

Üç Fazlı Asenkron Makinanın Geçici Hal Davranışı için Yenilikçi bir Matematiksel Model Geliştirilmesi

Design of an Innovative Mathematical Model for Transient Response of Three Phase Induction Machine

Seyhun Beyza Yabacı¹, Ahmet Kubilay Atalay¹, Derya AhmetKocabaş¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Teknik Üniversitesi

yabaci@itu.edu.tr, atalaya@itu.edu.tr, kocabasde@itu.edu.tr

Özet

Üç fazlı asenkron makinanın geleneksel matematiksel modeli sürekli hal davranışı için yeterli iken açma-kapama, besleme enerjisinin kesilmesi, yeniden enerjilendirme gibi durumlarda yetersiz kalmakta ve gerçekte farklı sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada geleneksel modelin yetersiz kaldığı durumlarda da geçerli olan yeni bir model geliştirilmiştir. Yeni ve eski model MATLAB altında kod olarak kurulmuş ve koşturulmuştur. Gerçek bir asenkron makinenin parametreleri kullanılarak sürekli ve geçici hal davranışları incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kurulan yenilikçi modelin başarımının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Abstract

Traditional mathematical model of a three phase induction machine becomes inadequate and gives different results from real values in re-switching, power interruption and re-supply modes while it is sufficient in steady state behavior analysis. In this study, a new mathematical model was developed that is already reliable in transient state analysis while the traditional model remains insufficient. Both novel and traditional models were established and executed in MATLAB. Steady state and transient state behaviors were both analyzed and the results were compared. It was proved that newly established innovative model has greater success.

Giriş

Asenkron makinalar endüstride en yaygın kullanılan elektrik makinalardır. Diğer makinalara kıyasla daha ucuz ve yapısının basit olması tercih edilmelerinde önemli etkenlerdir. Fazla bakım gerektirmemelerinin yanı sıra, çalışırken ark oluşmaması asenkron makinaların her türlü ağır şartlarda çalışabilmelerine imkan tanır. Uzun ömürlü ve kullanım alanlarına göre yüksek verimli olsalar da kontrolünün zor olması bu makinaların en önemli dezavantajlarından biridir.[1] Günümüzde işletmelerin en temel amaçlarından birisi sürüş sistemlerinin çalışmasında güvenliğin ve sürekliliğin sağlanmasıdır. Bu nedenle işletme bünyesindeki sistemlerin sürekli izlenmesi ve denetimlerinin iyi yapılması gereklidir. Elektrik makinalarının dinamik analizi işletme sırasında karşılaşılabilecek problemleri öngörebilmek için başvuru alan

yaygın yöntemlerden biridir. Böylece sürüş sisteminin gerek tasarımı sırasında gerekse işletilmesi sırasında oluşabilecek sorunların önüne geçilebilir. Bu amaçla sürüş sisteminin matematiksel modeli kurularak uygun bir yazılımla benzetimi yapılır. Bununla birlikte geleneksel matematiksel modellerin yetersiz kaldığı durumlar vardır. Bu durumlar açma- kapama veya elektrik kesintisi gibi makinanın enerjisinin kesilip geri verildiği geçici hal durumlarıdır. [2-3]

Asenkron makinaların arızalarının çoğu yol alma, açma kapama ve yük değişimi gibi geçici haldeki, elektriksel ve mekanik zorlanmalardan doğmaktadır. Bu nedenle makinanın dinamik benzetiminde geçici hal davranışının da doğru biçimde incelenmesi önem arz etmektedir. Sistemi en doğru şekilde temsil eden durum denklemleri belirlenerek ve sistem davranışını veren matematiksel ifadeler elde edilerek sistem modellenir.

