyileştirmek amacı ile kontrolcü yapısına Bulanık Resetleme uyarlanmıştır. Resetleme işlemi PI kontrolcünün integral hafızasını kısmi olarak resetlemektedir. Sunulan simülasyon ve deneysel sonuçlar, Bulanık Resetlemeli PI denetleyicinin performansını doğrulamaktadır.

**Anahtar Kelimeler** – FDAM, Hız Kontrolü, PI Kontrol, Bulanık Kontrol, Resetleme Oranı

**Abstract**— In this study, PI controller and Fuzzy Resetting PI controller are applied to speed control of brushless direct current motor (BLDC) in simulation environment and in real time. Fuzzy resetting is adapted to the PI controller structure in order to improve the speed response of motor. The simulation and experimental results presented confirm the performance of the Fuzzy Resetting PI controller.

**Keywords**— BLDC, Speed control, PI control, Fuzzy control, Resetting rate

### I. GİRİŞ

Fırçasız doğru akım motorları otomotiv, havacılık robotik, endüstriyel otomasyon ekipmanları gibi birçok uygulama alanlarında geniş çapta kullanılmaktadır [1]-[4]. Bu motorların hız kontrolü üzerine birçok çalışma yapılmıştır. LQR yaklaşımı kullanılarak PID kontrolcünün parametrelerinin ideal seviyeye getirilerek hız kontrolü [5], Genetik algoritma ile PID Parametrelerinin optimize edilmesi sonucu motorun konum kontrolü [6], bulanık mantık kontrolcü kullanılarak PID parametrelerinin dinamik olarak güncellenmesi ile hız kontrolü [7], motorun moment dalgalılığını azaltmak için akım kontrol algoritması [8] gibi pek çok çalışma fırçasız doğru akım motorlarının performanslarını yükseltmek için gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolcülerden bulanık mantık kontrolüne (fuzzy logic control – FLC) son zamanlarda ilgi artmaktadır [9]. Bulanık mantık insanların çıkarımlarına benzerdir [10]. Lineer olmayan sistemlerin kontrol edilmesi zor ve karmaşıktır. Bulanık mantık kontrolcü ise kolay tasarlanması ve fazla matematiksel karmaşıklık içermemesinden dolayı lineer olmayan sistemler için kontrolcü tasarımında çok tercih

edilmeye başlanmıştır. Bazen Bulanık kontrol geleneksel kontrolcülerden daha gürbüz sonuçlar vermektedir [11]. Bulanık kontrol endüstriyel uygulamalarda da çok iyi sonuçlar başarmıştır [12]. Fırçasız doğru akım motor (BLDC) kontrolünde PID yöntemi ile bulanık mantık yöntemi kıyaslanmış ve bulanık mantık ile kontrol edilen motorun daha hızlı ve aşısız cevaplar ürettiği görülmüştür [13]. Bulanık kontrol kullanılan sistemin cevabını gürbüzleştirmek için kontrolcü katsayıları adaptif olarak değiştirilecek şekilde modifiye edilmiştir [14]. Bulanık PI kontrolcüyü Bulanık resetleme oranı ile integral hafızasını kısmi olarak resetlenmiştir [15]. Bulanık PI kontrolcü, Bulanık PD kontrolcü ve resetleme oranı kullanılmış Bulanık PI kontrolcü ile karşılaştırılmıştır [16].

Bu makalede fırçasız doğru akım motorunun hızı, Bulanık resetlemeli PI Kontrolcü ile kontrol edilmiştir. Tasarlanan kontrolcü hata (e) ve hatanın türevine (de) bağlı olarak resetleme oranı ve artımsal kontrol giriş sinyali üretmektedir.

### II. BLDC MOTOR MODELİ

Fırçasız doğru akım motorları, iletken akımları ile rotora yerleştirilen sabit mıknatısların manyetik alanının etkileşimi sonucu indüklenen moment ile enerji dönüşümünü gerçekleştiren elektrik makineleridir [17]. Bu motorlar fırça ve kollektör yerine genelde sabit mıknatıslı rotordan ve pozisyon sensörlerinden oluşmaktadır. Ayrıca harici güç elektroniği sürme devresine ihtiyaç duyarlar.

