PI ve Anti-Windup PI Denetleyici ile Vektör Denetim Yöntemi Uygulanan Bir Asenkron Motorun Hız Denetim Performansının İncelenmesi

*[1]Hakan Açıkgöz, [2]Ö.Fatih Keçecioğlu, [3]Mustafa Şekkeli
*[1]Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis Meslek Yüksekokulu, Elektrik Programı Bölümü
[2,3]K.Maraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
*[1]hakanacikgoz@kilis.edu.tr, [2]fkececioglu@ksu.edu.tr, [3]msekkeli@ksu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, vektör denetim yöntemi uygulanan üç fazlı bir asenkron motorun hız denetim çalışması MATLAB/Simulink paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Üç fazlı asenkron motorun alan yönlendirmeli denetiminde; rotor alan yönlendirmeli denetim yöntemi kullanılmıştır. Bu denetim yönteminde, klasik PI denetleyici ve anti-windup PI (AW+PI) denetleyici asenkron motorun hız denetim ünitesine uygulanmıştır. Her iki denetleyici için aynı koşullar altında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Klasik PI denetleyicisinden ve anti-windup PI denetleyicisinden elde edilen sonuçlar, değişik hız referanslarını izleme, yük momenti ve parametre değişimleri gibi bozucu etkenlere göre incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre anti-windup PI denetleyicinin klasik PI denetleyiciye göre daha iyi bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Vektör Denetimi, Rotor Alan Yönlendirmeli Denetim, PI Denetleyici, Anti-windup PI Denetleyici

1. Giriş

Üç fazlı asenkron motorlar; düşük üretim maliyetleri, yüksek verim, basit ve dayanıklı yapıları nedeniyle endüstride en çok kullanılan motorlardır. Birçok üstünlüğüne rağmen asenkron motorlar matematiksel modelleri itibari ile parametreleri zamanla değişen, doğrusal olmayan ve yüksek dereceli diferansiyel denklemler içeren karmaşık bir yapıya sahiptir. Yakın geçmişe kadar genel olarak endüstride, dinamik performanslarının çok iyi olması ve denetlenebilirliğinin çok basit olmasından dolayı doğru akım (DA) motorları tercih edilmiştir. Son yıllarda, Mikroişlemciler ve güç elektroniği devre elemanlarındaki hızlı ilerlemeler, asenkron motorların bir doğru akım motoru gibi denetlenmelerini mümkün kılmıştır. Asenkron motorların hız denetimi, skaler ve vektörel olarak iki şekilde yapılabilmektedir. Skaler denetim yönteminde, denetlenen değişkenler stator gerilimi ve frekansıdır. Bu denetim yönteminde, rotor konumu ihmal edilir. Hız ve konum bilgisine gerek duyulmaz. Dolayısı ile bu yöntemi kullanan sürücü açık çevrimli sürücü olarak adlandırılır. Moment veya akı doğrudan veya dolaylı olarak denetlenmez. Denetim işlemi, sabit bir V/f oranını kullanan bir regülatör ile sağlanır [1-5]. Bu denetim işlemi basit bir yapıya sahip olmakla beraber düşük hız ve moment cevabına sahiptir. Vektör denetim yöntemi ise, asenkron motorun momenti ve akısı arasındaki kenetleme etkisini ortadan kaldıran yöntemdir ve ilk olarak 1971 yılında Blaschke [6] tarafından önerilmiştir. Bilindiği gibi serbest uyartımlı DA motorunda endüvi ve uyartım sargıları birbirine diktir ve bu durum endüvi ve uyartım akımlarının birbirinden bağımsız olarak denetlenmesine olanak verir.

İyi tasarlanmış vektör denetim teorisi moment ve akı arasında bağımsız denetim sağlamaktadır. Akı sabitse ve senkron eksen takımının d-ekseni üzerine yönlendirilmiş ise, moment akımın q-ekseni bileşeni tarafından denetlenir.

*Corresponding author: Address: Dept. of Electrical Science, Kilis Vocational High School, Kilis 7 Aralık University, 79000 Kilis, TURKEY. E-mail address: hakanacikgoz@kilis.edu.tr, Phone: +90348 814 26 66

Senkron eksen takımı rotor akısı, stator akısı veya hava aralığı akısı eksen takımı olabilir [7-9]. Bu çalışmada üç fazlı asenkron motorun rotor akı alan yönlendirmeli benzetim çalışması anlatılmaktadır. İkinci bölümde asenkron motorun modellenmesi ve rotor akı alan yönlendirme için gerekli hesaplamalar anlatılmakatdır. Üçüncü bölümde ise klasik PI ve anti-windup PI denetleyici ile elde edilen benzetim çalışması sonuçları verilmiştir. Dördüncü bölümde ise yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır.

