



VEKTÖR KONTROLLÜ SÜRÜCÜLER İÇİN ASENKRON MOTOR EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİNİN ÜRETİCİ VERİ FÖYLERİNDEN KESTİRİLMESİ

Mehmet Onur GÜLBAHÇE^{1,2*}, Muhammed Emin KARAASLAN¹

¹ Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Eşdeğer Devre, Asenkron Motorlar, Parametre Tahmini, Newton-Raphson Yöntemi, Vektör Kontrolü.</i>	Son yıllarda meydana gelen endüstriyel gelişmeler gerek endüstriyel gerekse ev tipi uygulamalarda kullanılan asenkron motorların geniş bir hız aralığında kontrol edilebilmesini zorunlu kılmıştır. Vektör kontrolü algoritmaları sayesinde hız ve moment kontrolünün geniş aralıkta yüksek başarımlı bir şekilde yapılabilmesi için asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin yüksek doğrulukla bilinmesi gerekir. Bu çalışmada sadece üreticilerin veri föylerinde paylaşılmış olduğu kısıtlı bilgiler ile asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin yöntemi asenkron motorun eşdeğer devresinden türetilen doğrusal olmayan denklemlerin Newton-Raphson yöntemi ile çözülmesi ilkesine dayanmaktadır. Önerilen denklemler Newton-Raphson yöntemi ve çözüm algoritması 20 farklı asenkron motor için test edilmiş ve deneysel olarak elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Dahası seçilen 4 farklı motor için deneysel olarak elde edilen hız-moment karakteristiği ve kestirilen parametreler ile hesaplanan hız-moment karakteristiği verilerek önerilen algoritmanın başarımlı irdelenmiştir.

ESTIMATION OF INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS FOR VECTOR CONTROLLED DRIVES FROM MANUFACTURER DATASHEET

Keywords	Abstract
<i>Equivalent Circuit, Induction Motors, Parameter Estimation, Newton-Raphson Method, Vector Control.</i>	In recent years, industrial developments have made it necessary to control induction motors used in both industrial and household applications in a wide-speed range. Thanks to vector control algorithms, in order to control the torque in a wide speed range operations with high performance, the equivalent circuit parameters of induction motor have to be known precisely. In this study, the estimation of the equivalent circuit parameters of the induction motor is implemented only with the limited information shared by the manufacturer's datasheets. The estimation method is based on the principle of solving nonlinear equations derived from the equivalent circuit of an induction motor by Newton-Raphson method. The proposed equation set and solution algorithm have been tested for 20 different induction motors and presented in comparison with the experimentally obtained equivalent circuit parameters. Moreover, the speed-torque characteristics obtained experimentally and calculated from estimated equivalent circuit parameters for 4 different selected motors are compared and the performance of the proposed algorithm is examined.

Alıntı / Cite

Gülbahçe, M.O., Karaaslan, M.E., (2021). Vektör Kontrollü Sürücüler İçin Asenkron Motor Eşdeğer Devre Parametrelerinin Üretici Veri Föylerinden Kestirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(4),1372-1385.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. O. Gülbahçe, 0000-0002-6689-8445
M. E. Karaaslan, 0000-0002-2542-1704

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	16.06.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	06.07.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	16.07.2021
Yayın Tarihi / Published Date	20.12.2021

* İlgili yazar / Corresponding author: mogulbahce@fsm.edu.tr, 0537-213-79-60

1. Giriş (Introduction)

Basit yapıları, düşük maliyetleri ve daha az bakıma ihtiyaç duymaları gibi sebeplerle asenkron motorlar gerek endüstriyel gerekse basit ev tipi tahrik uygulamalarının vazgeçilmezleri arasındadır. Son yıllarda imalat, ulaşım ve süreç endüstrisindeki gelişmeler tahrik sistemleri için en uygun çalışma hızında artışı beraberinde getirmiş ve geniş bir hız aralığında kontrol edilebilirliğini zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, yeni geliştirilen geniş hız aralığında çalışabilen, dişlisiz, kayış-kasnak düzeneğinin bulunmadığı veya doğrudan tahrikli elektriksel sürüş, sistemlerinin yapısal hacimlerindeki azalma nedeniyle şu sıralar oldukça bilinirliği artmıştır (Gezer vd., 2018).

Asenkron motorlarda hız ve moment kontrolünün geniş aralıkta yüksek başarılı bir şekilde yapılabilmesi için birçok kontrol yöntemi geliştirilmiştir (Aydeniz, 2005). Bu yöntemler içerisinde en yaygın olanı vektör kontrol yöntemidir. Fakat vektör kontrol yöntemleri genellikle motor modeline dayalı olarak yapıldığı için asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerine karşı duyarlıdır (Bingöl, 2006). Dolayısıyla yüksek başarılı bir hız-moment kontrolü için asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin bilinmesi büyük bir öneme sahiptir (Çukur, 2015).

Asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri genellikle bağlı olduğu sürücü içine gömülen kestirim algoritmaları ile belirlenir. Literatürde asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalara göre asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi çevrimdışı ve çevrimiçi kestirim yöntemleri olarak ikiye ayrılabilir (Zheng vd., 2008). Çevrimdışı parametre kestirimi için genellikle asenkron motora boşa çalışma ve kilitli rotor deneyi yapılır. Bu yöntemle yapılan parametre tahmini çoğunlukla motor çalışmaya başlamadan önce gerçekleştirilir. Çevrimdışı parametre kestirimi için en çok kullanılan yöntemler motor sargılarına doğru akım uygulama ve tek fazlı alternatif akım uygulama olarak ikiye ayrılır. Motor sargılarına doğru akım uygulama yönteminde asenkron motorun bir fazına anma akımını geçmeyecek mertebede bir doğru akım, bağlı olduğu evirici üzerinden uygulanır ve diğer iki faz açık hale getirilir. Bazen de fazlardan ikisi birbirine seri, diğer sargı da onlara paralel olacak şekilde doğru akım uygulama yöntemi yapılabilir. Bu işlem yapıldıktan sonra bir akım algılayıcısı tarafından stator akımı ölçümü yapılır ve stator direnci (R_s) kolaylıkla hesaplanır. Tek fazlı alternatif akım uygulama yönteminde ise motor fazlarından ikisine farklı frekanslarda akımlar uygulanır. Motor hareketsiz kalacağından dolayı bu yöntem kilitli rotor testine karşılık gelir. Elde edilen sonuçlar ile rotor direnci, mıknatıslanma reaktansı ve kaçak reaktanslar belirli bir yaklaşıklıkla hesaplanabilir.

