



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2011, Volume: 6, Number: 1, Article Number: 1A0147

ENGINEERING SCIENCES

Received: October 2010

Accepted: January 2011

Series : 1A

ISSN : 1308-7231

© 2010 www.newwsa.com

Ömer Ali Karaman

Hüseyin Altun

Mehmet İlyas Bayındır

Batman University

omer_ali_42@hotmail.com

Batman-Turkey

DOĞRUDAN MOMENT KONTROLLÜ ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜ SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, doğrudan moment kontrol (DTC) yöntemi kullanan bir asenkron motor sürücü sistemi analiz edilmiştir. Bunun için, asenkron motorun matematiksel d-q modelinden yararlanılarak, DTC kontrollü asenkron motor sürücü sisteminin Matlab/Simulink ile benzetimi yapılmıştır. DTC yöntemi ile kontrol edilen asenkron motorun hem geçici hem de sürekli durumda hızının, ürettiği momentin ve stator ile rotor akımlarının zamana göre değişimleri incelenmiştir. Sürücü sistemin incelenmesinde, motorun belli zaman aralıklarında boşa veya yük altında bulunduğu dikkate alınarak hız, moment ve akım sonuçları elde edilmiştir. Sürücü sistem modelinde bulunan akı ve moment kontrolörlerinin histerezis band genişlikleri evirici anahtarlama frekansını etkilediği ve moment dalgalanmalarına sebep olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, akı ve moment kontrolörlerinin histerezis band genişlikleri akı ve moment dalgalanmalarına neden olduğu için, önce uygun band genişliklerinin seçilmesi gerektiği ve daha sonra DTC kontrolünün yapılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğrudan Moment Kontrol, Vektör Kontrol, Histerezis Kontrolör, D-Q Model, Asenkron Motor

INVESTIGATION OF DIRECT TORQUE CONTROLLED INDUCTION MOTOR DRIVE SYSTEM

ABSTRACT

In this study, an induction motor drive system that uses direct torque control (DTC) method was analyzed. Therefore, DTC-controlled induction motor drive system was simulated in Matlab/Simulink by using mathematical d-q model of the induction motor. Speed, produced torque, stator and rotor currents variations against time of the DTC-controlled induction motor were investigated under both transient and steady-state conditions. In the examination of the drive system speed, torque and current results were obtained by considering the motor was under loaded or unloaded conditions at certain time intervals. It was seen that hysteresis bandwidth of the flux and torque controllers affect the inverter switching frequency and therefore causes torque fluctuations in the drive system. In this study, because hysteresis bandwidth of the controllers affect the inverter switching frequency, and therefore causes flux and torque fluctuations, first, suitable bandwidth for the controllers should be chosen and then the DTC control is recommended.

Keywords: Direct Torque Control, Vector Control, Hysteresis Controller, D-Q Model, Induction Motor

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğrudan moment kontrol (DTC) yöntemi, vektör kontrol yöntemine alternatif olarak geliştirilen bir yöntemdir. DTC yöntemi, referans ve hesaplanan akı vasıtasıyla momentte oluşacak hataları doğrudan giderecek nitelikte bir anahtarlama dizisinin, eviricideki güç anahtar elemanlarına uygulanmasına dayanır. Bu yöntemde doğrudan akı ve moment kontrolü sağlamak mümkündür. Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri de hız algılayıcısı olmadan istenilen momentin üretilebilmesi ve geniş bir hız aralığında kararlı bir şekilde çalışılabilmesidir.

AC motorlar için başlıca moment kontrol yöntemleri olan Vektör Kontrol ve DTC, yüksek performanslı sürücülere temel oluşturmaktadır. Vektör kontrolüne alternatif olarak geliştirilen DTC yöntemi, Japonya'da Takahashi ve Noguchi ve Almanya'da Depenbrock tarafından tanıtılmıştır. DTC kontrolde karmaşık akım dönüşümleri, gerilim ve frekans kontrollü DGM (darbe genişlik modülasyonu) modülü gibi karmaşık işlemlere gerek yoktur. Optimum anahtarlama tablosu, akı ve moment histerezis kontrolörlerinin çıkışlarına göre belirlenerek ve eviriciye uygulanarak hızlı bir moment ve akı kontrolü sağlanmaktadır.

