

ASİMETRİK İKİ FAZLI KISA DEVRE ROTORLU ASENKRON MAKİNANIN MODELLENMESİ VE SİMULASYONU

ERFİDAN T., ERFAN F.,

Kocaeli Üniversitesi Müh. Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü, 41010, Kocaeli
tarik.@kou.edu.tr erfana@kou.edu.tr

Özet- Bir fazdan beslenen iki fazlı asimetrik asenkron makina, endüstride ve ev uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İki fazlı asenkron makinalar, daha az gürültü, moment ve hız salınımları ile geleneksel motorlardan daha iyi performans gösterirler. Bu çalışmada kısa devre rotorlu asimetrik iki fazlı asenkron makinanın dinamik davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Simetrik park dönüşümü, modelleme, iki fazlı Asenkron Motor, referans eksen takımı, durum uzay modeli

I. GİRİŞ

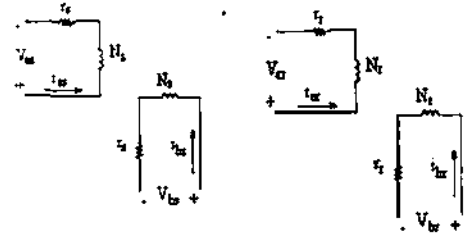
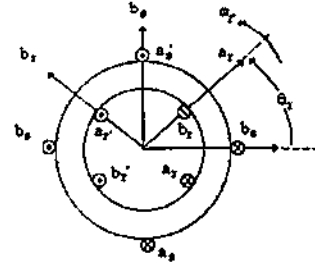
Senkron makinaların analizinde olduğu gibi, asenkron makinaların analizinde de modern kontrol teorisi ve durum uzayı yaklaşımı son yıllarda kullanılan en yaygın ve etkin yöntemlerden birisidir. Modern kontrol teorisi, sistem tasarımı ile analizi zaman domeninde gerçekleştirilir ve bu amaç için de bilgisayardan yararlanır. Durum uzayı yaklaşımının kullanılması ile lineer olmayan ve zamanla değişken parametrelili sistemlerin, ilk koşulları ile birlikte matematik modelleri kurulup, buradan da sayısal simülasyona geçilebilir. *Asenkron makinanın durum uzayı modelinin* kurulmasında, zamanla değişken katsayılı diferansiyel denklemlerden kurtulmak için simetrik park dönüşümü kullanılmaktadır.

II. MAKİNANIN ELEKTRİKSEL VE MEKANİKSEL UÇ DENKLEMLERİNİN YAZILMASI

İki fazlı, iki kutuplu asimetrik asenkron makinanın stator sargıları uzay düzleminde birbirinin eşdeğeri olmayan sargılardan oluşmaktadır. Stator, a sargısının sarım sayısı N_s ve iç direnci R_s , b sargısının sarım sayısı N_s ve iç direnci R_s ' tir. Rotor sincap kafesli olduğundan eşdeğer sargılardan oluştuğu düşünülmektedir. Herbir rotor sargısının sarım sayısı N_r ve iç direnci R_r ' dir. Şekil 1.' e göre makinanın elektriksel uç denklemleri yazılacak olursa [2],[3]:

$$[V_{sab}(t)] = [R_s] \cdot [i_{sab}(t)] + \frac{d[\psi_{sab}]}{dt} \quad (1)$$

$$[V_{rnb}(t)] = [R_r] \cdot [i_{rnb}(t)] + \frac{d[\psi_{rnb}]}{dt} \quad (2)$$



Şekil 1. Asimetrik iki fazlı makinanın modeli ve eşdeğer devresi

Stator direnç matrisi;

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

Akı matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{sr}^T & L_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

burada;

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{1s\delta} + L_{ms} & 0 \\ 0 & L_{1s\delta} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{1r\delta} + L_{mr} & 0 \\ 0 & L_{1r\delta} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Bu denklemlerde;