Çevrimdışı yöntemler ile asenkron motor eşdeğer devre parametreleri belli bir yaklaşıklıkla hesaplanabilir. Fakat bu parametreler sıcaklık artışı, yüzey etkisi, akı yoğunluğu gibi motor çalışma durumlarına bağlı nedenlerden ötürü değişmektedir. Bu yüzden parametre kestirimi işleminin gerçek zamanlı olarak da yapılması gereken uygulamalar da vardır. Literatürde gerçek zamanlı parametre tanımlama ile ilgili farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden Yinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi hız, verimlilik ve uygulama kolaylığı açısından büyük bir üstünlüklere sahiptir. Bu yöntem gerçek değer ve tahmin edilen değer arasındaki farkın karesinin minimize edilmesi ilkesine dayanmaktadır (Cirrincione ve Pucci, 2002; Stephan ve Chiasson, 1994; Alonge vd., 1998). Çevrimiçi parametre tanımlama için sıklıkla kullanılan bir başka yöntem ise Model Tabanlı Referans Uyarlamalı Sistem (MRAS) yöntemidir. Bu yöntem basit yapısı ve kolay uygulanması gibi üstünlükler sebebi ile uzun yıllardır ilgisini kaybetmemiştir. Referans model ve ayarlanabilir model arasındaki farkın uyarlanabilir bir mekanizma ile arasındaki hatanın azaltılması ilkesine dayanır.

Çevrimiçi ya da çevrimdışı kestirim yöntemlerinin dışında asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri veri föylerinde bulunan parametreler yardımıyla da kestirilebilir. Lee vd. (2012) çalışmalarında veri föyünde bulunan anma gücü, anma gerilimi, verim, güç faktörü, anma hızı ve kutup sayısı gibi parametreler kullanılarak yinelemeli bir yöntem önermiştir. (Lima vd. 2017; Mohammadi ve Akhavan, 2014) çalışmalarında eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için genetik algoritma tabanlı üst-sezgisel (meta-heuristic) bir yöntem önermiştir. Susanto ve Islam (2013) çift kafesli asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için genetik algoritma ve Newton-Rapson yönteminin bütünleşik olarak kullanıldığı bir yöntem önermiştir. Pedra (2008) ise çalışmasında yine çift kafesli asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için geliştirilmiş bir Newton-Rapson yöntemi önermiştir. Özyurt (2005) ise çalışmasında veri föylerinde bulunan bilgilerin yanı sıra bazı ölçüm bilgileri de kullanılarak kestirim işlemi yapmıştır. Wengerkievicz vd. (2017); parametre kestirimi için önerilen 9 farklı yöntem incelenmiş ve bu yöntemlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Çanakoğlu vd. (2014) çalışmasında 3 farklı üst-sezgisel algoritma önerilmiş ve bu algoritmalar farklı asenkron motorlar üzerinde denenerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Al-Jufout vd. (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada çift kafesli asenkron motorun eşdeğer devresinden yararlanılarak denklemler oluşturulmuş ve eşdeğer devre parametrelerinin kestirim işlemi yapılmıştır. Ancak bu çalışmada önerilen yöntemin farklı asenkron motorlar üzerinde test edildiği zaman yüksek hata oranına sahip sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Literatürdeki çalışmalar gibi parametre kestirimi için pek çok sayısal ya da üst-sezgisel yöntem önermek mümkündür. Fakat endüstriyel uygulamalarda önerilen algoritmaların basitliği ve bağlı bulunan sürücü içindeki mikrodenetleyici sistemlerine kolay bir şekilde gömülmesi istenmektedir. Bu nedenle pek çok yöntem endüstriyel uygulamalarda elenir.

Bu çalışmada asenkron motorun vektör kontrollü sürücüler için parametre kestirimi doğrusal olmayan denklem sistemlerinin Newton-Raphson yöntemi sayesinde çözülmesi ile yapılmıştır. Gerek basitliği gerekse bir mikrodenetleyici üzerinde kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmesinden dolayı Newton-Raphson yöntemi seçilmiş ve yöntemin detayları ikinci bölümde verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise asenkron motorun veri föylerinde bulunan parametreler ve bu parametrelerin asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin kestirimine olan etkisinden bahsedilmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde parametre kestirimi için elde edilen doğrusal olmayan denklem sistemlerinin elde edilmesi anlatılmış, bu denklem sisteminin Newton-Raphson algoritması ile nasıl çözüleceğinden bahsedilmiştir. Tasarlanan yazılım sonrası 20 farklı asenkron motor için elde edilen parametre tahmini sonuçları verilmiş ve deneysel olarak ölçülen parametreler ile arasındaki hata miktarı hesaplanmıştır. Dahası, verilen 20 motor arasından seçilen 4 farklı asenkron motor için deneysel olarak elde edilen hız-moment karakteristiği ve kestirilen parametreler ile hesaplanan hız-moment karakteristiği verilerek önerilen algoritmanın başarımlarını irdelenmiştir.

2. Doğrusal Olmayan Denklem Sistemlerinin Çözümü için Newton-Raphson Yöntemi (Newton-Raphson Method for Solving Non-Linear Equation Set)

İsmi Isaac Newton ve Joseph Raphson'dan alan Newton-Raphson yöntemi doğrusal olmayan cebirsel denklemlerin çözülmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Akram ve Ann, 2015). Newton-Raphson yöntemi doğrusal olmayan tek bir denklemin köklerini bulmak için kullanılabileceği gibi denklem takımlarının köklerini bulmak için de kullanılabilir. Öncelikle Eşitlik (1)'de verilen bir boyutlu denklemin Newton-Raphson yöntemi ile çözümünü ele alalım.

$$f(x) = c \quad (1)$$

Denklemin kökünü bulmak için keyfi bir x_0 başlangıç noktası belirlenir. Belirlenen bu başlangıç noktasına göre denklemin doğru çözümünden sapma miktarı Δx ise;

$$f(x^0 + \Delta x^0) = c \quad (2)$$

Eşitliğin sol tarafı Taylor Serisine açılırsa Eşitlik (3) elde edilir.

$$f(x^0) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^0 \Delta x^0 + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x}\right)^0 (\Delta x^0)^2 + \dots = c \quad (3)$$

Burada hata terimi olan (Δx^0) 'ın çok küçük olduğu varsayımı ile yüksek dereceli terimler ihmal edilir ve Eşitlik (4) ve (5) elde edilir.