Anahtarlama frekansının akı ve moment histerezis bandlarının genişliğine göre değişmesi ve moment dalgalanmalarının meydana gelmesi, geleneksel DTC'nin en büyük dezavantajıdır. Histerezis bandların dar seçilmesi evirici anahtarlama frekansının artmasına, bunun sonucu olarak da güç elemanlarının ısıl sınırlarının zorlanmasına yol açmaktadır. Bandların geniş seçilmesi ise evirici anahtarlama frekansının düşmesine, bunun sonucu olarak da yüksek moment dalgalanmasına sebep olmaktadır. Bu durum özellikle düşük hız bölgelerinde daha fazla moment dalgalanmalarına yol açmaktadır [1].

Kısaca histerezis bandların genişliği sürücü sistemin performansını etkilemektedir. Buna bağlı olarak güç elemanlarının anahtarlama frekansının değişmesine ve kayıpların artmasına, dolayısıyla aşırı sıcaklık artışına yol açmaktadır. Histerezis kontrolörler akı ve moment dalgalanmasında etkindir, dolayısıyla akı ve momentte dalgalanmalar oluşmaktadır. Ayrıca akım harmoniklerinin artmasına, dolayısıyla toplam harmonik distorsiyonunun değişmesine neden olmaktadır [2]. Bu çalışmada, histerezis kontrolörlerinin band genişlikleri uygun şekilde seçildikten sonra, DTC kontrollü asenkron motor giriş-çıkış bilgileri elde edilmiş ve böylece sürücü sistem incelenmiştir.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Asenkron motorların hız veya moment kontrolü, karmaşık ve doğrusal olmayan yapılarından dolayı, doğru akım motorlarına göre daha zordur. Asenkron motorun elektriksel dinamiği ile mekaniksel dinamiği arasındaki doğrusal olmayan kuplaj nedeniyle asenkron motorda yüksek performans elde etmek oldukça zordur. Bu problemi ortadan kaldırmak üzere standart konum ve hız kontrol çevrimlerinden başka daha iç içe kapalı çevrimleri bulunan doğrudan moment kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Doğrudan Moment Kontrol (DTC) yönteminde hem akı hem de moment doğrudan kontrol edilmektedir. Vektör kontrolünde koordinat dönüşümleri, işlemi daha karmaşık hale getirmektedir. DTC yönteminde koordinat dönüşümleri yapılmadığı için, bu yöntemin hızlı moment cevabı ve düşük harmonik kayıpları gibi avantajlara sahip olduğu gösterilmiştir.

DTC'nin en büyük avantajı, hız algılayıcı olmadan istenilen momenti üretebilmesi ve geniş bir hız aralığında kararlı bir şekilde çalışabilmesidir. Yapılan benzetim modelinde DTC'nin moment tahmininin hızlı ve doğru olduğu ve geniş bir hız aralığında cevap verdiği gösterilmiştir.

DTC'nin en büyük dezavantajı moment dalgalanmasına sebep olmasıdır. Yapılan bu çalışmada akı ve moment histerezis band genişliklerinin moment dalgalanmasını etkilediği gözlenmiştir. Akı histerezis band genişliği

küçüldükçe akı ve akım dalgalanmasının azaldığı gözlenirken, moment histeresis band genişliği küçüldükçe moment dalgalanmasının arttığı gözlenmiştir. Bundan dolayı akı histeresis band genişliğinin küçük tutularak moment histeresis band genişliğinin ayarlanması gerektiği kanaatine varılmıştır.

