

# Asenkron Motorun Bulanık Mantık Anahtarlama ile Doğrudan Moment Denetimi

Fatih KORKMAZ \* Yılmaz KORKMAZ \*\*

\*Çankırı Karatekin Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, ÇANKIRI

\*\* Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Geliş/Received : 05.08.2011, Kabul/Accepted : 12.10.2011

## ÖZET

Asenkron motorların, alan yönlendirmeli vektör denetim yöntemine alternatif olarak önerilen doğrudan moment denetimi yönteminin önemli sorunlarından birinin yüksek hız ve moment dalgalanmaları olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada; asenkron motorların, doğrudan moment denetimi ile denetlenmesinde meydana gelen hız ve moment dalgalanmalarının azaltılması amacıyla bulanık mantık tabanlı anahtarlama yöntemi ile doğrudan moment denetiminin üzerinde çalışılmıştır. Klasik denetimde kullanılan histerezis denetleyiciler ve vektör seçici kaldırılarak bunların yerine bulanık mantık tabanlı anahtarlama tekniği kullanılmıştır. Klasik ve bulanık denetim teknikleri Matlab/Simulink yazılımı ile simüle edilerek simülasyon sonuçları sunulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışılan yöntem ile asenkron motorun boş ve yüklü çalışması sırasında, klasik yöntemde oluşan akı vektörü bölge değişimlerinde meydana gelen hız ve moment dalgalanmalarının azaldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler :** Doğrudan moment denetimi, Vektör Denetimi, Bulanık Mantık

## Direct Torque Control of Asynchronous Motor With Fuzzy Logic Switching

### ABSTRACT

One of the important problems of direct torque control method that proposed as alternative to field direction vector control method in asynchronous motors, are known as high speed and torque ripples. In this study, direct torque control with fuzzy logic based switching method have been studied in order to reduce the speed and torque ripples which occurs during the direct torque control of asynchronous motors. Hysteresis controllers and vector selector that used in conventional control were removed, and fuzzy logic based switching method was used instead of them. Conventional and fuzzy control methods were simulated with Matlab/Simulink software and simulation results were compared. Speed and torque ripples that occurs from flux vector zone variations in conventional method reduction have been observed with the worked method during unloaded and loaded work of asynchronous motor.

**Key Words :** Direct Torque Control, Vector Control, Fuzzy Logic

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar (ASM) için günümüzde oldukça popüler olan vektör denetim tekniğinin, düşük hızlarda ve geçici durum çalışmasında skaler denetim tekniğinden daha iyi sonuçlar vermesi nedeniyle, hassas denetim uygulamaları için kullanılması gündeme gelmiştir. Başlangıçta gerçekleştirilmesinin zor ve skaler denetim tekniklerine göre uygulaması daha karmaşık olması nedeniyle ilgi görmeyen vektör denetim, mikro-bilgisayarların kullanılmaya başlaması ile, 1970' li yıllarda Almanya' da Blaschke ve Hasse tarafından geliştirilmiş ve 1980' den sonra da tüm dünyada genel kabul görmeye başlamıştır[1-3]. Vektör denetim tekniğinin amacı, stator akımının iki bileşenini (hava aralığı akısı ve akım bileşenleri) birbirinden bağımsız hale getirerek, motorların moment karakteristiğini doğrusallaştırmak suretiyle moment ve akıyı bağımsız olarak denetleme olanağı sağlamaktır[4]. 1980' lerin ortalarında Takashi

ve Depenbrock tarafından geliştirilen doğrudan moment denetimi (Direct Torque Control – DTC) yöntemi, hızlı dinamik performansı, parametre değişimlerine karşı dayanımının yüksek olması gibi özellikleri ile yüksek performanslı ASM sürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5-7]. DTC, sistemin akı ve momentinin, bunların anlık hata değerlerinin kullanılarak denetlenmesidir[8]. Skaler denetim sistemleri ile karşılaştırıldığında DTC sisteminin en önemli dezavantajları, yüksek hız ve moment dalgalanmaları, düşük hızlarda moment denetiminin zorlaşması, değişken anahtarlama frekanslarında çalışması, küçük adım aralığı gerektirmesi olarak sayılabilir[9].

Bu dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla temel DTC' de, hız algılayıcısı kullanılmayan denetim yapıları, farklı anahtarlama tekniklerinin kullanımı gibi denetim algoritmaları önerilmiştir. Önerilen bu sistemlerde temel amaç moment dalgalanmalarını azaltmaktır[10].

DTC sisteminin performansının artırılmasına yönelik çalışmalarda büyük başarı sağlayan diğer bir yaklaşımın yapay zeka temelli denetim yapıları olduğu

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: fkorkmaz@karatekin.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2011.14.4, 281-287

görülmektedir[11]. Bulanık mantık (BM), elektromekanik sürücü sistemlerde, insanların sezgisel karar verme yeteneklerini sisteme kazandırabilmesi nedeniyle büyük dikkat çekmektedir. DTC sisteminde bulanık mantık yaklaşımını öneren çeşitli çalışmalarda araştırmacılar bulanık mantık kullanımının DTC denetim performansını arttırdığını belirtmişlerdir.

