



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.08.2019  
Kabul Tarihi : 05.09.2019

Received Date : 28.08.2019  
Accepted Date : 05.09.2019

### ROTORU SARGILI BİR ASENKRON MOTORUN SENKRON HIZDA DÖNEN DQ EKSENİNDE VE ROTOR AKILARI KULLANILARAK SİMULASYONU

#### SIMULATION STUDY OF WOUND TYPE INDUCTION MOTOR IN SYNCHRONOUS DQ REFERENCE FRAME USING ROTOR FLUXES

Metin SALİHMUHSİN <sup>1,\*</sup> (ORCID: 0000-0003-2069-9376)

Mehmet EKER <sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-0954-6774)

<sup>1</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>2</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Elektronik Teknolojisi Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Metin Salihmuhsin, msalihmuhsin@ksu.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmada 3 fazlı motoru sargılı bir asenkron motorun senkron hızda dönen dq ekseninde rotor akıları kullanılarak matematiksel modellemesi yapılmış ve elde edilen motor modelinin Matlab/Simulink programı ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen Simülasyon programı başarılı bir şekilde çalıştırılmış ve program kullanılarak stator d ve q eksenleri akımları, rotor d ve q eksenleri akıları, motorun oluşturduğu elektriksel moment ve motor milinin açısal dönüş hızının 0-1.1 saniyeleri arasındaki değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Asenkron motor; Dq eksen takımı

#### ABSTRACT

This study involves generating mathematical model of a wound type induction motor in synchronously rotating dq reference frame utilizing rotor fluxes. A program using Matlab/Simulink is developed to simulate the motor model. The developed program successfully worked. Values of motor parameters such as stator d and q axis currents, rotor d and q axis fluxes, electrical torque and rotor speed in between 0 and 1.1 seconds are displayed graphically.

**Key words:** Induction motor; Dq reference frame

#### GİRİŞ

Geliştirilmesi ve kullanılmaya başlanması neredeyse DC makinelerle aynı çeyrek asırda olmasına rağmen, kontrolünün nispeten zor ve kararlı çalışma aralığının sınırlı olması nedeniyle asenkron motorların sanayide kullanımı 1960'lı yıllara kadar dc motorlardan geride kalmıştır. 1960'lı yıllardan sonra yarıiletken elemanların oluşturduğu güç elektroniği devrelerinin kullanılmaya başlanması ile bu makinelerin sanayide kullanımı artmaya başlamıştır. 1970'li yıllara kadar bu makinelerin kontrolü genellikle V/f gibi hassas hız ve moment kontrolüne uygun olmayan yöntemlerle yapılabilmıştır. Vektör kontrolü veya alan yönlendirmeli kontrol olarak adlandırılan ve 3 fazlı stator akımlarını, makinadaki manyetik akı ve makinanın oluşturduğu elektriksel momenti ayrı ayrı ve birbirinden bağımsız olarak kontrol edebilen iki bileşene ayıran yöntemin geliştirilmesi ile kısa sürede sanayideki kullanımı %80'lere varacak seviyelere ulaşmıştır (Kingsley, Dorf).

Diğer elektrik makinelerinde olduğu gibi asenkron makinelerinde de motora yol verme veya hız ve moment kontrolü benzeri işlevler yapılmaya başlanmadan önce makinanın matematiksel modelinin oluşturularak çalışmasının doğru bir şekilde anlaşılması önem arz etmektedir. Asenkron makineler için makine modelinin abc 3 fazlı ekseninde veya alfa-beta 2 fazlı ekseninde oluşturulması karmaşık ve nispeten zaman gerektiren bir süreçtir.

