

DOĞRUDAN MOMENT KONTROLLU BİR ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜSÜNDE STATOR AKISI TAHMİNİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Y.Doç.Dr.A.Faruk BAKAN, Prof.Dr.Hacı BODUR

Y.Doç.Dr.Gülderen YILDIRMAZ, Arş.Gör.Dr.Hülya OBDAN

Y.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü 34349 Beşiktaş / İSTANBUL

fbakan@yildiz.edu.tr, bodur@yildiz.edu.tr, gyildir@yildiz.edu.tr, obdan@yildiz.edu.tr

Anahtar sözcükler : DTC, Asenkron Motor, Stator Akısı Tahmini, LP Filtreli Tahmin Edici

ÖZET

Bu çalışmada, doğrudan moment kontrolü (DTC) yöntemi ile denetlenen bir asenkron motorda gerilim modelini kullanan alçak geçiren filtreli gelişmiş bir akı tahmin edici incelenmiştir. Yüksek performanslı motor sürücülerinde kullanılan akı tahmin teknikleri, akım modeli, gerilim modeli veya bunların ikisinin birlikte kullanılmasına dayalıdır. Akım modeli ile yapılan akı tahmini, düşük frekanslarda kullanılır ve stator akımı ile rotor hız bilgisini gerektirir. Bu modelin dezavantajı, yüksek hızlarda rotor parametrelerindeki değişimlere duyarlı olması ve bir hız algılayıcı gerektirmesidir. Algılayıcısız akı tahmini için, gerilim modelinin kullanılması gereklidir. Bu modelin doğruluğu yüksek hızlarda oldukça iyidir. Düşük hızlarda ise, stator geriliminin çok küçük olması, omik gerilim düşümü ve eleman gerilim düşümlerinin etkili olması nedeniyle integrasyon işlemindeki hata artar. Akı tahminindeki doğruluk, ölçülen akım ile gerilimlerin doğru olmasına ve parametrelerin gerçek değerlerinin kullanılmasına bağlıdır. Uygulamada, akım algılayıcılarının yapısı ve gürültüden kaynaklanan ölçüm hatası veya geçici rejim nedeniyle oluşan küçük bir DC kayma, integratörde hatanın birikmesine neden olur. Bunu önlemek için saf integratör yerine LP filtreli bir integratör kullanılır. Bu çalışmada, gerilim modelini kullanan LP filtreli gelişmiş bir akı tahmin edici sunulmuştur. LP filtrenin akı tahmin performansını nasıl etkilediği ve uygulamada nasıl tasarlanacağı etraflıca ele alınmıştır. Uygulama sonuçları, gelişmiş bir LP filtreli akı tahmin edicinin kullanıldığı DTC kontrollü bir asenkron motor sürücüsünde, çok düşük hızlara kadar kararlı bir kontrol yapılabildiğini göstermektedir.

1.GİRİŞ

Yüksek performanslı asenkron motor sürücülerini, genel olarak alan yönlendirmeli kontrol (FOC) veya doğrudan moment kontrol (DTC) teknikleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu sürücülerin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için, akının doğru tahmin edilebilmesi son derece önemlidir. DTC’de gerilim vektörünün seçimi, tahmin edilen stator akısı ve momentin referans değerler ile karşılaştırılmasıyla yapılır. DTC sürücüsünün performansı gerilim vektörü seçimlerinden etkilenir ve büyük ölçüde stator akısı uzay vektörünün doğru tahmin edilmesine bağlıdır [1,2].

Akı tahmin teknikleri, akım modeli, gerilim modeli veya bunların ikisinin birlikte kullanılmasına dayanır. Akım modeli kullanılarak yapılan akı tahmini, düşük frekanslarda kullanılır ve stator akımı ile rotor hız bilgisini gerektirir. Akım modeli, stator direncindeki değişimlerden etkilenmez fakat yüksek hızlarda rotor parametrelerinin değişimlerine duyarlıdır. Gerilim modelindeki tahmin işleminde rotor hız bilgisi gerekmez. Dolayısıyla algılayıcısız uygulamalarda ve çok düşük olmayan hızlarda gerilim modeli tercih edilir. Gerilim modelinde ölçülen akım ve gerilim değerlerindeki hatalar integral işleminin doğruluğunu etkiler. Bu hatalar, kullanılan algılayıcılardaki faz gecikmesinden, dönüştürücü kazancındaki hatalardan, ölçüm sistemindeki kaymadan, sayısal sistemdeki kuantalama hatalarından kaynaklanır. Gerilim modelinde stator direncinin sıcaklıkla değişmesi de hataya sebep olur. Çok düşük frekanslarda, stator gerilimi çok küçük olduğundan ve omik gerilim düşümü ile inverter elemanlarının gerilim düşümleri etkili olduğundan integrasyon işlemindeki hata artar [3,4].

