

Denetimli Doğrultucu ile Beslenen DA Motor İçin Kritik Tetikleme Açısının Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Belirlenmesi

Critical Firing Angle Determining for DC Motor Drive Fed by Controlled Rectifier by Using Neural Networks

M. Zeki BİLGİN¹ Altuğ ENGİN²

¹ Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi
bilgin@kocaeli.edu.tr

²Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği ABD
Kocaeli Üniversitesi
altugengin@yahoo.com

Özet

Bu çalışmada, doğrultucu ile beslenen doğru akım motor sürücülerini için kritik tetikleme açısı hesabı için YSA tabanlı bir yöntem önerilmiştir. İlk olarak doğru akım motoru için farklı çalışma koşullarında kritik tetikleme açıları hesaplanmıştır. Sonra bu veriler bir yapay sinir ağına öğretilmiştir. Herhangi bir çalışma durumu için kritik tetikleme açısı YSA' dan türetilmektedir.

Abstract

In this work, a Neural Networks (NN) based method is proposed to calculate the critical triggering angle of DC motor fed by the three phase controlled rectifier. Firstly, the critical triggering angles for DC motor are computed for the different operation conditions. Afterwards, the NN is trained with this data. The critical triggering angle is derived from NN for any operation condition.

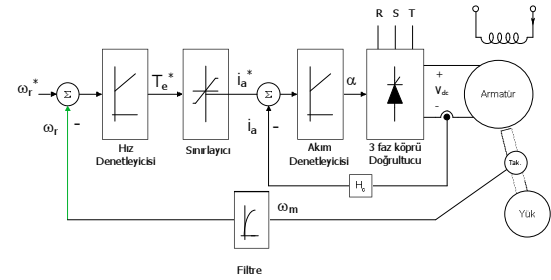
1. Giriş

Doğru Akım(DA) motorları yaygın olarak kullanılmamakla birlikte sabit mıknatıslı olanları bazı özel uygulamalarda tercih edilmektedir. DA motor sürücü devreleri incelendiğinde 2 farklı güç dönüştürücüsünün kullanıldığı görülür [5]. Bunlar DA kıyıcılar ve denetimli doğrultuculardır. Bu çalışmada DA motorunun 3 fazlı denetimli bir köprü doğrultucu ile beslendiği düşünülmüştür.

Doğru akım motorlarında da tüm motorlarda olduğu gibi üretilen moment akımla orantılıdır. Dolayısı ile DA motorunda da moment değişimi akım değişimi ile ilişkilidir. Bu sebeple akımdaki değişimlerin(dalgalanmaların) minimize edilmesi sabit moment davranışı için önemlidir. Bir fazlı doğrultucu ile beslenen motorunlar sabit doğru gerilimlerle beslenmediğinden çektikleri akımlar da sabit değildir. Momenti üreten akım dalgalıdır. Dolayısı ile de momentlerde dalgalanmalar görülür. Bu dalgalanmalar bazı hassas uygulamalarda istenmez. Akımlarının dalgalılığını azaltmak için genelde 3 fazlı doğrultucu kullanılır. 3 fazlı doğrultucular ise bilindiği üzere tam dalga ve köprü montajı olarak 2 farklı şekilde yapılırlar. Kısmen de olsa akım dalgalılığı bu sayede azaltılabilir.

2. DA Motor Sürücü Sistemi

Analizi yapılacak sistemin genel yapısı Şekil 1' de gösterildiği gibidir.

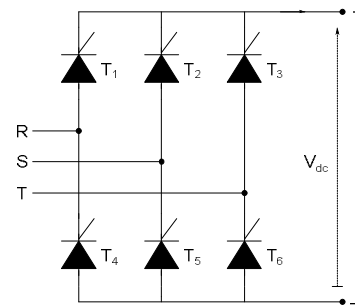


Şekil 1: Faz denetimli DA motor sürücü sistemi genel yapısı.