Li, DTC sisteminde bulanık mantık kullanarak akı optimizasyonunu öneren simülasyon çalışmasıyla, DTC sisteminin yapısal olarak daha dayanıklı olduğunu ve moment dalgalanmalarının azaldığını göstermiştir[12].

Sujatha ve Vaisakh, DTC sisteminde bulanık mantık PI denetleyici tasarlayarak yaptıkları simülasyon çalışmaları ile parametre değişimlerine karşı sistem dayanıklılığının ve denetim performansının arttığını belirtmişlerdir[13].

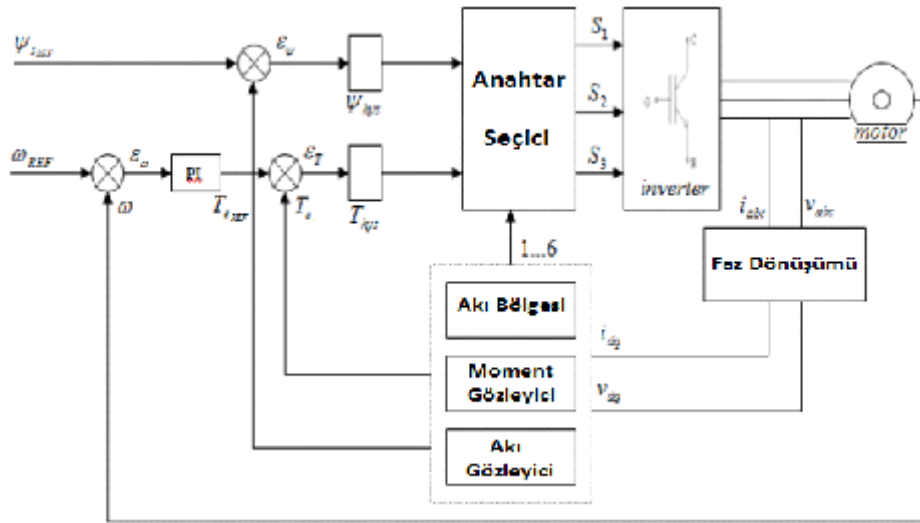
Zhijun ve arkadaşları, alan yönlendirmeli denetim yöntemi (FOC) ile DTC yöntemini birleştiren bir denetim yapısı önermişler, DTC yönteminde kullanılan histerisiz denetleyiciler yerine bulanık mantık anahtarlama yapısı kullanmışlardır. Yaptıkları simülasyonlar ile önerilen sistemin dinamik tepkisinin DTC ve FOC yöntemlerinden daha hızlı olduğunu göstermişlerdir[10].

Bu çalışmada DTC yönteminde meydana gelen yüksek hız ve moment dalgalanmaları azaltmak ama-

yeteneklerini sisteme kazandırmak ve bunun sistem performansı üzerindeki etkisini araştırmaktır. BMT-DTC yöntemi ile, K-DTC yönteminde kullanılan ve denetim parametrelerinin (akı-moment histerisiz çıkışları ve akı bölgesi) anahtarlama üzerinde eşit etkiye sahip olduğu ayrık karar verme yapısı değiştirilerek; bunun yerine denetim parametrelerinin etkisini parametredeki değişim miktarına ve bu değişimin diğer parametrelerdeki etkisine göre anahtarlama durumlarını belirleyen denetim yapısı önerilmiştir. Bu denetim yapısı, değişim parametrelerinin bulanık derecelendirilmesinin yanında kural tablosunun kullanılması ile parametrelerin çıkış üzerindeki etkisini birleştiren birleşik karar verme kabiliyeti ile benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. K-DTC ve BMT-DTC sistemi ile ASM yüklü ve yüksüz çalışma koşullarında hız-moment tepkileri simülasyon yoluyla test edilerek önerilen BMT-DTC sistemi ile hız ve moment dalgalanmalarının azaldığı görülmüştür.