Bir elektrik makinası eşdeğer devre denklemleri veya durum denklemleri ile olmak üzere iki şekilde incelenebilir. Makinanın dinamik benzetimini yapabilmek için durum denklemleri kullanılarak matematiksel modeli kurulur. Ancak bu modelin içerisindeki matematiksel ifadeler makinanın fiziksel kısıtlarını içermez. Bu kısıtların dinamik benzetimde dikkate alınmaması özellikle geçici hal davranışında, gerçekte uyumsuz sonuçlar elde edilmesine yol açar. Bu durumlarda oluşan ani moment ve akım salınımları bu değerlerin sürekli hal değerlerinin üzerine defalarca çıkmasına yol açabilir. Çok kısa süreli olmasına rağmen ani akım ve moment darbelerinin tekrar etmesi makinanın sargılarına ve mil gibi mekanik kısımlarına zarar verebilir. [3-7]

Bu çalışmada, fiziki, elektriksel, mekanik gerçek kısıtların matematiksel ifade olarak dikkate alınması sonucunda daha gerçekçi bir matematiksel model elde edilmiştir.

1. Asenkron Makinanın Matematiksel Modeli

Asenkron makinanın matematiksel modeli makineye yönelik durum denklemleri kullanılarak elde edilebilir. Öncesinde modeli basitleştirebilmek için Clarke dönüşümü uygulanır. Clarke dönüşümü makineye uygulanan üç fazlı gerilimin, iki boyutlu sabit referans eksen takımında ifade edilmesini sağlar. Durum denklemleri de Clarke dönüşümü ile elde edilen bileşenlere göre oluşturulur. Clarke dönüşümü matrisi (1)'de verilmiştir. Faz gerilimlerinin Clarke dönüşüm matrisi ile çarpılması sonucunda α ve β bileşenleri elde edilir.

Hesapların sonunda elde edilen stator akımı α ve β bileşenleri de Clarke dönüşüm matrisinin tersi ile çarpılarak gerçek değerleri elde edilir.

$$T_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sonrasında ise makinanın durum denklemleri bu bileşenler cinsinden ifade edilir. Asenkron makina 5 durum denklemi ile modellenir. Bu denklemler (2-6)'da verilmiştir.[3,8] Denklemlerdeki sembollerin açıklamaları ise Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1 Sembol listesi

Sembol	Açıklama
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Stator gerilimleri abc değerleri
V_a, V_b, V_0	Stator gerilimlerinin $\alpha\beta 0$ değerleri
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Stator akımları abc değerleri
i_a, i_b, i_0	Stator akımlarının $\alpha\beta 0$ değerleri
Ψ	Akı
R_s	Stator direnci
R_r	Rotor direnci
R_e	Eşdeğer direnç
L_s	Stator endüktansı
L_r	Rotor endüktansı
L_m	Mıknatıslanma endüktansı
Ω	Açısal hız
Σ	Kaçak faktörü
P	Kutup çifti sayısı
J	Eylemsizlik
B	Viskoz sürtünme katsayısı
T_e	Endüklenen moment
T_L	Yük momenti

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{V_{s\alpha}}{\sigma L_s} + \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{L_m}{L_r} \left(\frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} + p\omega \psi_{r\beta} \right) - R_e i_{s\alpha} \right) \quad (2)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{V_{s\beta}}{\sigma L_s} + \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{L_m}{L_r} \left(\frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} - p\omega \psi_{r\alpha} \right) - R_e i_{s\beta} \right) \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{s\alpha} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - p\omega \psi_{r\beta} \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{s\beta} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + p\omega \psi_{r\alpha} \quad (5)$$

$$T_e = p \frac{L_m}{L_r} (i_{s\beta} \psi_{r\alpha} - i_{s\alpha} \psi_{r\beta}) \quad (6)$$

Bu denklemlerde kullanılan R_e eşdeğer direnci ve σ kaçak faktörü ifadeleri de sırasıyla (7) ve (8)'de verilmiştir.

$$R_e = R_s \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \quad (7)$$

$$\sigma = 1 - \left(\frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) \quad (8)$$

Son olarak genel hareket denklemi (9)'da verilmiştir.[3,8]

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (9)$$

Matematiksel model oluşturulurken bazı varsayımlar yapılmıştır. Bunlar aşağıda listelenmiştir.

