

DOĞRUSAL HAREKETLİ ASENKRON MOTORDA UÇ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Emre ÖZKOP¹

Adem Sefa AKPINAR²

^{1,2} Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi

Karadeniz Teknik Üniversitesi, 61080, Trabzon

¹e-posta: eozkop@ktu.edu.tr

²e-posta: akpinar@ktu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Doğrusal Hareketli Motor, Uç Etkisi, LIM, Uç Etki Faktörü

ABSTRACT

This paper presents investigation of end effects in a Linear Induction Motor (LIM). LIMs have been used nearly for 165 years. There are a lot of utilization places of LIM. One of the big differences between LIM and traditional induction motor is end effects. The end effects affect fairly LIM's efficiency by bad way. While a mathematical model of LIM is obtained, the end effects in LIM should be taken account. The end effects in fast LIM are bigger than the end effects in slow LIM.

1. GİRİŞ

Yaklaşık 165 yıllık geçmişi bulunan Doğrusal Hareketli Motorlar (DHM), teknolojinin hızlı gelişmesi ve ihtiyaçların farklı boyutlara kayması ile hayatımızda kapladığı alan gün geç tikçe artmaktadır. 1890'larda dokuma tezgahının mekik sürücü olarak kullanılmış, 1900 ile 1940 arasında tekstil sanayinde doğrusal hareketli makine kullanımı büyük bir oranda artmıştır. Bunun en önemli sebeplerinden biri bu tip makinanın daha ucuz olmasıydı. Bu tarihler arasında doğrusal hareketli makinalar farklı uygulama alanlarında hayata geçirilmeye çalışılmış ama maliyetin fazla olması gibi dezavantajlarının ağır basmasından dolayı tekstil sanayinde olduğu gibi bir ilgi duyulmamıştır.

Günümüzde DHM'lu sistemlere rastlamaktayız; tren, yürüyen merdiven, spor aleti, asansör, CD-rom, kaldıraç, yazıcı, fotokopi makinası, robot...v.b.

Bu yazının amacı, doğrusal hareketli asenkron motor (DHAM) da uç etkilerinin incelenmesidir.

2. UÇ ETKİSİ

DHAM'ların primer ve sekonderlerinin uzunlukları sınırlıdır. Bu yüzden dönen tip makinelerde ortaya çıkmayan, bazı bozucu etkiler ortaya çıkar. Bunlardan bir tanesi enine uç etkisi ve boyuna uç etkisidir. Bu uç

etkileri motor boyunca manyetik akı dağılımını bozar. DHAM'un giriş kısmındaki uç etkileri yüksektir.

Primerde oluşan uç etkisi, hareket doğrultusunda ve her iki uça meydana gelir. Primer itme etkisi ile sürekli bir doğrusal hareket halindedir. Bu hareket sırasında, sekonderin bir kısmı primer altına girerken, bir kısmı da primer etkisinden uzaklaşmaktadır. Böylece primerin uç kısımlarındaki sekonder bölgelerinde bir akı değişimi oluşur [15-18]. Günümüze kadar DHAM'larda uç etkisi üzerine yapılan çalışmaları şu şekilde özetleyebiliriz:

Gieras (1986) ve arkadaşları, çift katlı tepki levhali Tek Yanlı Doğrusal Hareketli Asenkron Motor (TYDHAM)'un performans hesabını yaptılar ve boyuna uç etkisini hesaba kattılar. Boyuna uç etkisinin hesabı için dört yöntem ortaya koydular:

1. Uyarım ve hareket eden alanların süperpozisyonu yöntemi.
2. İki uç etki dalgası ile yürüyen dalganın senkron hızda süperpozisyonu yöntemi.
3. TYDHAM'un periyodik dağılım varsayımı ve Fourier serisi ile bileşke ortam (uzay) harmoniklerinin ifade edilmesi yöntemi.
4. T türü eşdeğer devrenin ortak empedans karşı düşen elektro motor kuvvetinin düzenlenmesi yöntemi.

Son teknik en iyi sonucu verdiği, analitik ve hesapsal olarak en basiti olduğunu öngördüler [1].

Nonaka (1987) ve arkadaşı, DHAM'un uç etkisi hesaba katılarak Genişletilmiş Fourier serisine dayanan, Uzay Harmonik Tekniğini kullanarak Basitleştirilmiş İki Boyutlu Analizi gerçekleştirdiler. Bu yöntem ile uç etkisinin sistem üzerinde oluşturduğu durumun ortaya konulmasını basitleştirdiğini vurguladılar [2].