3. ASENKRON MOTORUN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE INDUCTION MOTOR)

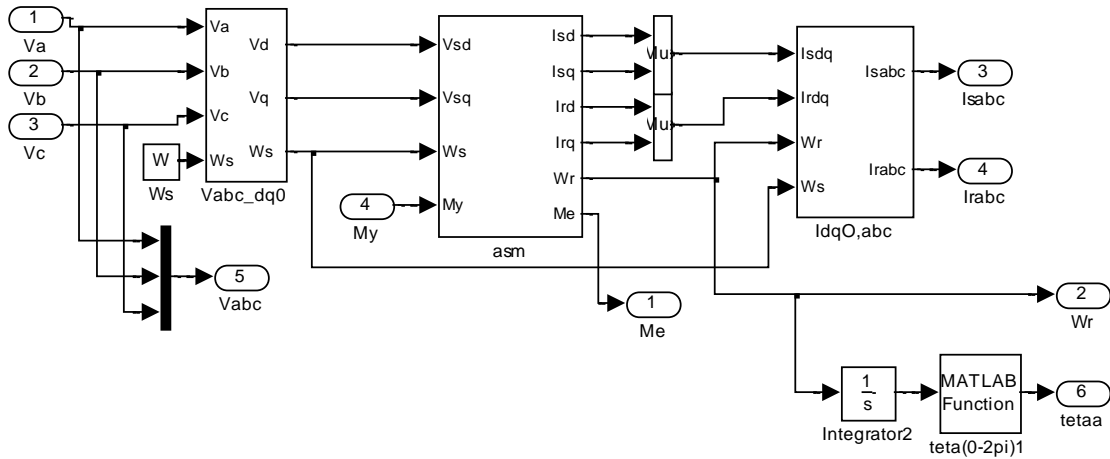
Doğrudan moment kontrollü sürücülerin daha iyi anlaşılabilmesi için kontrol edilen motorun matematiksel modelinin iyi bilinmesi gerekir. Matematiksel model, makinanın davranışını hem geçici ve hem de sürekli durumda temsil etmektedir. Üç fazlı asenkron motorun akı ve akımları arasındaki bağıntılar aşağıdaki denklemlerle gösterilebilir:

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = V_{sd} + \omega_s \psi_{sq} - R_s i_{sd} \quad \text{ve} \quad \psi_{sd} = L_s i_{sd} + \frac{3}{2} M_m i_{rd} \quad (3.1)$$

$$\frac{d\psi_{sq}}{dt} = V_{sq} - \omega_s \psi_{sd} - R_s i_{sq} \quad \text{ve} \quad \psi_{sq} = L_s i_{sq} + \frac{3}{2} M_m i_{rq} \quad (3.2)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = V_{rd} + S \omega_s \psi_{rq} - R_r i_{rd} \quad \text{ve} \quad \psi_{rd} = L_r i_{rd} + \frac{3}{2} M_m i_{sd} \quad (3.3)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = V_{rq} - S \omega_s \psi_{rd} - R_r i_{rq} \quad \text{ve} \quad \psi_{rq} = L_r i_{rq} + \frac{3}{2} M_m i_{sq} \quad (3.4)$$



Şekil 1. Üç fazlı asenkron motorun d-q modele dayalı Simulink blok diyagramı

(Figure 1. Simulink block diagram of three-phase induction motor based on d-q model)

Moment ifadesi ise Denklem (3.5) ile gösterilebilir.

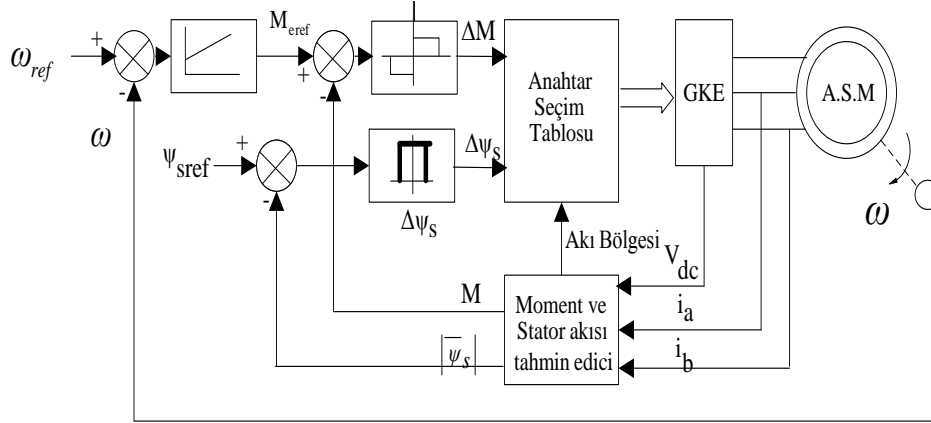
$$M = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \quad (3.5)$$