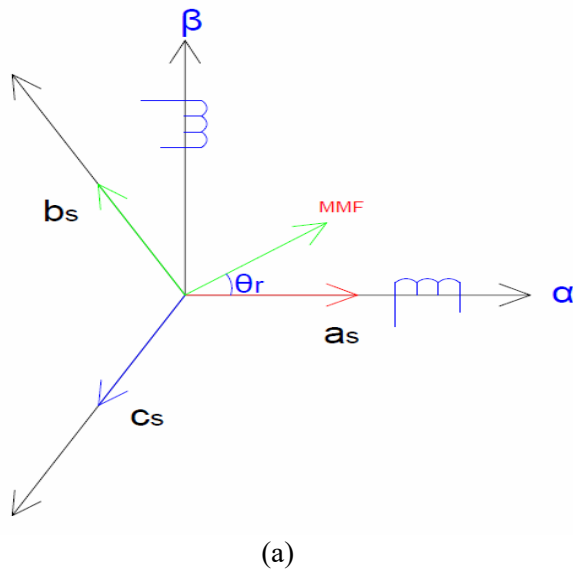
Bunun en önemli sebebi asenkron makinalarda stator akım ve gerilimlerinin statik (hareket etmeyen) eksen takımında modellenmesine karşılık makinanın rotor akım ve gerilimlerin rotorla birlikte dönüyor olmasıdır. Bu ise rotor akım ve gerilimlerinin stator akım ve gerilimleri ile beraber işleme alınmasını zorlaştırmaktadır. Dq eksen takımı adı verilen ve öncesinde rotor akım ve gerilimlerinin 3 fazdan 2 faza indirgenip durağan bir eksen takımında modellenmesine sonrasında ise bu durağan eksen takımının istenilen herhangi bir hızda dönmesine olanak sağlayan matematiksel dönüşüm yönteminin geliştirilmesi ile modelleme işlemi daha kolay yapılabilir hale gelmiştir. (Sarıoğlu ve ark., Vas).

Literatürde bu makinaların modellenmesi ile ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır (Kocabas ve ark., Guo ve ark.). Bu makalede yapılan çalışma asenkron makinaların alan yönlendirmeli kontrolü üzerine yapılan bir ön çalışma niteliğinde olup asenkron makinaların dq eksen takımında modellenmesini kapsamaktadır.

## MATERYAL VE METOT

### Asenkron Motorun dq Eksen Takımında Modellenmesi

Bir asenkron makinanın dq eksen takımında modellenmesi işlemi yapılmadan önce makinanın abc eksen takımındaki modellenmesine bakılmasında yarar vardır. Bu amaçla makinanın statorundaki a, b ve c olarak adlandırdığımız 3 adet sargısının birbirine  $120^\circ$  lik açılarla ve dairesel olarak statora yerleştirildiğini farz edelim. Aynı zamanda bu 3 sargıya aşağıda verilen ve aralarında  $120^\circ$  faz farkı bulunan 3 gerilimin uygulandığını kabul edelim. Şekil 1'de bu grafiksel olarak gösterilmektedir.



$$v_{sa}(t) = V_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$v_{sb}(t) = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2)$$

$$v_{sc}(t) = V_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (3)$$

Şekil 1: (a) 3 faz abc ekseninin şeması. (b) Stator a, b ve c sargılarına uygulanan kaynak gerilimleri

Bu durumda stator a fazında indüklenen gerilim denklemi şu şekilde olacaktır:

$$v_{sa}(t) = r_s i_{sa}(t) + p \phi_{sa}(t) \quad (4)$$

$i_{sa}(t)$  : Stator a fazından geçen akım (A)

$r_s$  : Stator a fazı direnci (Ohm)

$p$  :  $\frac{d}{dt}$  diferansiyel operatörü

$\phi_{sa}(t)$  : Stator a fazı bobinini çevreleyen net manyetik akı (Wb)

Yukarıdaki denklemlerde her bir stator ve rotor sargısını çevreleyen net manyetik akı bulunurken hem sargının kendi akımının hem de stator ve rotordaki diğer sargıların akımlarının oluşturdukları manyetik akıların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Sadece stator a fazı bobini için bu akı denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\varphi_{sa}(t) = L_S i_{sa} + M_S i_{sb} + M_S i_{sc} + M_{rs} \cos \theta_r i_{ra} + M_{rs} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) i_{rb} + M_{rs} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) i_{rc} \quad (5)$$

$L_S$  : Stator a fazı self endüktansı (H)

$M_S$  : Herhangi iki stator fazı arasındaki ortak (mutual) endüktans (H)

$M_{rs}$  : Herhangi bir rotor ve stator fazı arasındaki ortak (mutual) endüktans (H)

$\theta_r$  : Rotor a fazı eksenini ile stator a fazı eksenini arasındaki açı (rd)