L_{1s} =Stator a sargısının kaçak endüktansı

L_{1sb} =Stator b sargısının kaçak endüktansı

L_{ms} =Stator a sargısının özendüktansı

L_{msb} =Stator b sargısının özendüktansı

L_{1r} =Rotor sargılarının kaçak endüktansı

L_{mr} =Rotor sargılarının özendüktansı

L_{sr} =Stator a sargısının rotor sargıları ile oluşturduğu karşılıklı endüktans

L_{sb} =Stator b sargısının rotor sargıları ile oluşturduğu karşılıklı endüktansı göstermektedir.

Aşağıdaki moment denklemi ile mekanik denklem bulunmaktadır.

$$T_e(t) = \frac{P}{2} \cdot [I_{s,r}]^T \cdot \frac{\partial [L_{s,r}(\theta)]}{\partial \theta} \cdot [I_{s,r}] \quad (7)$$

Asimetrik iki fazlı asenkron makina için uygun matrisler yerine konulursa moment ifadesi;

$$T_e = \left(\frac{P}{2} \right) \cdot \left[\begin{array}{l} L_{sr} i_{sa} (i_{ra} \sin \theta_r - i_{rb} \cos \theta_r) \\ + L_{sb} i_{sb} (i_{ra} \cos \theta_r - i_{rb} \sin \theta_r) \end{array} \right] \quad (8)$$

şeklinde bulunur. Moment ile rotor hızı arasındaki bağıntı ise,

$$T_e = j \cdot \left(\frac{2}{P} \right) \cdot \frac{d\omega}{dt} + T_L \quad (9)$$

şeklinde basitleştirilebilir. Burada j makina miline indirgenmiş sistemin toplam eylemsizlik sabitini, ω açısal hızı, T_L yük momentini tanımlamaktadır. Böylece asimetrik makina için elektriksel ve mekaniksel uç denklemleri yazılmış olur.

III. ASİMETRİK ASENKRON MAKİ- NANIN D-Q DÖNÜŞÜMÜ

Elektriksel ve mekaniksel denklemlerdeki zamanla değişen katsayıları yok etmek için denklemleri sabit katsayılı forma sokmak için kullanılan d-q dönüşüm matrisi[3] aşağıdaki gibidir.

$$K_s = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ \sin \theta_s & -\cos \theta_s \end{bmatrix} \quad (10)$$

Faz dirençleri birbirlerine eşit değilse, ki dengesizlik veya asimetrik olma durumu, herhangi bir hızda dönen (ω) d-q ekseninde yapılan dönüşüm ile direnç matrisi θ 'nın sinüs biçiminde fonksiyonları olmaktadır. Bu da dönüşüm mantığına terstir. Bu yüzden d-q eksenleri

nin açısal hızı sıfır alınmaktadır ve θ 'nın sinüs formundaki fonksiyonları elimine edilmiş olur. Akılara göre gerilim uç denklemleri sabit referans eksen takımında yazılırsa ($\omega=0$);

$$V_{qs}^s = R_s \cdot i_{qs}^s + \frac{d\psi_{qs}^s}{dt} \quad (11)$$

$$V_{ds}^s = R_s \cdot i_{ds}^s + \frac{d\psi_{ds}^s}{dt} \quad (12)$$

$$V_{qr}^s = R_r \cdot i_{qr}^s + \frac{d\psi_{qr}^s}{dt} - \omega_r \psi_{dr}^s \quad (13)$$

$$V_{dr}^s = R_r \cdot i_{dr}^s + \frac{d\psi_{dr}^s}{dt} + \omega_r \psi_{qr}^s \quad (14)$$

biçiminde tanımlanır.