- Rotor çubukları simetrik ve her çubuk bir rotor faz sargısı varsayılmıştır.
- Manyetik doyma, dış ve oluk etkileri ihmal edilmiştir.
- Manyetik geçirgenlik sonsuz kabul edilmiştir.
- Demir kayıpları ve deri etkisi ihmal edilmiştir.
- Direnç ve endüktansa sıcaklığın ve frekansın etkisi ihmal edilmiştir. [4]

2. Geleneksel Matematiksel Model Benzetimi

2.1. Geleneksel Modelin Sürekli Halde Benzetimi

Bir önceki kısımda izah edilen geleneksel model MATLAB yazılımı kullanılarak hazırlanmış ve benzetimi yapılmıştır. Viskoz sürtünme katsayısının her yükleme durumu için sabit olduğu kabul edilmiştir.

Benzetim 1,5 saniye süre için yapılmış olup elde edilen değerler makinanın plaka değerleri ile karşılaştırılmış ve modelin sürekli halde doğruluğu irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge-2 verilmiştir.

Çizelge-2 Benzetim sonuçları ve plaka değerleri

	Akım (A)	Mil hızı (d/d)	Moment(N.m)
Plaka değerleri	1,555	1435	3,692
Benzetim sonuçları	1,618	1438	3,8

2.2. Geleneksel Modelin Açma-Kapama Benzetimi

Bu aşamada, bir önceki kısımda sürekli hal incelemesi yapılan asenkron makinanın açma-kapama durumu için benzetimi yapılmıştır. Motor yol alıp sürekli çalışma koşullarına ulaştıktan sonra $t=0,8$ sn anında enerjisi kesilmiş ve $t=1$ sn anında enerjisi geri verilmiştir. Benzetim yine 1,5sn süreyle yapılmıştır. Şekil-1'de benzetim sonuçları verilmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde modelin yetersiz kaldığı noktalar şunlardır;

- Hız-Zaman eğrisi incelendiğinde, enerji kesildikten sonra motorun yavaşlamakta ve eylemsizliğine bağlı bir süre sonra durup, ters yönde dönmeye başladığı görülmektedir. Normal şartlar altında enerjisi kesilen motorun durduktan sonra durgun kalması ve ters yöne dönmemesi gerekir. Açma anında, stator akımının ve dolayısıyla akımın α - β bileşenlerinin ani olarak sıfır olması ve sıfır kalması için bir koşul eklenmiştir.
- Stator akımının α - β bileşenlerine ilişkin eğriler incelendiğinde bu akımların enerjinin kesilme anından birkaç örnekleme zamanı sonra sıfır oldukları ve bu aralıkta akım darbeleri olduğu izlenmiştir. Oysaki stator akımının α - β bileşenlerinin enerjinin kesilme anında herhangi bir akım darbesi oluşturmadan sıfır olması gerekir.
- Rotor akısı α - β bileşenlerine ait eğriler incelendiğinde ise rotor akı bileşenlerinin birkaç örnekleme zamanı sonrası ve mil hızından bağımsız bir şekilde düzensiz ve darbeli olarak sıfırlandığı görülmektedir. Ancak rotor akısının α - β bileşenlerinin mil hızına bağlı bir şekilde ve düzgün bir biçimde azalması, mil hızı sıfır olduğunda da sıfıra ulaşması gerekir.

Matematiksel modelin bu yetersizlikleri sadece açma anının değil kapama anının da hatalı incelenmesine yol açmaktadır.

3. Önerilen Modelin Benzetimi

Geleneksel modele yetersizliklerini giderebilmek için bazı özel koşullar eklenmiştir. Böylece geçici durumda da güvenilir sonuçlar veren bir matematiksel model elde edilmiştir. Bu koşullar aşağıda verilmiştir.

