

Üç Fazlı Asenkron Motor İçin Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Yapay Sinir Ağı Temelli Adaptif Hız Kontrol Sistemi Tasarımı

Erdal KILIÇ¹, Hasan Rıza ÖZÇALIK^{2*}, Sami ŞİT²

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Afşin Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş, Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye

ÖZET: Asenkron motorların günümüz endüstrisinde yaygın kullanımı bu motorların sağlamlığı, yüksek verimliliği ve işletme güvenilirliğinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan yapılarından dolayı bu motorların kontrol edilmelerinde büyük güçlükler yaşanmaktadır. Mikroişlemci ve güç elektroniği alanlarındaki son gelişmelerin yanı sıra yapay zekâ temelli yeni kontrol stratejileri asenkron motorlarının daha etkin ve güvenilir şekilde kontrol edilmesini sağlamıştır. Güçlü mikrodenetleyicilerden olan sayısal işaret işlemciler ile motor kontrolünde kullanılan koordinat dönüşümleri, alan tahmin algoritmaları ve denetim algoritmaları gibi karmaşık hesaplamalar yapılabilmektedir. Bilindiği gibi yapay zekâya dayalı modern araçlar arasında yer alan yapay sinir ağları, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin modellenmesi ve kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada üç fazlı bir asenkron motorun hız kontrol sistemi dsPIC30F6010A mikrodenetleyicisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rotor akı vektörü, vektör kontrolünün en verimli şeması olan dolaylı alan yönlendirmeli kontrol tekniği kullanılarak tahmin edilir. Üç fazlı eviricinin anahtarlamasında uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) tekniği kullanılmıştır. Sürücü sisteminin performansının artırılması amacıyla radyal taban fonksiyonlu yapay sinir ağı (RTYSA) temelli model referans adaptif kontrol (MRAK) metodu kullanılarak bir hız denetimin algoritması geliştirilmiştir. Asenkron motor farklı hız ve yük koşulları altında çalıştırılarak önerilen kontrol algoritmasının başarısı deneysel olarak test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen kontrol yapısının başarısını açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: *Yapay Sinir Ağları, Adaptif Kontrol, Asenkron Motor*

Artificial Neural Network Based Adaptive Speed Control System Design using Space Vector Pulse Width Modulation for Three-Phase Asynchronous Motor

ABSTRACT: The widespread use of asynchronous motors in today's industry is due to their robustness, high efficiency and operational reliability. However, great difficulties due to the very complex and non-linear structure is experienced in controlling this motor. The recent advances in areas of microprocessors and power electronics, along with the new control strategies based on artificial intelligence has led asynchronous motors to be controlled more efficiently and reliably. Complex calculations such as coordinate transformations, field estimation algorithms and control algorithms used in the motor control can be easily done with digital signal processors which are powerful microcontrollers. As known, artificial neural networks which are among modern tools based on artificial intelligence are widely used for modeling and controlling nonlinear dynamical systems. In this study, a three-phase asynchronous motor speed control system was designed using a microcontroller labeled as dsPIC30F6010A. The rotor flux vector is estimated using the indirect field-oriented control technique, which is the most efficient scheme of vector control. The space vector pulse width modulation technique is used in the switching of the three-phase inverter. In order to improve the performance of the drive system, a speed control algorithm has been developed using a radial basis artificial neural network based model reference adaptive control method. The performance of the proposed control algorithm is experimentally tested by running the asynchronous motor under different speed and load conditions. The experimental results clearly demonstrate the success of the proposed control structure.

Keywords: *Artificial Neural Network, Adaptive Control, Induction Motor*

*Sorumlu Yazar: Hasan Rıza ÖZÇALIK, ozcalik@ksu.edu.tr

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar dayanıklı, basit yapılı, yüksek verimli, az bakım gerektiren yapısı ve düşük maliyetleri sayesinde ev cihazları ile endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen motorlardır. Ancak bu motorların karmaşık ve doğrusal olmayan yapılarından dolayı hız ve tork kontrolleri doğru akım motorlarına göre oldukça zordur. Bu nedenle asenkron motorların değişken hız denetiminde yüksek performanslı motor sürücü sistemleri kullanılmaktadır. Böylece motorlar daha verimli ve güvenilir bir şekilde çalıştırılmakta ve optimum işletme koşulları sağlanarak üretim kalitesinin artması ve enerji tasarrufunun sağlanması gibi birçok faydalar sunulmaktadır [1-3].

Hızla gelişen güç elektroniği ve mikroişlemci teknolojisi; yeni kontrol stratejilerinin ve motor sürme tekniklerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Yüksek performanslı asenkron motor sürücülerinde dolaylı alan yönlendirmeli vektör kontrol yaklaşımı en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemle stator akımının moment ve akı bileşenleri birbirinden ayrı kontrol edilerek asenkron motor bir yabancı uyartımlı doğru akım motoru gibi kontrol edilebilmektedir [4, 5].

Basit yapılarından dolayı vektör kontrollü asenkron motor sürücülerinde geleneksel PI tipi denetleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak geniş hız bölgelerinde ve değişik yük durumlarında PI tipi denetleyiciler iyi bir denetim performansı gösterememektedirler [6, 7]. Böylece, belirli bir dinamik tepki sağlanması ve bozucuların sistem çıkışına olan etkisinin giderilmesi için gelişmiş bazı adaptif kontrol tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Asenkron motor hız kontrolünde değişen sistem dinamiklerinin etkisini azaltma ve yüksek dinamik performans elde etmek için MRAK etkili bir kontrol yöntemi olacaktır.