Burada ψ akı, V gerilim, L öz indüktans, R sargı iç direnci, i akım, M_m ortak indüktans, ω_s rad/sn olarak senkron elektriksel frekans, P kutup sayısı ve S kayma için kullanılmıştır. Akım, gerilim, indüktans ve akı için kullanılan temsil sembolleriyle beraber; alt indis olarak kullanılan d ve q sembolleri sırasıyla d eksen ve q eksen değişkenlerini, yine alt indis olarak kullanılan s ve r sembolleri sırasıyla stator ve rotor değişkenlerini ayırt etmek içindir.

Asenkron motorun d-q modeline dayalı benzetimi, Matlab/Simulink ile yapılmıştır. Benzetimde (3.1) ile (3.5) arasındaki matematiksel denklemler temel alınmıştır. Şekil 1'de asenkron motorun d-q modeline dayalı Simulink blok diyagramı gösterilmiştir.

4. DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİ (DIRECT TORQUE CONTROL METHOD)

Doğrudan moment kontrol yöntemi karmaşık koordinat dönüşümleri, darbe genişlik modülasyonu ve hız/konum algılayıcısı gerektirmemektedir [3]. Şekil 2'de asenkron motoru süren DTC'li hız kontrol diyagramı gösterilmiştir. Bu hız kontrol diyagramı histerezis kontrolörlerinden, moment ile akı tahmin edicilerinden ve anahtar seçim tablosundan oluşmaktadır.



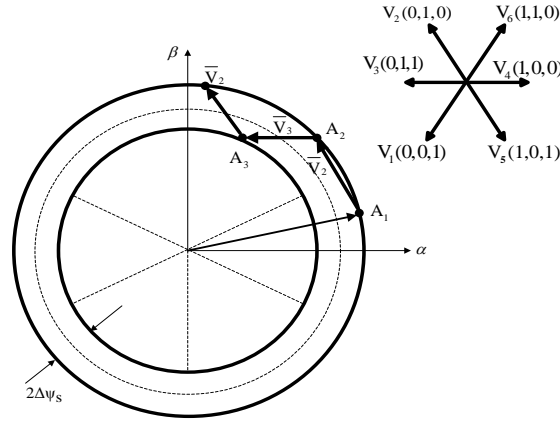
Şekil 2. DTC temelli asenkron motor hız kontrol diyagramı
(Figure 2. DTC based speed control diagram of an induction motor)

Gerilim kontrollü eviricinin (GKE) altı adet aktif gerilim vektörü ve iki adet sıfır anahtarlama vektörü bulunmaktadır. DTC yöntemine göre, Şekil 2'de gösterildiği gibi, istenilen akı ve moment değerlerini elde etmek üzere histerezis bandı içindeki akı ve momentleri koruyabilmek için, eviriciye bu gerilim vektörleri uygulanmaktadır.

Gerilim bağıntısında sargı direncindeki gerilim düşümü ihmal edilerek bulunan akı ve gerilim vektörleri arasındaki bağıntı denklem (4.1) de gösterilmiştir [1].

$$\bar{\psi}_s = \int \bar{V}_s . dt \quad (4.1)$$

Stator akısının kontrolü ile ilgili bir örnek, Şekil 3'te gösterilmiştir. Burada gerilim vektörleri, histerezis bandı içerisinde ve dairesel yörüngede saat ibresinin tersi yönünde hareket ettirilmiştir. Gerilim vektörlerinin hareketi, denklem (4.1)'de ifade edildiği gibi akı yörüngesini oluşturmuştur. Farklı gerilim vektörleri seçilerek akı azaltılıp arttırılmıştır.



Şekil 3. Stator akısının uygun gerilim vektörüyle kontrol edildiği yörünge
(Figure 3. Trajectory where the stator flux is controlled with a convenient voltage vector)

DTC yöntemi uygulandığı taktirde asenkron motorun moment ifadesi denklem (4.2)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{\delta L_s L_r} |\psi_s| |\psi_r| \sin \delta_{sr} \quad (4.2)$$

Stator ve rotor akıları arasındaki açı δ_{sr} 'nin azalıp artmasına göre moment de azalıp ya da artmaktadır. Moment için üç durum bulunmaktadır. Bu üç durum Tablo 1'de gösterilmiştir.