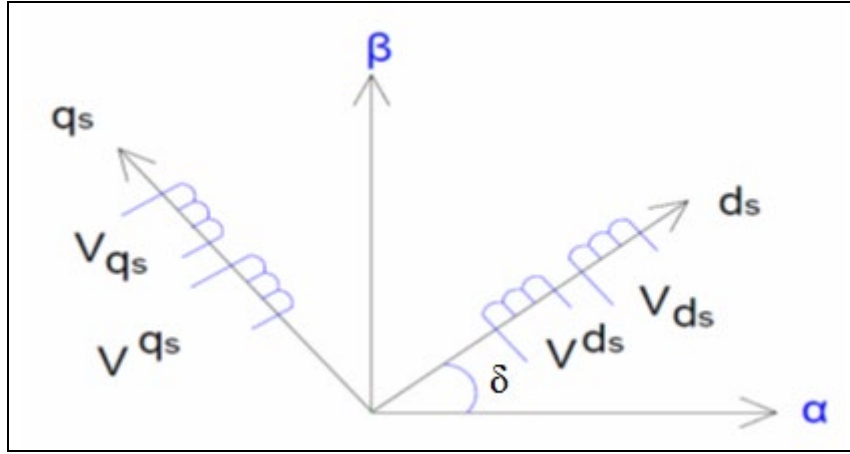
Makinanın modelinin oluşturulabilmesi için hem stator hem de rotordaki her bir faz bobini için bu akı bağıntılarının bulunup voltaj denklemlerinde yerine yazılması ve elde edilecek denklem sistemine birde motorun mekanik denkleminin eklenmesi gerekmektedir. Bu durumda, sonuçta elde edilecek denklem sisteminde hem diferansiyel denklem sayısı hem de değişken sayısının oldukça fazla olacağı görülecektir. Ayrıca sistem doğrusal olmayan diferansiyel denklemler içermektedir. Bu denklem sisteminin bu şekli ile çözümlenmesi hem zor hem de zaman gerektiren bir süreçtir.

Abc eksenindeki motor denklemleri çok sayıda denklem ve değişken içerdiklerinden sistemdeki denklem ve değişken sayısının azaltılması için sistemin 3 fazdan iki fazlı bir eksen sistemine indirgenmesi işleminin yapılması gerekir. Bu işlem Clark dönüşümü kullanılarak yapılır. Clark dönüşümü sadece motorun elektriksel modeline ve elektriksel moment ifadesine uygulanır. Motorun mekanik denkleminde herhangi bir değişiklik yapılmaz. Aşağıda verilen Clark dönüşüm matrisi sistemdeki toplam gücün korunumu ilkesi göz önünde bulundurularak elde edilen dönüşüm matrisidir. Matrisinin üçüncü satırı sıfır dizisi (zero sequence) olarak adlandırılıp dönüşümün tersi alınabilir bir dönüşüm olmasının istendiği durumlarda kullanılır.

$$C = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\alpha\beta$  dönüşümü her ne kadar motor denklemlerinde değişken sayısının azaltımı ve denklemlerin sadeleştirilmesi gibi iyileştirmeler yapıyor olsa da, bu dönüşüm sonrasında stator değişkenleri hala durağan eksen ve sinüzoidal olarak değişen değişkenler ve rotor değişkenleri de dönen rotorda sinüzoidal olarak değişen değişkenlerdir. Ancak bilindiği üzere motorların hız ve moment kontrolü için oluşturulan geri beslemeli kontrol döngüleri genellikle PI benzeri kontrolörler kullanmakta ve bu kontrolörlerin girişlerinin de dc değerler olması gerekmektedir. Bu sebeple  $\alpha\beta$  eksenine aktarılmış değişkenlerin yeni bir dönüşüm işlemine daha tabi tutulması gerekir. Bu dönüşüm işlemi Park dönüşümü olarak adlandırılır. Park dönüşümü motorun elektriksel modelindeki stator denklemlerine doğrudan uygulanır. Rotor denklemlerine uygulanması durumunda ise rotor denklemlerinin önce 'sözde değişmeyen' (pseudo-stationary) eksene aktarılacağı bir ön dönüşüme tabi tutulması gerekir.

Dq eksen takımı, hareket edebilen bir eksen takımıdır. Bir başka deyişle eksen takımı rotora benzer bir şekilde dairesel olarak bir  $w_{dq}$  açısal hızıyla sürekli olarak dönebilmektedir. Şekil 2 herhangi bir  $w_{dq}$  açısal hızı ile dönen bir dq eksen takımının stator alfa eksenini ile arasında  $t = 0$  anında bir  $\delta$  açısı olduğu durumu göstermektedir.