IV. ROTOR BÜYÜKLÜKLERİNİN STATORA İNDİRGENMESİ

Bilindiği gibi, asenkron makinaların eşdeğer devrelerinin geliştirilmesinde bütün rotor parametreleri stator parametrelerine dönüştürülmektedir. Asimetrik iki fazlı asenkron makinanın stator sargıları eşit sarım sayılarından oluşmadığı için değiştirme oranı aynı değildir. Bütün q parametreleri N_s sarımlı "as" sargısında, d parametreleri N_s sarımlı "bs" sargısında tanımlanmaktadır. Bu tür bir dönüşüm, bütün değişkenlerin $\omega = 0$ alarak yapılan sabit referans eksen takımındaki dönüşüm ile en iyi sonucu vereceği açıktır. Eğer bütün q parametreleri N_s sargısında ("as" sargısı) ve bütün d parametreleri N_s sargısında ("bs" sargısı) ifade edilirse, statora dönüştürülmüş rotor büyüklükleri;

$$V_{qr}^s = \frac{N_s}{N_r} V_{qr}^s \quad (15)$$

$$I_{qr}^s = \frac{N_r}{N_s} I_{qr}^s \quad (16)$$

$$V_{dr}^s = \frac{N_s}{N_r} V_{dr}^s \quad (17)$$

$$I_{dr}^s = \frac{N_r}{N_s} I_{dr}^s \quad (18)$$

biçimindedir. Buna göre, elektriksel uç denklemleri, rotor sargılarının kısa devre olduğu düşünülerek yazıldığında aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_l} \begin{bmatrix} X_s & 0 & X_{ms} & 0 \\ 0 & X_s' & 0 & X_{ms}' \\ X_{ms} & 0 & X_s' & 0 \\ 0 & X_{ms}' & 0 & X_s' \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{N_s \omega_r}{N_s \omega_l} X_{ms} & R_r' & -\frac{N_s \omega_r}{N_s \omega_l} X_s' R \\ \frac{N_s \omega_r}{N_s \omega_l} X_{ms} & 0 & \frac{N_s \omega_r}{N_s \omega_l} X_s' R & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (19)$$

ve mekanik uç denklemi;

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{N_s}{N_s} \frac{X_{ms}}{\omega_l} (i_{qs}^s i_{dr}^s - i_{ds}^s i_{qr}^s) \quad (20)$$

şeklinde elde edilir.

V. MAKİNANIN DURUM UZAY MODELİNİN KURULMASI

Genel olarak, standart durum uzayı modeli, doğrusal, sabit katsayılı, çok değişkenli bir sistem için aşağıdaki şekildedir[4];

$$\begin{aligned} \dot{X} &= [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \\ [Y] &= [C] \cdot [X] + [D] \cdot [U] \end{aligned} \quad (21)$$

Bu çalışmada, (19) ve (20) nolu denklemlerden elektriksel ve mekaniksel bağıntılar dikkate alındığında türevli ifadeler sol tarafta kalacak şekilde durum uzay modeli kurulmaktadır. Seçilen motor parametreleri [1] aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} R_s &= 2.02 \Omega & R_r &= 7.14 \Omega \\ R_s' &= 5.74 \Omega & X_{ls} &= 2.79 \Omega \\ X_{ls} &= 3.22 \Omega & X_{ms} &= 2.79 \Omega \\ X_{lr} &= 2.12 \Omega & X_r &= 2.95 \Omega \\ X_{ms} &= 66.8 \Omega & j &= 0.0146 \text{ kg/m}^2 \\ n &= 1.18 & P_k &= 2 \\ f &= 50 \text{ Hz} & S &= 1.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