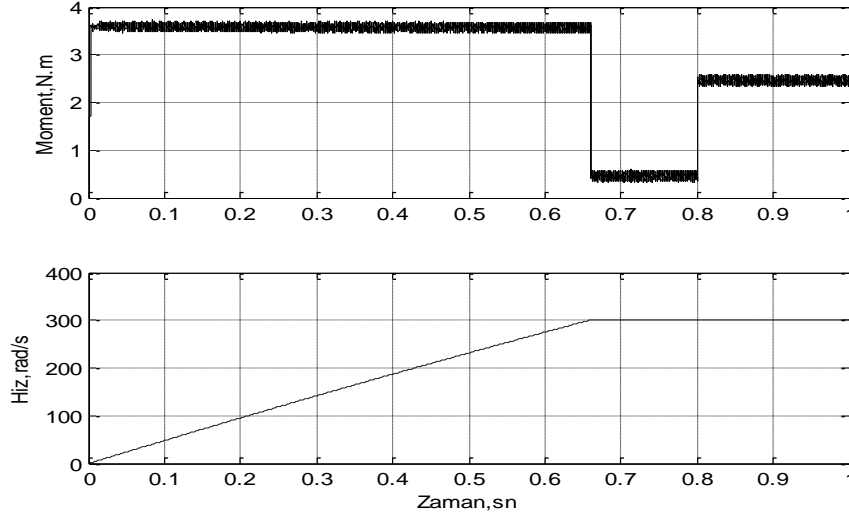
Tablo 1. Gerilim vektörlerinin uygulanışına göre moment durumu
(Table 1. Torque conditions according to the applied voltage vectors)

	İleri Aktif Gerilim Vektörleri Uygulanırsa	Sıfır Gerilim Vektörleri Uygulanırsa	Geri Aktif Gerilim Vektörleri Uygulanırsa
Açı	Artar	Azalır	Hızla azalır
Moment	Artar	Azalır	Hızla azalır
Stator akısı	Artar ya da azalır	Durur	Artar ya da azalır

Şekil 4.a'da görüldüğü gibi akılar arasındaki açı arttığı için moment de Denklem (4.2)'ye göre artmakta ve aynı şekilde Şekil 4.b'de görüldüğü gibi akılar arasındaki açı azaldığı için moment de azalmaktadır.

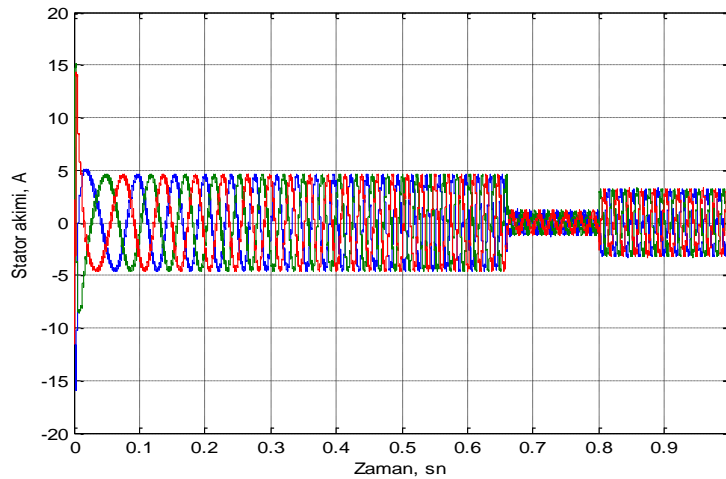
Bu amaçla referans akı ve moment değerleri gerçek akı ve moment değerleri ile karşılaştırılıp elde edilen hata değerleri Şekil 2'de gösterildiği gibi histerezis kontrolörlerine uygulanmakta ve çıkışlarındaki kontrol sinyalleri ($\Delta\psi_s, \Delta M$) elde edilmektedir. Bu sinyaller ve stator akısı uzay vektör pozisyonu kullanılarak ve Tablo 2'den en uygun anahtarlama vektörü seçilerek, eviriciye uygulanıp asenkron motorun moment kontrolü yapılmaktadır.