- Açmadan sonra, rotorun hızı sıfıra ulaştıktan sonra negatif değere düşmemesi için bir koşul eklenmiştir
- Açma anında, stator akımının ve dolayısıyla akımın α - β bileşenlerinin ani olarak sıfır olması ve sıfır kalması için bir koşul eklenmiştir.

Önerilen yeni model kullanılarak aynı açma kapama zamanlarında yapılan benzetim sonuçları Şekil-2’de verilmiştir. Yeni model ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde koşulların yerine geldiği görülmektedir. Aynı zamanda rotor akısı-zaman eğrilerine bakıldığında da bu konuda modele herhangi bir uyarılma yapılmamasına rağmen eğrinin istenen biçime, zamanla düzgün olarak azalıp sıfıra ulaşan, geldiği görülmüştür.

4. Geleneksel Model ile Önerilen Modelin Karşılaştırılması

Geleneksel model ve yeni modeli karşılaştırmak için bu kısımda aynı şartlar altında iki modele de benzetim yapılmıştır. Benzetim şartları aşağıda verilmiştir.

- 1.5 sn süreyle benzetim yapılmıştır.
- $t=0.8$ sn anında enerji kesilmiştir
- Sırasıyla $t=0.85$ sn; $t=0.90$ sn; $t=0.95$ sn ; $t=1.00$ sn anlarında enerjisi geri verilerek her bir kapama anı için ayrı ayrı benzetim yapılmıştır.
- Motor kalkışta anma yüküyle yüklenmiş ve anma yükü hiç bir zaman kaldırılmamıştır.

Bu benzetimler sonucunda motorun enerjisi kesildikten sonra çeşitli kapama anlarında oluşacak en yüksek pozitif ve en yüksek negatif moment değerleri belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge-3’de verilmiştir. Böylece motora tekrar enerji vermek için uygun olan ve olmayan zamanlarla ilgili fikir edinilmiştir. Çizelge-3 incelendiğinde $t=0.85$ sn kapama anında önerilen model ile hesaplanan en yüksek negatif moment değeri geleneksel model ile hesaplanana göre çok yüksektir. Bu kapama anı için bahsi geçen moment darbesi geleneksel model kullanılarak yapılan benzetimlerde farkedilemez. Bu kapama anı için yapılan benzetimler Şekil-3, Şekil-4 ve Şekil-5’te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil-5’teki hız-zaman eğrisi incelendiğinde kapama anında milin henüz durmadığı görülmektedir. Bu nedenle endüklenen negatif moment değerinin bu denli yüksek olması mile zarar verebilir. Bu tehlikeli durum geleneksel model ile yapılan benzetimlerde görülememesine rağmen, önerilen model bu

tehlikeli durumu benzetim aşamasındayken ortaya çıkarabilir. Dolayısıyla önerilen model kullanılarak açma-kapama veya elektrik kesintisi gibi durumlarda motora enerjinin yeniden verileceği güvenli kapama anı belirlenebilir.

Çizelge-3 Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

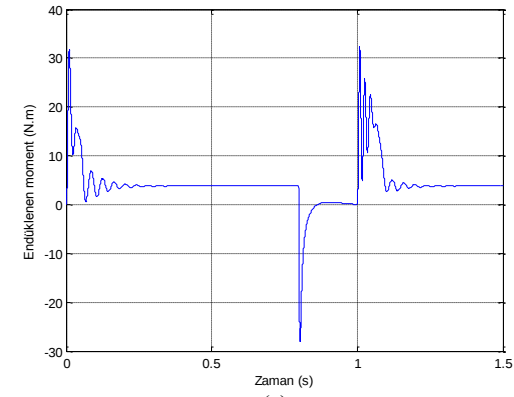
Kapama Zamanı (s)	Geleneksel Model		Önerilen Model	
	En Yüksek Negatif Moment (N.m)	En Yüksek Pozitif Moment (N.m)	En Yüksek Negatif Moment (N.m)	En Yüksek Pozitif Moment (N.m)
0,85	-0,712	20,528	-17,777	17,486
0,9	-3,479	42,492	-2,995	22,626
0,95	-2,273	40,223	-1,527	31,308
1	0	38,280	0	30,764