MRAK, parametreleri bilinmeyen veya kısmen bilinen karmaşık doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde yaygın kullanılan adaptif kontrol yöntemlerindedir. Bazı ayarlanabilir denetleyici parametreleri ve bunları ayarlamak için bir ayarlama mekanizması ile doğrudan uyumlu bir kontrol sistemidir. Bu yöntemde, sistem çıkışının kararlılığı bilinen bir referans model çıkışını takip etmesi amaçlanır. Referans model, sistemde yükselme zamanı, maksimum aşım, kararlı hal hatası ile ilgili istenen özelliklere sahip ideal bir modeldir. Denetleyicinin performansı, uygun referans model seçimi ve ayar mekanizmasının yeteneğine bağlıdır [8-10].

Yapay sinir ağları (YSA) doğrusal olmayan yapı, genelleme, öğrenme ve adaptif yeteneği sayesinde karmaşık ve doğrusal olmayan dinamik sistemlerin modelleme ve kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır [11, 12]. Son yıllardaki çalışmalardan, RTYSA'nın asenkron motor sürücü sistemlerinin

denetim yapısında kullanımının dayanıklılığı ve performansı artırdığı görülmektedir [13-15]. RTYSA'nın bu çalışmada kullanım amacı ise sistemden gelen doğrusal olmayan kısımları kompanze etmektir.

YSA ve MRAK yapıları beraber kullanılarak birçok denetleyici geliştirilmekte ve pratik uygulamalarda kullanılmaktadır. [16]'da dolaylı alan yönlendirmeli asenkron motor için YSA kullanan bir model referans adaptif hız kontrolü sunulmuştur. Sistemdeki parametre değişimlerinden kaynaklanan belirsizlikler ile bozucuları tahmin etmek için bir gözlemci kullanılmıştır. [17]'de, RTYSA temelli bir MRAK yaklaşımı önerilmiş ve birinci dereceden sürekli zamanlı doğrusal olmayan dinamik sistemler için analiz edilmiştir. [18]'de, beş fazlı daimi mıknatıslı bir motor için yeni bir YSA tabanlı MRAK'nın başarılı bir şekilde kontrol uygulanması sunulmuştur. [19]'da geliştirilen MRAK denetleyici ile asenkron motorun skaler hız kontrolü gerçekleştirilmiş ve adaptasyon mekanizması olarak RTYSA kullanılmıştır. [20]'de tek fazlı aktif güç filtresini kontrol etmek için bir RTYSA kullanan bir model referans adaptif kayma modu önerilmiş ve başarıyla uygulanmıştır. [21]'de, gemi dümen sistemleri için bir YSA tabanlı MRAK denetleyici sunulmuştur. MRAK sisteminde, yüksek adaptif kontrol performansı elde etmek için sistemdeki bilinmeyen doğrusal olmayan kısımları kompanze etmek amacıyla RTYSA kullanılmıştır. [22]'de direk MRAK yöntemine dayanan dinamik bir geri yayılım algoritması ile online olarak eğitilmiş YSA denetleyici ile asenkron motoru hız kontrolü yapılmıştır. [23]'te, dolaylı alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemi kullanılarak RTYSA temelli MRAK tipi denetleyici ile üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motorun doğrusal olmayan fan tipi yük altında hız denetiminin benzetim çalışması yapılmıştır.

Bu çalışmada, üç fazlı sincap kafesli 0.25 kW gücünde bir asenkron motorun hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Motorun kontrol yönteminde yüksek performanslı sürücülerde kullanılan dolaylı alan yönlendirmeli (rotor akısı yönlendirmeli) vektör kontrol algoritması tercih edilmiştir. Bu kontrol yönteminde hız denetleyicisi olarak kullanılan klasik PI tipi denetleyici yerine RTYSA tabanlı MRAK denetleyici gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Üç fazlı eviricide anahtarlama kayıplarının az olması ve toplam harmonik bozulmanın düşük olması gibi avantajları nedeniyle uzay vektör darbe genişlik modülasyon tekniği kullanılmıştır. Bu teknik yüksek hesaplama gücü gerektirdiğinden gelişmiş bir sayısal işaret işleyici olan dsPIC30F6010A mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Önerilen denetim algoritmasının performansını belirlemek amacıyla asenkron motorun farklı hız ve yük durumları altındaki çalışmalarını gösteren deneysel sonuçlar sunulmuştur. Buna göre, RTYSA tabanlı MRAK hız denetleyici asenkron motorun referans hızı yakından takip etmesini sağlamış ve bozucu yük etkisine karşı dayanıklı bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur.

2. ASENKRON MOTOR DİNAMİK MODELİ

Üç fazlı devrelerin analizini basitleştirmek için $d-q$ matematiksel dönüşümü kullanılmaktadır. Asenkron motorun vektör kontrolünü tasarlamak için ihtiyaç duyulan matematiksel model, motora ait üç faz değişkenleri senkron hızda dönen $d-q$ düzlemine aktarılarak elde edilmektedir. $d-q$ eksen takımındaki modele ilişkin eşitlikler (1-5)'te gösterilmiştir [23-25].

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} -R_E i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{L_m R_r}{L_r'} \psi_{rd} \\ + \omega_r \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} + V_{sd} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} -R_E i_{sq} - \sigma L_s \omega_s i_{sd} + \frac{L_m R_r}{L_r'} \psi_{rq} \\ -\omega_r \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} + V_{sq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r} i_{sq} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_e}{J} - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J} \quad (5)$$

Burada $R_E = R_s + R_r' L_m^2 / L_r'^2$ eşdeğer direnci, $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r'^2$ kaçak faktörü, $\omega_m = \omega_r / p$ ise mekanik hızı tanımlamaktadır. ω_s senkron açısal hızı, ω_r elektriksel rotor açısal hızı, V_{sd} ve V_{sq} stator voltajlarını, i_{sd} ve i_{sq} stator akımlarını, ψ_{rd} ve ψ_{rq} rotor akımlarını, R_s ve R_r' stator ve rotor dirençlerini, L_s ve L_r' stator ve rotor endüktanslarını, L_m karşılıklı endüktansı, p motor kutup çifti sayısını, J motor eylemsizlik momentini, B sürtünme katsayısını, T_L ise yük momentini ifade etmektedir. Dolaylı alan yönlendirmeli kontrol tekniğini uygulamak için aşağıdaki denklemleri dikkate almak gerekir.

$$T_e = \frac{3}{4} \frac{p L_m}{L_r} (i_{sq} \psi_{rd} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (6)$$

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r = \frac{L_r}{R_r} \frac{di_{sq}}{dt} \quad (7)$$

$$\theta_s = \int \omega_s dt = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \theta_r + \theta_{sl} \quad (8)$$

Burada T_e motorun ürettiği momenti, ω_{sl} rotor akımlarının açısal hızını ve θ_s eksen dönüşümlerinde kullanılan senkron açısal konumu ifade etmektedir.