$$\Delta c^0 \cong \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^0 \Delta x^0 \quad (4)$$

$$\Delta c^0 \cong c - f(x^0) \quad (5)$$

Daha sonra Δx^0 değeri başlangıçta belirlenen x_0 başlangıç değerine eklenerek Eşitlik (6)'da verilen ikinci yaklaşık çözüme ulaşılır.

$$x^1 = x^0 + \frac{\Delta c^0}{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^0} \quad (6)$$

Bu işlem denklemin kökleri bulununcaya dek tekrar edilir. Newton-Raphson Algoritmasının genelleştirilmiş hali Eşitlik (7)-Eşitlik (9) arasında verilmiştir.

$$\Delta c^i = c - f(x^i) \quad (7)$$

$$\Delta x^i = \frac{\Delta c^i}{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^i} \quad (8)$$

$$x^{i+1} = x^i + \Delta x^i \quad (9)$$

$j^i = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^i$ olmak üzere Newton-Raphson algoritması yeniden düzenlenirse Eşitlik (10) elde edilir.

$$\Delta c^i = j^i \Delta x^i \quad (10)$$

Bir boyutlu denklem için yapılan bu işlemler n boyutlu denklem sistemi için yeniden yapılacak olursa Eşitlik (11) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^0 \\ c_2 - (f_2)^0 \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1^0}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1^0}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1^0}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2^0}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2^0}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2^0}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n^0}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n^0}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n^0}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ΔX ve ΔC Eşitlik (12) ve Eşitlik (13) ile ifade edilir.

$$\Delta X^i = \begin{bmatrix} \Delta x_1^i \\ \Delta x_2^i \\ \vdots \\ \Delta x_n^i \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Delta C^i = \begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^0 \\ c_2 - (f_2)^0 \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

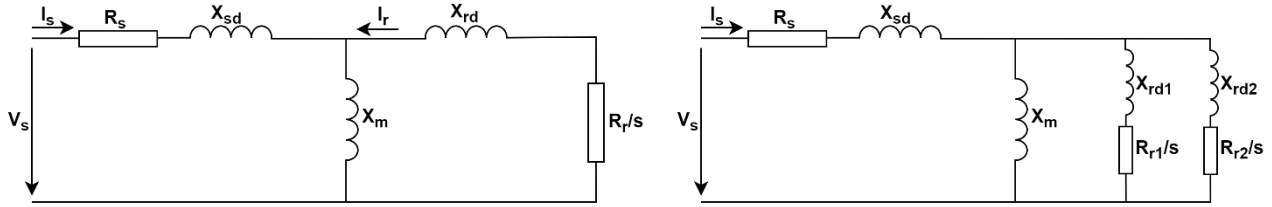
Sonuç olarak n boyutlu bir denklem sistemi için Newton-Raphson algoritması Eşitlik (14)'deki gibi yazılabilir.

$$X^{i+1} = X^i + \Delta X^i \quad (14)$$

3. Asenkron Motorun Eşdeğer Devre Modeli ve Üretici Veri Föylerinde Paylaşılan Değerler (Equivalent Circuit Model of Induction Motor and Parameter Shared in Manufacturer Datasheets)

3.1. Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi (Equivalent Circuit of Induction Motor)

Asenkron motorun karmaşık yapısında, her an değişebilen çalışma koşullarına göre hesap yapmak, stator ve rotor sargılarda akan akımları, momenti, güç faktörünü, kayıpları ve diğer bazı gerekli büyüklükleri hesaplamak, hem oldukça zaman alıcı hem de hata yapma olasılığı yüksek işlemler içerir. Özellikle faz sayısının artırılıp, gücün büyütülmesi durumunda fazlara ilişkin değerleri hesaplamak oldukça zordur. Bu zorluğu önlemek ve işlemleri basite indirmek için, makineye yerleştirilen, aslında birbirinin aynısı olan faz sargılarının meydana getirdiği stator ve rotor bobinleri düşünerek, makinenin sadece bir fazına ait eşdeğer devre modeli çıkartmak ve bunun üzerinde hesaplamalar yapmak daha kolaydır (Zorlu ve Mergen, 2000). Asenkron motorun eşdeğer devresi asenkron motorun çalışma şeklinin anlaşılmasında ve analiz edilmesinde uzun süredir kullanılmaktadır (Diaz vd., 2009). Asenkron motoru temsil eden tek kafesli ve çift kafesli eşdeğer devre modeli Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Asenkron motorun eşdeğer devresi (Induction motor equivalent circuit) a) Tek kafesli model (Singel-cage Model) b) Çift kafesli model (Double-cage model)

Burada V_s statora uygulanan gerilimi, I_s statoradan geçen akımı, I_r rotordan geçen akımın statora aktarılmış eşdeğerini, s ise kaymayı temsil etmektedir. Eşdeğer devre parametreleri ise aşağıdaki gibi isimlendirilmektedir.

R_s = Stator sargı direnci

R_r = Rotor sargı direncinin stator tarafına indirgenmiş değeri

X_{sd} = Stator sargısı kaçak reaktansı

X_{rd} = Rotor sargısı kaçak reaktansının stator tarafına indirgenmiş değeri

X_m = Mıknatıslanma reaktansı

Şekil 1.'de verilen tek kafesli asenkron motorun eşdeğer devresi R_s , X_{sd} , R_r , X_{rd} ve X_m olmak üzere beş parametre içerirken, çift kafesli asenkron motorun eşdeğer devresi ise R_s , R_{r1} , R_{r2} , X_m , X_{sd} , X_{rd1} ve X_{rd2} olmak üzere yedi farklı parametreye sahiptir. Genel olarak pratikte uygulama kolaylığı açısından stator kaçak reaktansı (X_{sd}) ve rotor kaçak reaktansı (X_{rd}) birbirlerine eşit kabul edilir. Dolayısıyla tek kafesli eşdeğer devrede birbirinden bağımsız dört parametre bulunmaktadır (Novotny ve Lipo, 1996). Çift kafesli asenkron motorun birbirlerine eş olan altı, yedi veya sekiz parametre içeren farklı eşdeğer devreleri kullanılmaktadır. Şekil 1.'de yedi parametrelili eşdeğer devre gösterilmiştir. Bu modelde de stator kaçak reaktansı (X_{sd}) ve dış kafes rotor kaçak reaktansı (X_{rd2}) birbirlerine eşit kabul edilebilir.

3.2. Üretici Veri Föylerinde Paylaşılan Değerler (Parameter Shared in Manufacturer Datasheets)

Motor üreticileri son kullanıcının motor seçimini daha doğru yapabilmesi ve üretilen motorun karakteristiğinin tanımlanabilmesi için veri föylerinde motorlarına dair birtakım veriler paylaşmaktadır. Tablo 1.'de örnek olarak bir asenkron motor üreticisine ait şebeke beslemeli genel maksatlı bazı motorların veri föyünde paylaşılan bilgileri verilmiştir.