Sistem incelendiğinde; doğrultucu ve sürücüsü, motor ve yük, konum algılayıcı ve denetleyici olmak üzere 4 temel parçadan oluştuğu görülür. Yapılan çalışmada motor yabancı uyarımlı ve doğrultucu ise 3 fazlı denetimli doğrultucu seçilmiştir. Yük olarak sabit moment ve denetleyiciler ise PI denetleyici olarak kullanılmıştır.

2.1. Üç Fazlı Denetimli Doğrultucu

Bu çalışmada güç dönüştürücüsü olarak Şekil 2'de gösterilen 3 fazlı denetimli köprü doğrultucu kullanılmıştır [1].



Şekil 2: Üç fazlı denetimli köprü doğrultucu.

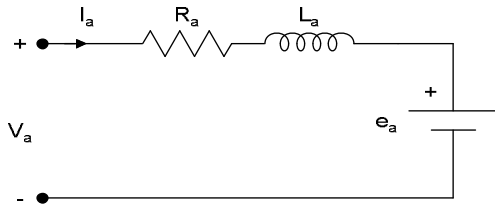
Şekil 2' de gösterilen doğrultucu tetikleme açıları değiştirilerek çıkışındaki gerilim değiştirilebilir. Yol alma sırasında ve devir sayısı ayarında motor uçlarına gelen geriliminin ayarlanması gerekir. Bu sebeple motor yol alırken veya motorun devir sayısını ayarlarken doğrultucu çıkış geriliminin de değiştirilmesi gerekir. Bu değişim doğrultucu anahtarlarının iletime geçme anı değiştirilerek yani tetikleme açısı (α) değiştirilerek yapılır. Şekil 2' de verilen doğrultucu için çıkış geriliminin ortalama değeri denklem (1)' deki gibi hesaplanır [2].

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} V_m \cos(\alpha) \quad (1)$$

Burada V_m giriş alternatif gerilimin genliğidir.

2.2. Doğru Akım Motor Modeli ve Yük

Yabancı uyarımlı DA motoru eşdeğer devresinin Şekil 3' deki gibi oluşu bilinmektedir. Burada R_a endüvi direnci, L_a endüvi endüktansı, e_a endüklenen gerilim, V_a besleme gerilimi ve I_a endüvi akımıdır.



Şekil 3: Yabancı uyarımlı DA motor eşdeğer devresi

Şekil 3' ten endüvi devresi çevre denklemi (2)' deki gibi yazılabilir [4].

$$V_a = e_a + i_a \cdot R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2)$$

$$e_a = K_b \cdot \omega_r$$

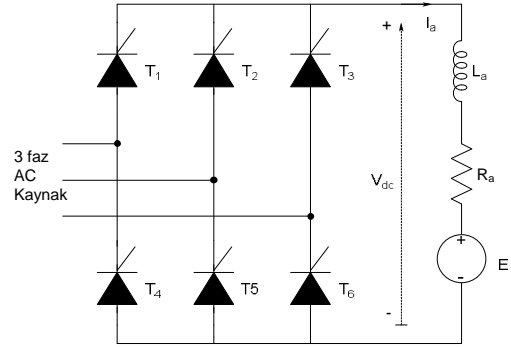
Elektriksel ve mekanik moment denklemlerini de içeren DA Motoru matematiksel modeli ise (3) deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\omega_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K_b}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

Burada J rotor ataleti ve B sürtünme sabiti, K_b moment ve emk sabiti, L_a endüvi endüktansı, R_a endüvi direnci, V_a besleme gerilimi ve T_L yük momentidir ve bu çalışmada sabit olarak alınmıştır.

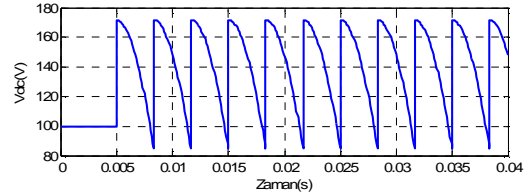
3. Sürücü Sistemi Analizi

Doğrultucu devresi ile DA motor eşdeğer devresi birleştirilirse toplam eşdeğer devre Şekil 4' teki gibi olur.

