

DOĞRUDAN MOMENT KONTROLLU BİR ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜSÜNDE ANAHTARLAMA FREKANSININ İNCELENMESİ

Y.Doç.Dr.A.Faruk BAKAN, Prof.Dr.Hacı BODUR, Doç.Dr.M.Hadi SARUL, A.Gör.İsmail AKSOY

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

fbakan@yildiz.edu.tr, bodur@yildiz.edu.tr, sarul@yildiz.edu.tr, iaksoy@yildiz.edu.tr

Anahtar sözcükler : Doğrudan Moment Kontrolü, Asenkron Motor, Anahtarlama Frekansı

ÖZET

Bu çalışmada, Doğrudan Moment Kontrolü (DTC) yöntemi ile kontrol edilen bir asenkron motor sürücüsünde, inverter anahtarlama frekansının değişmesi incelenmiştir. DTC’de temel kontrol değişkenleri olan moment ve akı, motorun matematiksel modeli kullanılarak tahmin edilir. Tahmin edilen moment ve akı her kontrol periyodunda referans değerler ile karşılaştırılarak, moment ve akı ihtiyacına göre gerilim vektörü belirlenir. Motora uygulanan gerilim vektörünün belirlenmesinde farklı yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerin birçoğu, DTC’nin bazı problemlerini çözmekle birlikte sistemin karmaşıklığını ve parametre bağımlılığını arttırmaktadır. Gerilim vektörünün seçilmesinde kullanılan en temel yaklaşım tablo yöntemidir. Tablo yöntemi basitliği ve parametre değişimlerine karşı dayanıklı olması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda diğer yöntemlere tercih edilir ve temel DTC olarak bilinir. Temel DTC sürücüsünde inverter anahtarlama frekansı, akı ve moment histerezis bantlarına bağlı olarak değişir. Akı ve moment histerezis bantları sabit tutulduğunda, motor hızı, akı ve moment referansı gibi çalışma şartları da anahtarlama frekansını değiştirir. Uygulamada inverter gücü ve soğutucu boyutu, iletim ve anahtarlama güç kayıpları dikkate alınarak seçilir. Önceden belirlenen anahtarlama frekansının aşılması durumunda, histerezis bantları genişletilerek anahtarlama güç kaybı azaltılır. Histerezis bantlarının genişletilmesi kontrol performansının bozulmasına yol açar. Bant genişliklerinin seçimi açısından, moment ve akı histerezis bantlarının anahtarlama frekansına etkisinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada DTC kontrollü bir asenkron motor sürücüsünde inverter anahtarlama frekansının değişmesi incelenmiştir. Teorik analiz, gerçekleştirilen sürücü sisteminden alınan deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır.

1. GİRİŞ

DTC yönteminde koordinat dönüşümü ve akım kontrol döngüleri kullanılmadan, histerezis denetleyicileri ile lineer olmayan dönüşüm yapılarak, akı ile moment ayrıştırılır ve doğrudan kontrol edilir. Yöntemin temel fikri, akı ve momentin ani değerlerini sadece stator değişkenleri kullanarak hesaplamaktır. Gerilim beslemeli inverterde uygun anahtarlama vektörleri seçilerek kontrol sağlanır. DTC yöntemi, yüksek performanslı uygulamalarda alan

yönlendirmeli kontrol (FOC) yöntemine bir alternatif olarak kabul edilmektedir [1,2,3,4].