Bu çalışmada kapsamında asenkron motor üreticileri tarafından veri föylerinde paylaşılan sınırlı karakteristik değerler kullanılacaktır. Kullanılacak olan karakteristik veriler aşağıda açıklamaları ile birlikte sıralanmıştır.

P_n = Anma gücü

V_n = Anma gerilimi

I_n = Anma akımı

F = Frekans

P_f = Güç faktörü ($\cos \varphi$)

N_r = Rotor devir hızı

Poles = Kutup sayısı

I_d/I_n = Kalkış akımının anma akımına oranı

M_d/M_n = Devrilme momentinin anma momentine oranı

Tablo 1. Şebeke beslemeli genel maksatlı motorların elektriksel ve mekanik karakteristikleri (Electrical and mechanical characteristics of general purposed mains powered induction motors)

Motor No	Anma Gücü (P _n) kW	Hız d/dk	Anma Gerilimi (V _n) V	Anma Akımı (I _n) A	Frekans Hz	Kutup Sayısı	Anma Momenti (M _n) N.m	Güç Faktörü (cosφ)	Devrilme Momenti /Anma Momenti (M _d /M _n)	Başlangıç Akımı/Anma Akımı (I _d /I _n)
1	3.72	1750	460	7.35	60	4	25.5	0.85	3.7	7.3
2	7.5	1760	460	13.3	60	4	48	0.89	2.9	6
3	15	1760	460	35	60	4	128	0.90	2.15	4.5
4	37	1780	460	54	60	4	192	0.86	3.7	7.4
5	74.5	1780	460	135.7	60	4	507.5	0.90	3.2	6.6
6	111	1785	460	140.6	60	4	497.5	0.85	4.43	8.75
7	149	1785	460	229.6	60	4	865	0.90	3.85	8
8	3.72	1750	575	5.38	60	4	22.8	0.83	4.38	8.59
9	7.5	1760	575	12.2	60	4	54.2	0.87	3	6.3
10	15	1765	575	22.5	60	4	102	0.88	3	6.44
11	37	1775	575	45.6	60	4	106	0.87	3.9	7.7
12	74.5	1780	575	113	60	4	533	0.91	2.9	6.1
13	111	1785	575	116	60	4	507.5	0.84	4.5	8.8
14	4	1430	400	8.3	50	4	28.8	0.83	3.18	6.1
15	7.5	1440	400	13.2	50	4	48.1	0.87	3.68	7.3
16	15	1460	400	29.2	50	4	112.8	0.90	4.97	10.5
17	37	1480	400	65	50	4	242.5	0.87	3.7	7.6
18	75	1484	400	124.4	50	4	475.1	0.88	4.18	8.6
19	110	1487	400	173.5	50	4	661	0.87	4.5	9.2
20	160	1487	400	270	50	4	1055	0.90	4.26	8.8

4. Newton-Raphson Yönteminin Eşdeğer Devre Parametre Kestirimi Problemine Uygulanması (Implementation of Newton-Raphson Method to Equivalent Circuit Parameter Estimation Problem)

Bu bölümde asenkron motorun Şekil 1’de gösterilen eşdeğer devresi kullanılarak eşdeğer devre parametrelerini ve üretici veri föylerinde paylaşılan deneysel verilerin bulunduğu bir denklem takımı oluşturulmuştur. Asenkron motorun stator kaçak reaktansı (X_{sd}) ile rotor kaçak reaktansının statora indirgenmiş değeri (X_{rd}) yaklaşık olarak eşit kabulü yapılarak denklem sayısı ve denklemleri karmaşıklığı azaltılmıştır. Denklemler elde edilirken anma akımının aktif ve reaktif bileşeni, anma moment ve devrilme momenti eşitlikleri kullanılarak bilinmeyen dört farklı eşdeğer devre parametresinin yer aldığı dört farklı denklem elde edilmiştir. Üretici veri föylerinde verilen anma akımı ve güç faktörü kullanılarak Newton-Raphson yönteminin uygulanacağı ilk iki denklem Eşitlik (15) ve Eşitlik (16)’daki gibi yazılabilir.

$$f_1(x) = \frac{V_n}{I_n} \cos \varphi - \Re_e\{Z_{n_est}\} = 0 \quad (15)$$

$$f_2(x) = \frac{V_n}{I_n} \sin \varphi - I_m\{Z_{n_est}\} = 0 \quad (16)$$

Eşitlik (15) ve Eşitlik (16)’da yer alan eşdeğer devrenin kestirilen toplam giriş empedansı (Z_{n_est}) Eşitlik (17)’de verilmiştir. Burada R_s stator sargı direncini, R_r rotor sargı direncinin stator tarafına indirgenmiş değerini, X_{sd}

stator sargısının kaçak reaktansını, X_{rd} rotor sargısının kaçak reaktansının statora indirgenmiş değerini ve X_m mıknatıslanma reaktansını ve s_n anma çalışmadaki kayma değerini temsil etmektedir.

$$Z_{n_est} = \frac{\frac{jX_m R_r^2}{s_n} - \frac{X_m R_r X_{rd}}{s_n} + \frac{X_m R_r X_{rd} + X_m^2 R_r}{s_n} + jX_m X_{rd}^2 + X_m^2 X_{rd}}{\frac{R_r^2}{s_n^2} + (X_m + X_{rd})^2} + R_s + jX_{sd} \quad (17)$$

Kestirilen parametreler ile hesaplanan eşdeğer devre giriş empedansı (Z_{n_est}) aktif ve reaktif bileşenlerine ayrıldığında, Eşitlik (18) ve Eşitlik (19) elde edilir.

$$\Re\{Z_{n_est}\} = \frac{\frac{R_r^2 R_s}{s_n^2} + R_s (X_m + X_{rd})^2 + \frac{R_r X_m^2}{s_n}}{\frac{R_r^2}{s_n^2} + (X_m + X_{rd})^2} \quad (18)$$

$$I_m\{Z_{n_est}\} = \frac{\frac{R_r^2 (X_m + X_{sd})}{s_n} + (X_m + X_{rd})(X_{rd} X_{sd} + X_{sd} X_m + X_{rd} X_m)}{\frac{R_r^2}{s_n^2} + (X_m + X_{rd})^2} \quad (19)$$