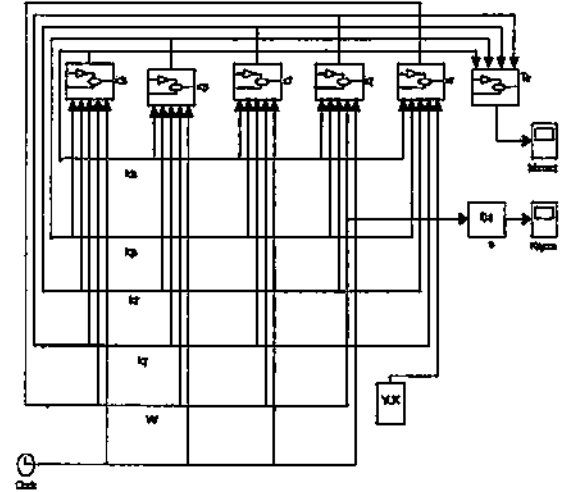
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - [B] \cdot \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_l = \frac{0.251 P_k}{j} (i_{qs}^s i_{dr}^s - i_{ds}^s i_{qr}^s) - \frac{0.251}{j} T_L$$

asenكرون makinanın durum uzay modeli elektriksel ve mekaniksel olarak 22 no'lu denklemdaki gibi kurulmaktadır.

VI. ALTERNATİF GERİLİMLE BESLENEN MAKİNANIN SAYISAL SİMÜLASYONU

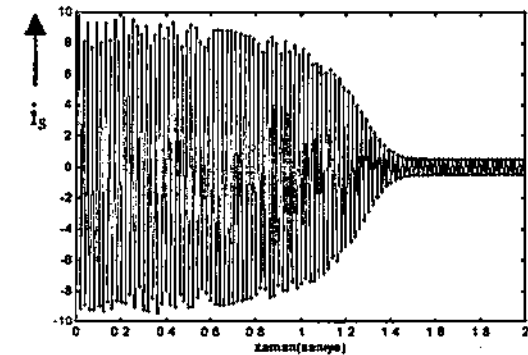
Simülasyonu yapılacak olan iki fazlı asenكرون makinanın Matlab-Simulink[5] blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmektedir. (h) olarak tanımlanan simülasyon zaman adımı 0.001 alınmaktadır.



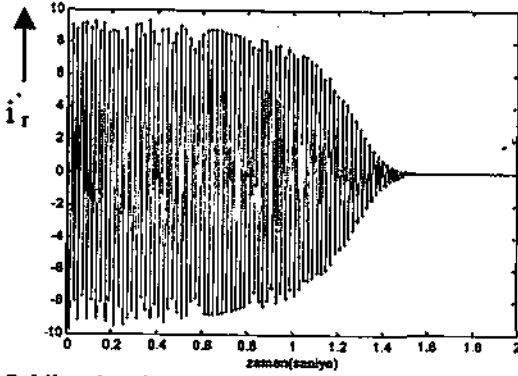
Şekil 2. Kısa devre rotorlu asimetrik iki fazlı asenكرون makinanın Matlab-Simulink blok diyagramı.

VII. SİMÜLASYON SONUÇLARI

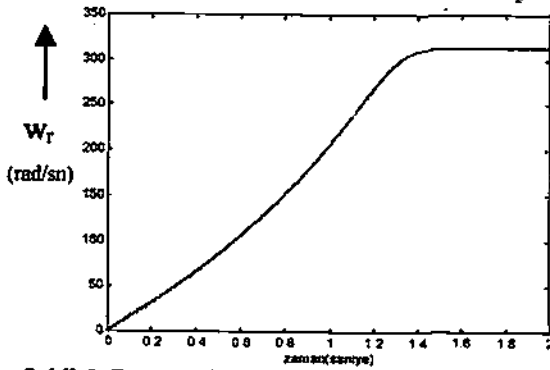
$T_L=0$ alınması halinde makina boşa çalışmaktadır, bu durumdaki simülasyon sonuçları aşağıda sunulmaktadır.