DTC’de gerilim vektörünün belirlenmesinde farklı yöntemler geliştirilmiştir. Uzay vektör modülasyonu (SVM) ve ölü zaman kontrolünü birleştiren bir çalışmada, kararlı rejimde sabit bir anahtarlama periyodu içinde, stator akısını ve momentini ölü zaman kontrolü ile referans değerlerinde tutan gerilim vektörü önceden tahmin edilmiştir [5]. Temel DTC’de anahtarlama frekansının sabit olmasını sağlayan ve moment dalgalanmasını azaltan bir başka yöntem [6]’da teklif edilmiştir. Bu yöntemde sabit bir T_s kontrol periyodu içinde, aktif vektörün uygulandığı aralıkta momentin artma eğimi, sıfır vektörünün uygulandığı aralıkta momentin azalma eğimi ve aktif vektörün uygulanma süresi, minimum moment dalgalanmasını sağlayacak şekilde hesaplanmıştır. Bir başka çalışmada DTC’nin uzay vektör modülasyonu ve PI denetleyicileri ile birlikte kullanılması teklif edilmiştir [7]. Geliştirilen yöntemler frekansı sabit tutmakla beraber, DTC’nin sağladığı bazı avantajları ortadan kaldırmaktadır. Temel DTC, motor parametrelerine dayanıklılığı ve hesaplama yoğunluğu açısından uygulamalarda bu yöntemlere tercih edilmektedir.

Akı ve moment kontrolü için iki histerezis denetleyicisi ve bir anahtarlama tablosu kullanan temel DTC sürücüsünde, inverter anahtarlama frekansı, akı ve moment histerezis bantlarına bağlı olarak değişir. Akı ve moment histerezis bantları sabit tutulduğunda, motor hızı, akı ve moment referansı gibi çalışma şartları da anahtarlama frekansını değiştirir [7,8,9]. Uygulamada inverter gücü ve soğutucu boyutu, iletim ve anahtarlama güç kayıpları dikkate alınarak seçilir. Önceden belirlenen anahtarlama frekansının aşılması durumunda, histerezis bantları genişletilerek anahtarlama güç kaybı azaltılır. Histerezis bantlarının genişletilmesi ise özellikle düşük hızlarda sistemin kontrol performansının bozulmasına yol açar. Bu nedenle moment ve akı histerezis bantlarının anahtarlama frekansına etkisinin incelenmesi gerekir. Bu çalışmada DTC kontrollü bir asenkron motor sürücüsünde inverter anahtarlama frekansının değişmesi incelenmiştir. Teorik analiz, gerçekleştirilen sürücü sisteminden alınan deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır.

2. DTC'DE ANAHTARLAMA FREKANSI

Temel DTC sürücüsünde durum değişkenleri olarak stator ve rotor akısı seçilirse, asenkron motorun matematiksel modeli aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_s \\ \bar{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & (j\omega_r - \frac{R_r}{\sigma L_r}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_s \\ \bar{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{v}_s \quad (1)$$

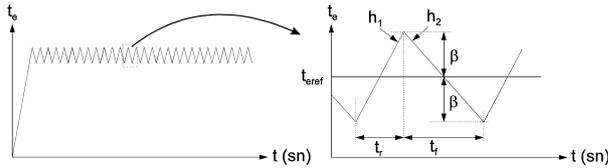
Burada R_s, R_r, L_s, L_r, L_m makine parametreleri olup, ω_r rotor açısal hızı, σ kaçak katsayısı, $\bar{\Psi}_s$ stator akısı, $\bar{\Psi}_r$ rotor akısı ve \bar{v}_s statora uygulanan gerilim vektörüdür. Gerilim beslemeli inverter (VSI) ile beslenen asenkron motorda uygun gerilim vektörleri seçilerek, stator akısı ve moment doğrudan kontrol edilebilir. Gerilim beslemeli inverterde altı adet ($\bar{v}_1 - \bar{v}_6$) ve iki adet sıfır (\bar{v}_0, \bar{v}_7) anahtarlama vektörü mevcuttur [4].

DTC algoritmasında, elektromanyetik moment ve stator akısı kontrol değişkenleri olarak kullanılır. Kontrol sayısal olarak gerçekleştirildiği için, moment ve stator akısı aşağıdaki gibi ayrı ayrı hesaplanır.

$$t_{e_k} = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \text{Im}[\bar{\Psi}_{s_k} \cdot \bar{\Psi}_{r_k}^*] \quad (2)$$

$$\bar{\Psi}_{s_{k+1}} = \bar{\Psi}_{s_k} + (\bar{v}_{s_k} - R_s \bar{i}_{s_k}) T_s \quad (3)$$

Burada T_s örnekleme periyodudur. Şekil 1'de DTC ile kontrol edilen asenkron motorda momentin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1. DTC'de momentin değişimi.