Şekil 2: dq eksen takımının şeması.

Dq dönüşümü için kullanılan Park dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$P = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

Pratikte dönen bir dq eksen takımı için sadece 3 adet hız önem arz etmektedir. Bunlardan ilki  $w_{dq} = w_s$  (kaynak voltajının açısal hızı veya çok bilinen adıyla senkron hız), ikincisi  $w_{dq} = w$  (rotorun milinin mekanik hızı) ve üçüncüsü ise  $w_{dq} = 0$ 'dır (durağan eksen takımı). Clark ve Park dönüşüm matrislerinin her ikisi beraber tek seferde uygulanabilmektedir. Bu işlemi gerçekleyen matris aşağıda verilmiştir (Sarioğlu ve ark.).

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Clark ve Park dönüşümlerinin abc eksen takımındaki denklemlere uygulanması ile bir asenkron motorun senkron hızda dönen dq eksen takımındaki denklemlerinin matris formuna getirilmiş ifadeleri aşağıda verilmiştir (Sarioğlu ve ark.).

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r' & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r' \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -w_s L_{ss} & w_s L_m & 0 \\ w_s L_{ss} & 0 & 0 & w_s L_m \\ w_r L_m & 0 & L_r' & -w_r L_r' \\ 0 & w_r L_m & w_r L_r' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$w_s = w_r + Pw \quad (10)$$

$r_r'$  : Statora indirgenmiş rotor direnci (Ohm)

$L_m$  : Makinanın mıknatıslanma endüktansı (H)

$L_r'$  : Rotor faz endüktansının dönüşümler uygulanmış ve statora indirgenmiş değeri (H)

$w_s$  : Stator akımları açısal frekansı (rd/sn)

$w_r$  : Rotor akımları açısal frekansı (rd/sn)

$w$  : Motor milinin açısal frekansı (Rotor mili açısal hızı) (rd/sn)

### **Rotor Akıları Kullanılarak Oluşturulan dq Motor Modeli**

Asenkron makinelerin kontrol uygulamalarında rotor akımları yerine rotor akılarının kullanımı daha kolay ve az masraf gerektirir. Bunu gerçeklemek için rotor akıları ve akımları arasındaki bağıntı kullanılarak yukarıdaki denklemlerdeki rotor akımları, akı değişkenleri cinsinden yazılabilir. Bunun için öncelikle rotor akı denklemlerini yazalım.

$$\varphi_{rd} = L'_{rr}i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (11)$$

$$\varphi_{rq} = L'_{rr}i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (12)$$

Bu denklemlerden  $i_{rd}$  ve  $i_{rq}$  ifadeleri çekilirse:

$$i_{rd} = \frac{\varphi_{rd} - L_m i_{sd}}{L'_{rr}} \quad (13)$$

$$i_{rq} = \frac{\varphi_{rq} - L_m i_{sq}}{L'_{rr}} \quad (14)$$

Rotor akıları için bulunan bu bağıntılar yukarıdaki denklemlerde ve makinanın oluşturduğu elektriksel moment ifadesinde yerine yazılırsa asenkron makinanın senkron hızda ve rotor akıları kullanılarak dq eksenindeki modeli elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \sigma L_{ss} p & -w_s \sigma L_{ss} & \frac{L_m}{L'_{rr}} p & -\frac{L_m}{L'_{rr}} w_s \\ w_s \sigma L_{ss} & r_s + \sigma L_{ss} p & \frac{L_m}{L'_{rr}} w_s & \frac{L_m}{L'_{rr}} p \\ -r'_r \frac{L_m}{L'_{rr}} & 0 & \frac{r'_r}{L'_{rr}} + p & -w_r \\ 0 & -r'_r \frac{L_m}{L'_{rr}} & w_r & \frac{r'_r}{L'_{rr}} + p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\sigma L_{ss} = L_{ss} - \frac{L_m^2}{L'_{rr}} \quad (16)$$

$$M_e = P \frac{L_m}{L'_{rr}} (i_{sq} \varphi_{rd} - i_{sd} \varphi_{rq}) \quad (17)$$

Bu motor modeline makinanın mekanik denklemi aşağıdaki şekilde eklenebilir.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{P}{J} \frac{L_m}{L'_{rr}} (i_{sq} \varphi_{rd} - i_{sd} \varphi_{rq}) - \frac{B}{J} w - \frac{1}{J} M_L \quad (18)$$