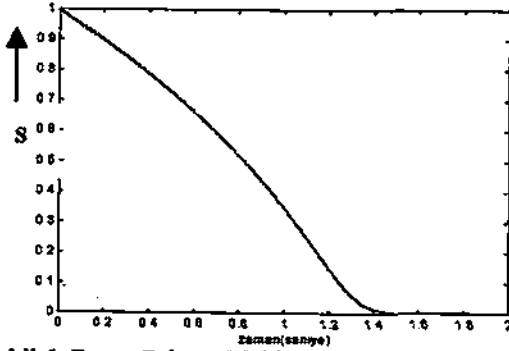
Şekil 3. Boşta çalışan makinada stator akımının zamana bağlı değişimi



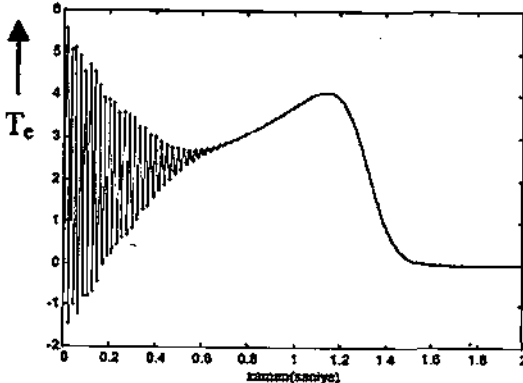
Şekil 4. Boşta Çalışan Makinada Statora İndirgenmiş rotor akımının zamana bağlı değişimi



Şekil 5. Boşta Çalışan Makinada rotor açısal hızının zamana bağlı değişimi

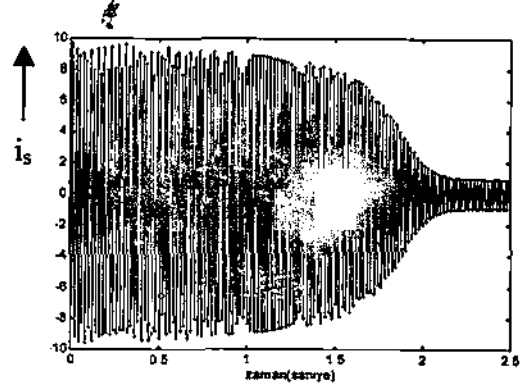


Şekil 6. Boşta Çalışan Makinada Kaymanın zamana bağlı değişimi

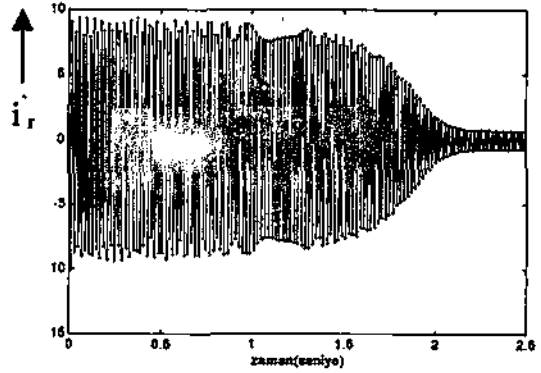


Şekil 7. Boşta Çalışan Makinada Elektriksel Momentin zamana bağlı değişimi

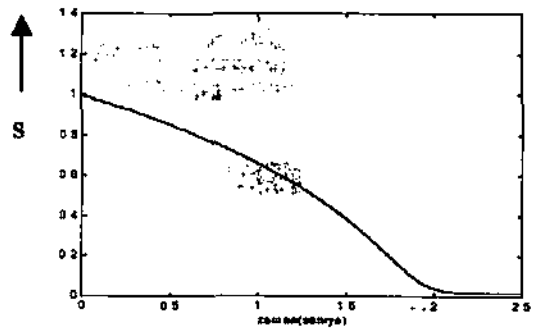
$T_L=1Nm$ alınması halinde durumdaki simülasyon sonuçları aşağıda sunulmaktadır.