Şekil 1'de görüldüğü gibi motor moment, aktif gerilim vektörünün uygulandığı t_r süresi boyunca h_1 eğimi ile artmakta, sıfır gerilim vektörünün uygulandığı t_f süresinde ise h_2 eğimi ile azalmaktadır. t_r ve t_f sürelerinin, T_s örnekleme periyodunun tam katı olduğu kabul edilir. Histeresis moment denetleyici bandı 2β olarak gösterilir. Çok küçük örnekleme süresi T_s için, $(k+1) \cdot T_s$ anındaki stator ve rotor akıları (1) eşitliği kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\bar{\Psi}_{s_{k+1}} = \bar{\Psi}_{s_k} + \left[\frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \bar{\Psi}_{r_k} - \frac{R_s}{\sigma L_s} \bar{\Psi}_{s_k} + \bar{v}_{s_k} \right] T_s \quad (4)$$

$$\bar{\Psi}_{r_{k+1}} = \bar{\Psi}_{r_k} + \left[\frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \bar{\Psi}_{s_k} + (j\omega_r - \frac{R_r}{\sigma L_r}) \bar{\Psi}_{r_k} \right] T_s \quad (5)$$

Stator akısı eşitliğinde mevcut olan inverter gerilim vektörü, rotor akısı eşitliğinde mevcut değildir. Gerilim vektörünün stator akısına doğrudan etki ettiği, rotor akısına ise stator akısı vasıtasıyla dolaylı olarak etki ettiği (4) ve (5) eşitliklerinden görülmektedir.

Bu iki eşitlik (2) nolu moment ifadesinde yerine konularak ve çok küçük olan T_s 'nin karesi ihmal edilerek, sıfırdan farklı \bar{v}_{s_k} vektörünün T_s süresinde oluşturduğu Δt_e moment artışı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\Delta t_e}{T_s} = h_1 \approx \frac{3P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \text{Im} \left(\left[\bar{v}_{s_k} \cdot \bar{\Psi}_{r_k}^* \right] - j\omega_r \left[\bar{\Psi}_{s_k} \cdot \bar{\Psi}_{r_k}^* \right] \right) \quad (6)$$

Benzer şekilde, sıfır gerilim vektörünün T_s süresinde oluşturduğu $-\Delta t_e$ moment azalması,

$$-\frac{\Delta t_e}{T_s} = h_2 \approx \frac{3P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \text{Im} \left\{ j\omega_r \left[\bar{\Psi}_{s_k} \cdot \bar{\Psi}_{r_k}^* \right] \right\} \quad (7)$$

olarak hesaplanır. (3) eşitliği kullanılarak T_s süresi boyunca stator akısındaki değişim $(k+1)$ örnekleme anında aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$\frac{\Delta \bar{\Psi}_s}{T_s} = \bar{v}_s - R_s \bar{i}_s \quad (8)$$

DTC'de moment histeresis denetleyici bandı ile kontrol edilebilen anahtarlama frekansı, asenkron motor parametrelerine ve çalışma şartlarına bağlıdır. Pozitif ve negatif moment eğimlerinin ortalaması kullanılarak, moment anahtarlama frekansı hesaplanır. Hesaplama, momentin artış aralığında, stator akısını arttırmak ve azaltmak için seçilen vektörlerin (1. bölgede \bar{v}_2 ve \bar{v}_3) sürelerinin eşit olduğu kabul edilir. Momentin azaltılması için ise sıfır gerilim vektörü (\bar{v}_0 veya \bar{v}_7) seçilir. Sıfır gerilim vektörünün seçimi en az anahtarlama sağlayacak şekilde yapılır. Eşitliklerde rotor akısının boşa çalışmadaki değeri olan $\bar{\Psi}_r \approx (L_r / L_m) \bar{\Psi}_s$ ifadesi kullanılarak, ortalama moment eğimleri H_1 ve H_2 aşağıdaki gibi elde edilir.