3. DOLAYLI ALAN YÖNLENDİRMELİ VEKTÖR KONTROL TEKNİĞİ

Alan yönlendirmeli kontrol, moment kontrolünü alan kontrolünden ayırarak asenkron motorun serbest uyarımlı bir doğru akım motoru gibi hareket etmesini sağlar [26]. Alan yönlendirmeli kontrol 1972'de F. Blaschke tarafından geliştirilen doğrudan alan yönlendirmeli kontrol ve 1969'da K. Hasse tarafından geliştirilen dolaylı alan yönlendirmeli kontrol olarak iki sınıfa ayrılabilir [27]. Doğrudan alan yönlendirmeli kontrol tekniğinde akının ölçülmesi için birçok sensör gerekmesi ve düşük devirlerde düşük akı algılaması gibi problemler nedeniyle [28], bu çalışmada dolaylı alan yönlendirmeli kontrol tekniği tercih edilmiştir. Bu kontrol tekniğinde rotor pozisyonu, motorun hız geri bildirim sinyalinden hesaplanır ve $d-q$ referans düzlemi kullanılır. Bu nedenle vektör kontrolünün uygulanması rotor akısının açı (konum) bilgisini gerektirmektedir.

Vektör kontrolünde asenkron motor stator akımının moment ve akı bileşenlerinin birbirlerinden ayrıştırılarak doğru akım motorunun moment eşitliğine benzetilmesi gerekir. Stator akımının bileşenlerine ayrıştırılması rotor akısının senkron referans çatısındaki d -ekseninin üzerine çakıştırılmasıyla yapılır. Bu durumda rotor akısının q -eksen bileşeni (ψ_{rq}) sifira eşitlenmiş olur. [29-31]. q -ekseni rotor akısı $\psi_{rq}=0$ alınırsa Eşitlik (6) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$T_e = \frac{3}{4} \frac{p L_m}{L_r} i_{sq} \psi_{rd} = K_t i_{sq} \quad (9)$$

Asenkron motorun elektromekanik dinamik ifadesi aşağıdaki gibidir [32].

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + T_L = K_t i_{sq} \quad (10)$$

Böylece, motor modeli birinci derece dinamik eşitlikle ifade edilebilir:

$$\frac{d\omega_m}{dt} + f(\omega_m) = i_{sq} \quad (11)$$

Burada $f(\omega_m)$, motor hızına bağlı doğrusal olmayan bir fonksiyonu temsil etmektedir.

4. DENETLEYİCİNİN TASARIMI

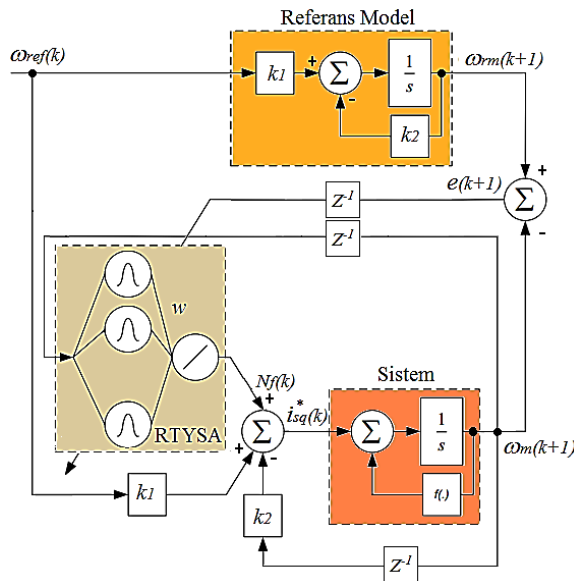
Bu çalışmada hız denetleyicisi olarak RTYSA tabanlı MRAK algoritması kullanılmıştır. MRAK'ın amacı q -ekseni referans akımını (i_{sq}^*) üretmek için bir kontrol kuralı oluşturmak ve gerçek motor hızının referans sinyali takip etmesini sağlamaktır. RTYSA'nın amacı ise asenkron motor doğrusal olmayan yapısından dolayı denetimi zorlaştıran kısımları kompanze etmektir. RTYSA tabanlı MRAK denetleyicinin sisteme uygulanmış yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.

Sistem ve referans model ile ilgili diferansiyel eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{\omega}_m(t) + f[\omega_m(t)] = \dot{i}_{sq}^*(t) \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_{rm}(t) + k_1 \omega_{rm}(t) = k_2 \omega_{ref}(t) \quad (13)$$

Burada $\omega_{ref}(t)$ referans hızı, $\omega_{rm}(t)$ referans model çıkışı; $i_{sq}^*(t)$ kontrol sinyalinin; f bilinmeyen statik doğrusal olmayan bir fonksiyon; k_1 ve k_2 pozitif katsayılarıdır.