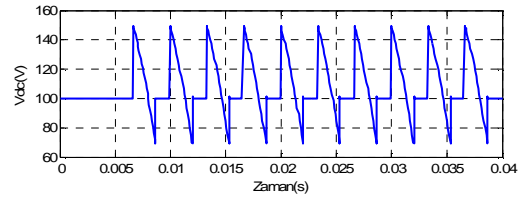


Şekil 4: Üç fazlı köprü doğrultucu ile beslenen DA motor eşdeğer devresi.

Şekil 4' deki doğrultucu çıkış gerilimi V_{dc} değişimi tetikleme açısına bağlı olarak değişmekle birlikte dalgalı bir formdadır. Doğrultucu çıkışı $\alpha=30$ Şekil 5.a ve $\alpha=60$ derece için çıkış dalga formu Şekil 5.b' deki gibidir.



Şekil 5.a: Akımın sürekli olduğu ($\alpha=30$).



Şekil 5.b: Akımın süreksiz olduğu durum ($\alpha=60$).

Şekil 5' den doğrultucu çıkış gerilimi değişimi ifadesi (4)' deki gibi yazılabilir. Çıkış gerilimi periyodu $\pi/3$ ' tür.

$$V_a = V_m \sin(\omega_s t + \frac{\pi}{3} + \alpha), \quad 0 < \omega_s t < \frac{\pi}{3} \quad (4)$$

Doğru akım motoruna Şekil 5' teki gibi bir gerilim uygulandığında motor akımı da diğer etken parametreler sabit iken tetikleme açısına bağlı olarak sürekli (Şekil 5.a) veya süresiz (Şekil 5.b) durumda olabilir. Sabit moment isteyen uygulamalarda akımın sürekli olması istenir.

Eğer akım süresiz durumda ise momentte süresiz durumda olacaktır. Dolayısı ile bazı sürelerde motor momenti sıfırlanacaktır. Bu tahrik edilen yükün hassasiyetine göre olumsuz neticeler doğurabileceğinden bu tür yüklerde akımın sürekliden süresize geçmesi istenmez. Bu sebeple çalışma şartlarına göre akımın sürekli durumda kalması istenebilir. Bu sebeple motor akımının süresiz olma koşullarının belirlenip akımın süresiz olması önlenmelidir. Akımın sürekli durumdan süresize geçişine etki ede faktörler belirlenirken DA motor eşdeğer devresi ve doğrultucu çıkış gerilimi ifadeleri kullanılır. Motor hızı ve akısı sabit alınırsa endüvi eşdeğer devresinden endüvi akımının durum denklemi;

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_b \omega_m \quad (5)$$

Şeklinde bulunur. Sabit hız ve akıda endüklenen gerilim e_a sabittir, buna E denilip (4) denklemi (5)' te yerine yazılıp $i_a(t)$ çözümlürse;

$$i_a(t) = \left(\frac{V_m}{|Z_a|} \right) \left\{ \sin(\omega_s t + \frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi) - \sin(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_a}} \right\} - \left(\frac{E}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_a}} \right) + i_{a0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_a}} \quad (6)$$

Burada;

$$\omega_s = 2\pi f, \quad \varphi = a \tan\left(\frac{\omega_s L_a}{R_a}\right), \quad \tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad \text{ve}$$

$Z_a = R_a + jX_a$, $E = K_b \omega_m$, dir. i_{a0} ; $t=0$ anında başlangıç akımı, V_m ise faz-faz maksimum gerilimdir.

i_{a0} başlangıç akımı akım denkleminde başlangıç koşulları girilerek hesaplanır. $i_a(t)$ her 60° periyotta kendini tekrarlar dolayısı ile;

$$i_a(\omega_s t) = i_a(\omega_s t + \frac{\pi}{3}), \quad \dots$$

$$i_a\left(\frac{\pi}{3\omega_s}\right) = i_{a0}$$

Şeklinde yazılabilir. Bu bilgi kullanılarak başlangıç akımı hesaplanırsa denklem (7)' deki ifade bulunur.