$$H_1 = \frac{3P}{2} \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} V_{dc} \Psi_{sref} - \omega_r \Psi_{sref}^2 \right) \quad (9)$$

$$H_2 = -\frac{3P}{2} \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \omega_r \Psi_{sref}^2 \quad (10)$$

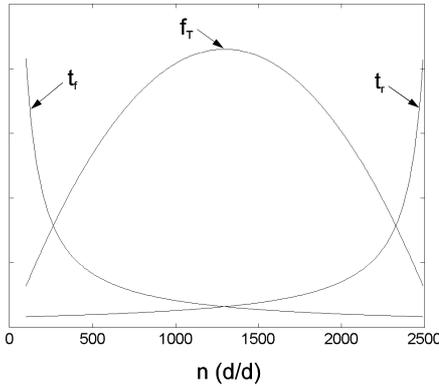
Moment eğimleri, stator akısının referans değeri Ψ_{sref} , rotor açısal hızı ω_r ve DC bara gerilimi V_{dc} 'nin fonksiyonudur. Özellikle motor hızı moment eğiminde etkilidir. Ortalama moment eğimleri H_1 ve H_2 kullanılarak, t_r ve t_f süreleri ve moment anahtarlama frekansı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$t_r = \frac{2\beta}{H_1} = \frac{2\beta}{\frac{3P}{2} \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} V_{dc} \Psi_{sref} - \omega_r \Psi_{sref}^2\right)} \quad (11)$$

$$t_f = \frac{2\beta}{H_2} = -\frac{2\beta}{\frac{3P}{2} \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2 \omega_r \Psi_{sref}^2} \quad (12)$$

$$f_T = \frac{1}{t_r + t_f} \quad (13)$$

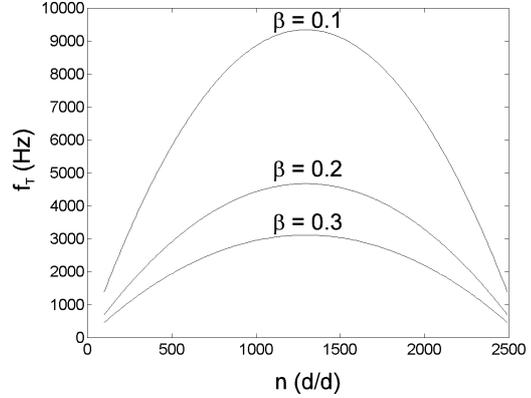
Sayısal olarak gerçekleştirilen denetleyicide, kontrol periyodu t_r ve t_f 'nin tam katı olmadığından, moment belirlenen histerezis bandının dışına taşabilir. Kontrol periyodu büyük seçilirse anahtarlama frekansı düşer fakat fazla taşma oluşur. Düşük hız bölgesinde t_r süresi ve yüksek hız bölgesinde t_f süresi çok küçük değerler almaktadır. Momentin istenilen bant içinde kalması için kontrol periyodunun $25 \mu s$ 'nin altında olması tavsiye edilmiştir [1]. Yükselme ve düşme süreleri ile moment anahtarlama frekansının devir sayısına bağlı değişimi simülasyon ile elde edilerek Şekil 2'de gösterilmiştir.



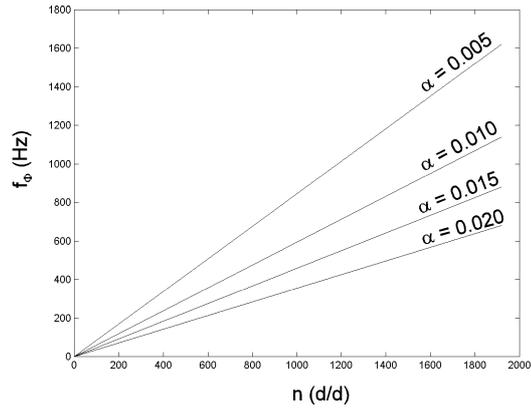
Şekil 2. Moment anahtarlama frekansı ile yükselme ve düşme sürelerinin devir sayısına bağlı değişimleri.