Nonaka (1987) ve Higuchi, TYDHAM'un primer çekirdeğini, tasarımında uç etkilerini azaltmak ve sekonder tepki rayının maliyetini azaltmak için uzun

dar ve ince tasarladılar. Uç etkisinin nispeten düşük hız uygulamalarında ciddi olmadığı belirttiler. Esasında uç etkisini azaltmak için motor uzunluğu mümkün olduğunca uzun yapılması gerektiğini vurguladılar [3].

Furukawa (1987) ve arkadaşları, DHAM'un Sonlu Elemanlar Metodu ile analizi yaptılar. Yaptıkları çalışmada, kayma değeri büyüdükçe uç etkisinin azaldığını, küçüldükçe arttığını, böylelikle DHAM'un hızı arttıkça sistem üzerinde uç etkisi artmakta, hızı azaldıkça uç etkisi azalmakta olduğunu ortaya koydular [4].

Fujii (1999) ve arkadaşları, DHAM'un analizinin geçerli olabilmesi için uç etkilerini hesaba katılması ve Fourier serisi tekniği kullanılması ile oluşturulan sargı düzeninin (teknikinin) doğrulanması gerektiğini vurguladılar [5].

Mori (1999) ve arkadaşları, DHAM performansının, uç etkisinin nüfuz etmesinden dolayı azaldığını belirttiler. DHAM uç etkilerinin analizinde Dalgacık dönüşüm tekniği ve Fourier serisi kullandılar. DHAM'un primer kısmının sonlu uzunlukta olması uç etkisini ortaya çıkmasına sebebiyet verdiğini öngördüler [6].

Fujii (1999) ve Harada, merdiven tipi DHAM'da uç etkisinin fiziksel olgusu, yapılan yapısal özelliğin kullanılması ile sekonder taraftan gözlemlenildi. Tokyo ve Osaka metropol şehirlerde yer altı sistemlerinde DHAM'ların kullanıldığı, bu sistemlerde sistem çalışırken enerjini tüketiminin fazla olması bir büyük sorun olduğu, yüksek performans elde edilebilmesi için uç etkilerinin azaltılması konulu çalışmaların çok önemli olduğunu, yaprak tip sekonderli DHAM'larda hava boşluğu içindeki uç etkisi konusunda birçok makale çalışması yapıldığını belirttiler [7].

Ahn (2000) ve arkadaşları, motor yapısından kaynaklanan statik uç etki olgusu ile ilgili analizi ele aldılar. Bu analizde, sonlu eleman bölgesinde gerilim denklemleri yerine statik uç etkisinden etkilenen primer akı bağıntısının hesaplanabileceğini belirttiler [8].

Fujii (2000) ve Harada, DHAM'un primer çekirdeğinin önüne yerleştirilmiş olan mıknatis rotoru, DHAM uç etkisini telafi edici (azaltıcı) olarak önerdiler. Uç etkisini etkili bir şekilde kompanze etmenin enerji tüketimini en aza indirmede anahtar oluşturduğunu, eğer bu sorun çözülebilirse DHAM'un yüksek hızlarda yaygın bir şekilde kullanılmasının yolu açılmış olacağını öngördüler. Dr. Yamamura uç etkilerinin ortadan kaldırılması için önceden bir metot önermiş olduğunu, bu metodun 70kVA ve 100kVA kapasiteli test cihazlarında hem teorik hem de uygulamada kullanılmış olduğunu ve Yamamura metodunda; temel sarımın, uç etkisini kompanze edebileceğini belirtti. Küçük kaymalarda, tasarlanan küçük uç etkili sistem için mıknatis rotorlu DHAM'un itmesinin %45 arttığını vurguladılar [9].

Faiz (2000) ve Jafari, motor tasarımını ve analizini zorlaştıran boyuna uç etkisinin ve kenar etkisinin bu

tür makinelerin iki önemli elektro mekanik olgusu olduğunu, boyuna uç etkisinin karmaşık ve motor performansında etki sahibi olduğu vurguladılar. Değişik analiz yöntemlerinin tasarlanmış olduğu ve bunların:

1. İki senkronize ve titreşimli dalganın süperpozisyonu,
2. Senkronize ve uç dalgalarının süperpozisyonu,
3. Fourier katman metodu.

olduğunu ve üçüncü metodun daha iyi sonuçlar verdiğini belirttiler [10].