Gerilim modelinde, saf integrasyonda hatalar nedeniyle oluşan kaymanın yok edilmesi için alçak geçiren (LP) filtreli bir integratör kullanılır. LP filtre kaymayı yok etmekle birlikte faz ve genlik hatalarına neden olur. Bu nedenle, özellikle filtrenin kesim frekansına yakın bölgede sürücü performansı azalır [2,5,6]. LP filtreli stator akısı tahminini iyileştirmek için çalışmalar yapılmıştır [5,7,8]. Teklif edilen bir yöntem [7], elektromotor kuvveti ile stator akısının ortogonal olmasına dayanan adaptif bir kontrol sistemi kullanmıştır. Adaptif kontrolün uygulanması, basit olan DTC’de kontrol sisteminin karmaşıklığını artırır.

LP filtre ile yapılan stator akısı tahmininde oluşan faz ve genlik hataları kompanzasyon ile giderilebilir ve DTC sürücüsünün kararlı hal performansı iyileştirilebilir. Böylece, LP filtrenin kesim frekansı civarında önemli ölçüde bir iyileşme sağlanır [5,8].

Bu çalışmada, gerilim modelini kullanan LP filtreli gelişmiş bir akı tahmin edici sunulmuştur. LP filtrenin akı tahmin performansını nasıl etkilediği ve uygulamada nasıl tasarlanacağı konusu etraflıca ele alınmıştır. Uygulama sonuçları, LP filtreli gelişmiş bir akı tahmin edici kullanılan DTC kontrollü bir asenkron motor sürücüsünde, çok düşük hızlara kadar kararlı bir kontrol yapılabildiğini göstermektedir.

2.GERİLİM MODELİ İLE AKI TAHMİNİ

Asenkron motorda gerilim modeli ile akı tahmini aşağıdaki eşitlik kullanılarak gerçekleştirilir.

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} \quad (1)$$

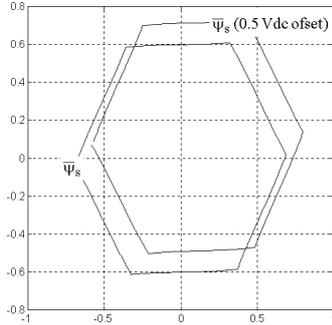
Bu eşitlikte, R_s , \bar{v}_s , \bar{i}_s ve $\bar{\Psi}_s$ sırasıyla statorun direnci ile gerilim, akım ve akı vektörleridir. Stator akısı uzay vektörü, (1) eşitliği kullanılarak,

$$\bar{\Psi}_s = \int (\bar{v}_s - R_s \bar{i}_s) dt \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikte stator akısı hesabı için saf integratör kullanılmıştır. Sinüsoidal sürekli halde bu eşitlik,

$$\bar{\Psi}_s = (\bar{v}_s - R_s \bar{i}_s) / j\omega_e \quad (3)$$

olarak yazılır. Burada ω_e , stator akısının açısal frekansıdır. Kare dalga inverterde saf integratör kullanılarak yapılan stator akısı tahmininde, ölçülen gerilimdeki 0.5V'luk bir kaymanın, bir süre sonra stator akısının yörüngesinde oluşturduğu kayma simülasyonla elde edilerek Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Saf integratörle yapılan akı tahminindeki kayma.