## 2. DOĞRUDAN MOMENT DENETİMİ (DIRECT TORQUE CONTROL)

DTC sisteminin temel prensibi, stator akısı ve elektromanyetik momentin referans değerleri ile gerçek değerlerinin karşılaştırılması ile elde edilen hata değerlerinin histerisiz denetleyicilerde kullanılması ile eviricinin optimum anahtarlama durumlarının belirlenmesine dayanır. Böylece evirici çıkışları ile stator akısı ve momentini belirlenen sınırlar içerisinde tutulur[14]. K-DTC blok diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Klasik doğrudan moment denetimi blok diyagramı

cıyla bulanık mantık içeren yeni bir anahtarlama yaklaşımı önerilmektedir. Klasik DTC (K-DTC) sisteminde kullanılan ve anahtarlama durumlarını belirleyen histerisiz bantlar, vektör seçici ve stator akısının bulunduğu bölgeyi belirleyen gözlemci blokları kaldırılarak yerine bulanık mantık tabanlı DTC (BMT-DTC) sistemi denlenmiştir. Burada amaç, DTC sisteminin performansına doğrudan etki eden anahtarlama işleminin bulanık mantık kullanılarak yapılması suretiyle karmaşık denetim yapısının basitleştirmek, insanların sezgisel karar verme

Sabit d-q referans düzleminde stator akısı ölçülen akım ve gerilim değerleri kullanılarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$v_{ds} = i_{ds} R_s + \frac{d}{dt} \psi_{ds} \quad (1)$$

$$v_{qs} = i_{qs} R_s + \frac{d}{dt} \psi_{qs} \quad (2)$$

$$\psi_{ds} = \int (v_{ds} - i_{ds} R_s) dt \quad (3)$$

$$\psi_{qs} = \int (v_{qs} - i_{qs} R_s) dt \quad (4)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{(\psi_{ds})^2 + (\psi_{qs})^2} \quad (5)$$

Burada  $\psi_s$  stator akı vektörü,  $v_{ds}$  ve  $v_{qs}$  d-q referans düzleminde stator gerilimleri,  $i_{ds}$  ve  $i_{qs}$  d-q referans düzleminde hat akımları ve  $R_s$  stator direncidir. Asenkron motorun ürettiği elektromanyetik moment ise;

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (6)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada  $P$  motor kutup sayısı,  $\psi_{ds}$  ve  $\psi_{qs}$  stator akısı  $\psi_s$ ' in d-q bileşenleri,  $i_{ds}$  and  $i_{qs}$  stator akımı  $i_s$ ' nin d-q bileşenleridir[15].

### 2.1. Önerilen Bulanık Mantık DTC Sistemi (Purposed Fuzzy Logic DTC System)

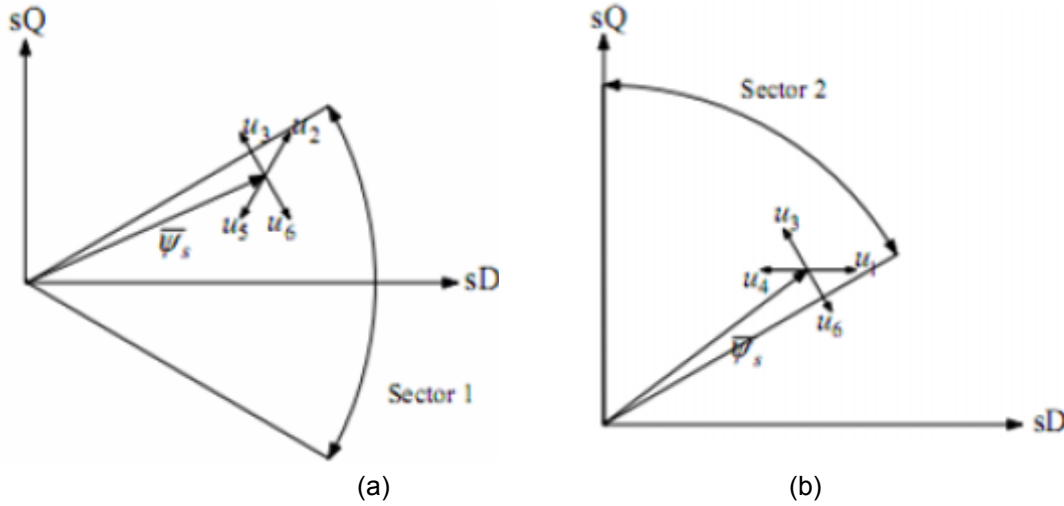
Önerilen BMT-DTC sistemindeki amaç akı bölgesinin belirlenmesinde ve histeresis denetleyicilerde kullanılan mutlak değerler yerine bulanık ifadeler kulla-

nımı ile optimum gerilim vektörünü belirleyerek moment dalgalanmalarını azaltmaktır.