$$i_{a0} = \frac{1}{\left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{3\omega_s \tau_a}\right)}\right)} \cdot \left\{ \left(\frac{V_m}{|Z_a|} \right) \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) - \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) e^{-\left(\frac{\pi}{3\omega_s \tau_a}\right)} \right] - \left(\frac{E}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{3\omega_s \tau_a}\right)} \right) \right\} \quad (7)$$

Denklem 7 incelendiğinde başlangıç akımı i_{a0} 'nin sıfır olmasını sağlayacak parametrelerin; rotor hızı (ω_s), gerilim (V_m), L_a (dolayısı ile φ), endüklenen gerilim (E) ve α olduğu görülür. Burada kaynak geriliminin tepe değeri (V_m) sabit olduğu düşünülürse; akımın sürekliden süresize geçişini 4 parametre belirler. Çalışma sırasında gerilim ayarı için α değiştirilip diğerlerinin sabit olduğu düşünülürse; akımın sürekliden süresize geçtiği tetikleme açısına kritik tetikleme açısı (α_c) denilirse bu açı $i_{a0}=0$ yapılarak hesaplanabilir. Diğer bir deyişle öyle bir α_c açısı vardır ki o açıda $i_a(t)=0$ olur yani süresiz çalışmaya geçilir. α_c açısı analitik veya Newton-Raphson yöntemi gibi sayısal teknikler kullanılarak hesaplanabilir. Analitik yaklaşım ile (8)' deki gibi hesaplanabilir. (8) ifadesi per-unit değerlere göre belirlendiği için makine parametrelerinden bağımsızdır [5].

$$\alpha_c = \varphi + \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{E}{V_m}}{c_1} \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{3 \tan \varphi}\right)} \right) \right\} - \frac{\pi}{3} + \theta_1$$

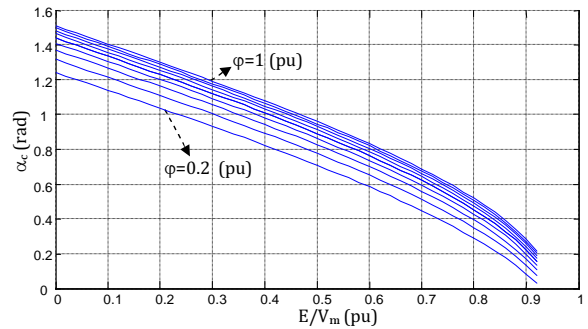
$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

$$a_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$b_1 = \frac{1}{2} - e^{-\left(\frac{\pi}{3 \tan \varphi}\right)}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \quad (8)$$

Denklem 8 incelendiğinde α_c açısının V_m sabit olduğu düşünülürse sadece E/V_m ve φ ' ye bağlı olduğu görülür. Kritik açının bu parametrelere göre değişimi Şekil 6' taki gibidir.



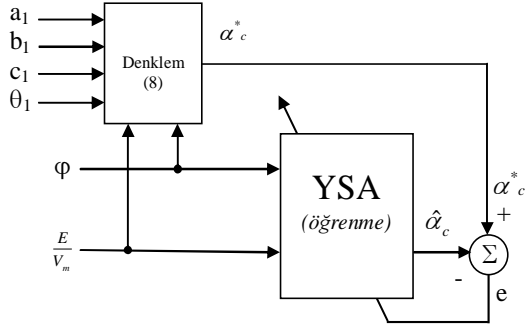
Şekil 6: Kritik tetikleme açısının φ ve E/V_m ye göre değişimi.

Sürekli akımda çalışma için doğrultucuya uygulanacak tetikleme açısının kritik açısı (α_c) aşmaması gerekir. Eğer aşarsa kesikli akım çalışmaya geçilir. Kritik tetikleme açısı hesabı (8)' den de görüleceği üzere on-line çalışmada zor olabilir. Önerilen yöntemde kritik tetikleme açısı kullanım sırasında bu hesap yapılmadan Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılarak belirlenmektedir.