3. LP FİLTRE İLE AKI TAHMİNİ

Akı tahmininde integrasyondan kaynaklanan kayma problemlerini önlemek için, saf integratör yerine LP filtre kullanılır. Alçak geçiren filtre ile (3) eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\bar{\Psi}_s' = (\bar{v}_s - R_s \bar{i}_s) / (j\omega_e + \omega_c) \quad (4)$$

Burada ω_c rad/s cinsinden alçak geçiren filtrenin kesim frekansıdır. (4) eşitliği ile tahmin edilen $\bar{\Psi}_s'$, (3) eşitliğindeki $\bar{\Psi}_s$ 'ye eşit değildir. (3) ve (4) eşitlikleri kullanılarak stator akısı,

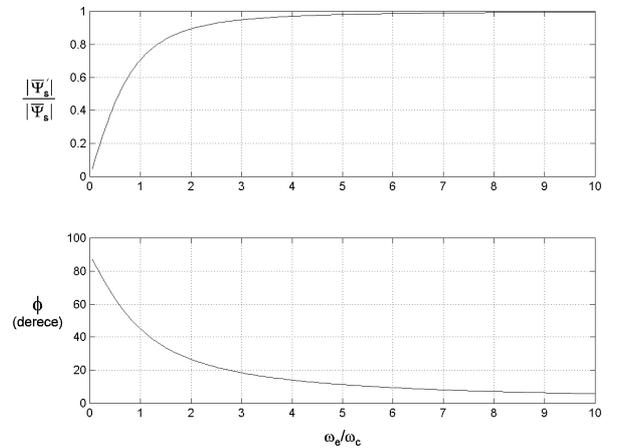
$$\bar{\Psi}_s = \bar{\Psi}_s' - j(\omega_c / \omega_e) \bar{\Psi}_s' \quad (5)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikte $\omega_e \gg \omega_c$ olması durumunda, LP filtreli tahmin edicinin saf integratörlü tahmin ediciye yaklaştığı görülmektedir. Karşılaştırma açısından (5) eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\bar{\Psi}_s'}{\bar{\Psi}_s} \angle(\theta' - \theta) = \frac{\omega_e}{\sqrt{\omega_e^2 + \omega_c^2}} \angle\phi \quad (6)$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\omega_e / \omega_c) \quad (7)$$

Tahmin edilen akı genliğinin gerçek akı genliğine oranı ve her iki akı arasındaki faz farkının değişimleri, Şekil 2'de ω_e / ω_c 'ye bağlı olarak verilmiştir. Kesim frekansı senkron frekansa eşit olduğunda, tahmin edilen akının gerçek akıya oranı $1/\sqrt{2}$ olup açı $\pi/4$ 'tür. Kesim frekansının düşük seçilmesiyle, genlik ve faz hataları azalmakla birlikte tahmin edicinin etkinliği azaldığından, algılanan akım ve gerilimdeki DC kaymalar yok edilemez. Çalışma frekansına yakın bir kesim frekansının seçilmesi, stator akısındaki DC kaymayı azaltmakla beraber, faz ve genlik hatalarına neden olur. Akıdaki faz hatası yanlış gerilim vektörünün seçilmesiyle kontrolün bozulmasına, genlik hatası ise akı ile momentin referans değerinden büyük olmasına ve akıdaki doyma sebebiyle alan zayıflatmanın sağlanamamasına neden olur. Dolayısıyla, LP filtreli tahmin edicinin kesim frekansının, çalışma frekansı ile uyum içinde seçilmesi gerekir [1,5].



Şekil 2. Tahmin edilen ve gerçek stator akısı genliklerinin oranı ile bu akılar arasındaki faz farkı.

4. GELİŞMİŞ STATOR AKISI TAHMİNİ

LP filtre ile tahmin edilen stator akısındaki genlik ve faz hataları, gerilim vektörlerinin seçimini ve dolayısıyla DTC sürücüsünün performansını etkiler. Kararlı halde tahmin edilen akı, gerçek akıdan belirli bir açı kadar önde gider. Faz farkının miktarı, hem kesim frekansına hem de çalışma frekansına bağlıdır. Bu hata, yanlış gerilim vektörlerinin seçilmesine neden olur. Kararlı rejimde tahmin edilen akıda faz ve genlik kompanzasyonları sağlanarak DTC

sürücüsünün performansı iyileştirilir. Gerçek stator akısı LP filtre ile tahmin edilen stator akısı cinsinden ifade edilerek, bu akının sD ve sQ bileşenleri kompanse edilir. Gerçek stator akısı bileşenleri, tahmin edilen akı bileşenleri cinsinden,

$$\Psi_{sD} = \left(\frac{\omega_c}{\omega_e} \Psi'_{sQ} + \Psi'_{sD} \right) \quad (8)$$

$$\Psi_{sQ} = \left(-\frac{\omega_c}{\omega_e} \Psi'_{sD} + \Psi'_{sQ} \right) \quad (9)$$