5. Sonuçlar

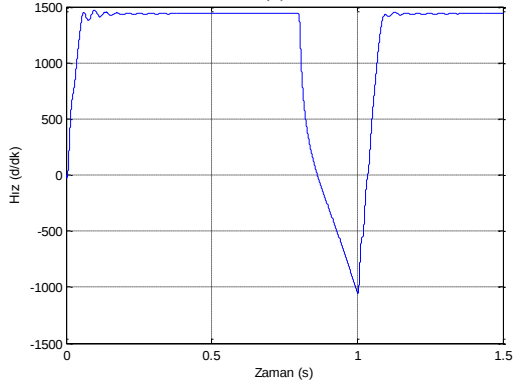
Yük altında çalışan asenkron makinalarda açma- kapama veya enerjinin kesilip yeniden geri verilmesi gibi geçici durumlarda, tekrar kapama anında yüksek negatif moment darbeleri oluşabilir. Endüklenen yüksek negatif moment darbeleri motor milinin burulmasına ve zarar görmesine neden olabilmektedir.

Enerjinin kesilip kısa süre içerisinde geri geldiği anahtarlama veya açma-kapama, gibi geçici olaylarda, matematiksel denklemler fiziki kısıtları içermediği için geleneksel matematiksel model bu olayların incelenmesinde yetersiz kalmaktadır. Örneğin Şekil 1 incelendiğinde, motorun enerjisi kesildikten sonra mil yavaşlayıp mil hızının sıfırda sabit kalması gerekirken ters yöne doğru hızlandığı görülmektedir. Oysaki Şekil 2 incelendiğinde, önerilen yeni modelin bu fiziksel kısıtı içerdiği ve mil yavaşlayıp hızı sıfır olduktan sonra sıfırda sabit kaldığı gözlemlenmektedir.

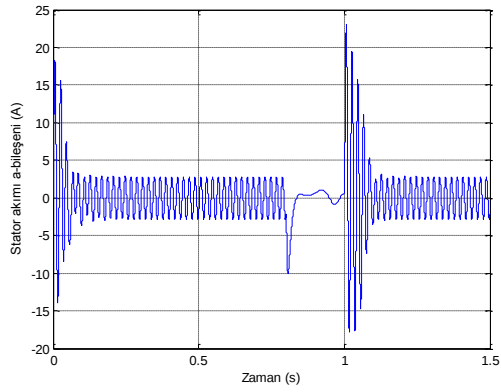
Bu çalışmada geleneksel asenkron makina modeline bazı özel koşullar eklenerek geçici hal durumlarında da doğruluk oranı daha yüksek sonuçlar verebilen yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Standart bir asenkron makinanın parametreleri kullanılarak hem geleneksel model hem de önerilen model ile benzetimler yapılmıştır. Çeşitli kapama zamanları ile yapılan benzetimlerin karşılaştırılması sonucunda, kapama yapıp enerjinin geri verildiği belirli bir zaman değerinde, geleneksel model de fark edilemeyen ancak önerilen yeni modelde fark edilebilen, makinanın anma momentinden çok daha yüksek bir negatif moment tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda makinanın enerjisinin kesilip geri gelmesi, veya açma-kapama yapılması gibi geçici olaylarda, makinanın zarar görmemesi ve sürüş sisteminin en az bozucu etki ile sürekliliğini sürdürebilmesi için enerjinin yeniden verilmesi için en uygun olan an veya uygun olmayan zaman aralığının tespit edilebileceği bir matematiksel model elde edilmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşaması deneysel uygulama ile sürdürülecektir.