Şekil 1. RTYSA Tabanlı MRAK Yapısı

Model referans adaptif sistemin amacı; kontrol edilen sistemin çıkışını, referans model çıkışı izlemeye zorlayan bir denetleyici tasarlamaktır. RTYSA adaptasyonu da sistemin büyük belirsizliklerine karşı kontrol performansını etkili bir şekilde artıracaktır. MRAK sisteminde değişkenleri düzenleyen mekanizma gradyant yöntemi veya Lyapunov direk yöntemi gibi bir kararlılık teorisi kullanmak suretiyle iki şekilde gerçekleştirilebilir. Böylece tüm sistemin kararlılığı ve adaptasyon yakınsaması garanti edilir [33]. Denetleyici tasarımı için, kontrol kuralı aşağıdaki gibi önerilebilir:

$$i_{sq}^*(t) = -k_2 \omega_m(t) + k_1 \omega_{ref}(t) + N_f[\omega_m(t), w(t)] \quad (14)$$

Burada N_f RTYSA'nın çıkış vektörü; w RTYSA'nın ağırlık vektörüdür. Ağ çıkışı N_f sistemin $f(\cdot)$ ile ifade edilen doğrusal olmayan kısmını kompanse etmektedir. N_f aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$N_f[\omega_m(t), w(t)] = \sum_{j=1}^J w_j(t) \exp\left[-\frac{\|\omega_m(t) - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right] \quad (15)$$

Eşitlik (12), (13) ve (14) birleştirilir ve yeniden yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned} & \left[\dot{\omega}_m(t) - \dot{\omega}_{rm}(t) \right] + k_2 [\omega_m(t) - \omega_{rm}(t)] \\ & = N_f[\omega_m(t), w(t)] - f[\omega_m(t)] \end{aligned} \quad (16)$$

Burada N_f asimptotik olarak $f(\cdot)$ 'ye yaklaştığı zaman, izleme hatası $e(t)$ sıfıra doğru eğilim gösterecektir.

$$e(t) = \omega_m(t) - \omega_{rm}(t) \quad (17)$$

$$\dot{e}(t) + k_2 e(t) \approx 0 \quad (18)$$

4.1. RTYSA VE GERİ YAYILIM ALGORİTMASI

YSA teknikleri sürekli olarak büyük gelişmeler göstermekte ve öğrenme, desen tanıma, sinyal işleme, modelleme ve sistem kontrolü gibi pek çok alanda başarıyla uygulanmaktadır. Yüksek paralel yapı, öğrenme kabiliyeti, doğrusal olmayan fonksiyon yaklaşımı, hata toleransı gibi başlıca avantajları, YSA'nın gerçek zamanlı uygulamalar için doğrusal olmayan sistem kimliklendirme ve kontrolünde kullanımını büyük ölçüde artırmaktadır. RTYSA iyi genelleme yeteneği ve çok katmanlı ileri besleme ağlarına (MLP) kıyasla gereksiz ve uzun hesaplamayı önleyen basit bir ağ yapısı nedeniyle son zamanlarda çok dikkat çekmiştir. [34].

RTYSA giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmana sahiptir. Gizli katmandaki nöronlarda aktivasyon fonksiyonu olarak radyal taban fonksiyonları (genellikle doğrusal olmayan yapıya sahip Gauss Fonksiyonu) kullanılır [35, 36]. Gizli katmanda, gizli düğümler denilen bilgi işlem birimleri dizisinden oluşur. Her gizli düğüm, x giriş vektörü ile aynı boyutta bir parametre vektörü olan c merkez vektörünü içerir. Bu vektörler arasındaki Öklid uzaklığı $\|x - c_j\|$ ile tanımlanır.

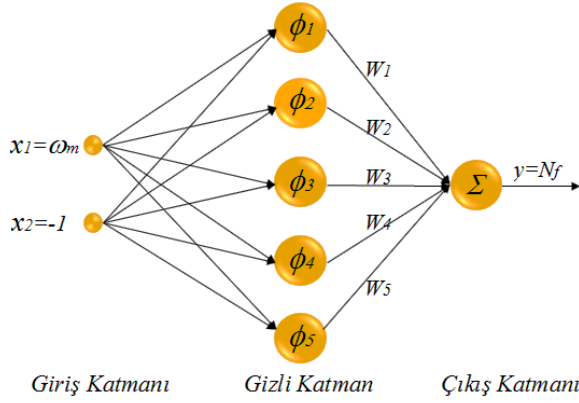
$$\phi_j(x) = \exp\left[-\frac{\|x - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right] \quad (19)$$

Burada σ_j radyal taban fonksiyon genişliğini, m gizli düğüm sayısını göstermektedir. c_j ve σ_j 'ler giriş değerlerinin aralığına göre belirlenir [37, 38]. Ağ çıkışı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$y_k(x) = \sum_{j=1}^m w_{kj} \phi_j(x), \quad j=1, 2, \dots, m \quad (20)$$

Burada w , m , y sırayla çıkış katmanı ağırlıkları, çıkış sayısı ve çıkış düğümünü ifade etmektedir. RTYSA'nın eğitimi adaptif parametrelerin (c_j , σ_j , w_{kj}) optimize edilmesi sürecidir.

Bu çalışmada Şekil-2'de gösterildiği gibi RTYSA topolojisi 2:5:1 (giriş katmanı düğüm sayısı 2, gizli katman düğüm sayısı 5 ve çıkış katmanı düğüm sayısı 1) ağ mimarisi yapısında seçilmiştir.