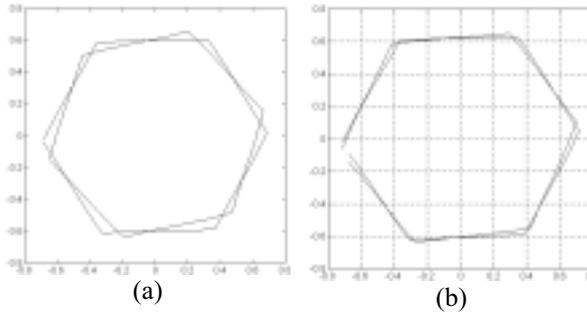
olarak elde edilir. Kompanzasyonu gerçekleştirmek için, alçak geçiren filtrenin ω_c kesim frekansı ve ω_e çalışma frekansının bilinmesi gerekir. Stator akısının ortalama frekansı aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$\omega_e = \frac{\bar{\Psi}_s \times (\bar{v}_s - \bar{i}_s R_s)}{|\bar{\Psi}_s|^2} \quad (10)$$

Uygulamada LP filtre sayısal olarak gerçekleştirilir. Ayrık zamanda saf integratöre bir miktar negatif geribesleme ilave edildiğinde,

$$\bar{\Psi}_s(m) = \sum_{n=0}^m \alpha^n \bar{\Psi}_s(m-n) \quad (11)$$

eşitliği elde edilir. Burada α , filtre kazancı olup 1'den biraz küçüktür ve 1 Hz için 0.999 civarında seçilir. Yüksek frekanslarda, filtre kazancının arttığı düşünülerek α azaltılmalıdır. Analog integratörden farklı olarak, gözlemleyici algoritması çalışma frekansına göre α açısını ayarlayarak optimum performansı gerçekleştirebilir. Sabit frekansla beslenen kare dalga inverterde stator akısını tahmin etmek için kullanılan LP filtreli tahmin edicide, farklı filtre katsayılarının stator akısının yörüngesine etkisi simülasyonla elde edilerek Şekil 3'te gösterilmiştir. Filtre kazancı yüksek ise, gerçek akı ile tahmin edilen akı arasındaki faz farkı azalmakta ve tahmin edilen akının gerçek akıya oranı artmaktadır. Filtre katsayısı ile stator akısının frekansı arasındaki ilişki burada gösterilmemiştir.



Şekil 3. LP filtre ile stator akısı tahmininde, farklı filtre katsayılarının stator akısı yörüngesine etkisi, a) $\alpha = 0.995$ ve b) $\alpha = 0.996$ için.

Gerilim modeline dayanan LP filtreli gelişmiş bir tahmin edici ve bu tahmin edicideki filtre kazancı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\bar{\Psi}'_{s_{k+1}} = \alpha \bar{\Psi}'_{s_k} + (\bar{v}_{s_k} - R_s \bar{i}_{s_k}) T_s \quad (12)$$