$J$  : Atalet momenti (kg.m<sup>2</sup>)

$B$  : Sürtünme katsayısı (N.m.sn/rd)

$M_L$  : Motor miline uygulanan yük N.m

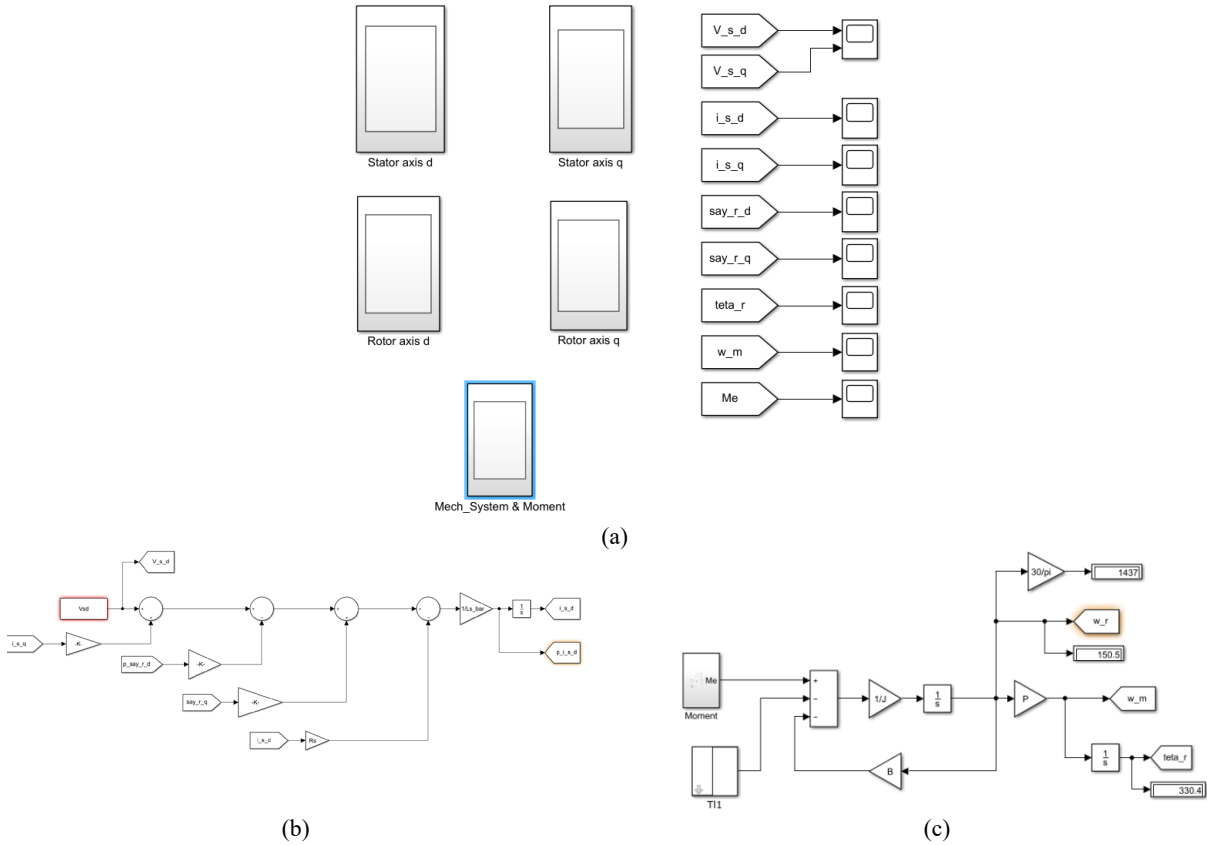
### **3 Fazlı Bir Asenkron Makinenin dq Eksenindeki Modelinin Matlab /Simulink ile Simulasyonu**

3 fazlı rotorlu sargılı bir asenkron makinanın senkron hızda dönen dq eksen takımında rotor akıları kullanılarak simulasyonu Matlab/Simulink kullanılarak geliştirilmiştir. Simulasyon için literatürde değerleri verilen bir

asenكرون makinanın parametreleri kullanılmıştır. Bu makina parametreleri Tablo 1’de verilmiş ve geliştirilen Matlab/Simulink programı Şekil 3’te gösterilmiştir