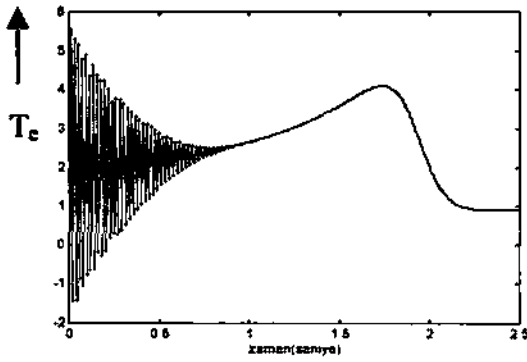
Şekil 8. 1Nm'lik yükle çalışan makinada stator akımının zamana bağlı değişimi



Şekil 9. 1Nm'lik yükle çalışan makinada Statora İndirgenmiş rotor akımının zamana bağlı değişimi



Şekil 10. 1Nm'lik yükle çalışan makinada Kaymanın zamana bağlı değişimi



Şekil 11. 1Nm'lik yükte çalışan makina-
Elektriksel Momentin zamana bağlı değişimi

VII. SONUÇ

Makina yüksüz olduğundan elektriksel çıkış momentine ait değişim aynı zamanda makina hızlandırma momenti de göstermektedir. Gözlemlendiği gibi $t=0$ anında dengeli iki fazlı gerilimin uygulanması ile, elektriksel moment genlikleri giderek azalan sinüs formunda salınımlar yaparak, pozitif bir ortalama momentle sistemi hızlandırmaya başlamaktadır. Makina senkron devir sayısının yaklaşık %60'ına ulaşması ile, salınımlar giderek sönmekte ve moment sürekli rejim davranışından beklendiği gibi devrilerek sıfıra hızlı bir şekilde düşmektedir. Bu arada rotor hızı, makina yüksüz ve sürtünmesiz olarak tanımlandığından, senkron hıza ulaşmaktadır. Kayma ise sıfıra düşmektedir. Bu üç değişim, modelin gerçek makina davranışlarına uygun sonuçlar verdiğini göstermektedir. Elektriksel moment ve rotor hızına bağlı olarak yorumlanabilecek bir başka değişim de stator akımlarında görülmektedir. Makinaya etki eden sürtünme kuvvetleri ve yük momenti bulunmadığından, makinanın sürekli rejimde sadece mıknatıslanma akımını çekmesi beklenir. Eğriler incelendiğinde sürekli rejimde akımların küçük değerler gösterdiği gözlenmektedir, ki bu akımda mıknatıslanma akımıdır. Statora benzer şekilde rotor akımları da incelenecek olursa, bu akımların sıfıra düştüğü görülür. Bu durum, yük ve sürtünme momenti bulunmaması nedeniyle rotor hızının senkron hıza ulaşması, bir başka deyişle rotor devresinin açık devre olmasının sonucudur.

Makinanın 1Nm'lik yük ile yüklenmesi durumunda, grafiklerden de görüleceği üzere, artık makinanın rotoru da akım çekmektedir ve yükten dolayı kayma sıfır değerine düşmemektedir. Geçici rejimden sonra, elektriksel çıkış momentini yük momentine eşit duruma gelmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] YOUNG, C.M., LIU, C.C., C.H., "New Inverter-Driven Design and Control Method For Two-Phase Induction Motor Drivers", IEEE 1996.
- [2] HANCOCK, N. N., "Matrix Analysis of Electrical Machinery", Pergamon Press Ltd., 1974.
- [3] KRAUSE, P. C., "Analysis of Electrical Machinery", McGraw-Hill Series in Electrical Engineering, 1987.
- [4] BOSE, B. K., "Power Electronics and A.C. Drivers", Prentice Hall, 1986.
- [5] Matlab vrs 5.0, MatWORKS Inc.
- [6] ERFİDAN T., "Asimetrik İki Fazlı Kısa Devre Rotorlu Asenkron Makinanın Modellenmesi ve Simulasyonu" Y. Lisans Tezi, KOU Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 1998, KOCAELİ.