$$\alpha = 1 - T_s \omega_c \quad (13)$$

Burada T_s örnekleme süresidir. Uygulamada kesim frekansının,

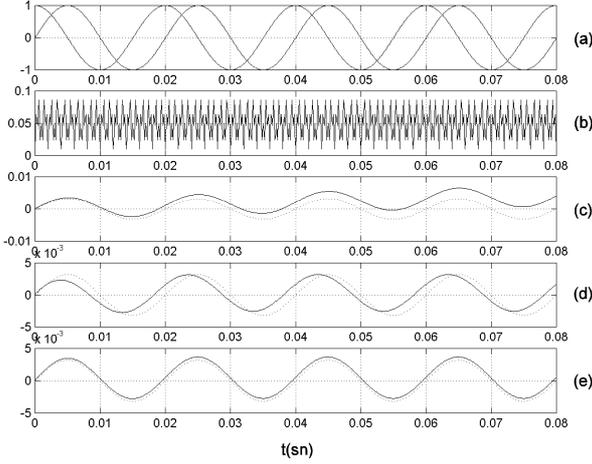
$$\omega_c = \omega_e / 2 \quad (14)$$

olarak seçilmesi, kayma ve gürültü problemini ortadan kaldırmak için yeterli olmaktadır. Kesim frekansı ve filtre katsayısı, her örnekleme periyodunda stator akısı vektörünün ortalama frekansı (10) dikkate alınarak güncellenebilir. Bu işlemten sonra, faz ve genlik kompanzasyonu yapılarak gerçek akı değeri hesaplanır. Böylece, kayma ve gürültü yok edilerek gerçek değere yaklaşılmış olur. (14) eşitliği (8) ve (9)'da yerine konularak aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\Psi_{sD} = 0.5 \Psi'_{sQ} + \Psi'_{sD} \quad (15)$$

$$\Psi_{sQ} = -0.5 \Psi'_{sD} + \Psi'_{sQ} \quad (16)$$

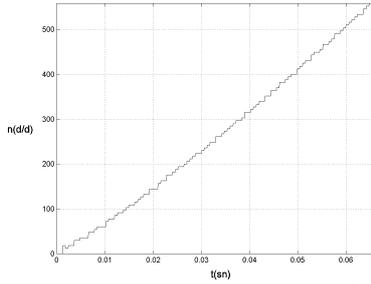
Stator akısı tahmininde, saf integratör, LP filtre ve kompanzasyonun etkisi simülasyonla incelenerek Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4(a)'da, $\bar{e} = \bar{v}_s - R_s \bar{i}_s$ elektromotor kuvvetinin bileşenleri $e_{sD} = \cos(\omega_e t)$ ve $e_{sQ} = \sin(\omega_e t)$ gösterilmiştir. $\omega_e = 314 \text{ rd/s}$ ve $T_s = 100 \mu\text{s}$ alınmıştır. Şekil 4(b)'de, elektromotor kuvveti bileşenlerine eklenecek olan DC ortalama değerli gürültü işareti görülmektedir. Şekil 4'te kesikli çizgi ile gösterilen değişimler, elektromotor kuvvetinin sD bileşeninin integralidir yani gerçek akının sD bileşenini temsil etmektedir. Şekil 4(c)'de, gürültü eklenmiş olan elektromotor kuvvetinin sD bileşeninin saf integrali görülmektedir. Değişimden görüldüğü gibi, elektromotor kuvvetine eklenen gürültünün oluşturduğu DC kayma nedeniyle, saf integrasyon sonucunda zamanla büyük bir kayma birikmektedir. Bu yöntemle yapılan stator akısı tahmini ile sistemin kararlı çalışması gerçekleştirilemez. Şekil 4(d)'deki değişimler, saf integrasyon yerine kesim frekansı $\omega_c = \omega_e / 2$ olan bir filtre kullanıldığında elde edilmiştir. Burada filtre katsayısı $\alpha = 1 - T_s \omega_c = 1 - 100e^{-6} \cdot 314 / 2 = 0.9843$ seçilmiştir. Oluşan faz ve genlik hataları da Şekil 4(d)'de görülmektedir. Tahmin edilen işaret, olması gereken kesikli çizgili işarete göre ileri fazdadır ve genliği bu işareten küçüktür. Şekil 4(e)'de, işaretin faz ve genlik kompanzasyonu sonrası değişimi görülmektedir. Kompanzasyon işlemi (15) ve (16) eşitlikleri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4(e)'deki değişimlerden stator akısının çok küçük bir hata ile tahmin edildiği görülmektedir.



Şekil 4. Filtrenin etkisi, a) elektromotor kuvvetin sD ve sQ bileşenleri, b) elektromotor kuvvetine eklenen gürültü, c) saf integratör çıkışı, d) LP filtre çıkışı ve e) faz ve genlik kompanzasyonu yapıldıktan sonra LP filtre çıkışı.