Moment anahtarlama frekansı f_T 'nin değişimi farklı β bant genişlikleri için simülasyon ile elde edilerek Şekil 3'te verilmiştir. Bu şekilde, f_T 'nin motor hızına bağlı olarak değiştiği ve orta hız aralığında maksimum değerine ulaştığı görülmektedir. Motorun orta hız bölgesini stator akısının referans değeri ve DC bara gerilimi belirler. Akı anahtarlama frekansının α akı bandına göre değişimi simülasyon ile elde edilerek Şekil 4'te verilmiştir.

İnverter anahtarlama frekansı, moment ve akı anahtarlama frekanslarının toplamıdır. Eğer inverter anahtarlama frekansı maksimum frekansı aşarsa, moment ve akı histerezis bant genişliklerinin artırılarak anahtarlama kayıplarının azaltılması gerekir.



Şekil 3. Moment anahtarlama frekansının, moment bandı β ve hıza göre değişimleri.

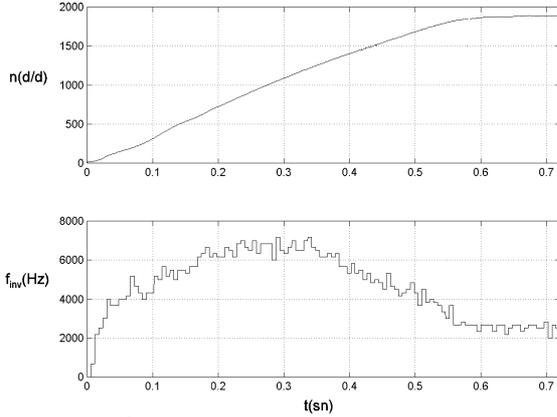


Şekil 4. Akı anahtarlama frekansının akı bandı α ve hıza göre değişimleri.

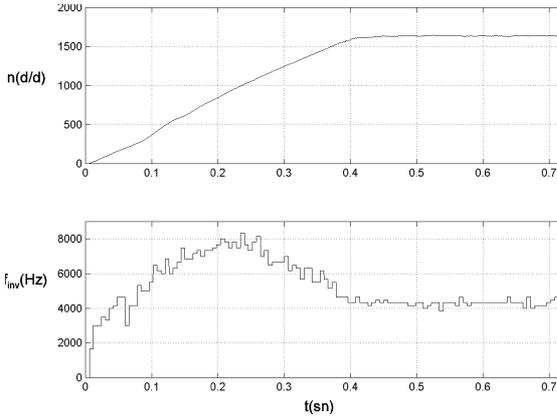
3. DENEYSEL SONUÇLAR

Laboratuvarda gerçekleştirilen DTC kontrollü asenkron motor sürücü sisteminde, hız, moment ve akı bant genişliklerine bağlı olarak inverter anahtarlama frekansının değişimi incelenmiştir. Teorik olarak incelenen inverter anahtarlama frekansının değişimi, uygulama sonuçları ile doğrulanmıştır. İnverter anahtarlama frekansının ölçülmesi, yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Bunun için, her kontrol periyodunda gerilim vektörünün bir önceki vektörden farklı olup olmadığı kontrol edilmiş ve farklı olduğunda sayıcı bir artırılmıştır. Frekansın ölçülmesi $1.2 ms$ 'de bir gerçekleştirilmiş ve her periyod başında sayıcı sıfır yapılmıştır. Gerilim vektöründe bir değişiklik olması, çoğunlukla inverterdeki bir faza ait elemanlardan birinin ilettime girmesi ve diğerinin iletimden çıkmasına karşılık gelir. Bu esnada diğer fazlara ait elemanlar konum değiştirmez. Dolayısıyla ortalama anahtarlama frekansı gerilim vektöründeki değişme sayısının altıda biridir. Deneysel olarak frekansın ölçülmesi esnasında, motora sabit moment