Şekil 6'da görüldüğü gibi moment, referans hızı yakalayabilmek için yüksek değerlerde sabit kalmıştır. Referans hız yakalandıktan sonra moment, sürtünme momentine eşit bir değere kadar düşmüştür. $t=0.8$ inci sn'de 2 Nm yük uygulandığı için, sürtünme momenti de dikkate alındığında motorun ürettiği moment yaklaşık 2.5 Nm sabit değerine yükselmiştir. Şekil 6'da, $t=0.8$ inci saniyede, motora 2 Nm yük bindiği ve motorun ürettiği moment sürtünmeye karşı gelen 0.5 Nm'den 2.5 Nm'ye yükseldiği halde, motorun hızında geçici de olsa herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir.



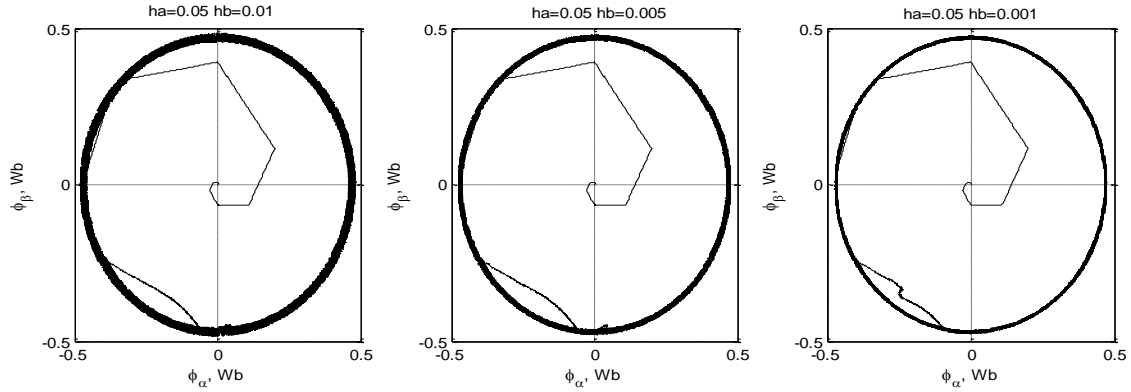
Şekil 6. DTC kontrollü asenkron motorun moment ve hız cevabı ($\omega_{ref}=300$ rad/s, $t=0.8$ sn'de 2 Nm yük momentinde)
(Figure 6. Torque and speed responses of DTC controlled induction motor ($\omega_{ref}=300$ rad/s, at $t=0.8$ sec. 2 Nm load torque is applied))

Şekil 7'de ise stator akımlarının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Bu akımlara bakıldığında, ilk yol alma anında motor nominal akımın yaklaşık 3-4 katı bir akım çekmiştir. Daha sonra motor sürekli durumda ve boşta akım çekerken $t=0.8$ inci sn'de 2 Nm'lik yük momentinin binmesi ile beraber akım tekrar yükselmiştir.