Genelleştirilmiş motorun gerilim denklemi,

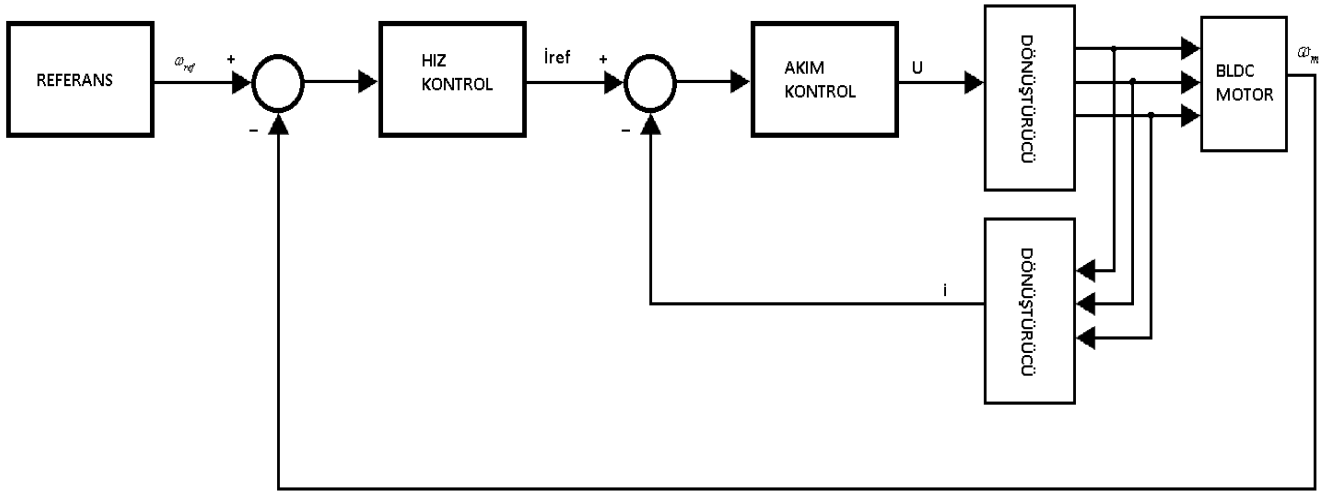
$$u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

olarak verilebilir. Denklemde  $R$  faz direnci,  $L$  faz endüktansı ve  $e_a$  'da zıt emk'dır. Zıt emk denklemi ise

$$e_a = k_a \omega_m \quad (2)$$

$$k_a = -\lambda_a \sin(\theta_m) \quad (3)$$

Şeklinde verilebilir.



Şekil 1. Motor Kontrol Blok Diyagramı

Denklem (2)'de  $k_a$  zıt emk katsayısı ve  $\omega_m$  motorun açısal hızıdır. Zıt emk katsayısı ise bobin akısına  $\lambda_a$  ve rotor pozisyonuna  $\theta_m$  bağlıdır [18]. Motorun genelleştirilmiş moment ifadesi,

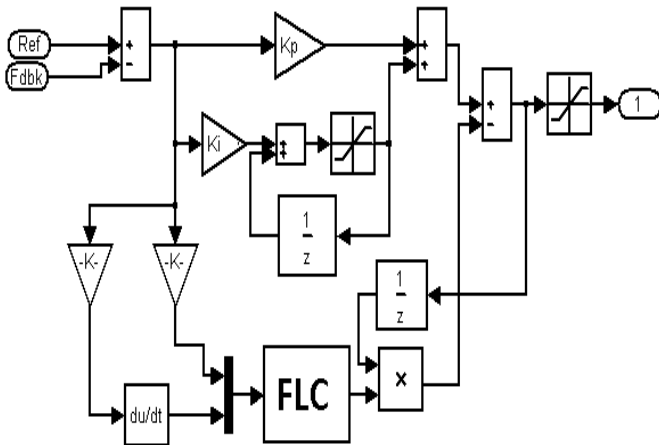
$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left( \frac{1}{J} \right) [T_e - B\omega_m - T_L] \quad (5)$$

şeklinde. Denklem (4)'te  $J$  atalet momenti kat sayısını,  $B$  sürtünme momenti katsayısını,  $T_L$  yük momentini,  $T_e$  elektriksel momentini temsil etmektedir.