Mirsalim (2002) ve arkadaşları, İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile eşdeğer devre parametreleri hesaplanmakta olduğunu, Sonlu Elemanlar Yöntemi; elde edilen parametreleri Duncan modelinde kullanarak uç etkisinin hesaba katılması sağlandığını belirttiler. Duncan modeli ile elde edilen sonuçların uç etkili deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğunu öngördüler [11].

Fujii (2002) ve arkadaşları, DHAM'u için yeni bir uç etki kompensatörü önerdiler ve DHAM'un çalışma kayması ile girdap akımı adımının ayarlanmadan sadece DHAM'un önünde DHAM frekanslı girdap akım senkronizasyonu sağlanmasıyla uç etkisinin kompanze edilmesini amaçladılar. Teori, mıknatis rotator tipi ve alternatif akım bobin kompensatör tipi modeller ile analitik olarak teyit edilmiş ve sabit dönen hızlı ve sabit manyeto motor kuvvetli basit model yerine mıknatis rotator tarafından kompanze edilen kayma karakteristiğinin daha düzgün olduğunu öngördüler. DHAM ye ait uç etkili ve uç etkisi kompanze edilmişli itme, verim ve akı dağılımlarını ortaya koydular [12].

Kang (2003) ve arkadaşları, DHAM uç etkilerinin hesaba katılmadığı, dolayısıyla DHAM modelinin DÖHAM modeli ile aynı olduğunu belirttiler. 18Hz den düşük frekanslarda uç etkisinin ihmal edilebileceğini öngördüler [13].

Jamali (2003), Döner Elektrik Makinelerinde ve DHAM'larda uç etkisini inceledi. Hareket yönünde demir çekirdeğin (stator, duran bölge) sınırlı uzunlukta olması DHAM'da uç etkisinin sebebi olduğunu, sekonder demir çekirdekten ayrılırken sekonderin çıkış kenarında en çok uç etkisi meydana geldiğini vurguladı [14].

2.1. k_e Uç Etki Faktörü

Uç etki faktörü aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$e = -E_s (1 - k_e) \cos \omega t \quad (1)$$

$$k_e = \frac{E_1}{E_s} \quad (2)$$

Uç etki faktörü k_e ile ilgili denklem takımları elde edebilmek için aşağıdaki kabuller yapılır.

- a. $2p\tau_e$ kadar mesafeden sonra uç etkisi dalgası etkin değer olarak sıfırdır.
- b. Bütün manyetik ve elektriksel ifadeler zamanla değişen sinüzoidal değerlerdir.

- c. v_o 'a kadar olan hızlarda ($0 \leq v_o \leq v_s$) uç etkisi dalgası primerde gerilim indüklememektedir.
d. $\alpha \rightarrow \infty$ ve $\tau_e = \tau$ limitlerinde giriş ucu etki dalgası senkron hızlı dalgayı yok etmektedir.
e. Her fazdan geçen akı miktarı aynıdır.

Kabul (a), uç etkisi dalgasının x eksenı boyunca zor sönümlenmesine dayanmaktadır. Kabul (b)'de belirtilen ifadelerle rağmen uygun dönüşümler yapılarak manyetik ve elektromotor kuvveti gibi değerler sinüzoidal olmayan ifadeler elde edilebilir. Kabul (c), düşük hızlı DHAM'larda uç etkisinin çok az etkili olacağını belirtmektedir. Kabul (d) ile bir sınır koşulu ortaya koyulmuştur. Kabul (e), her fazda aynı elektromotor kuvvetinin indüklendiğini vurgulamaktadır.

Uç etki dalgası için uç etki faktörü ise,

$$k_{we} = \frac{\sin(\frac{\tau\pi}{2m\tau_e})}{q \sin(\frac{\tau\pi}{2mq\tau_e})} \sin(\frac{\pi w_e}{2\tau_e}) \quad (3)$$

Burada kullanılan τ_e kutup adım aralığı ve α_1 etki mesafesi Yamamura tarafından bulunan ifadeler ile belirlenebilir.