Şekil 2. RTYSA ağ mimarisi

Ayarlanabilen RTYSA parametreleri hatanın geri yayılım algoritması kullanılarak online ayarlanır.

$$w_{kj}(t+1) = w_{kj}(t) + \eta e(t) \phi_j \quad (21)$$

$$c_j(t+1) = c_j(t) + \eta e(t) \phi_j w_j \frac{(x - c_j)}{\sigma^2} \quad (22)$$

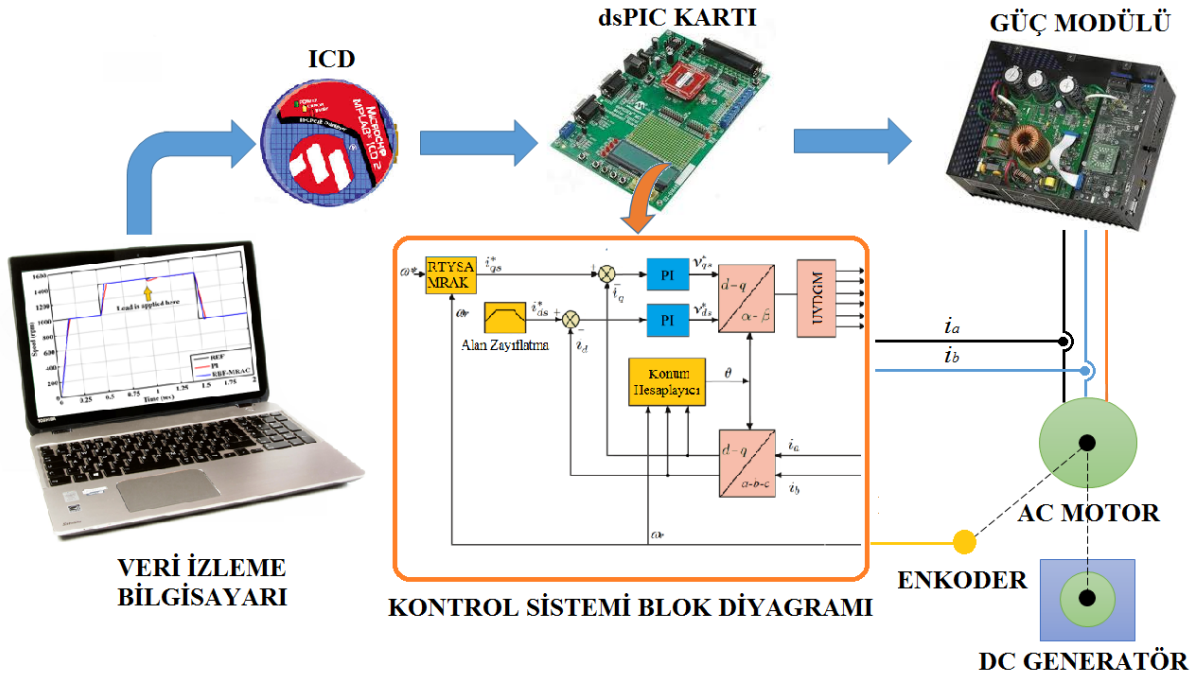
$$\sigma_j(t+1) = \sigma_j(t) + \eta e(t) \phi_j w_j \frac{\|x - c_j\|}{\sigma^3} \quad (23)$$

Burada η (0,1) aralığında seçilen öğrenme katsayısıdır. $e(t)$ izleme hatasını göstermek üzere RTYSA'nın eğitilmesi için minimize edilmesi amaçlanan performans fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

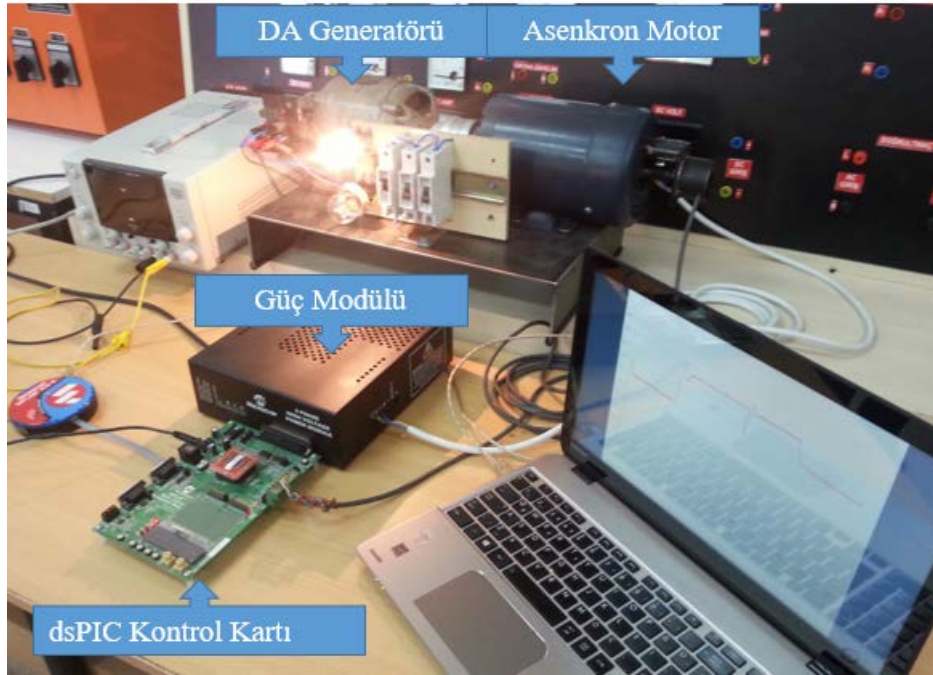
$$E(t) = \frac{1}{2} e(t)^2 \quad (24)$$

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Üç fazlı asenkron motorun hız kontrolünün gerçekleştirilmesi için Şekil 3'teki diyagrama göre Şekil 4'te gösterilen deney düzeneği tasarlanmıştır. Rotor akısı vektörünün hesaplanması ve $d-q$ koordinat sistemi dönüşümleri yüksek hesaplama gücüne sahip bir mikro denetleyici gerektirir. Bu nedenle dsPIC30F6010A dijital sinyal işlemci seçilmiştir. Deney düzeneği dsPIC30F6010A mikrodenetleyici tabanlı motor kontrol geliştirme kartı, 1 kW doğrultucu ve evirici içeren güç modülü, 0.25 kW gücünde üç fazlı sincap kafesli asenkron motor, yüklemeye amacıyla doğru akım şönt generatörü ve ölçüm cihazlarından oluşmaktadır.