### III. MOTORUN HIZ KONTROL DÖNGÜSÜ

Şekil 1'de fırçasız doğru akım motorun kapalı çevrim hız kontrol diyagramı verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere iç içe iki döngü bulunmaktadır. Bu döngülerden içteki BLDC motorun akımını dıştaki ise motorun hızını kontrol etmektedir.



Şekil 2. Hız Kontrol Blok Diyagramı

Şekil 2' de Motorun hızını kontrol etmek için tasarlanmış Bulanık Resetlemeli PI kontrolcüye ait yapı verilmiştir [15,16]. Hız kontrolü iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda geleneksel PI kontrolcü bulunmaktadır. PI kontrolcünün girdisi hız hatasıdır.

PI kontrolcünün ürettiği kontrol sinyali  $u_k$  verilmiştir.

$$e_k = \omega_{ref} - \omega_m \quad (6)$$

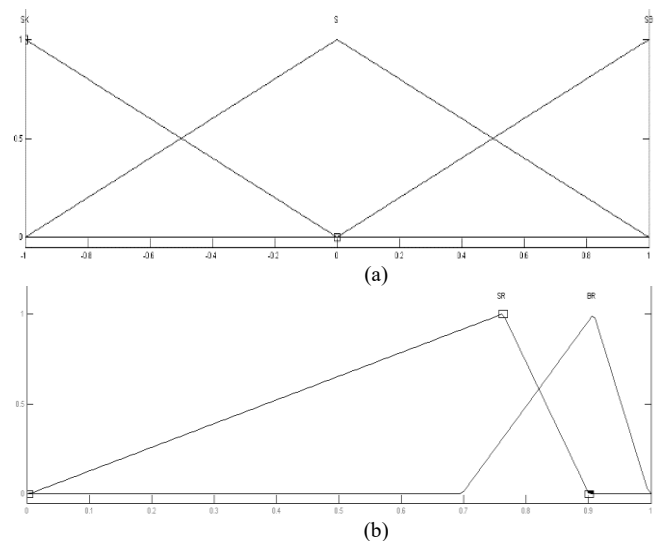
$$u_k = Kp * e_k + Ki(e_k + e_{k-1}) \quad (7)$$

Burada  $Kp$  Oransal (P) kontrolcünün ve  $Ki$  İntegral (I) kontrolcünün katsayılarıdır.

Hız kontrol bloğumuzun çıkışı  $\dot{I}_{ref}$  aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$\dot{I}_{ref}_k = u_k - r * \dot{I}_{ref}_{k-1} \quad (8)$$

Bu denklemde  $r$  resetle oranını temsil etmektedir ve bulanık bir yapı ile belirlenmektedir.



Şekil 5: Üyelik fonksiyonları (a): Hata (e) ve Hatanın değişimine (de) ait üyelik fonksiyonları (b): resetleme oranına (r) ait üyelik fonksiyonları.

Bulanık mantık kontrolcü Hataya (e) ve Hatanın değişimine (de) bağlı olarak belirlenmiş kurallar doğrultusunda resetleme oranı  $r'$ 'yi üretir. Bulanık yapıya ilişkin hata, hatanın değişimi ve resetleme oranına ait üyelik fonksiyonları Şekil 5'te verilmiştir.