2. Rotor Akı Eksen Takımına Göre Asenkron Motorun Modellenmesi

Genel bir referans eksen takımına göre asenkron motorun stator ve rotor denklemleri aşağıdaki gibidir [7-9]:

Stator gerilim denklemi:

$$V_s^g = i_s^g R_s + j\omega_g \psi_s^g + p\psi_s^g \tag{1}$$

Rotor gerilim denklemi:

$$0 = i_r^g R_r + j(\omega_g - \omega_r)\psi_r^g + p\psi_r^g \tag{2}$$

Stator akı denklemi:

$$\psi_s^g = L_s i_s^g + L_m i_r^g \tag{3}$$

Rotor akı denklemi:

$$\psi_r^g = L_m i_s^g + L_r i_r^g \tag{4}$$

“g” harfi genel bir referans eksen takımını ifade etmektedir. Denklem 3 ve 4’deki rotor akım ve stator akı ile durum değişkenleri ile gösterilen akı ve akım fonksiyonları türetilirse;

$$\psi_s^g = \sigma L_s \dot{I}_s^g + \frac{L_m}{L_r}\psi_r^g \tag{5}$$

$$i_r^g = \frac{1}{L_r}\left(\psi_r^g - L_m i_s^g\right) \tag{6}$$

Burada; $\sigma = 1 - L_m^2 / L_r L_s$’dır. Rotor eksen takımında, asenkron motorların dinamik modeli aşağıdaki gibi bulunur.

$$p\psi_r^r = \left[R_r\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\right]i_s^r + \left[-j\omega_s - \left(\frac{R_r}{L_r}\right)\right]\psi_r^r \tag{7}$$

Akı denklemi (7) gerilim denklemine uygulandığında:

$$p\psi_r^r = \left(\frac{L_m}{\tau_r}\right)i_s^r + \left[-j\omega_s - \left(\frac{1}{\tau_r}\right)\right]\psi_r^r \tag{8}$$

Durum değişkenleri ile gösterilen motor modelinde, rotor akısı alan yönlendirmesi için [6-7];

$$\psi_r^r = \psi_{dr}^r + j\psi_{qr}^r = \psi_{dr}^r \text{ ve } \psi_{qr}^r = 0 \tag{9}$$

Benzer şekilde, stator akımının d-ekseni bileşeni aşağıdaki şekilde türetilebilir [7-9]:

$$i_{ds}^r = (1+\tau_r p)\frac{\psi_{dr}^r}{L_m} \tag{10}$$

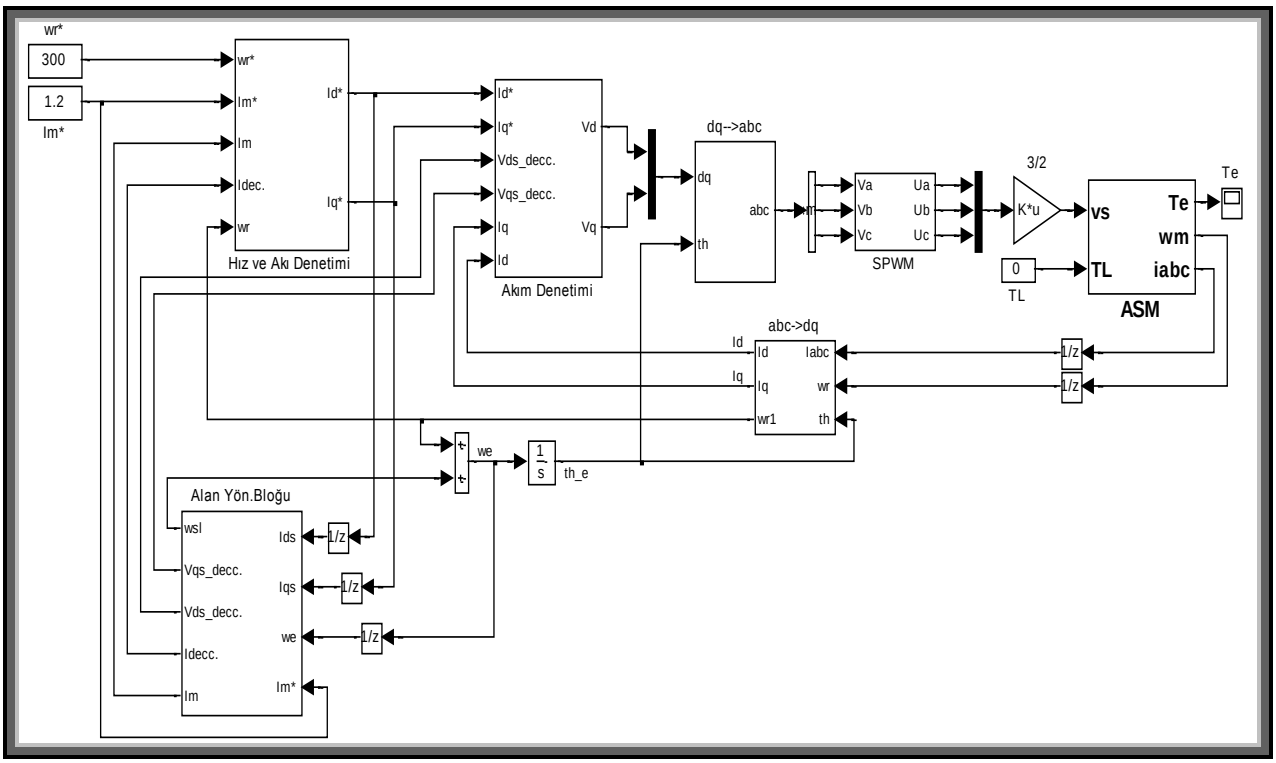
Burada; r**,** rotor akısı eksen takımını, ψ_s, ψ_r stator ve rotor akısını, d-q ise d ve q ekseni bileşenini, R_s, R_r stator ve rotor direncini, L_r, L_s, L_m stator, rotor ve ortak endüstansı, $\dot{I}_s$, $\dot{I}_r$ stator ve rotor akımını, p diferansiyel operatörü, ω_s kayma frekansını, τ_r rotor zaman sabitini, σ toplam sızıntı faktörünü ve V_s'de stator gerilimini ifade etmektedir.

Rotor alan yönlendirmesi için rotor akısının d-ekseni ile çakıştırılması gerekir. Bu ise, senkron hız hesaplanarak bulunabilir. Senkron hız ise, hesaplanan kayma hızı ile ölçülen/tahmin edilen mil hızının toplamıyla bulunur. Gerilim-denetimli gerilim beslemeli bir evirici için gerilim komutununda hesaplanması gerekir. Dolayısıyla, kayma frekansı, gerilim dekuplajı ve mıknatıslanma akımı hesaplamaları da bir rotor alan-yönlendirmeli denetim için gerekli hesaplamalardır [6-10].

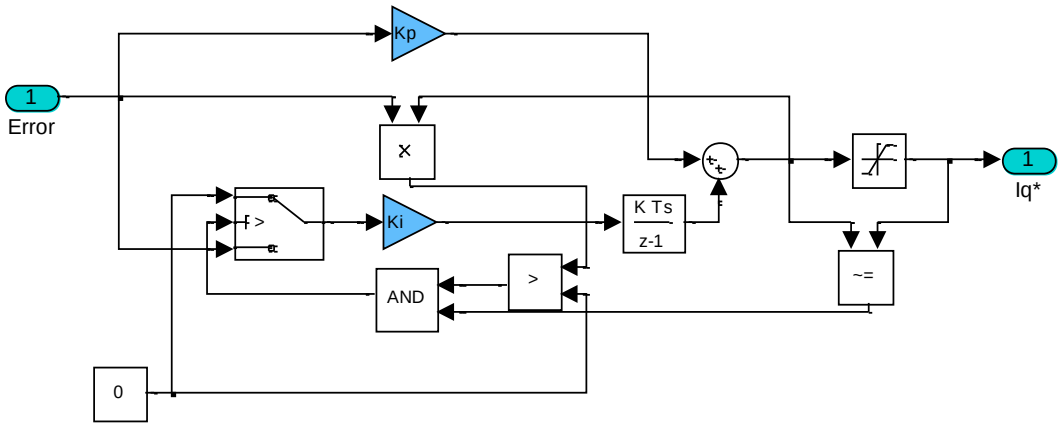
2.1. Rotor Alan Yönlendirmeli Denetim için Benzetim Modeli