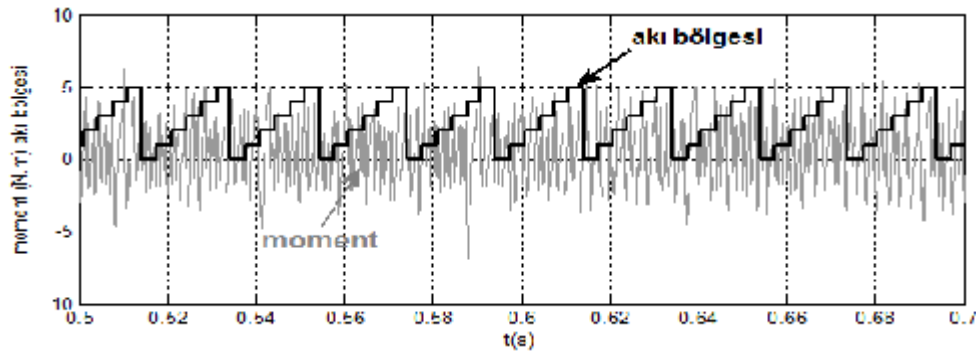
Stator akı vektörünün 1. bölgede olduğunu ve saat yönü tersine döndüğünü kabul edilirse, akının azalıp momentin artması durumunda motora uygulanması gereken optimum gerilim vektörü şekil 2.a' da görüldüğü gibi  $u_3$  vektörüdür. Akı vektörünün 2. bölgeye geçtiğini akının azalıp momentin artması gerektiğini kabul edildiğinde ise uygulanması gereken optimum gerilim vektörü şekil 2.b' de görüldüğü gibi  $u_4$  vektörü olacaktır.

Görüldüğü gibi akı ve moment histeresis çıkışlarında bir değişim olmamasına rağmen akı vektörünün açısındaki birkaç derecelik değişim ile uygulanan gerilim vektörü  $u_3$  iken  $u_4$  olarak değişmiştir.

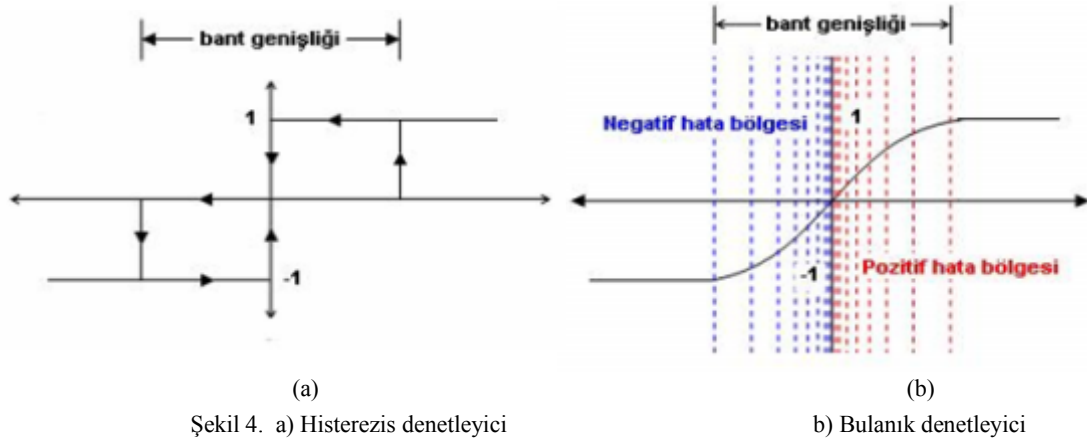
Klasik yöntemde oluşan moment dalgalanmalarının stator akısı vektörünün bölge değişimi anlarında meydana geldiği Şekil 3' de görülmektedir. Klasik anahtarlama sisteminde her bir giriş parametresinin (akı hatası, moment hatası, akı bölgesi) çıkış üzerinde (anahtarlama durumu) ağırlığı eşittir. Yani bu girişlerin herhangi birinde meydana gelen değişim, diğer girişlerin durumlarına bakılmaksızın çıkış durumlarına yansımaktadır



Şekil 2. a) Stator akısının birinci bölgedeki konumu b) Stator akısının ikinci bölgedeki konumu