Resetleme oranını üreten kurallar tablosu aşağıda Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kurallar tablosu

		e		
		SK	S	SB
de	SK	KR	BR	KR
	S	KR	KR	KR
	SB	KR	BR	KR

SK : SIFIRDAN KÜÇÜK

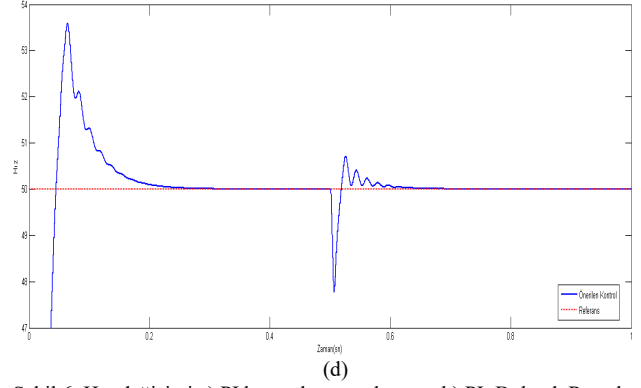
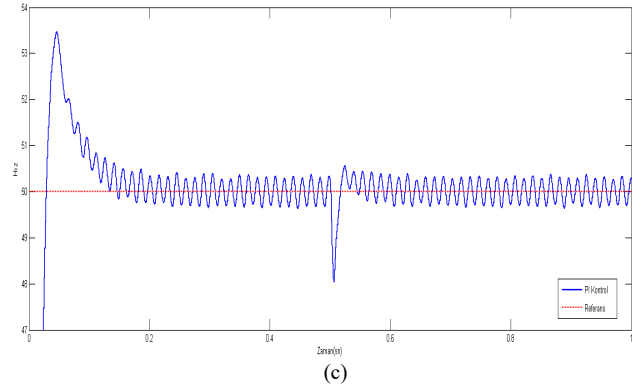
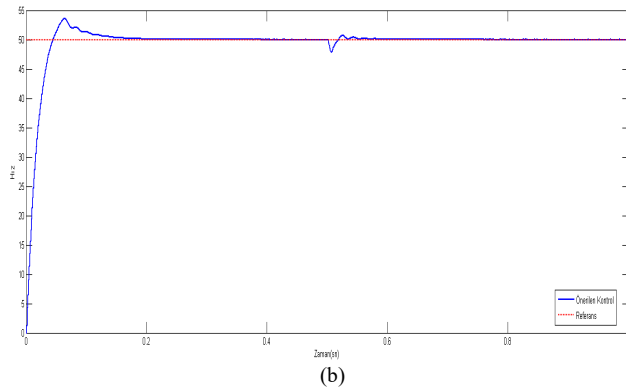
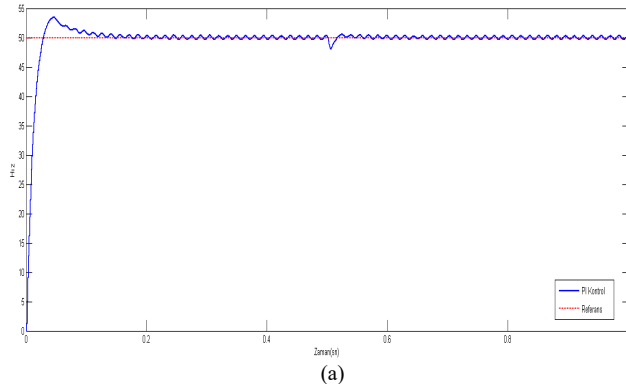
S : SIFIR

SB : SIFIRDAN BÜYÜK

KR : KÜÇÜK RESET

BR : BÜYÜK RESET

#### IV. SİMULASYON SONUÇLARI

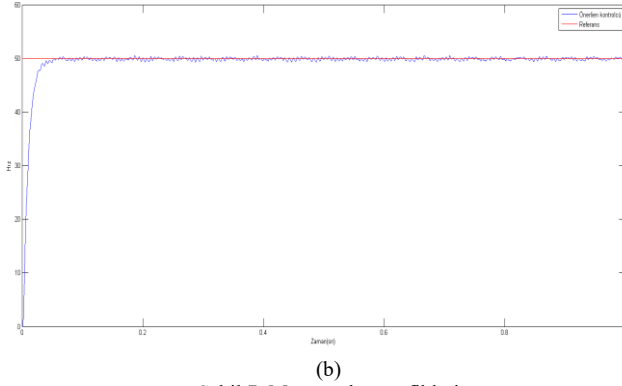
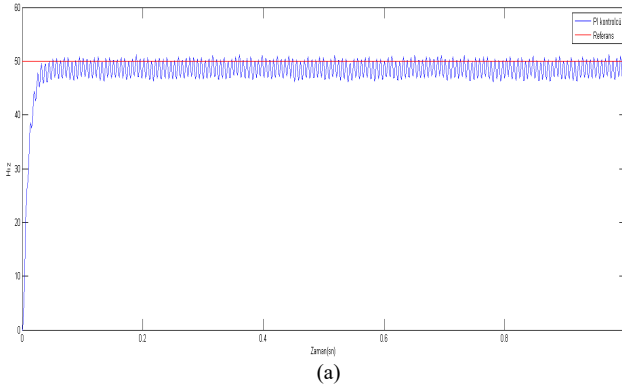