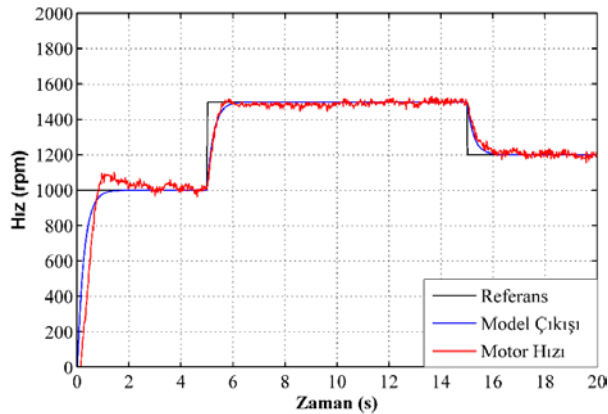
Şekil 3. Deney düzeneği blok diyagramı



Şekil 4. Deney düzeneği

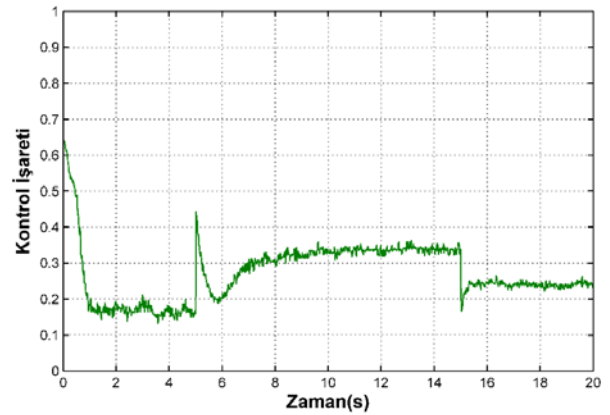
Kontrol sisteminde hız, akı ve torku kontrol eden üç kontrol döngüsü kullanılmaktadır. Önerilen RTYSA tabanlı MRAK hız kontrolörü olarak kullanılmıştır. Kontrol kartında akı ve tork kontrol döngüleri $100 \mu\text{s}$ 'de, hız kontrol döngüsü ise 10 ms olarak yürütülmüştür. Eviricinin anahtarlama frekansı 10 kHz , anahtarlama ölü zaman ise $2 \mu\text{s}$ olarak seçilmiştir. Asenkron motor sürücününün sistem cevabı ani referans hız ve ani yük değişimleri için gösterilmiştir.

Asenkron motorun değişken hız referansları için elde edilen grafiği ve sistemin takip etmesi istenilen referans model çıkış işareti Şekil 5'te gösterilmiştir. Motora 1000 d/d referans hız ile yüksüz olarak yol verilmiştir. Çalışmanın $5. \text{ saniyesinde}$ referans hız değeri 1000 d/d 'dan 1500 d/d 'ya çıkarılmıştır. Çalışmanın $15. \text{ saniyesinde}$ referans hız değeri 1500 d/d 'dan 1200 d/d 'ya düşürülmüştür.

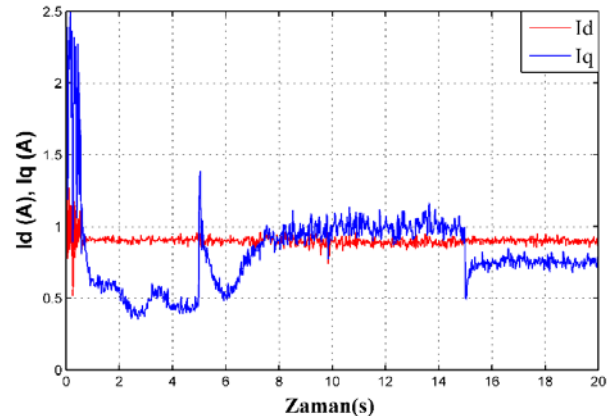


Şekil 5. Referans hız değişimindeki hız cevabı

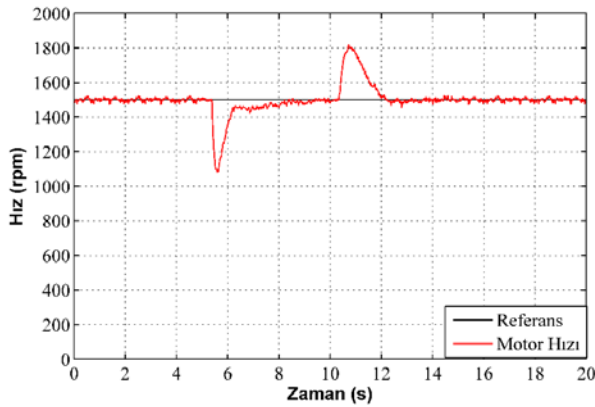
Hız denetleyicisinin ürettiği kontrol işareti Şekil 6'da ve $d-q$ eksen akımları Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Referans hız değişimindeki kontrol işareti

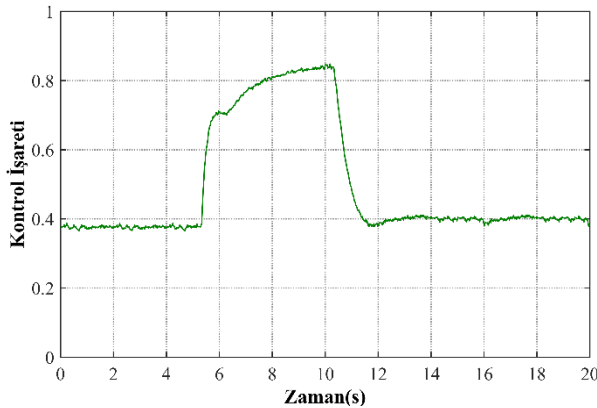
Şekil 7. Referans hız değişimindeki $d-q$ eksen akımları

Asenkron motor 1500 d/d referans hızda kararlı durumda çalışırken doğru akım generatörüne bağlı lamba yükü devreye alınmıştır. Bu yüklenme durumu asenkron motorun hızında anlık düşüğe sebep olmuştur. Denetleyici motor hızını tekrar kararlı duruma getirmiştir. Yine motor kararlı durumda çalışırken lamba yükü devreden çıkarılmıştır. Bu durum motorun hızında anlık yükselme etkisi oluşturmuştur. Denetleyici bozucu etkiyi telafi ederek motorun istenilen hızda çalışmasına devam etmesini sağlamıştır. Yük değişimi altında elde edilen hız grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir.