Şekil 3. Akı vektörü bölgesi ve moment değişimi



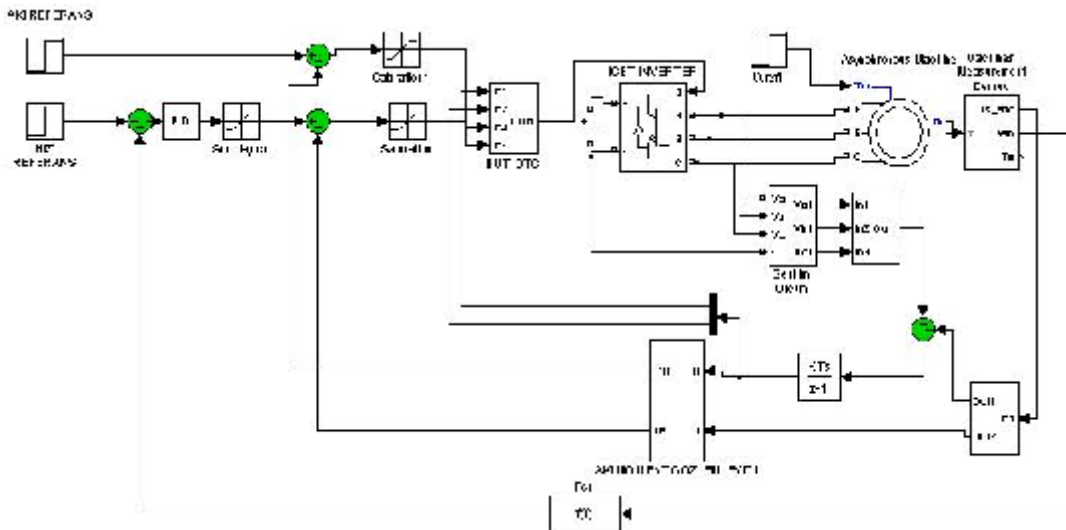
Şekil 4. a) Histeresis denetleyici

b) Bulanık denetleyici

Şekil 4’ de klasik hata denetleyici ve bulanık hata denetleyici yapıları görülmektedir. Şekil 4.a’ da görülen histeresis denetleyici incelendiğinde pozitif sınır değerden çok küçük bir değer önce denetleyici çıkışı (0) iken çok küçük bir değer sonra çıkışın (1) olacağı görülebilir. Benzer durum negatif sınır değer içinde geçerlidir. Hatada meydana gelen çok küçük değişimler histeresis denetleyicinin çıkışını değiştirmekte dolayısıyla

anahtarlama sisteminde akı hatası, moment hatası ve akı vektörünün pozisyonu sistem girişleri olarak kullanılarak sistem çıkışında optimum anahtarlama vektörü elde edilmiştir.

Bulanık mantık tabanlı anahtarlama kullanılan kural tablosu Tablo 1’ de, giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 6’ de görülmektedir.



Şekil 5. BMT-DTC sistemi Simulink blok diyagramı

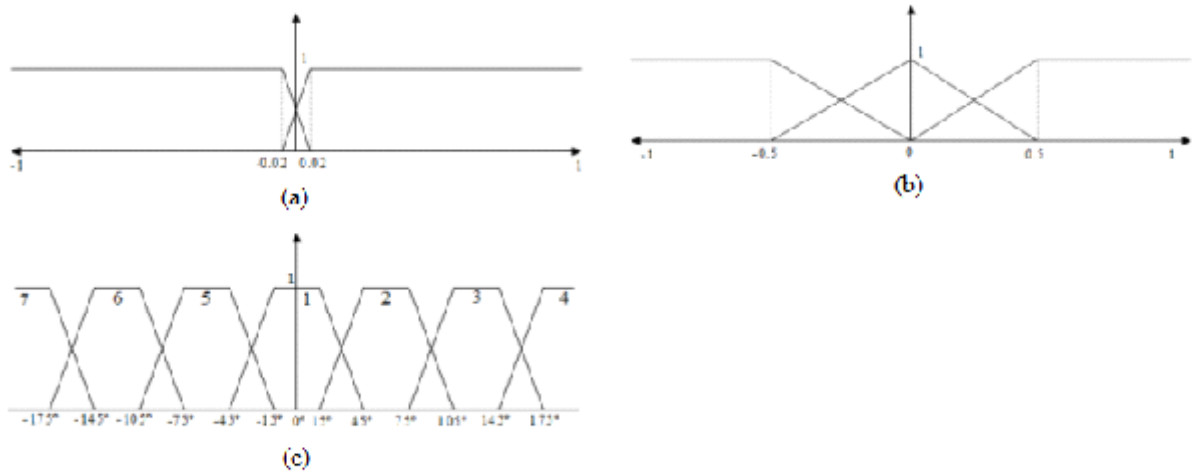
motora uygulanacak uygun gerilim vektörü de değişmektedir.

Önerilen bulanık mantık tabanlı anahtarlama sisteminde anahtarlama durumlarının belirlenmesinde klasik denetimdeki 0 ya da 1 kesin ifadeleri yerine 0-1 arası derecelendirilen bulanık ifadeler kullanılmıştır. Stator akı vektörünün  $25^\circ$  olduğu kabul edilirse klasik denetimde sistem akı bölgesini 1. bölge kabul etmekte ve çıkış durumuna karar vermektedir. Bulanık sistemde ise akı vektörü yaklaşık 0,65 1. bölgede, 0,35 2. bölgededir ve sistem akı ve moment hata derecelerini değerlendirerek çıkış durumuna karar vermektedir. Böylece hata değerinin negatif ya da pozitif olması durumları da derecelendirilerek sistemin performansının artırılması amaçlanmıştır.