Şekil 6. Hız değişimi a) PI kontrolcu uygulanmış, b) PI+Bulanık Resetleme uygulanmış, c) PI yakınlaştırılmış sonuç, d) PI+Bulanık Restleme yakınlaştırılmış sonuç

Şekil 6(a) ve şekil 6(c) de PI kontrolcünün 0,5. saniyede bozucu giriş uygulanan motor üzerinde etkisi gösterilmektedir. Motora referans hız olarak 50rad/sn bilgisi verilmektedir. Motor hızı yaklaşık %7'lik bir aşım değerine ulaşmış ve referans değerinin etrafında yaklaşık %2'lik bir salınım gerçekleştirmektedir.  $t=0.5sn$ 'de 0.015N'luk bozucu etki uygulanmış ve motorun hızı bir miktar düşmüş ancak tekrar salınım yaparak referansı takip etmektedir. Aynı parametreler ile tasarlanan Bulanık resetlemeli PI kontrolcü ise Şekil 6(b) ve şekil 6(d) görüldüğü gibi sönümleyen bir salınım ile referansı takip etmektedir. Motor yaklaşık %7'lik bir aşım değerine ulaşmış ve referansı salınım yapmadan takip etmektedir.  $t=0.5sn$ 'de motora 0.015N'luk bozucu etki uygulanmış ve motorun hızla toparlanarak referans değeri salınım yapmadan takip ettiği görülmektedir.

#### V. DENEYSEL SONUÇLAR

Kontrolü gerçekleştirilen sistemde kullanılan motor parametreleri;  $R=4.3ohm$ ,  $L=3.5604e-4H$ ,  $J=11e-7 N.m.s^2/rad$ ,  $K=36.8e-3$  tork sabiti,  $K_a=82.8e-6$  elektromotor sabiti, Motorun gücü 40W,  $I_{max}=1A$  motor maksimum akımı, kutup çifti sayısı  $p=1$  özelliklerine sahiptir.



Şekil 7: Motorun hız grafikleri

Şekil 7(a) da PI kontrolcü ile kontrol edilen motorun hız grafikleri verilmiştir. Aynı PI kontrolcüye ( $K_p$  ve  $K_i$  değerleri aynı kalmak üzere) Bulanık Resetlemeli yapı eklenmiş ve motorun hız grafikleri Şekil 7(b) de verilmiştir. Motora referans değeri olarak 50 rad/sn hız bilgisi verilmiştir. PI Kontrolcü ile kontrol edilen motorun yaptığı salınımlar referans değerinin etrafında değil yaklaşık 48 değerinin etrafında %8'lik bir salınım ile gerçekleşmiştir. Bulanık Resetlemeli PI kontrolcü ile kontrol edilen motor referans değerinin etrafında %0.5'lik bir salınım gerçekleştirmektedir. Deneysel sonuçlardan da görüleceği gibi bulanık Resetleme oranı devreye girdiğinde PI kontrolcününün üretmiş olduğu salınımlar önemli oranda azalmıştır. Bu sonuçlar, parametreleri iyi ayarlanmamış olsa bile bir PI kontrolcüye Bulanık Resetleme yapısının eklenmesi durumunda performansın ne derecede iyileştiğini göstermektedir.