$$\tau_e = \frac{2\pi}{Y} \quad (4)$$

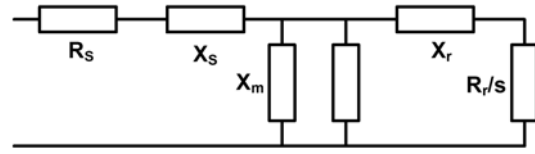
$$\alpha_1 = \frac{2\rho_s g}{\rho_s g X - \mu_o v} \quad (5)$$

$$X = \sqrt[4]{\left(\frac{\mu_o v}{\rho_s g}\right)^4 + \left(\frac{4\omega\mu_o}{\rho_s g}\right)^2 \cos\left(0.5 \tan^{-1}\left(\frac{4\omega\rho_s g}{\mu_o v^2}\right)\right)} \quad (6)$$

$$Y = \sqrt[4]{\left(\frac{\mu_o v}{\rho_s g}\right)^4 + \left(\frac{4\omega\mu_o}{\rho_s g}\right)^2 \sin\left(0.5 \tan^{-1}\left(\frac{4\omega\rho_s g}{\mu_o v^2}\right)\right)} \quad (7)$$

3. YAPILAN İRDELEME

Bir matematiksel model oluşturulurken DHAM'un sonlu yapısı nedeniyle ortaya çıkan uç etkileri hesaba dahil edilmelidir. DHAM'u dönme hareketi yapan asenkron motordan ayıran en önemli özellik olan uç etkisi, motorun performansı üzerinde oldukça etkilidir. Bu çalışmada, uç etkisi hava aralığında zayıflayarak sönen bir hava aralığı alanı olarak değerlendirilmiş, bu hava aralığı alanı indüktans olarak benzetilmiş ve bu indüktanslar uygun metotlar ile hesaplanıp DHAM geçici çözüm modeline, değişken değerli bir indüktans olarak katılmıştır. Bir DHAM un uç etki faktörü katılarak ortaya koyulan matematiksel modelinden faydalanarak değişik hızlarda DHAM un çalışma karakteristiğini elde edilebilir. Uç Etkisini içeren eşdeğer devre aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. DHAM un uç etkisini içeren eşdeğer devre

Sistem parametreleri aşağıda verilmiştir.

$$R_s = 7.2\Omega, X_s = 9.26\Omega, X_r = 0\Omega, R_r = 2.68\Omega$$

$$Z_e = 16.55\Omega, V_{g(faz-faz)} = 60V, m = 8kg, \tau = 0.099m$$

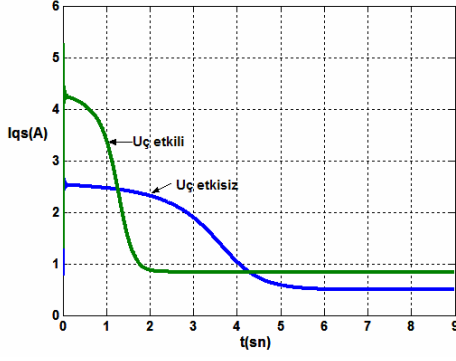
$$f_r = 50Hz$$

DAHM'un uç etki faktörü hesaba katılarak elde edilen matematiksel modele ait denklemler aşağıda verilmiştir.

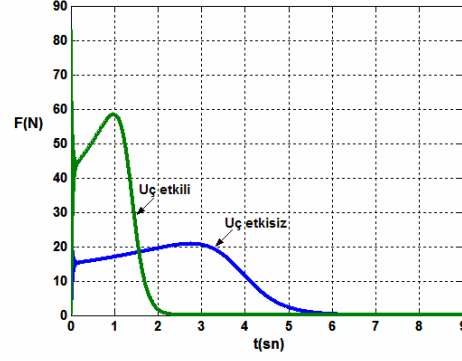
Elde edilen sistem parametre değerleri belirtilen matematiksel model içerisinde kullanılarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s L_r - M^2} \begin{bmatrix} -L_r r_s & [M^2(\omega_e - \frac{\pi}{\tau} V_r)] & M_r & -ML_r \frac{\pi}{\tau} V_r \\ -[M^2(\omega_e - \frac{\pi}{\tau} V_r) - L_r L_s \omega_e] & -L_r r_s & L_r M \frac{\pi}{\tau} V_r & M_r \\ M r_s & ML_s \frac{\pi}{\tau} V_r & -L_s r_r & [M^2 \omega_e - L_s L_r (\omega_e - \frac{\pi}{\tau} V_r)] \\ -L_s M \frac{\pi}{\tau} V_r & M r_s & -[M^2 \omega_e - L_s L_r (\omega_e - \frac{\pi}{\tau} V_r)] & -L_s r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