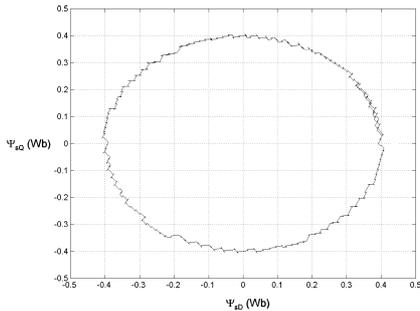
5. DENEYSEL SONUÇLAR

Gerçekleştirilen DTC kontrollü asenkron motor sürücü sisteminde, motora sabit momentle yol verilmesi durumunda hızın değişimi Şekil 5’de verilmiştir. Burada stator akısının frekansı nominal değere doğru artarken, filtre katsayısı (10), (13) ve (14) eşitlikleri kullanılarak güncellenmiştir.

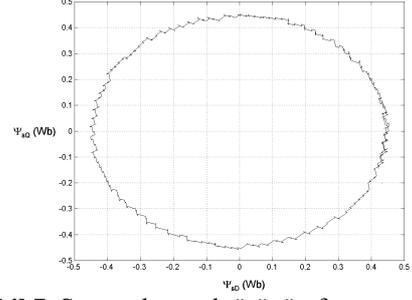


Şekil 5. Motor hızının değişimi.

Şekil 6’de LP filtre çıkışında elde edilen stator akısı vektörünün değişimi görülmektedir. Bu değişimden stator akısının sinüsoidal olarak değiştiği ve DC kaymanın olmadığı görülmektedir. LP filtre ile tahmin edilen stator akısının genlik ve faz hataları kompanzasyon ile giderilmiştir. Kompanze edilen stator akısının değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu iki değişim arasındaki faz ve genlik farkı açıkça görülmektedir. Kontrol algoritmasında stator akısının kompanze edilerek kullanılması, akı ve moment kontrolünde önemli bir iyileşme sağlamıştır.



Şekil 6. LP filtre çıkışında stator akısı vektörünün değişimi.



Şekil 7. Stator akısı vektörünün faz ve genlik kompanzasyonundan sonraki değişimi.

6.SONUÇ

Bu çalışmada, DTC ile kontrol edilen bir asenkron motorda, gerilim modelini kullanan LP filtrelili gelişmiş bir akı tahmin edici incelenmiştir. LP filtre katsayısının stator akısı frekansı ile uyumlu bir şekilde güncellenmesiyle faz ve genlik kompanzasyonu yapıldığında, akı tahmininde oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu tahmin edicinin, yüksek performanslı motor sürücülerinde geniş bir hız aralığında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] D. Casadei, G. Serra ve A. Tani, “Analytical investigation of torque and flux ripple in DTC schemes for induction motors”, Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997, IECON 97, Vol.2, 552-556.
- [2] N. R. N. Idris, A. H. M. Yatim, “Reduced torque ripple and constant torque switching frequency strategy for direct torque control of induction machine”, APEC 2000. Vol.1 , pp. 154 –161, 2000.
- [3] P. L. Jansen ve R. D. Lorenz, “A physically insightful approach to the design and accuracy assesment of flux observers for field oriented IM Drives”, IEEE Trans. Ind. Applications, Vol 30, Jan/Feb.1994, 101-110.
- [4] P. Vas, “Sensorless Vector and Direct Torque Control”, Oxford University Press, 1998.
- [5] X.Yang, ve W.Oghanna, “Fuzzy DTC of induction motor with stator flux estimation compensation”, Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON 97, Vol.2, 505–510.
- [6] T. G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli, ve A. Bettini, “Stator Resistance Tuning in a Stator-Flux Oriented Drive Using an Instantaneous Hybrid Flux Estimator”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.13, No.1, January 1998, 125-133.
- [7] H. Jun, ve H. Bin, “New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux over a Wide Speed Range”, IEEE Trans. on Power Electronics., Vol .3, No.5, September 1998.
- [8] Shin M-H., Hyun D-S., Cho S-B. Ve Choe S-Y., (2000), “An Improved Stator Flux Estimation for Speed Sensorless Stator Flux Orientation Control of Induction Motors”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 15, No. 2, March 2000, 312-318.
- [9] A. F. Bakan ve H. Bodur, “Asenkron Motorda Doğrudan Moment Kontrolünün Gerçekleştirilmesi”, Elektrik – Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 9.Ulusal Kongresi, 19-23 Eylül 2001, Kocaeli, Sayfa 179-182.