## VI. SONUÇLAR

Bu çalışmada Fırçasız doğru akım motorlar için bulanık resetlemeli PI kontrolcü yapısı tasarlanmış ve hem simülasyon hem de deneysel ortamda uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar incelendiği zaman bulanık resetlemeli PI kontrolcünün geleneksel PI kontrolcüye göre referans hızı daha iyi takip ettiği gözlemlenmiştir. PI kontrolcünün parametrelerinin hesaplanmasının zorluğu ve parametreler hesaplanırken yapılan varsayımlar göz önünde bulundurulduğunda Bulanık

resetlemeli PI kontrolcü parametre hatalarını belli oranda tolere ettiği tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Hong, Wonbok, Wootaik Lee, and Byoung-Kuk Lee. "Dynamic simulation of brushless DC motor drives considering phase commutation for automotive applications." 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Vol. 2. IEEE, 2007.
- [2] Hubik, Vladimir, Martin Sveda, and Vladislav Singule. "On the development of BLDC motor control run-up algorithms for aerospace application." 2008 13th international power electronics and motion control conference. IEEE, 2008.
- [3] Tashakori, Alireza, and Mehran Ektesabi. "Fault diagnosis of in-wheel BLDC motor drive for electric vehicle application." 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2013.
- [4] Youssef, Mohamed Z. "Design and performance of a cost-effective BLDC drive for water pump application." IEEE Transactions on Industrial Electronics 62.5 (2014): 3277-3284.
- [5] Yu, Gwo-Ruey, and Rey-Chue Hwang. "Optimal PID speed control of brush less DC motors using LQR approach." 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04CH37583). Vol. 1. IEEE, 2004.
- [6] Ansari, Uzair, and Saqib Alam. "Modeling and control of three phase BLDC motor using PID with genetic algorithm." 2011 UkSim 13th International Conference on Computer Modelling and Simulation. IEEE, 2011.
- [7] Shamseldin, Mohammed Abdelbar, and Adel A. EL-Samahy. "Speed control of BLDC motor by using PID control and self-tuning fuzzy PID controller." 15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM). IEEE, 2014.
- [8] Kim, Tae-Sung, Sung-Chan Ahn, and Dong-Seok Hyun. "A new current control algorithm for torque ripple reduction of BLDC motors." IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 37243). Vol. 2. IEEE, 2001.
- [9] Siang, Tan Chee, et al. "Fuzzy logic controller for BLDC permanent magnet motor drives." International Journal of Electrical & Computer Sciences 11.2 (2011): 13-18.
- [10] Rajagiri, Anil Kumar, et al. "Speed Control of DC Motor using Fuzzy Logic Controller by PCI 6221 with MATLAB." E3S Web of Conferences. Vol. 87. EDP Sciences, 2019.
- [11] Palm, Rainer. "Sliding mode fuzzy control." [1992 Proceedings] IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 1992.
- [12] Bonissone, Piero P., et al. "Industrial applications of fuzzy logic at General Electric." Proceedings of the IEEE 83.3 (1995): 450-465.
- [13] Cunkas, Mehmet, and Omer Aydođdu. "Realization of fuzzy logic controlled brushless dc motor drives using Matlab/Simulink." Mathematical and Computational Applications 15.2 (2010): 218-229.
- [14] Kandiban, R., and R. Arulmozhiyal. "Design of adaptive fuzzy PID controller for speed control of BLDC motor." International Journal of Soft Computing and Engineering 2.1 (2012): 386-391.
- [15] Lee, Jihong. "On methods for improving performance of PI-type fuzzy logic controllers." IEEE transactions on fuzzy systems 1.4 (1993): 298-301.
- [16] Mudi, Rajani K., and Nikhil R. Pal. "A note on fuzzy PI-type controllers with resetting action." Fuzzy sets and systems 121.1 (2001): 149-159.
- [17] ULU, B. Fırçasız Doğru Akım Motor (BLDC) Hız Kontrolü. Diss. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2011.
- [18] Orman, K. Daimi Miknatıslı Senkron Motorlar için Akım Gözetleyici ve Hız Kestirimi. Diss. Yüksek Lisans Tezi, Tez, 2008.