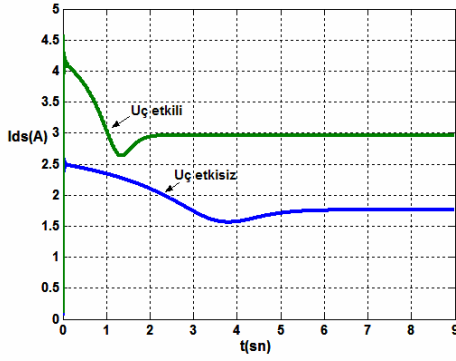
$$+ \frac{1}{L_s L_r - M^2} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -M \\ -M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix}$$



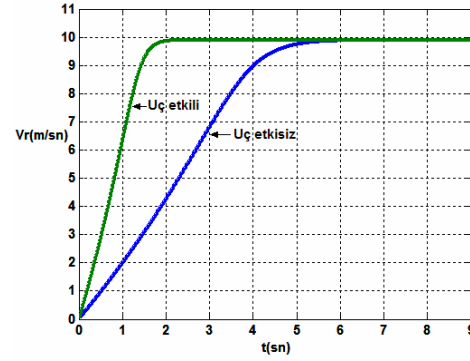
Şekil 2. DHAM'un senkron hızla dönen d-q eksen sisteminde I_{qs} akımının zamanla değişimi



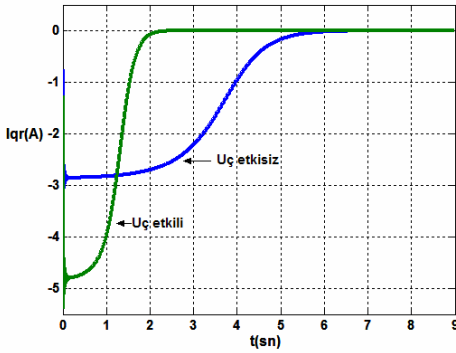
Şekil 6. DHAM'un senkron hızla dönen d-q eksen sisteminde itmenin zamanla değişimi



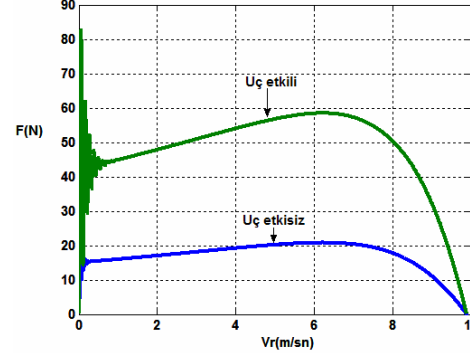
Şekil 3. DHAM'un senkron hızla dönen d-q eksen sisteminde I_{ds} akımının zamanla değişimi



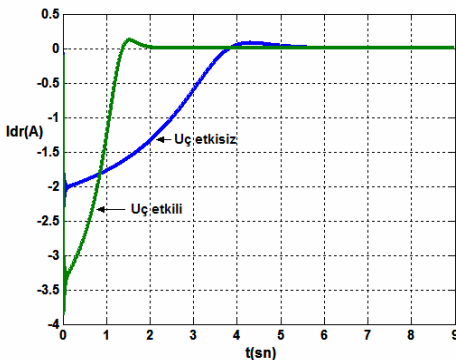
Şekil 7. DHAM'un senkron hızla dönen d-q eksen sisteminde hızın zamanla değişimi



Şekil 4. DHAM'un senkron hızla dönen d-q eksen sisteminde I_{qr} akımının zamanla değişimi



Şekil 8. DHAM'un senkron hızla dönen d-q eksen sisteminde itmenin hıza bağlı değişimi.



Şekil 5. DHAM'un senkron hızla dönen d-q eksen sisteminde I_{dr} akımının zamanla değişimi

4. DEĞERLENDİRME

Araştırma ve deneyler sonucunda uç etkisinin DHAM performansı üzerinde dikkate değer olumsuzlukları olduğu özellikle de yüksek hızlı DHAM'ların performanslarını olumsuz yönde etkilediği vurgulanmıştır.

DHAM'un performansına ve karakteristiğine tesir eden kutup sayısı, hava aralığı genişliği, frekans, sekonder direnci ve kutup arası açıklığı gibi birçok faktör aynı zamanda uç etkisiyle ilgilidir:

1. Kutup sayısının çok olması zararlı uç etkinin daha fazla etkin olduğu kayama aralığını daraltır.
2. Yüksek sekonder direnci giriş uç etkisi dalgasının yayılma mesafesini bozar.