Bu bölümde asenkron motorun rotor alan yönlendirmeli hız denetimi için benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Rotor Alan yönlendirmeli denetim yapısının benzetim çalışmasında MATLAB/Simulink blokları kullanılmıştır. Rotor alan yönlendirmeli denetim için hazırlanan benzetim modeli, hız ve akı denetimi, alan yönlendirme, akım denetimi, Park-Clarke ve ters Park-Clarke dönüşümü, hız denetiminin gerçekleşmesi için gerekli olan farklı frekanslarda gerilim üreten sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu (DGM) ve evirici ile asenkron motorun modellendiği ana bloklardan oluşmaktadır. Asenkron motorun alan yönlendirmeli hız denetiminin gerçekleştirilebilmesi için, rotor alan yönlendirmesi kullanılmıştır.

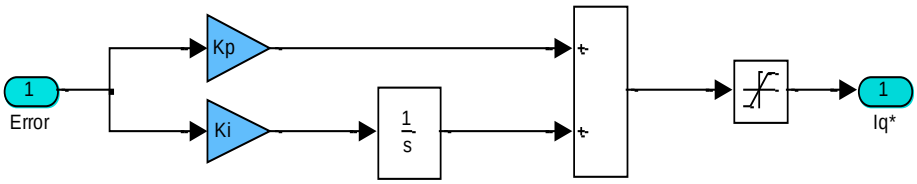
Bu amaçla şekil 1'de verilen denetim yapısında alan yönlendirme bloğunda rotor alan yönlendirmesi sağlanmıştır. Rotor alan yönlendirme bloğunun içi, bölüm 2'deki rotor alan yönlendirme kısmında verilen denklemleri içermektedir. Stator geriliminin denetimini sağlamak için d-ekseni ve q-ekseni bileşenleri arasındaki kenetleme terimleri simulink blokları yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 1. Asenkron motorun rotor alan yönlendirmeli denetimine ilişkin MATLAB/Simulink modeli