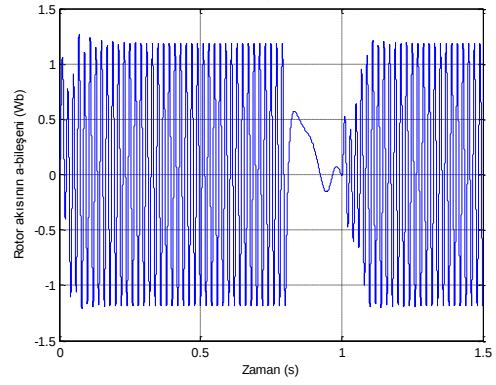
(a)



(b)

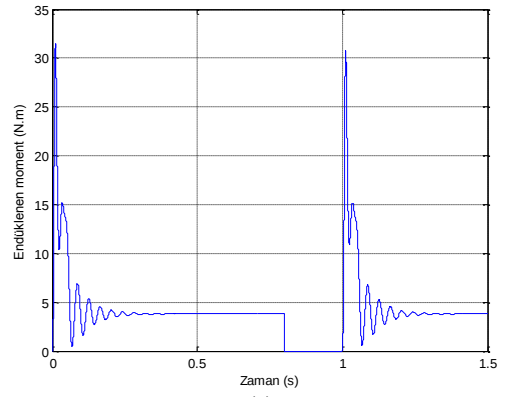


(c)

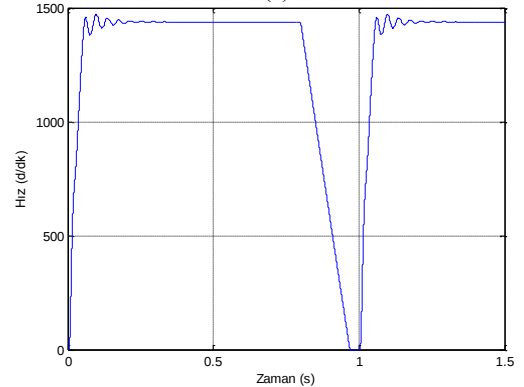


(d)

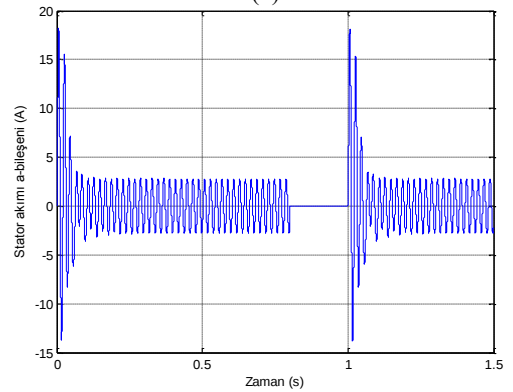
Şekil 1 Geleneksel model (a) endüklenen moment-zaman eğrisi
(b) hız-zaman eğrisi
(c) stator akımı α bileşeni-zaman eğrisi
(d) rotor akısı α bileşeni-zaman eğrisi



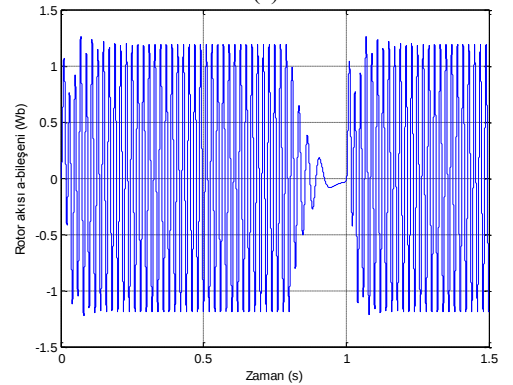
(a)



(b)

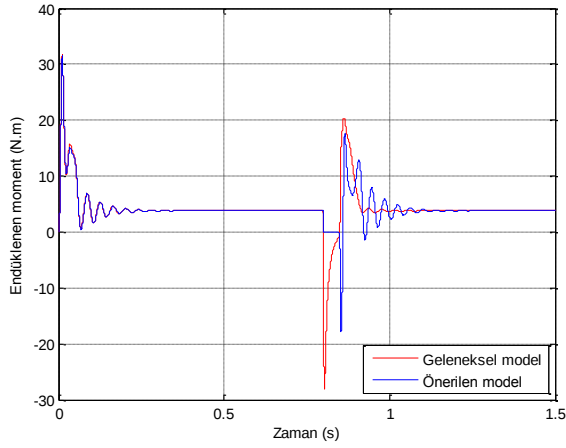


(c)