4. YSA İle Kritik Tetikleme Açısının Belirlenmesi

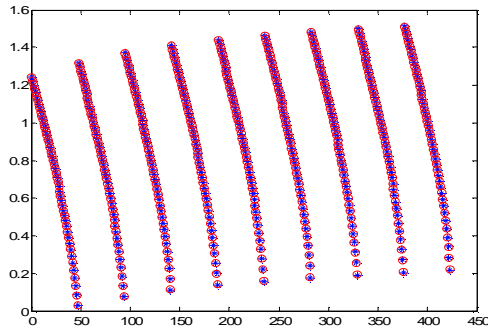
Bilindiği üzere Yapay Sinir ağı (YSA) lineer olmayan sistemleri modellemede çok başarılı olduğu bilinmektedir [3],[6]. Hesabı zor matematiksel işlemler uygun öğretilendiğinde YSA ile daha basit işlemlerle gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada da YSA' nın bu

özelliğinden faydalanılmaya çalışılmıştır. Yapay Sinir ağı (YSA) için öğrenme işlemi için Şekil 7’ de gösterilen yapı kullanılmıştır.



Şekil 7: Önerilen sistem için YSA öğrenme yapısı.

Denklem 8’den öğrenme seti oluşturulmuştur. Öğrenme seti; ϕ açısı 0.2-1 (pu) arasında E/V_m ise 0-0.92 (pu) arasında değiştirilerek oluşturulmuştur. Bu öğrenme seti 3:2:1 yapısında aktivasyon fonksiyonu olarak sırasıyla tanh:tanh:sınırlandırılmış lineer fonksiyonlar kullanılan İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı (İBYSA)’na uygulanıp LM algoritması ile toplam karesel hata 10^{-6} oluncaya kadar eğitilmiştir. Eğitim sonucu Şekil 8’deki gibidir.



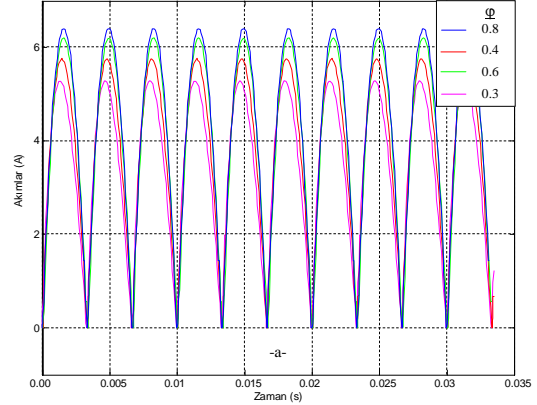
Şekil 8: Eğitim setinin testi.

Öğrenme işlemi sonucunda YSA eğitim seti dışındaki veriler kullanılarak test edilmiştir. Belirlenen açılarda motor akımını kesintili yapıp yapmadığını görmek için Şekil 4’te gösterilen DA motor sürücü sisteminin benzetimi yapılmıştır. Tablo 1’de verilen parametrelere sahip DC motor için benzetimler MATLAB/Simulink programında yapılmış ve YSA denetim performansı belirlenmiştir.

Tablo 1: DA motor sürücü sistemi için benzetim parametreleri.