Üretici veri föylerinde verilen anma momenti (M_{n_test}) ve devrilme momenti (M_{D_test}) kullanılarak Newton-Raphson yönteminin uygulanacağı diğer iki denklem Eşitlik (20) ve Eşitlik (21)'deki gibi yazılabilir.

$$f_3(x) = M_{n_test} - M_{n_est} \quad (21)$$

$$f_4(x) = M_{D_test} - M_{D_est} \quad (22)$$

Eşitlik (21)'de yer alan kestirilen anma momenti (M_{n_est}) Eşitlik (23), Eşitlik (24) ve Eşitlik (25)'ten türetilmiştir. Burada P_{n_est} kestirilen parametreler ile hesaplanan mil gücünü, I_{r_est} rotor akımını, n_r rotor devir hızını temsil etmektedir.

$$M_{n_est} = \frac{60 \cdot P_{n_est}}{2\pi \cdot n_r} \quad (23)$$

$$P_{n_est} = \frac{3 \cdot |I_{r_est}|^2 \cdot R_r \cdot (1 - s) \cdot 60}{s_n \cdot 2\pi \cdot n_r} \quad (24)$$

$$I_{r_est} = \frac{V_n - I_n (R_s + jX_{sd})}{R_r / s_n + jX_{rd}} \quad (25)$$

Son olarak Eşitlik (22)'de motorun kestirilen eşdeğer devre parametreleri ile hesaplanan devrilme momenti (M_{D_est}) Eşitlik (26) ile Eşitlik (31) arasında verilen eşitlikle hesaplanabilir. Burada, P_{D_est} devrilme anındaki mil gücünü, I_{rD_est} devrilme anındaki rotor akımını, $I_{in,D}$ devrilme anındaki motor akımını, Z_{D_est} devrilme anındaki motor empedansı, s_D devrilme anındaki kayma değerini temsil etmektedir.

$$M_{D_est} = \frac{60 \cdot P_{D_est}}{2\pi \cdot n_r} \quad (26)$$

$$P_{D_est} = \frac{3 \cdot |I_{rD_est}|^2 \cdot R_r \cdot (1 - s_D) \cdot 60}{s_D \cdot 2\pi \cdot n_r} \quad (27)$$

$$I_{rD_est} = \frac{V_n - I_{in,D} (R_s + jX_{sd})}{R_r / s_D + jX_{rd}} \quad (28)$$

$$I_{in,D} = \frac{V_n}{Z_{D_est}} \quad (29)$$

$$Z_{D_est} = \frac{\frac{jX_m R_r^2}{s_D} - \frac{X_m R_r X_{rd}}{s_D} + \frac{X_m R_r X_{rd} + X_m^2 R_r}{s_D} + jX_m X_{rd}^2 + X_m^2 X_{rd}}{\frac{R_r^2}{s_D^2} + (X_m + X_{rd})^2} + R_s + jX_{sd} \quad (30)$$

$$s_D = \frac{s_n}{\frac{M_{D_test}}{M_{n_test}} - \sqrt{\frac{M_{D_test}^2}{M_{n_test}^2} - 1}} \quad (31)$$

Daha sonra elde edilen doğrusal olmayan denklem sistemi ($f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$, $f_4(x)$) Newton-Raphson yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Newton-Raphson yönteminin bilinen diğer yöntemlerden en büyük üstünlüğü Newton-Raphson yönteminin çok iyi bir şekilde sonuca yakınsaması veya hiç sonuç vermemesidir. Newton-Raphson algoritmasının sonuca ulaşamamasının iki sebebi olabilir. Bu sebeplerin önemlisi eşdeğer devreden türetilen denklemlerin hatalı olmasıdır. Eğer denklemler doğru bir şekilde elde edildiği halde yöntem sonuca gidemiyorsa bu veri föylerinde verilen değerlerin tutarsızlığına işaret etmektedir. Bu algorithmada en kritik parametreler devrilme momenti ve devrilme kaymasıdır. Bazen devrilme momenti ve devrilme kayması ile türetilen dördüncü denklem, kalkış akımı eşitliği yazılarak da elde edilebilir. Yöntemin hızlı bir şekilde sonuca yakınsaması için yine veri föyünde verilen kalkış akımı değerinin doğru olması gerekir. Denklemler doğru yazıldığı halde algoritma sonuca gidemiyor ise maksimum moment ve başlangıç akımı için algoritmayı sonuca götürecek yeni değerler bulunabilir (Pedra, 2008).

Üretici veri föyünden alınan değerler kullanılarak R_s , X_{sd} , R_r , X_{rd} ve X_m eşdeğer devre parametrelerinin bulunabilmesi için bir önceki bölümde elde edilen dört denklem $F(x) = 0$ formunda yazılmalıdır. Burada $F = (f_1, f_2, f_3, f_4)$ ve $x = (R_s, X_{sd}, R_r, X_m)$ şeklinde ifade edilebilir. Newton-Raphson yönteminde başlangıç koşullarının doğru seçilmesi sonuca hem doğru hem de kısa sürede ulaşmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için aşağıdaki başlangıç koşulları kullanılmıştır.

$$X_m = \frac{3 \cdot V_n^2}{Q_n} \quad (32)$$

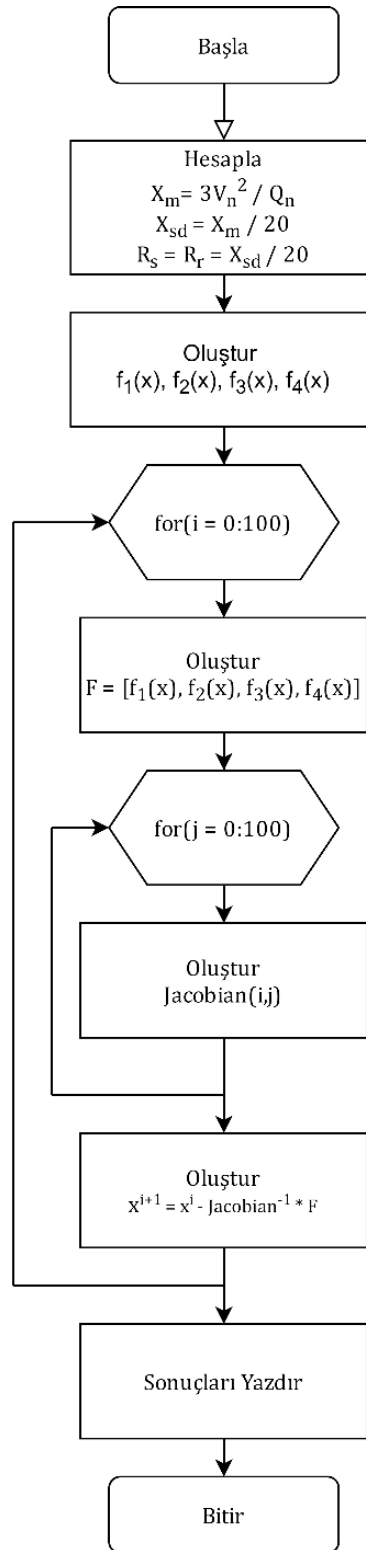
$$X_{sd} = \frac{X_m}{20} \quad (33)$$

$$R_s = R_r = \frac{X_{sd}}{20} \quad (34)$$

Bu çalışmada, elde edilen doğrusal olmayan denklem sisteminin Newton-Raphson yöntemi ile çözümü için yazılan algoritma aşağıdaki adımları takip etmektedir.