BMT-DTC sistemi için oluşturulan Simulink devresi Şekil 5’ de ki gibidir. Bulanık mantık tabanlı

Tablo 1. Kural tablosu (Rule table)

Akı Hatası	Moment Hatası	Stator Akısı Bölgesi					
		1	2	3	4-7	5	6
P	P	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>
	0	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>
	N	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>
N	P	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>
	0	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>
	N	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>



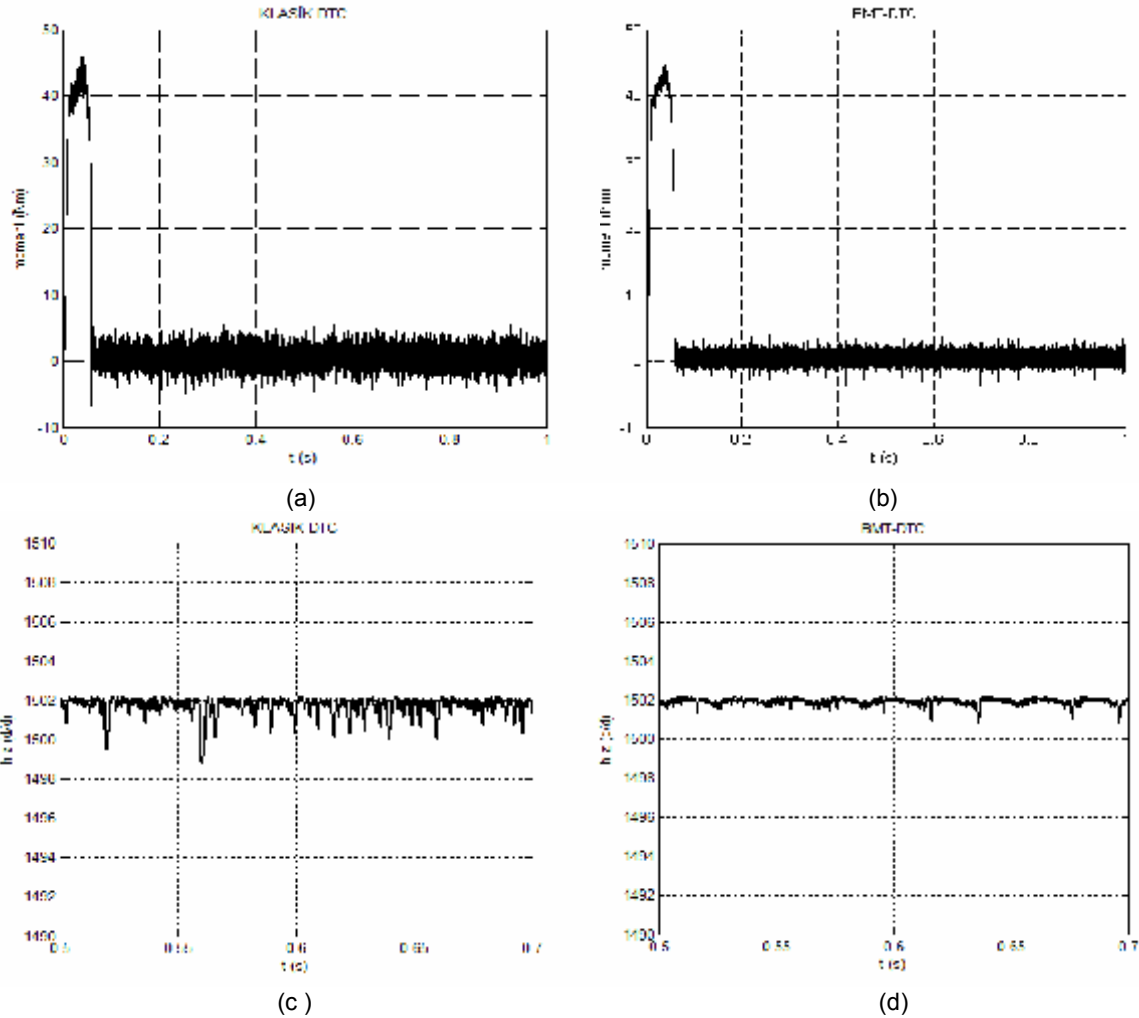
Şekil 6. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları  
 a) Akı hatası      b) Moment hatası      c) Akı pozisyonu      d) Optimum anahtarlama vektörü

### 3. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Çalışmada; K-DTC ve BMT-DTC yöntemlerinin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan denetim sistemleri MATLAB / SIMULINK ile simule edilmiştir.

Kullanılan motor parametreleri:  $P_N = 4 \text{ kW}$ ,  $U_N = 400 \text{ V}$ ,  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $r_s = 1,405 \Omega$ ,  $r_r = 1,395 \Omega$ ,  $P = 2$ ,  $L_s = L_r = 0,005839 \text{ H}$ ,  $L_m = 0,1722 \text{ H}$ ,  $J = 0,0131 \text{ kgm}^2$  dir.