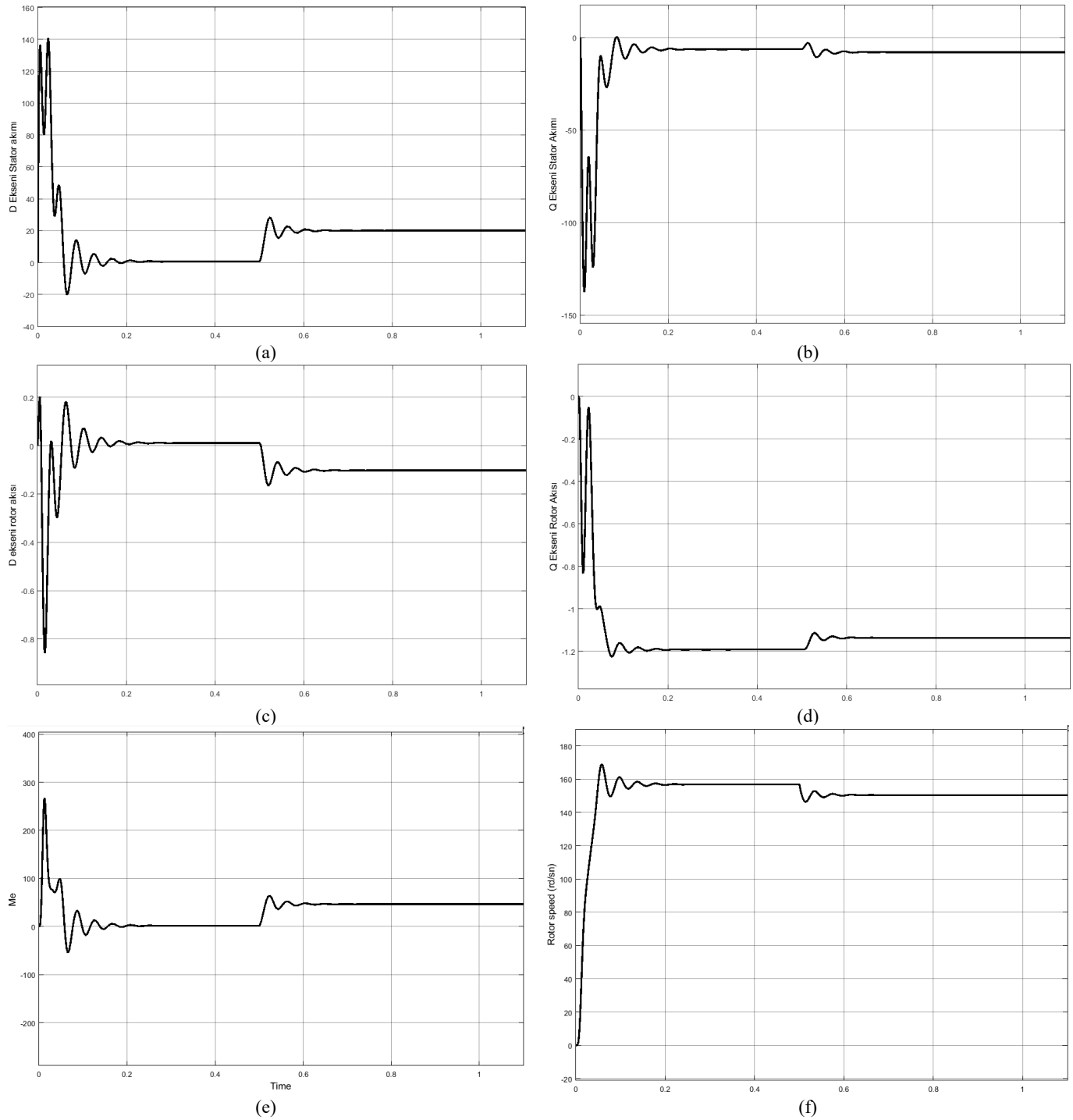
**Tablo 1:** Asenkron motorun parametreleri

Kaynak gerilimi (rms V)	220
Kaynak frekansı (Hz)	50
Kutup çifti sayısı	4
Stator faz direnci ( $\Omega$ )	0.73
Statora indirgenmiş rotor direnci ( $\Omega$ )	0.74
Stator kaçak endüktansı (mH)	3
Statora indirgenmiş rotor kaçak endüktansı (mH)	3
Mıknatıslanma endüktansı (mH)	124
Toplam rotor atalet momenti ( $\text{kg.m}^2$ )	0.0343
Toplam sürtünme moment katsayısı ( $\text{Nm.sn/rd}$ )	0.01



**Şekil 3:** (a) Geliştirilen asenkron motor modeli. (b) Stator axis d alt sistemi. (c) Mech\_system & Moment alt sistemi.