- 1) Veri föyünden gerekli değerleri oku.
- 2) Başlangıç koşullarını hesapla
- 3) Eşdeğer devreden türetilen denklemleri oluştur($f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$, $f_4(x)$).
- 4) İterasyon sayısını tanımla ve döngü değişkeni olarak ata
- 5) $F = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x))$ denklem takımını oluştur.
- 6) Denklem sayısını ikinci bir döngü değişkeni olarak tanımla.
- 7) 4x4 boyutunda Jacobian matrisini oluştur.
- 8) Başlangıç koşullarını $x^{i+1} = x^i - Jacobian^{-1}F$ olacak şekilde güncelle.
- 9) Döngü değişkeni en yüksek iterasyon sayısından küçük ise 5. Adıma dön.
- 10) Sonuçları yazdır.
- 11) Programı sonlandır.

Newton-Raphson algoritmasına ait algoritma akış şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Newton-Raphson algoritması akış şeması (Newton-Raphson algorithm flowchart)

5. Sayısal Sonuçlar (Numerical Results)

Asenkron motorların vektör kontrollü sürücüler için üretici veri föylerinden eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için önerilen algoritma 20 farklı asenkron motor için test edilmiştir. Algoritmanın başarısının daha iyi anlaşılabilmesi için testlerde güç, gerilim, güç faktörü ve frekans gibi plaka değerleri birbirinden çok farklı mertebelerde olan asenkron motorlar kullanılmıştır. Şekil 2'de akış şeması verilen algoritma MATLAB üzerinde oluşturulmuştur. Tablo 1'de üretici veri föyü bilgileri verilen 20 farklı asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri önerilen algoritma kullanılarak kestirilmiş, tahmin edilen eşdeğer devre parametreleri ve deneysel

olarak elde edilen eşdeğer devre parametreleri Tablo 2’de ve Tablo 3’de verilmiştir. Tasarlanan algoritmanın başarımının irdelenmesi için kestirim hataları da tablolarda verilmiştir.

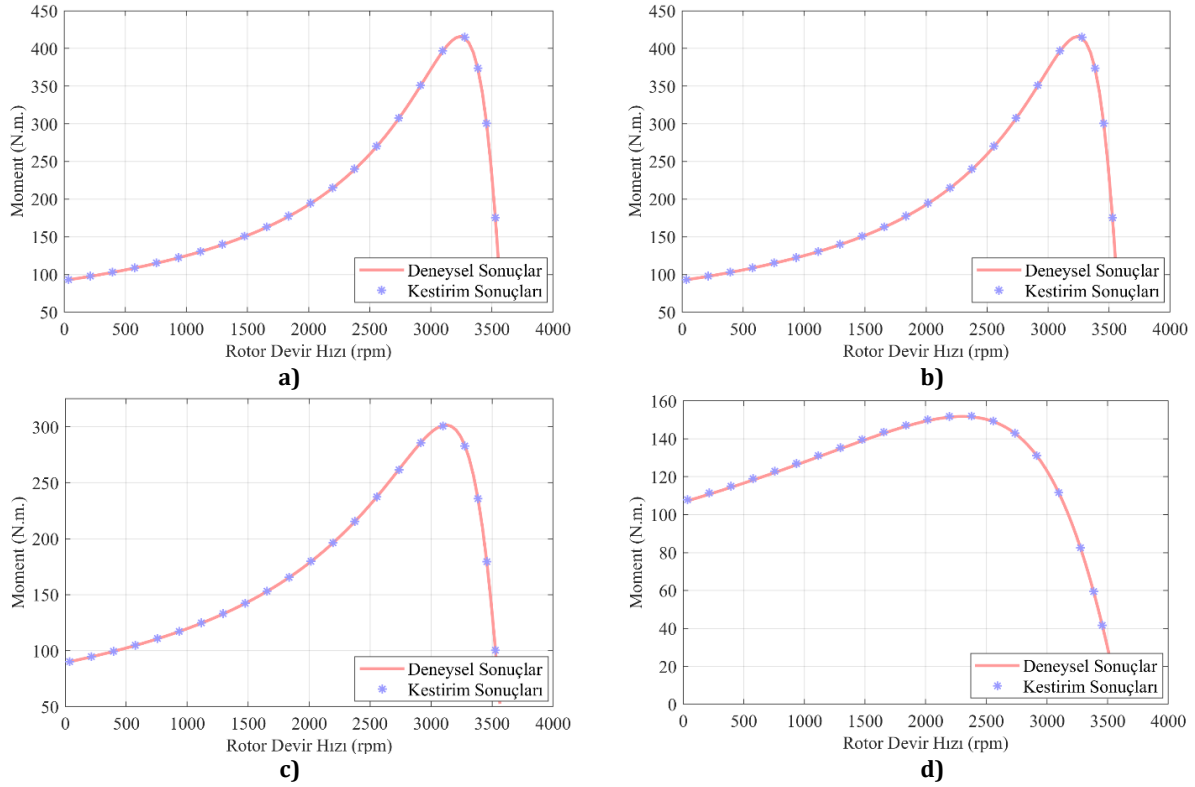
Tablo 2. Önerilen algoritma ile kestirilen stator devresine ait eşdeğer devre parametreleri ve bu parametrelerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Comparison of stator resistance, stator and rotor leakage reactance estimated by the proposed algorithm and experimental results)