Şekil 2. AW+PI denetleyici MATLAB/Simulink modeli

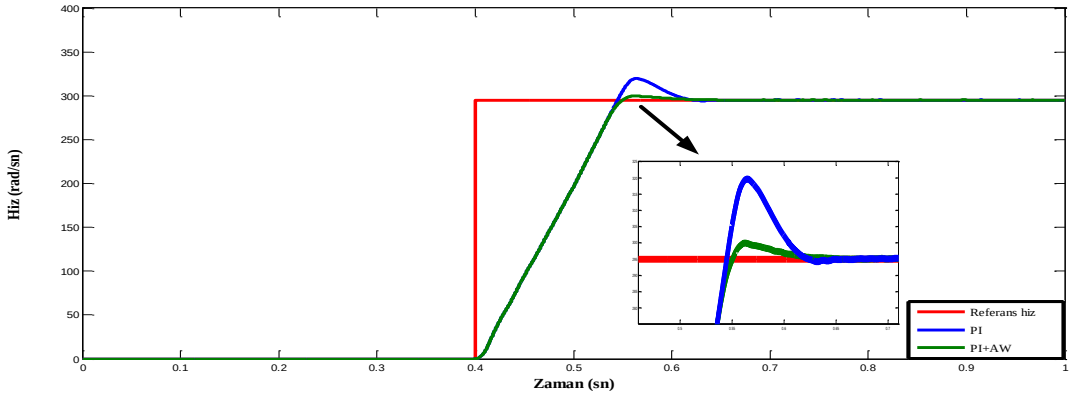


Şekil 3. Klasik PI denetleyici MATLAB/Simulink modeli

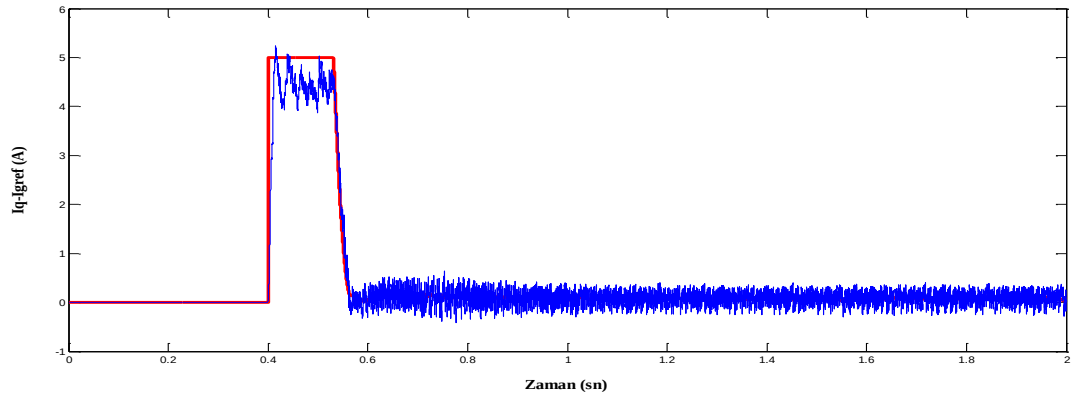
3. Benzetim Sonuçları

Asenkron motorun hız denetim ünitesine şekil 2 ve 3'te gösterilen AW+PI ve PI denetleyici uygulanmıştır. Akım denetim bloğundan elde edilen referans gerilimler DA gerilimleridir. Asenkron motorun gereksinim duyduğu üç fazlı gerilimlerin sağlanabilmesi için, senkron çatıdaki DA gerilimler "dq->abc" bloğu ile referans üç faz gerilimlerine dönüştürülmektedir. Motorun istenilen momenti üretebilmesi için hesaplanan bu gerilimlerden sinüzoidal DGM yöntemi kullanılarak bulunan modülasyon dalgaları eviriciye kapı darbeleri olarak uygulanmaktadır. Eviriciden elde edilen gerilimler ise asenkron motor modeline uygulanmaktadır.

Şekil 4'de motor yüksüz durumda iken motorun sabit 295 rad/sn'lik referans hızı izleme başarımı gösterilmiştir. Şekil 4 (a)'da motor hızı ile referans hız arasındaki değişim verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi motor hızı, PI denetleyici ile yaklaşık %5 ve AW+PI denetleyici ile yaklaşık %1'lik bir aşma ile sürekli durum hatası olmaksızın referans hızı başarılı bir şekilde izlemektedir. Şekil 4 (b)'de I_q^* ve I_q akımlarının değişimi görülmektedir. Motorun referans hıza ulaşana kadarki geçici durumda motorun aşırı akım çekmemesi için motor akımı ±5A ile sınırlanmıştır. Geçici durumun sona ermesiyle birlikte I_q akımı boştaki kayıpları karşılayacak kadarlık akım değerine düşmekte ve referans I_q^* akımını başarılı bir şekilde izlemektedir.



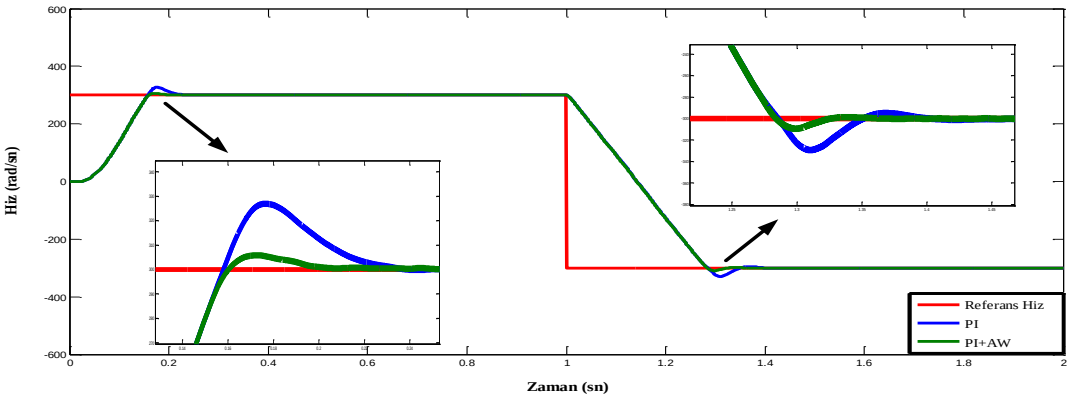
(a)