3. Büyük hava aralığı, giriş uç etkisi dalgasının yayılma mesafesini azaltarak zararlı uç etkisini hafifletir. Ancak büyük hava aralığı, uç etkisi olmayan motorun performansı bozar.
4. Hava aralığı genişliği ve sekonder yüzey direnci aynı karakterde olup uç etkisine aynı oranda tesir ederler.
5. Güç kaynağının daha yüksek frekanslarda olması uç etkisi dalgasının yayılma mesafesini azaltır. Böylece empedansın artıp performansın azalmasına rağmen zararlı uç etkisi hafifler.

Yukarıda verilen maddeler yüksek hızlı DHAM'lardaki uç etkisini hafifletmeye yönelik tedbirler olup uç etkisi altında olmayan normal motor performansını azaltır. Bu sebeple uygun motor tasarımı yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Jacek F. Gieras, Graham E. Dawson, Anthony R. Eastham, Performance Calculation for Single-Sided Linear Induction Motors with a Double-Layer Reaction Rail Under Constant Current Excitation, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-22, No. 1, pp.54-62, January 1986.
- [2] S. Nonaka, N. Fujii, Simplified Two-Dimensional Analysis of Linear Induction Motors, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-23, No. 5, pp.2832-2834, September 1987.
- [3] S. Nonaka, T. Higuchi, Elements of Linear Induction Motor Design for Urban Transit, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-23, No. 5, pp.3002-3004, September 1987.
- [4] Tatsuya Furukawa, Kokichi Ogawa, Sakutaro Nonaka, Finite Element Analysis of Eddy Currents Problem Subject to Convective Diffusion Equation, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-23, No. 5, pp.2660-2662, September 1987.
- [5] Nobuo Fujii, Masashi Fujitake, Two-Dimensional Drive Characteristics by Circular-Shaped Motor, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No.4, pp.803-809, July/August 1999.
- [6] Yoshihiko Mori, Susumu Torii, Daiki Ebihara, End Effect Analysis of Linear Induction Motor Based on the Wavelet Transform Technique, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp.3739-3741, September 1999.
- [7] N. Fujii, T. Harada, A New Viewpoint of End Effect of Linear Induction Motor from Secondary Side in Ladder Type Model, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp.4040-4042, September 1999.
- [8] Sung Chan Ahn, Jr., Jung Ho Lee, Dong Seok Hyun, Dynamic Characteristic Analysis of LIM Using Coupled FEM and Control Algorithm, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 4, pp.1876-1880, July 2000.
- [9] N. Fujii, T. Harada, Basic Consideration of End Effect Compensator of Linear Induction Motor for Transit, 0-7803-6401-5/00/\$10.00/2000 IEEE.
- [10] Jawad Faiz, H. Jafari, Accurate Modeling of Single-Sided Linear Induction Motor Considers End Effect and Equivalent Thickness, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 5, pp. 3785-3790, September 2000.
- [11] M. Mirsalim, A. Doroudi, J. S. Moghani, Obtaining the Operating Characteristics of Linear Induction Motors: A New Approach, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 1365-1370, March 2002.
- [12] N. Fujii, T. Kayasuga, T. Hoshi, Simple End Effect Compensator for Linear Induction Motor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 5, pp. 3270-3272, September 2002.
- [13] Gubae Kang, Junha Kim, Kwanghee Nam, Parameter Estimation Scheme for Low-Speed Linear Induction Motors Having Different Leakage Inductances, IEEE Transactions on Industrial Electronics on Industrial Electronics, Vol. 50, No. 4, pp.708-716, August 2003.
- [14] Jan Jamali, End Effect in Linear Induction and Rotating Electrical Machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 3, pp. 440-447, September 2003.
- [15] Gieras, J. F., Linear Induction Drives, Clarendon Pres, Oxford, 1994.
- [16] Nasar, S. A. ve Boldea, I., Linear Motors: Theory, Design and Practical Applications, Prentice- Hall, Inc., New Jersey, 1987.
- [17] Nasar, S. A. ve Boldea, Linear Motion Electric Machines, John Wiley&Sons, ISBN 0-471-63029-2, 1976.
- [18] Laithwaite, E. R., Linear Electric Motors, Mills&Boon Limited, London, 1971.