Motor No	R_s (Deneysel)	R_s (Kestirim)	Kestirim Hatası (Yüzde)	$X_{sd} = X_{rd}$ (Deneysel)	$X_{sd} = X_{rd}$ (Kestirim)	Kestirim Hatası (Yüzde)
1	1,115	1,1714	-5,06	2,2521	2,2277	1,09
2	0,6837	0,6847	-0,15	1,565	1,5628	0,16
3	0,2761	0,2746	0,54	0,8259	0,8248	0,14
4	0,0996	0,1025	-2,90	0,3268	0,326	0,26
5	0,0395	0,0405	-2,35	0,1466	0,1463	0,24
6	0,0302	0,0314	-3,97	0,1066	0,1063	0,36
7	0,0181	0,0194	-6,71	0,0716	0,0713	0,46
8	2,053	2,0461	0,34	3,0540	3,0468	0,24
9	0,9174	0,9353	-1,95	2,0632	2,0531	0,49
10	0,454	0,4637	-2,14	1,0989	1,0953	0,33
11	0,0987	0,1063	-7,69	0,4693	0,4674	0,42
12	0,0596	0,0614	-2,97	0,2386	0,2379	0,31
13	0,0458	0,0447	2,55	0,1598	0,1596	0,15
14	1,405	1,4102	-0,37	1,8343	1,8238	0,58
15	0,7384	0,7411	-0,37	0,9566	0,9517	0,51
16	0,2147	0,219	-2,00	0,3113	0,3082	1,01
17	0,0823	0,0858	-4,21	0,2274	0,2262	0,55
18	0,0355	0,037	-4,17	0,1052	0,1048	0,42
19	0,0215	0,0215	0,23	0,071	0,0709	0,14
20	0,0137	0,0137	0,65	0,0477	0,0477	0,11

Tablo 3. Önerilen algoritma ile kestirilen rotor direnci ile mıknatıslanma reaktansı değerleri ve bu parametrelerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Comparison of rotor resistance, magnetization reactance estimated by the proposed algorithm and experimental results)

Motor No	R_r (Deneysel)	R_r (Kestirim)	Kestirim Hatası (Yüzde)	X_m (Deneysel)	X_m (Kestirim)	Kestirim Hatası (Yüzde)
1	1,083	1,099	-1,48	76,7930	74,6226	2,83
2	0,451	0,4511	-0,02	56,0208	55,99	0,06
3	0,1645	0,1645	0,00	28,7041	28,3849	1,11
4	0,05837	0,0583	0,12	11,4567	11,4124	0,39
5	0,02215	0,0221	0,23	6,2731	6,2234	0,79
6	0,01721	0,0172	0,06	4,1280	4,1068	0,51
7	0,009956	0,0099	0,56	3,5493	3,5132	1,02
8	1,904	1,9044	-0,02	118,526	118,4565	0,06
9	0,6258	0,6251	0,11	69,8941	69,3406	0,79
10	0,2938	0,2935	0,10	40,6019	40,4009	0,50
11	0,1081	0,1079	0,19	17,7826	17,6496	0,75
12	0,03281	0,0328	0,03	10,3371	10,235	0,99
13	0,02634	0,0264	-0,23	6,0280	5,9966	0,52
14	1,395	1,395	0,00	54,0982	53,9657	0,24
15	0,7402	0,7401	0,01	38,9871	38,8772	0,28
16	0,2205	0,2209	-0,18	20,1658	20,062	0,52
17	0,0503	0,0502	0,20	8,5168	8,4452	0,84
18	0,02092	0,0209	0,10	4,7438	4,706	0,80
19	0,01231	0,0123	0,08	3,2609	3,2475	0,41
20	0,007728	0,0077	0,36	2,4158	2,4157	0,01

Önerilen algoritma sayesinde stator direnci en fazla % 6.7 hata ile, rotor direncinin stator tarafına indirgenmiş değeri en fazla % 1.9 hata ile, stator ve rotor kaçak reaktansı en fazla % 1.09 ile ve mıknatıslanma reaktansı da en fazla % 2.83 hata ile tahmin edilebilmiştir. Tablolardaki sonuçlara ek olarak algoritmanın kestirdiği eşdeğer devre parametreleri ile dört farklı motorun hız-moment karakteristiği hesaplanmış ve bu karakteristik ile deneysel olarak elde edilen hız-moment karakteristiği aynı grafik üzerinde Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 Farklı Asenkron Motora Ait Rotor Devir Hızı – Moment Grafikleri: a) 3 Numaralı Motor, b) 5 Numaralı Motor, c) 10 Numaralı Motor, d) 15 Numaralı Motor (Torque -Rotor Speed Curves of 4 Different Induction Motors: a) Motor No. 3, b) Motor No. 5, c) Motor No. 10, d) Motor No. 15)

Şekil 3'ten kolaylıkla görülebileceği gibi, algoritma sayesinde elde edilen sonuçların farklı motorlarda ve farklı yük ve çalışma koşullarındaki deneysel sonuçlarla büyük bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

6. Sonuç (Conclusion)

Asenkron motorlarda hız ve moment kontrolünün geniş aralıkta yüksek başarılı bir şekilde yapılabilmesi için vektör kontrol algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat vektör kontrol yöntemleri genellikle motor modeline dayalı olarak yapıldığı için hız ve moment kontrolünün hassasiyeti kontrol algoritmalarında tanımlanan asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerine karşı duyarlıdır. Dolayısıyla yüksek başarılı bir hız-moment kontrolü için asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin olabildiğince yüksek doğrulukla tanımlanması gerekir.

Bu çalışmada sadece üreticilerin veri föylerinde paylaştığı kısıtlı bilgiler ile asenkron motorun vektör kontrollü sürücüler için eşdeğer devre parametrelerinin tahmini gerçekleştirilmiştir. Öncelikle asenkron motorun eşdeğer devresinden türetilen doğrusal olmayan denklemler üretici veri föylerindeki verilen bilgiler doğrultusunda elde edilmiştir. Tahmin yöntemi eşdeğer devreden türetilen doğrusal olmayan denklemlerin Newton-Raphson yöntemi ile çözülmesi ilkesine dayanmaktadır. Önerilen denklem sistemi ve çözüm algoritması 20 farklı asenkron motor için test edilmiş ve deneysel olarak elde edilen eşdeğer devre parametreleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda üretici föylerinde paylaşılan bilgilerin yüksek doğruluklu olması algoritmanın başarımının oldukça etkilemektedir. Üreticilerin paylaştığı veriler ile algoritma sonuca ulaşmadığında bu bilgilerden yola çıkarak algoritmayı sonuca götürecek yeni değerler bulunabilir. Buna ek olarak önerilen algoritma başlangıç koşullarına oldukça bağlıdır. Bunun üstesinden gelebilmek için motor gücüne göre başlangıç koşullarının uyarlandığı bir algoritma önerilebilir.