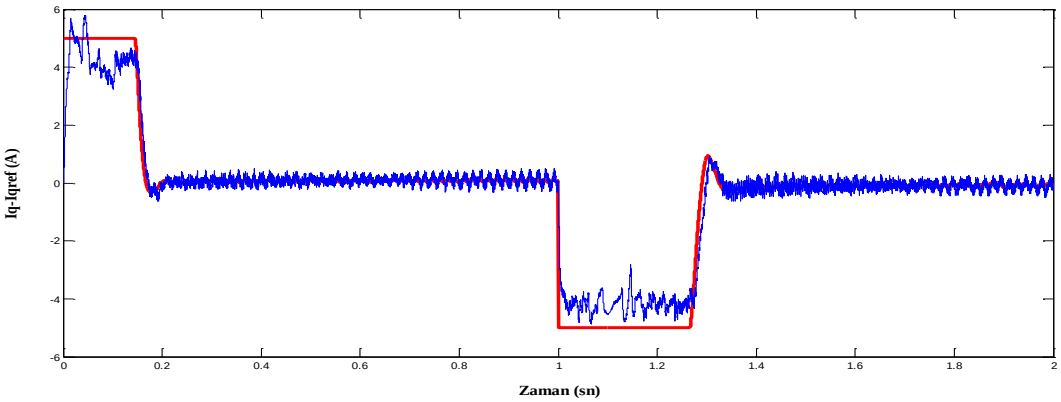
(b)

Şekil 4. Rotor alan yönlendirmeli denetim için 295 rad/sn basamak hızda ve yüksüz durumda elde edilen sonuçlar. (a) Referans hız ile motor hızının değişimi, (b) I_q^* akımı ile I_q akımının değişimi

Vektör denetimli asenkron motorlardan beklenilen en önemli özelliklerden biri de motorun dört bölgeli olarak çalışabilmesidir. Bu amaçla motor yüksüz durumda iken motora ±300 rad/sn'lik sabit referans hız uygulanmış ve elde edilen sonuçlar şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5 (a)'da motor hızı hem PI hemde AW+PI denetleyicide sürekli durum olmaksızın referans hızı izlemektedir. Şekil 5 (b)'de I_q^* ve I_q akımlarının değişimi görülmektedir



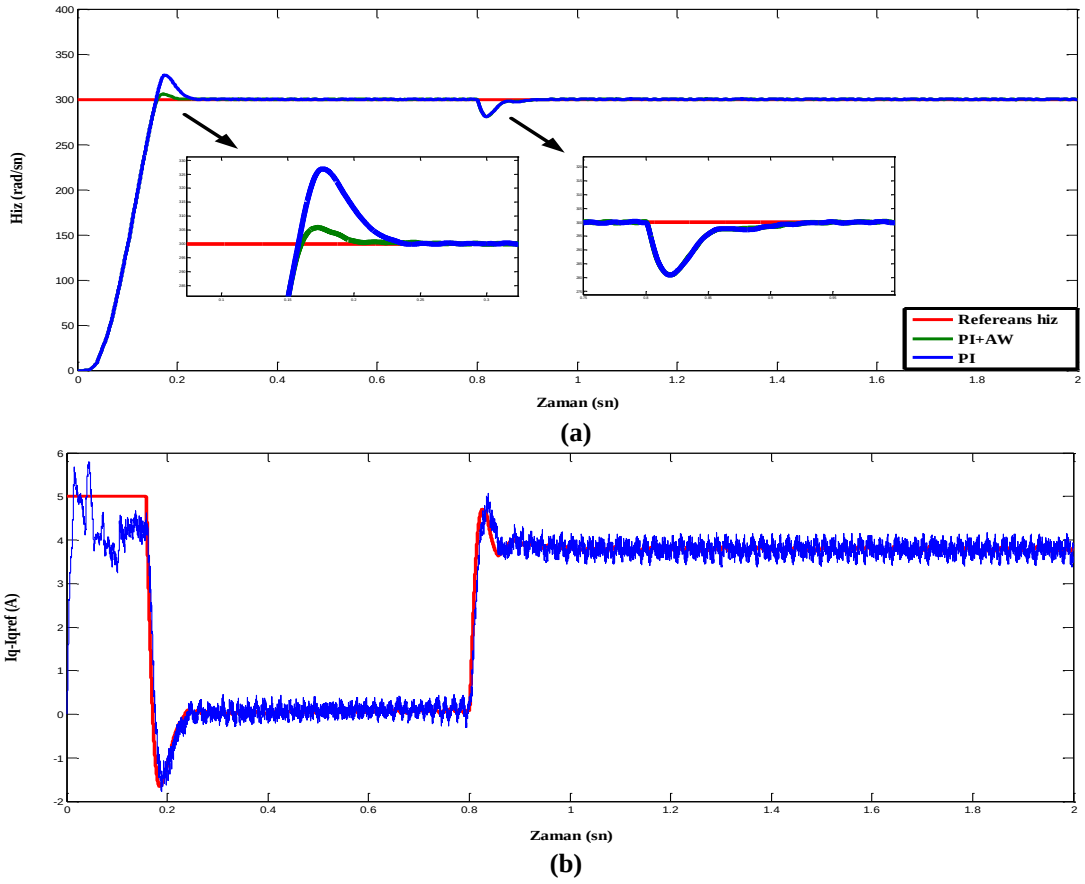
(a)