Simulasyon esnasında motor 0–0.5 saniyeleri arasında boşta döndürülmüş, 0.5-1.1 saniyeleri arasında ise motor miline 45 Nm’lik bir yük uygulanmıştır. Şekil 4 grafiksel olarak  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $\varphi_{rd}$ ,  $\varphi_{rq}$ ,  $M_e$  ve  $w$ ’nun 0-1.1 saniyeleri arasındaki değişimlerini göstermektedir.



Şekil 4: (a) Stator d eksen akımı  $i_{sd}$ . (b) Stator q eksen akımı  $i_{sq}$ . (c) Rotor d eksen akısı  $\varphi_{rd}$ . (d) Rotor q eksen akısı  $\varphi_{rq}$ . (e) Motorun oluşturduğu elektriksel moment  $M_e$ . (f) Motor milinin açisal dönüş hızı ve  $w$ .

Şekillerden görüldüğü gibi  $i_{sd}$  akımı motor boşa çalışırken 0.2 inci saniyede kararlı değeri olan 0.72 A'ye (yaklaşık sıfır) gelmiştir. Motora 45 Nm yük uygulanan 0.5 inci saniyeden sonra ise 20 A kararlı değerini almıştır.  $i_{sq}$  akımının ise karşılık gelen süreler içerisindeki kararlı değerleri olan -6.4 A ve -7.97 A olmuştur. Rotor d eksen akısı  $\varphi_{rd}$  motor boşa çalışırken 0.01 Wb sabit değerini almış, motora yük uygulandıktan sonra ise bu değer -0.103 Wb değerine gelmiştir.  $\varphi_{rq}$  ise bu zaman aralıklarında -1.19 Wb ve -1.135 Wb değerlerini almıştır. Motorun ürettiği elektriksel moment motor boşa çalışırken sürtünmeden dolayı 1.6 Nm oluştur. Motora 45Nm yük uygulandığı 0.5 inci saniyeden sonra ise 46.6 Nm kararlı değerini almıştır. Nihayetinde, rotor milinin mekanik hızı boşa dönerken 157 rd/sn'dir. Bu ise yaklaşık 1500 dev/dk olup 4 kutuplu bir asenkron makinenin boşa dönerken anma hızına karşılık gelmektedir. Motora yük uygulandığında ise bu hız 151 rd/sn değerini almıştır.

## SONUÇ

Bu çalışmada 3 fazlı bir asenkron motorun Matlab/Simulink programı kullanılarak dq eksenindeki modellenmesinin simülasyonu yapılmıştır. Bu amaçla önce makinanın senkron hızda ve rotor akıları kullanılarak matematiksel modeli elde edilmiştir. Sonrasında ise bu modele makinanın ürettiği elektriksel moment ifadesi ve makinanın mekanik denklemi eklenerek simülasyon için gereken denklemler oluşturulmuştur. Geliştirilen simülasyon programı başarılı bir şekilde çalışmış ve makina için dq ekseninde gösterimi istenen değişkenler grafiksel olarak şekillerde gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Sarıoğlu, K., Gökaşan, M., Boğosyan, S.,(2003), “Asenkron Makinalar ve Kontrolü”, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye
- Vas, P. (1990). Vector control of ac machines, Oxford Science Publications, Clarendon Press
- Kingsley C., Fitzgerald A. E. Jr., (2014), “Electric Machinery”, 7thEdt., McGraw Hill Publication, New York, USA.
- Dorf, R. C., Bishop R. H., (2014), “Modern Control Systems”, 12th Edt, Pearson Education, UK.
- Kocabas, D.A., Atalay, A.K., Salman, E., Z. Akcali, Z., (2010), " $\alpha$ - $\beta$  axes simulation of a drive system driven by two equivalent induction motors", *Proc. EEECS*, pp. 21-24, Nov. 2010, ISBN 978-975-98897-6-0.
- Guo, Z., Zhang, Q., (2018), The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1060 (2018) 012085