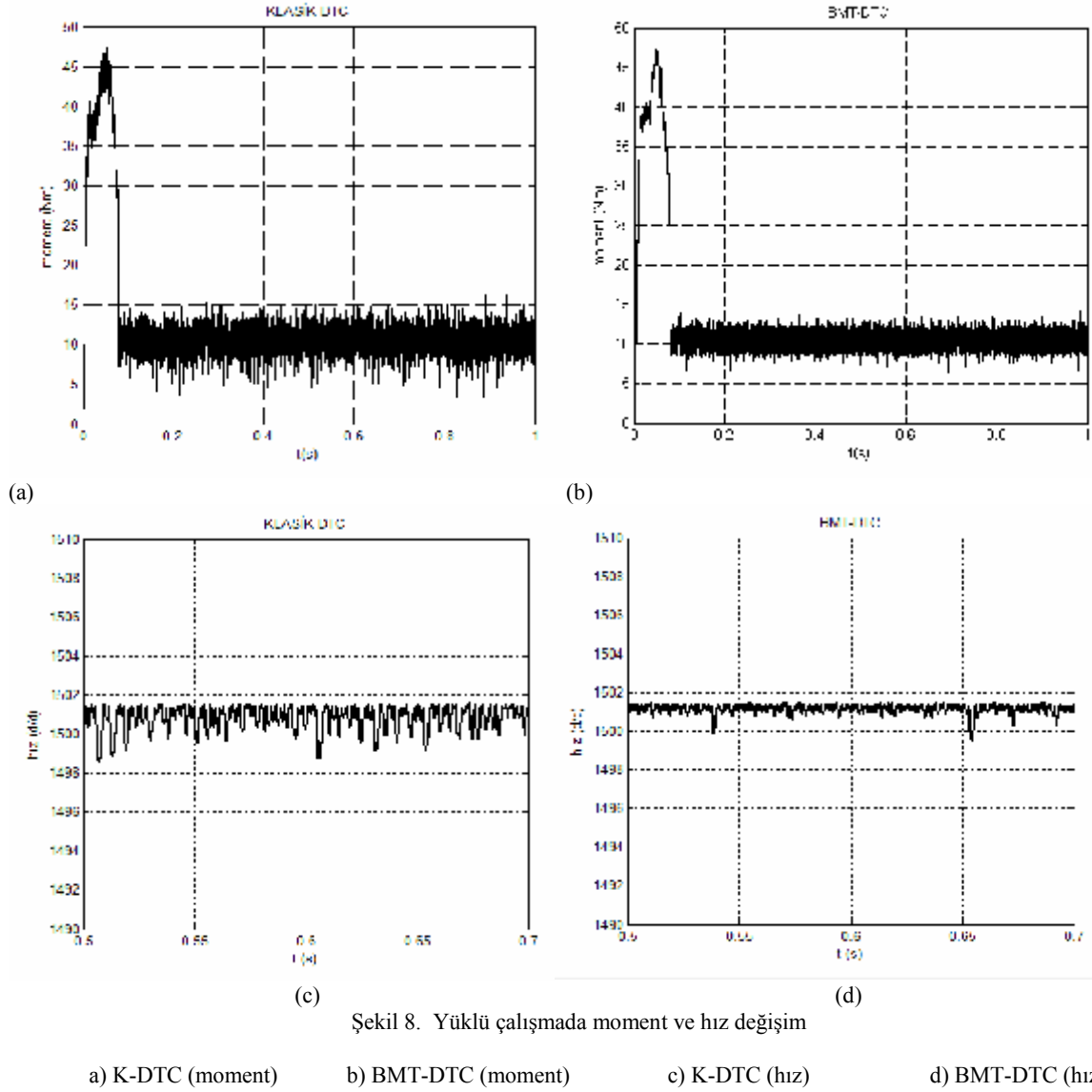
Her iki sistemde akı referansı  $0,8 \text{ Wb}$  ve hız referansı  $1500 \text{ d/d}$  olarak kabul edilmiştir. Örnekleme



Şekil 7. Yüksüz çalışmada moment ve hız değişimi

zamanı  $20\mu\text{s}$  alınarak motorun boş ve yüklü çalışma durumları simüle edilmiştir. Şekil 7.a ve Şekil 7.b' de

yöntem ile bu dalgalanmaların sayısı ve genliği azalmaktadır.



Şekil 8. Yüklü çalışmada moment ve hız değişim

verilen moment hataları incelendiğinde klasik yöntemle moment dalgalanmasında anlık  $\pm 4$  Nm seviyesinde ani değişim görülmekte iken önerilen yöntemle moment dalgalanmasında anlık ani değişimin maksimum değeri yaklaşık olarak  $+2$  ile  $-1$  Nm seviyesinde kalmıştır.

Şekil 7.c ve Şekil 7.d' de görülen motor hız eğrileri moment dalgalanmaları ile hız dalgalanmaları aynı karakteristiği sergilediğini göstermektedir. Klasik yöntemle denetlenen motorun moment değişimi paralelinde hız tepkisinde de ani dalgalanmalar gözlenmekte iken bu durumun önerilen BMT yöntemi ile azaldığı görülmektedir.