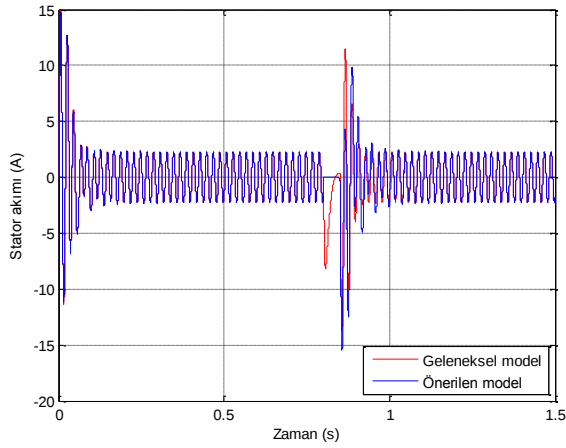


(d)

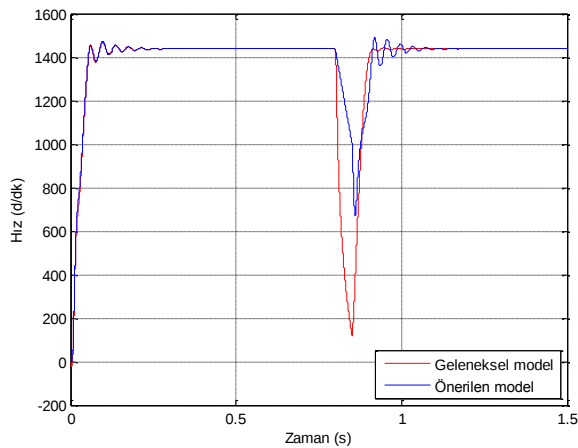
Şekil 2 Önerilen model (a) endüklenen moment-zaman eğrisi
(b) hız-zaman eğrisi
(c) stator akımı α bileşeni-zaman eğrisi
(d) rotor akısı α bileşeni-zaman eğrisi



Şekil 3 Geleneksel model ve önerilen model endüklenen moment-zaman eğrisi



Şekil 4 Geleneksel model ve önerilen model stator akımı - zaman eğrisi



Şekil 5 Geleneksel model ve önerilen model hız-zaman eğrisi

6. Kaynaklar

- [1] Chapman, S. J., "Electric Machinery Fundamentals", McGraw Hill, 4th Edition, 2005.
- [2] Krishnan, R., "Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control", New Jersey: Prentice Hall, 2001
- [3] Atalay A. K. & Kocabaş D. A. & İmeryüz M. & Gülbahçe M.O., *Analysis of Problems in a Load System Driven by Multiple Tandem Induction Motor*
- [4] Maginnis, F.J. & Schultz N. R. "Transients", proc. IEE, 1944, Vol.63, No.4, pp. 641-646.
- [5] Wiczorek M. & Rosolowski E., *Modelling of Induction Motor for Simulation of Internal Faults*. Modern Electric Power Systems, *Proceedings of the International Symposium* 2010.
- [6] Konuhova M. & Ketners K. : "Mathematical Modelling of Induction Motor Transient Process During Stator Winding Interruption", Scientific Journal of Riga Technical University, Vol 27, pp.73-76. (2010).
- [7] Koņuhova M., Ketners K., Ketnere E., Kļuevska S. ,Investigation of the undamped field effect to the electromagnetic processes in the induction machines". RTU. "Enerģētika un elektrotehnika" 4. Sērija, 25. Sējums, Rīga, 2009.
- [8] Sarioğlu, M. K., Gökaşan, M. & Boğosyan, S., (2003). *Asenkron Makinalar Kontrolü*. İstanbul: Birsan Yayınevi.