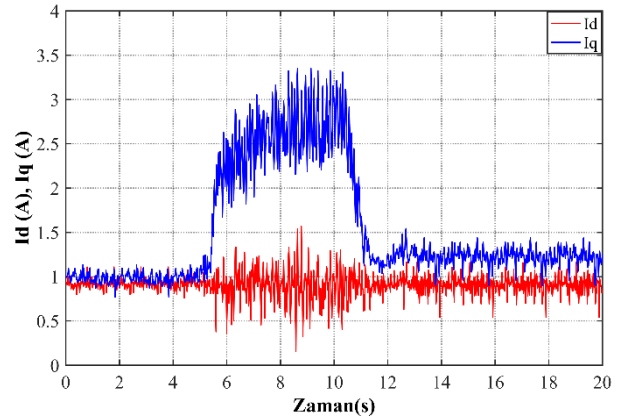
Şekil 8. Referans yük değişimindeki hız cevabı

Bu çalışma durumunda denetleyici çıkışında oluşan ölçeklenmiş kontrol işareti Şekil 9'da gösterilmiştir. Kontrol işareti aynı zamanda q -ekseni referans akımını (i_{sq}^*) oluşturmaktadır.



Şekil 9. Referans yük değişimindeki kontrol işareti

Motorun yüklenme anında referans moment işaretini temsil eden kontrol işaretinin maksimum değerine doğru yükseldiği, yükün çıkarılmasıyla tekrar yüksüz haldeki değerine geri geldiği Şekil 9'dan görülmektedir. Motorun yükünde meydana gelen değişime karşılık oluşan akımların d - q ekseninde değerleri Şekil 10'da gösterilmiştir. I_q akımının i_{sq}^* referans akımını takip ettiği görülmektedir.



Şekil 10. Referans yük değişimindeki d - q eksen akımları

6. SONUÇ

Bu çalışmada, dsPIC30F6010A mikrodenetleyici tabanlı asenkron motor hız kontrol sistemi RTYSA tabanlı MRAK denetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dolaylı alan yönlendirmeli kontrol tekniğinde hız denetleyicisi olarak genellikle kullanılan PI denetleyici yerine RTYSA tabanlı MRAK denetleyici kullanılmıştır. Önerilen denetim algoritmasının performansı farklı çalışma koşullarında deneysel verilerle sunulmuştur.

Motora ait hız grafikleri incelendiğinde referans hızın değişim bölgelerinde sistemin istenilen değerlere kısa sürede ulaştığı, aşmanın küçük olduğu ve sürekli hal hatasının oldukça küçük kaldığı görülmektedir. Yük değişiminin motor hızında oluşturduğu bozucu etki denetleyici tarafından kısa sürede ve yumuşak geçişle düzeltilmiştir. RTYSA tabanlı MRAK denetim yönteminin, yüksek dinamik performans gerektiren vektör kontrollü asenkron motor sürücülerinde kullanılması önerilmiştir.

7. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince 2014/2-36D nolu proje ile desteklenmiştir.

8. KAYNAKLAR

- [1]. Acikgoz, H., Kecicioglu, O.F., Gani, A., Sekkeli, M., (2014), Speed Control of Direct Torque Controlled Induction Motor By using PI, Anti-Windup PI And Fuzzy Logic Controller, International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 2, 58-63.
- [2]. Ustun, S.V., (2007), GA-based optimization of PI speed controller coefficients for ANN-modelled