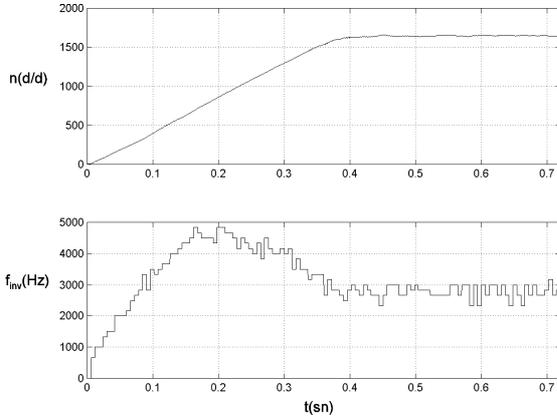
referansı ile yol verilerek, devir sayısının zamana göre lineer olarak artması sağlanmıştır. Moment referansı 2 Nm, akı referansı 0.5 Wb ve kontrol periyodu 60 μ s seçilmiştir. Kontrol periyodunun büyük seçilmesi anahtarlama frekansının çok yüksek değerler almasını önlemiştir. Bu durumda, momentin histerezis bandının dışına çıkmasına izin verilmiş olur. Moment ve akı bant genişliklerinin farklı değerleri için, motor devir sayısı ve inverter anahtarlama frekansının değişimleri Şekil 5-7’de verilmiştir.



Şekil 5. $\beta = 0.05$ ve $\alpha = 0.02$ için, hız ve inverter anahtarlama frekansı değişimleri.



Şekil 6. $\beta = 0.05$ ve $\alpha = 0.01$ için, hız ve inverter anahtarlama frekansı değişimleri.



Şekil 7. $\beta = 0.5$ ve $\alpha = 0.01$ için, hız ve inverter anahtarlama frekansı değişimleri.

Değişimlerden, moment bant genişliğinin küçük seçilmesi ile anahtarlama frekansının arttığı ve yüksek hızlarda akı bant genişliğinin anahtarlama frekansı üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. İnverter anahtarlama frekansı orta hız bölgesinde maksimum olmaktadır.

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada DTC’de anahtarlama frekansının değişimi incelenmiştir. DTC’de moment ve akı histerezis bantlarının genişliği ile kontrol periyodu, sürücü sisteminin performansını belirlediği gibi, inverter anahtarlama frekansını da büyük ölçüde etkilemektedir. Bant genişliklerinin seçilmesi, önceden belirlenen anahtarlama frekansı aşılmayacak şekilde yapılmalıdır. Bu maksimum anahtarlama frekansın aşılması durumunda, kontrol performansından bir miktar taviz verilerek bant genişliklerinin artırılması gerektiği, bunun için düşük hızlarda sadece moment bant genişliğinin ve yüksek hızlarda ise moment ve akı bant genişliklerinin birlikte artırılmasının daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] P. Tiitinen, “The next generation motor control method, DTC direct torque control”, Proc. of Int. Conf. on Power Electronics, India, 8-11 Jan., 1996.
- [2] J. N. Nash, “Direct torque control, induction motor vector control without an encoder,” IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 33, pp. 333–341,1997.
- [3] M. P. Kazmierkowski and A. B .Kasproicz, “Improved direct torque and flux control of PWM inverter-fed induction motor drives”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 42, No.4. Aug 1995.
- [4] 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.
- [5] T. G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli, and L. M. Tolbert, “Direct Torque Control of Induction Machines Using Space Vector Modulation”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.28, No.5, September-October 1992, 1045-1053.
- [6] J. Kang, and S. Sul, “New DTC of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.35, Num:5 , Sept.-Oct. 1999, 1076–1082.
- [7] C. Lascu, I. Boldea, and F. Blaabjerg, “A modified DTC for induction motor sensorless drive”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.36, Num:1, Jan.-Feb. 2000, 122–130.
- [8] J. Kang, and S. Sul, “Analysis and prediction of inverter switching frequency in DTC of induction machine based on hysteresis bands and machine parameters”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.48, Num.3, June , 2001, 545-553.
- [9] 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.