(b)

Şekil 5. Rotor alan yönlendirmeli denetim için sabit basamak hızlarda ve yüksüz durumda elde edilen sonuçlar. (a) Referans hız ile motor hızının değişimi, (b) I_q^* akımı ile I_q akımının değişimi

Motorun bozucu girişlere karşı başarımının incelenebilmesi amacıyla, motora anma değerinde sabit yük momenti uygulanmış ve elde edilen sonuçlar şekil 6'da verilmiştir. Motor başlangıçta yüksüz durumdadır. t=0.8 sn'den itibaren motora 3,72 N.m'lik yük bindirilmektedir. Motora yük bindirildiği anda motor hızında yaklaşık olarak % 6.5'lik bir düşüş olmuş, sonra hızla toparlanarak referans hızı izlemeye devam etmiştir. Şekil 6(b)'de I_q^* ve I_q akımlarının değişimi görülmektedir. Şekil 6 (b)'de görüldüğü gibi, yük bindirildikten sonra I_q akımı yükü karşılayacak kadar akım çekmiştir ve I_q^* akımını başarılı bir şekilde izlemektedir.



Şekil 6. Rotor alan yönlendirmeli denetim için 300 rad/sn sabit hızda ve t=0.8 sn'den itibaren 3.72 N.m yüklü durumda elde edilen sonuçlar. (a) Referans hız ile motor hızının değişimi (b) I_q^* akımı ile I_q akımının değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç fazlı bir asenkron motorun hızı denetlenmiştir. Asenkron motorun rotor alan yönlendirmeli denetim yöntemi MATLAB/Simulink paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Asenkron motorun hız denetiminde klasik PI ve anti-windup PI denetleyici kullanılmıştır. PI ve anti-windup PI denetleyiciden elde edilen sonuçlar incelenmiş ve karşılaştırılmştır. Simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre anti-windup PI denetleyici PI denetleyiciye göre daha iyi tepki ve hız cevabı verdiği gözlemlenmiştir.

REFERANSLAR

[1] Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.

[2] G.O Garcia, R. M. Stephan and E. H. Watanabe, "Comparing the indirect field-oriented control with a scalar method", IEEE Trans. Ind. Appl., 41(2), 201-207, April 1994.

[3] Harnefors, L., "Design and analysis of general rotor-flux-oriented vector control systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.48, 383-390, 2001.

[4] Boldea, I., Nasar, S.A., Vector Control of AC Drives, CRC Pres, New York, 1992.
[5] Dandıl B., Gökbulut M., "Asenkron Motorların Sinirsel-Bulanık Denetleyici ile Uyarlamalı Denetimi", J. fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Vol.20, No 2, 145-153, 2005.
[6] F.Blaschke., "The principle of field orientation as applied to the new Transvector closed loop control system for rotating field machines," Siemens Rev., vol. 34, pp. 217–220, 1972.
[7] Y. S. Lai, "Machine Modeling and Universal Controller for Vector Controlled Induction Motor Drives," in Proc. IEEE Trans.energy con., Vol.18, No.1, March, 2003.
[8] Y. S. Lai, J. H. Chen, and C. H. Liu, "A universal vector controller for induction motor drives fed by voltage-controlled voltage source inverter," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, 2000, pp. 2493–2498
[9] Y. S. Lai., "Modeling and Vector Control of Induction Machine a new unified approach," in Proc. IEEE Power Eng. Soc.Winter Meeting, 1999, pp. 47–52.
[10] Açıkgöz H., "Vektör denetim yöntemi ve Doğrudan Moment Denetim Yöntemi Uygulanan bir Asenkron Motorda Hız Denetim Performansının Karşılaştırılması", Elektrik Eğitimi Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008