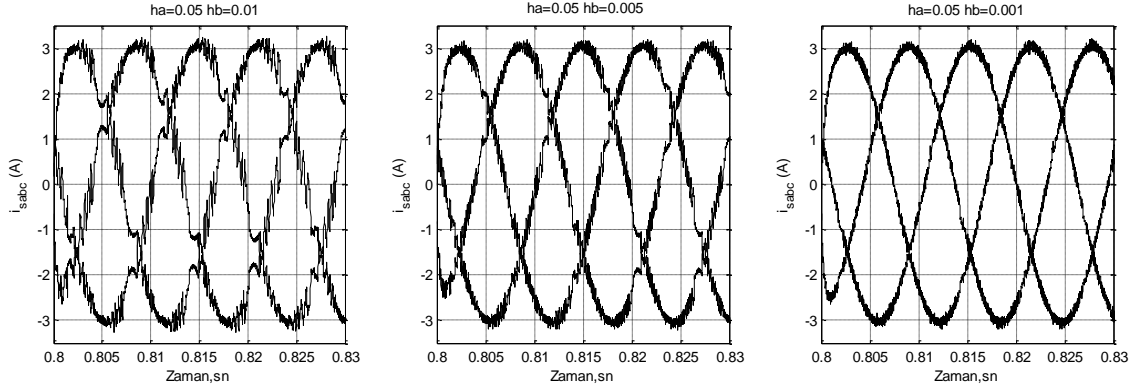


Şekil 7. Stator akımlarının zamana göre değişimi ($\omega_{ref}=300$ rad/s, $t=0.8$ sn 2 Nm yük altında)
(Figure 7. Stator currents variation versus time, ($\omega_{ref}=300$ rad/s, at $t=0.8$ sec. 2 Nm load torque is applied))

DTC'de histerezis kontrolör bantlarının genişliği kontrol edilebilmektedir. Histerezis kontrolör bantlarının genişliği inverter anahtarlama frekansını, akı ve moment dalgalanmalarını, akım harmoniklerini ve dolayısıyla sürücü performansını etkilemektedir [4 ve 5]. Akı ve moment bantlarının anahtarlama frekansına etkisi yapılan benzetimle de gösterilmiştir. Akı histerezis kontrolörünün band genişliği (hb) artacak olursa, akı dalgalanması da artmaktadır. Band genişliği küçülecek olursa, akı dalgalanması azalmaktadır. Yine aynı şekilde akı histerezis kontrolörünün band genişliğinin artması akım dalgalanmasının artmasına ve band genişliğinin küçülmesi akım dalgalanmasının azalmasına neden olmaktadır. Bu etkiler, Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 8 ve Şekil 9'dan görüldüğü gibi, akı band genişliği küçüldüğü zaman akı dalgalanması da azaldığı için akım dalgalanması azalmaktadır [6].

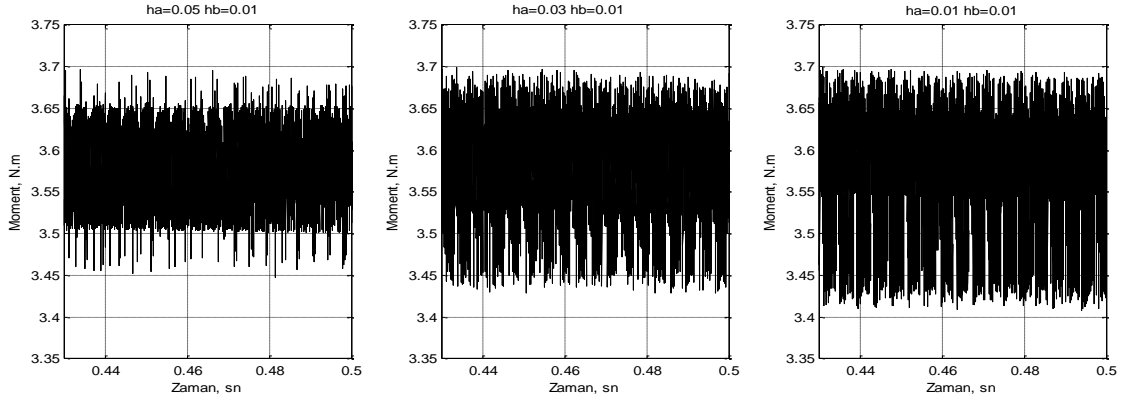


Şekil 8. Belli akı ve sabit moment band genişlikleri için stator akı yörüngeleri ($\omega_{ref} = 300$ rad/s, $t=0.8$ sn'de 2 Nm yük momenti altında) (Figure 8. Stator flux trajectories for certain flux and fixed torque band widths, ($\omega_{ref} = 300$ rad/s, at $t=0.8$ sec. 2 Nm load torque is applied))



Şekil 9. Belli akı ve sabit moment band genişlikleri için stator akımlarının zamana göre değişimi ($\omega_{ref} = 300$ rad/s, $t=0.8$ sn'de 2 Nm yük momenti altında) (Figure 9. Stator currents variation versus time for certain flux and fixed torque band widths, ($\omega_{ref} = 300$ rad/s, at $t=0.8$ sec. 2 Nm load torque is applied))

Moment kontrolörünün histerezis band genişliği (ha) küçülecek olursa moment dalgalanması artmaktadır. Şekil 10'da görüldüğü gibi moment band genişliği küçüldükçe moment dalgalanması artmıştır.