Önerilen algoritma bu hali ile stator direncini en fazla % 6.7 hata ile, rotor direncinin stator tarafına indirgenmiş değerini en fazla % 1.9 hata ile, stator ve rotor kaçak reaktansını en fazla % 1.09 ile ve mıknatıslanma reaktansını da en fazla % 2.83 hata ile tahmin edilebilmektedir. Karşılaştırmalı hata analizlerinin yanı sıra örnek olarak seçilen 4 farklı motorun algoritmanın kestirdiği eşdeğer devre parametreleri ile hız-moment karakteristiği hesaplanmış ve bu karakteristik ile deneysel olarak elde edilen hız-moment karakteristiği görsel bir karşılaştırma sunabilmek için aynı grafik üzerinde çizilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abdelaziz, M. M., & El-Saadany, E. F. (2013, July). Estimation of induction motor single-cage model parameters from manufacturer data. In 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-5). IEEE.
- Akram, S., & Ann, Q. U. (2015). Newton raphson method. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(7), 1748-1752.
- Al-Jufout, S. A., Al-Rousan, W. H., & Wang, C. (2018). Optimization of induction motor equivalent circuit parameter estimation based on manufacturer's data. *Energies*, 11(7), 1792.
- Alonge, F., D'Ippolito, F., Ferrante, G., & Raimondi, F. M. (1998). Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 145(6), 587-593.
- Amaral, G. F. V., Baccarini, J. M. R., Coelho, F. C. R., & Baccarini, L. M. R. (2020). A High Precision Method for Induction Machine Parameters Estimation from Manufacturer Data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- Arslan, M. (2010). Diferansiyel evrim algoritması yardımıyla asenkron motor parametrelerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydeniz, M. G. (2005). Asenkron motorların hız algılayıcısız kontrolünde yeni bir algoritmanın geliştirilmesi ve uygulaması. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bajrektarevic, Edina, "Parameter identification of induction motor using a genetic algorithm" (2002). Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 1217.
- Bingöl, O. Üç-Seviyeli Evirici ile Bir Asenkron Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Vektör Kontrolü. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(3), 452-459.
- Cirrincone, M., & Pucci, M. (2002, July). Experimental verification of a technique for the real-time identification of induction motors based on the recursive least-squares. In 7th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No. 02TH8623) (pp. 326-334). IEEE.
- Çanakoğlu, A. İ., YETGİN, A. G., Temurtaş, H., & Turan, M. (2014). Induction motor parameter estimation using metaheuristic methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 22(5), 1177-1192.
- Çukur, R. (2015). Vektör Denetim Yönteminde İki Farklı Hız Gözlemcisinin Karşılaştırılması Ve Motor Parametrelerindeki Değişimlerin Denetim Performansına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Diaz, A., Saltares, R., Rodriguez, C., Nunez, R. F., Ortiz-Rivera, E. I., & Gonzalez-Llorente, J. (2009, May). Induction motor equivalent circuit for dynamic simulation. In 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (pp. 858-863). IEEE.
- Fan, M., Chai, J., & Sun, X. (2014, October). Induction motor parameter identification based on T-model equivalent circuit. In 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 2535-2539). IEEE.
- Gezer, A., Gülbahçe, M. O., & Kocabas, D. A. (2018). Generalised Model of Multiphase Tesla's Egg of Columbus and Practical Analysis of 3-Phase Design. *Electrica*, 18(2), 151-158.
- Guasch-Pesquer, L., Youb, L., Jaramillo-Matta, A. A., González-Molina, F., & Barrado-Rodrigo, J. A. (2015, September). Parameters calculation of single-and double-cage models for induction motors from manufacturer data. In 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION) (pp. 237-242). IEEE.
- Haque, M. H. (2008). Determination of NEMA design induction motor parameters from manufacturer data. *IEEE transactions on Energy conversion*, 23(4), 997-1004.
- Kaygısız, F. (2008). Asenkron Makinaların Matlab'da Tasarımı ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lee, K., Frank, S., Sen, P. K., Polese, L. G., Alahmad, M., & Waters, C. (2012, September). Estimation of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data. In 2012 North American Power Symposium (NAPS) (pp. 1-6). IEEE.
- Lima, S. C., Wengerkievicz, C. A., Batistela, N. J., Sadowski, N., da Silva, P. A., & Beltrame, A. Y. (2017, November). Induction motor parameter estimation from manufacturer data using genetic algorithms and heuristic relationships. In 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) (pp. 1-6). IEEE.
- Mohammadi, H. R., & Akhavan, A. (2014). Parameter estimation of three-phase induction motor using hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization. *Journal of Engineering*, 2014.
- Novotny, D. W., & Lipo, T. A. (1996). *Vector control and dynamics of AC drives* (Vol. 41). Oxford university press.
- Özköse, E. (2019). Newton-Raphson yöntemi ile rüzgar santrali için en iyilenmiş şebeke entegrasyonu. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Özyurt, Ç. H. (2005). Parameter and speed estimation on induction motors from manufactures data and measurements / [M.S. - Master of Science]. Middle East Technical University.
- Pedra, J. (2008). On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(4), 1709-1718.
- Stephan, J., Bodson, M., & Chiasson, J. (1994). Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors. *IEEE Transactions on industry applications*, 30(3), 746-759.
- Susanto, J., & Islam, S. (2013, October). Estimation of induction motor parameters using hybrid algorithms for power system dynamic studies. In 2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) (pp. 1-6). IEEE.

- Tang, J., Yang, Y., Blaabjerg, F., Chen, J., Diao, L., & Liu, Z. (2018). Parameter identification of inverter-fed induction motors: A Review. *Energies*, 11(9), 2194.
- Ukil, A., Bloch, R., & Andenna, A. (2011). Estimation of induction motor operating power factor from measured current and manufacturer data. *IEEE transactions on energy conversion*, 26(2), 699-706.
- Ursem, R. K., & Vadstrup, P. (2003, December). Parameter identification of induction motors using differential evolution. In *The 2003 Congress on Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. (Vol. 2, pp. 790-796)*. IEEE.
- Zorlu, S., Mergen, F. (2000) *Elektrik Makineleri 2 Asenkron Makineler*, Birsen Yayınevi
- Wengerkiewicz, C. A., Elias, R. D. A., Batistela, N. J., Sadowski, N., Kuo-Peng, P., Lima, S. C., ... & Beltrame, A. Y. (2017). Estimation of three-phase induction motor equivalent circuit parameters from manufacturer catalog data. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(1), 90-107.
- Zheng, J., Wang, Y., Qin, X., & Zhang, X. (2008). An offline parameter identification method of induction motor. In *2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*.