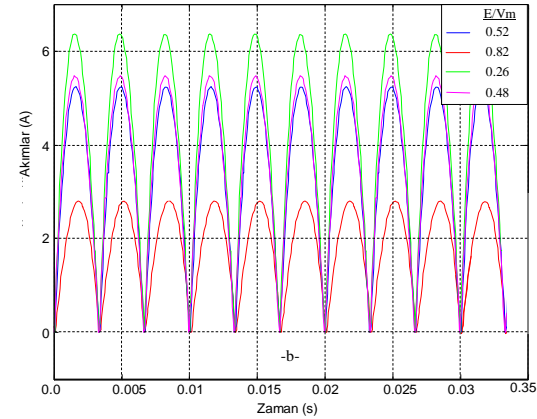
R _a	değişken	T _L	3 Nm
L _a	0.01 H	V _m	173.2 V
J	0.0165	K _b	0.8
B	0.01	f _s	50 Hz

Yapılan benzetim sonuçları Şekil 10’da gösterilmiştir. Şekil 10.a’da $\phi=0.55$ sabit ve E/V_m değişken, Şekil 10.b’de $E/V_m = 0.33$ ve ϕ değişken, Şekil 10.c’de ise ϕ ve E/V_m değişken olduğu durumlardaki benzetim sonuçları verilmiştir.



Şekil 10: Sistem benzetim sonuçları.

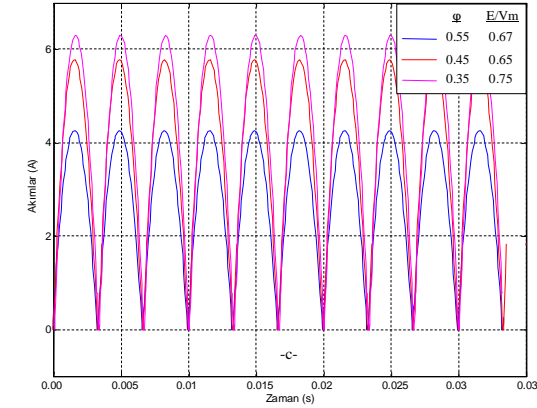
a- $E/V_m=0.33$ için akım değişimleri,



Şekil 10: Sistem benzetim sonuçları.

b- $\phi=0.55$ için akım değişimleri,

c- Verilen değerler için akım değişimleri,



Şekil 10: Sistem benzetim sonuçları.

b- $\phi=0.55$ için akım değişimleri,

c- Verilen değerler için akım değişimleri,

YSA girişine verilen değerler girilip YSA çıkışında üretilen kritik açı modelde doğrultucuya uygulanmıştır. Farklı veriler için akım değişimleri incelenerek belirlenen açıda akımın sürekli olup olmadığı test edilmiştir. Benzetim sonuçlarından önerilen YSA yapısı ile bir doğru akım sürücü sistemi için kritik tetikleme açısının kolayca belirlenebileceği görülmektedir.

5. Sonuçlar

Yapılan çalışmada 3 fazlı denetimli doğrultucu ile beslenen doğru akım motoru akımının süresiz hale geçtiği kritik tetikleme açısının belirlenmesi için Yapay

Sinir Ağı (YSA) tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Benzetim sonuçlarından önerilen yöntemin kritik tetikleme açısı hesabında çok başarı olduğu görülmüştür. YSA eğitimi için kullanılan eğitim seti makine parametrelerinden arındırılıp per-unit değerler kullanılarak hesaplandığından tüm makineler için kullanılabilir.

YSA tek işlemde sonucu türettiği için on-line çalışmalarda iteratif yöntemlere göre daha hızlı sonuç üretebileceği ve işlem adımı az olduğu için hesaplama kolaylığının da var olduğu söylenebilir.

6. Kaynaklar

- [1] Abut, N., Güç Elektroniđi, *Birsen Yayınevi*, 2004.
- [2] Ahmed, A., Power Electronic for Technology, *Prentice Hall*, 1999.
- [3] Abulafya, N., Neural Networks for System Identification and Control, *Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London*, 1995.
- [4] Guru, B.S., Hızıroğlu H.R., Electric Machinery and Transformers, *Oxford University Press*, 2001.
- [5] Krishnan, R., Electric Motor Drives, *Prentice Hall*, 2001.
- [6] Narendra, K.S. and Campagna, D.P., Identification and Control of Dynamical systems Using Neural Networks, *IEEE Tran. On Neural Networks*, Vol 1, no.1, 4-27. 1990.