Şekil 10. Belli moment ve sabit akı band genişlikleri için moment dalgalanmaları ($\omega_{ref} = 300$ rad/s, $t=0.8$ sn'de 2 Nm yük momentini altında) (Figure 10. Torque ripples for certain torque and fixed flux band widths, ($\omega_{ref} = 300$ rad/s, at $t=0.8$ sec. 2 Nm load torque is applied))

Akı band genişliği, motor akımının THD (toplam harmonik distorsiyonu) değerini önemli ölçüde etkilemektedir. Akım harmoniklerinin azaltılması için, band genişliklerinin dinamik olarak optimize edilmesi gerekir [7]. Anahtarlama frekansını düşürmek için akı band genişliği arttırılırsa, anahtarlama frekansında önemli bir azalma olmamasına karşılık motor akımının THD değeri artmaktadır. Akı histerezis band genişliğini küçük tutarak motor akımının THD'sini azaltmak ve anahtarlama frekansını kontrol etmek için moment histerezis bandını ayarlamak en uygun çözümdür [8].

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Asenkron motorun d-q modeli üzerine kurulan DTC sistemi benzetiminden hızlı ve düzgün moment cevabı üretildiği gösterilmiştir. DTC'nin en büyük avantajı, hız algılayıcısı olmadan istenilen momentin üretilebilmesi ve geniş bir hız aralığında kararlı bir şekilde çalışılabilmesidir. Benzetim modelinde DTC'nin moment tahmininin hızlı ve doğru olduğu ve geniş bir hız aralığında cevap verdiği Şekil 6'da gösterilmiştir.

DTC'nin en büyük dezavantajı moment dalgalanmasına sebep olmasıdır. Akı ve moment histerezis band genişlikleri evirici anahtarlama frekansını etkilediği için, histerezis kontrolörlerinin band genişlikleri uygun bir şekilde seçilmesi gerekir. Değişik akı ve moment histerezis band genişlikleri için elde edilen sonuçlara göre, akı histerezis band genişliği küçüldükçe akı ve akım dalgalanmasının azaldığı Şekil 9.'da gösterilmiştir. Moment histerezis band genişliği küçüldüğünde ise moment dalgalanmasının arttığı Şekil 10.'da gösterilmiştir. Sonuç olarak akı histerezis band genişliğinin küçük tutularak moment histerezis band genişliğinin optimize edilmesi gerekir.

NOT (NOTICE)

Bu çalışma, 14-16 Ekim 2010 tarihinde Dicle Üniversitesinde tamamlanan Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumunda (BUMAT2010) sözlü sunumu yapılmış ve NWSA yazım esaslarına göre yeniden düzenlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Buja, G.S. and Kazmierkowski M.P., (2004). Direct torque control of PWM inverter-fed ac motors—a survey," IEEE IE Trans., vol. 51, pp. 744-757, August.
2. Kang, J.K. ve Sul, S.K., (1999). Analysis And Prediction of Inverter Switching Frequency In Direct Torque Control of Induction Machine Based on Hysteresis Bands and Machine Parameters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 48, Issue: 3, June 2001, 545-553.

3. Takahashi, I. and Ohmori, Y., (1989). High performace direct torque control of induction motor. IEEE Trans. Ind. Appl. 25 (2): 257-264.
4. Buja, G., Casadei, D., and Serra, G., (1997a), "direct torque control of induction motor drives", Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'97., Vol.1, Tu2-TU8.
5. Vas, P., (1998). Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford Science Publications, U.S.A.
6. Karaman, Ö.A., (2010). Doğrudan Moment Kontrollü Asenkron Motor Sürücü Sisteminin İncelenmesi, Y.Lisans Tezi, F.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
7. Monti, A., Pironi, F., Sartogo, F., and Vas, P., (1998). "New state observer for sensorless DTC control", Proceedings of the 1998 7th International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, Sep 21-23 1998, 311-317.
8. Bakan, A.F., (2002). Asenkron Motorda Doğrudan Moment Kontrolünün İncelenmesi ve Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.