- vector controlled induction motor, *Applied Sci*, 7, 4001-4006.
- [3]. Nur, A., Omaç, Z., (2015), Üç Fazlı Sincap Kafesli Bir Asenkron Motorun Matlab/Simulink Ortamında Dolaylı Vektör Kontrol Benzetimi, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3, 63-73.
- [4]. Trzynadlowski, A.M., (2000), *Control of Induction Motors*, Academic press, USA.
- [5]. Matić, P., Rakic, A., Vukosavic, S., Marcetic, D., (2015), Improved Torque Control of High Speed Shaft-Sensorless Induction Motor Drive, *Automatika–Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 56, 443-453.
- [6]. Açıkgöz, H., Keçecioglu, Ö.F., Güneş, M., Şekkel, M., (2015), Öz Ayarlamalı Bulanık-PID Denetleyici İle Hidrolik Türbinin Benzetim Çalışması, *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 3, 7-15.
- [7]. Şit, S., Özçalık, H.R., Kılıç, E., Yılmaz, Ş., (2015), Üç Fazlı Asenkron Motor Sürücülerinde Hız Kontrol Yöntemlerinin Araştırılması, *Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5, 125-151.
- [8]. Jain, P., Nigam, M., (2013), Design of a model reference adaptive controller using modified MIT rule for a second order system, *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3, 477-484.
- [9]. Prakash, R., Anita, R., (2012), Modeling and simulation of fuzzy logic controller-based model reference adaptive controller, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8, 2533-2550.
- [10]. Al-Aubidy, K., Ali, M., (2004), A Hierarchical Neuro-Fuzzy MRAC of a Robot in Flexible Manufacturing Environment, *Int. Arab J. Inf. Tech.*, 1, 209-214.
- [11]. Efe, M.Ö., Kaynak, M.O., (1997), Doğrusal Olmayan Dinamik Sistemlerin Yapay Sinir Ağları Tarafından Tanınması ve Denetimi, *TOK'97 Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri Sempozyumu, Mecidiyeköy, İstanbul, Türkiye*, 20-21 Şubat, pp. 15-28.
- [12]. Kılıç, E., Özbalcı, Ü., Özçalık, H.R., (2012), Lineer Olmayan Dinamik Sistemlerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesinde MLP ve RBF Yapılarının Karşılaştırılması, *ELECO'2012 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa*.
- [13]. Şit, S., Kılıç, E., Özçalık, H.R., Altun, M., Gani, A., (2016), Model Reference Adaptive Control based on RBFNN for Speed Control of Induction Motors, *International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE'16)*, Kilis.
- [14]. Qian, M., Pei, L., Hui-xian, H., 2009, Induction Motor Vector Control Based on Immune RBF Neural Network Sliding Mode Variable Control, *2009 International Conference on Signal Processing Systems, IEEE*, pp. 541-545.
- [15]. Brandstetter, P., Kuchar, M., Skuta, O., (2014), Implementation of RBF Neural Network in Vector Control Structure of Induction Motor, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 9, 749-756.
- [16]. Shyu, K.-K., Shieh, H.-J., Fu, S.-S., (1998), Model reference adaptive speed control for induction motor drive using neural networks, *IEEE transactions on industrial electronics*, 45, 180-182.
- [17]. Patino, H.D., Liu, D., (2000), Neural network-based model reference adaptive control system, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 30, 198-204.
- [18]. Guo, L., Parsa, L., (2012), Model reference adaptive control of five-phase IPM motors based on neural network, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59, 1500-1508.
- [19]. Özçalık, H.R., Yıldız, C., Danacı, M., Koca, Z., 2007, RBF based induction motor control with a good nonlinearity compensation, *International Work-Conference on Artificial Neural Networks*, Springer, pp. 878-886.
- [20]. Fang, Y., Fei, J., Ma, K., (2015), Model reference adaptive sliding mode control using RBF neural network for active power filter, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 249-258.
- [21]. Cheng, J., Yi, J., Zhao, D., (2005), Neural Network Based Model Reference Adaptive Control for Ship Steering System, *International Journal of Information Technology*, 11, 75.
- [22]. Jiang, X., Zhao, J., Luo, H., Cheng, S., Wan, S., 2003, Neural network speed controller of induction motor drive based on direct MRAC method, *Industrial Electronics Society, 2003. IECON'03. The 29th Annual Conference of the IEEE, IEEE*, pp. 2531-2536.
- [23]. Kılıç, E., Özçalık, H.R., Yılmaz, Ş., Şit, S., (2015), Vektör Kontrollü Asenkron Motorların RTYSA Temelli Model Referans Adaptif Kontrol ile Değişken Yük Altında Hız Denetimi, *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 3, 27-33.

- [24]. Kılıç, E., Özçalık, H.R., Yılmaz, Ş., Şit, S., (2015), A comparative analysis of FLC and ANFIS controller for vector controlled induction motor drive, 2015 International ACEMP-OPTIM-ELECTROMOTION, IEEE, 102-106.
- [25]. Sarıoğlu, M.K., Gökaşan, M., Boğosyan, S., (2003), Asenkron makineler ve kontrolü, Birsan Yayınevi.
- [26]. Nisha, G., Lakaparampil, Z., Ushakumari, S., (2016), Torque capability improvement of sensorless FOC induction machine in field weakening for propulsion purposes, Journal of Electrical Systems and Information Technology.
- [27]. Orłowska Kowalska, T., Dybkowski, M., (2016), Industrial drive systems. Current state and development trends, Power Electronics and Drives, 1.
- [28]. Naik, B.S., (2014), Comparison of Direct and Indirect Vector Control of Induction Motor, International Journal of New Technologies in Science and Engineering (IJNTSE), 1, 110-131.
- [29]. Lepka, J., Stekl, P., (2005), 3-Phase AC induction motor vector control using a 56F80x, 56F8100 or 56F8300 device, Freescale Semiconductor Application Note AN1930 Rev. 2.
- [30]. Popescu, M., (2000), Induction motor modelling for vector control purposes, Helsinki University of Technology,
- [31]. Liaw, C.-M., Chao, K.-H., Lin, F.-J., (1992), A discrete adaptive field-oriented induction motor drive, IEEE transactions on power electronics, 7, 411-419.
- [32]. Chen, T.-C., Sheu, T.-T., (2002), Model reference neural network controller for induction motor speed control, IEEE Transactions on Energy Conversion, 17, 157-163.
- [33]. Alkan, Ö., 2011, Zamanla değişen sistemlerin bulanık model referans adaptif kontrolü, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [34]. Liu, J., (2013), Radial Basis Function (RBF) neural network control for mechanical systems: design, analysis and Matlab simulation, Springer Science & Business Media,
- [35]. Haykin, S., (1999), Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- [36]. Zhang, M.-G., Li, W.-H., Liu, M.-Q., 2005, Adaptive PID control strategy based on RBF neural network identification, 2005 International Conference on Neural Networks and Brain, IEEE, pp. 1854-1857.
- [37]. Okkan, U., Dalkılıç, H.Y., (2012), Radyal tabanlı yapay sinir ağları ile Kemer Barajı aylık akımlarının modellenmesi, Teknik Dergi, 23.
- [38]. Qin, L., Zhou, X., Cao, P., (2012), New control strategy for PMSM driven bucket wheel reclaimers using GA-RBF neural network and sliding mode control, Elektronika ir Elektrotehnika, 122, 113-116.
- [39]. Bas, Z., Yılmaz, A.S., (2016), Klasik, İki ve Üç Paralel Kollu Düşüren Dönüştürücünün Ortalama Akım Kontrolü ile Analizi ve Karşılaştırılması. Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Konferansı (ICETAS-2016), 914-919.