Boş çalışma performansına benzer durum, yüklü çalışma performansında da görülmektedir. Şekil 8' de görüldüğü gibi, klasik yöntemle denetlenen motorun moment ve hız tepkilerinde görülen, periyodik olmayan ani dalgalanmalar devam etmekte iken, önerilen BMT

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışmada, asenkron motorun doğrudan moment denetimi yöntemi ile denetlenmesinde meydana gelen hız ve moment dalgalanmalarını azaltmak amacıyla bulanık mantık tabanlı anahtarlama tekniği ile doğrudan moment denetimi önerilmektedir. Klasik denetim sisteminde kullanılan histerezis denetleyiciler ve akı vektörü bölge seçici blokları kaldırılarak yerine bulanık mantık tabanlı anahtarlama sistemi kullanılmıştır. Böylece hata değerlerinin yorumlanması ve bölge belirlenmesinde mutlak değerler yerine dilsel ifadeler ile derecelendirme yapılabilen bulanık ifadelerden oluşan denetim sistemi geliştirilmiştir. Asenkron motorun boş ve yüklü çalışma durumları, klasik ve bulanık mantık tabanlı doğrudan moment denetimi, aynı referans değerler kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları irdelenerek, önerilen yöntem ile boş ve yüklü çalışma koşullarında, klasik yöntemde özellikle akı

vektörü bölge değişimlerinde meydana gelen hız ve moment dalgalanmalarında azalma sağlandığı görülmüştür. Çalışma, uygulanabilirliği açısından incelendiğinde ise ortaya çıkabilecek sorunun denetim yapısındaki matematiksel işlemlerin artması nedeniyle işlemci yükündeki artış olduğu söylenebilir. Ancak günümüzde bu tip uygulamalarda kullanılan işlemcilerin kapasiteleri ve hızları her geçen gün artmaktadır. Diğer taraftan literatür incelendiğinde bulanık mantık tabanlı motor denetim uygulamalarının gerçekleştirilebilir olduğu görülmekte ve bu durum önerilen yöntemin uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

##### 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Khanna, R., Singla, M., Kaur, G., "Fuzzy logic based direct torque control of induction motor", *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, pp.1-5, 2009.
2. Guohan L., Zhiwei X., "Direct Torque Control of Induction Motor Using Neural Network", *Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on*, pp.4827-4830, 2009.
3. Takahashi, I., Noguchi, T., "A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor", *IEEE Transactions on Industrial Applications*. vol.I A-22, no.5, pages 820-827, 1986.
4. Depenbrock, M., "Direct self control of inverter-fed induction machines", *IEEE Transactions in Power Electronics*, vol. PE-3, No 4, pages 420-429, 1988.
5. P. Vas, "*Sensorless Vector and Direct Torque Control*", First ed., Oxford University Press, New York, pp.505-526, 1998.
6. Chunhua Z., Xianqing C., "Direct Torque Control Based on Space Vector Modulation with Adaptive Neural Integrator for Stator Flux Estimation in Induction Motors", *Natural Computation, 2009. ICNC '09. Fifth International Conference on*, vol.6, pp.355-359, 2009.
7. Xu B., Zhang X., "Design of a new Direct Torque Control in induction motor", *Control and Decision Conference, 2009. CCDC '09. Chinese*, vol., no., pp.5397-5400, 2009.
8. Casadei, D., Serra, G., Tani, A., "The use of matrix converters in direct torque control of induction machines", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.48, N°6, pp. 1057-1064, 2001.
9. Martins, C.A., Roboam, X., Meynard, T.A., Carvalho, A.S., "Switching frequency imposition and ripple reduction in DTC drives by using a multilevel converter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.17, N°2, pp. 286-297, 2002.
10. Zhijun J., Shimiao H., Wenhui C., "A New Fuzzy Logic Torque Control Scheme Based on Vector Control and Direct Torque Control for Induction Machine", *Innovative Computing Information and Control, 2008. ICICIC '08. 3rd International Conference on*, pp.500, 2008.
11. Abianeh, A.J., Ping, H.W., "Simulation studies of optimized classical direct torque fuzzy controlled drive for permanent magnet synchronous motor", *Industrial Mechatronics and Automation (ICIMA), 2010 2nd International Conference on*, vol.1, pp.210-213, 2010.
12. Li, H., "Fuzzy DTC for induction motor with optimized command stator flux", *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on*, pp.4958-4961, 2010.
13. Sujatha, K.N., Vaisakh, K., "Self-tuning Fuzzy PI scheme for DTC Induction Motor drive", *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp.1-6, 2010.
14. Yubin W., Chanjuan H., Jin Z., Shuyun W., Yongji W., "A new robust DTC-SVM for high performance induction machine drives", *Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2008. ISSCAA 2008. 2nd International Symposium on*, pp.1-5, 2008.
15. Sadati, N., Kaboli, S., Adeli, H., Hajipour, E., Ferdowsi, M., "Online Optimal Neuro-Fuzzy Flux Controller for DTC Based Induction Motor Drives", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*, pp.210-215, 2009.