

# ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ DESTEKLİ DİNAMİK SİMÜLASYONU

Mehmet Aytaç ÇINAR<sup>1</sup> Çiğdem GÜNDOĞAN<sup>2</sup> Feriha ERFAN KUYUMCU<sup>3</sup>

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 41100, Kocaeli

<sup>1</sup>e-posta: aytac@kou.edu.tr <sup>2</sup>e-posta: cdemgun@kou.edu.tr <sup>3</sup>e-posta: erfan@kou.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Anahtarlı Relüktans Motoru, Matematiksel Model, Dinamik Simülasyon*

## ÖZET

*Bu çalışmada, anahtarlı relüktans (AR) motorunun dinamik davranışına ilişkin bir simülasyon çalışması sunulmaktadır. Söz konusu AR motorunun halkalama akısı ve moment eğrileri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan manyetik analiz ile elde edilerek simülasyona dahil edilmektedir. Bu sayede simülasyon sonuçlarının güvenilirliği artmaktadır. AR motorunun farklı çalışma koşulları için simülasyon sonuçları verilmekte ve yorumlanmaktadır. Ayrıca, simülasyon, basit ve esnek yapısından dolayı farklı yapılarıdaki AR motorlarına da kolayca uyarlanabilir.*

## 1. GİRİŞ

Anahtarlı relüktans motorları, basit ve dayanıklı yapısı, düşük maliyeti ve oldukça geniş hız aralığında çalışabilmesi gibi nedenlerle, birçok uygulamada yaygın biçimde kullanılmaktadır. Günümüzde, güç elektroniği ve kontrol tekniklerindeki gelişmelerle birlikte, AR motorları yüksek doğrulukla kontrol edilebilmektedir. Literatürde AR motorlarının algılayıcısız kontrolüne ve moment dalgalılığının azaltılmasına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır.

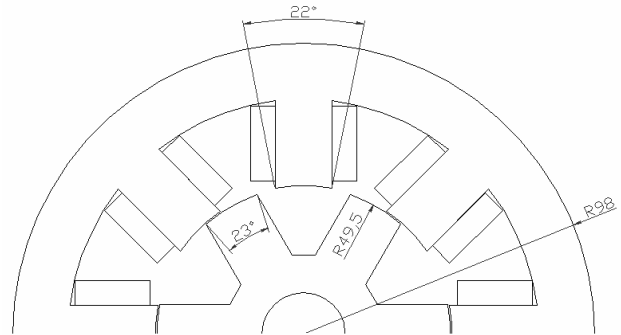
AR motorlarının farklı çalışma koşullarındaki dinamik davranışının doğru biçimde analiz edilebilmesi için, simülasyon çalışmaları büyük önem taşır. Bu nedenle, simüle edilecek motorun karakteristik eğrileri ( akı – akım – konum açısı ve moment – konum açısı – akım) doğru biçimde elde edilmeli ve simülasyona dahil edilmelidir. Makinanın lineer olmayan yapısından dolayı, sonlu elemanlar analizi bu amaçla kullanılacak en uygun yöntemdir [1],[2].

Bu çalışmada, bir elektrikli taşıtın doğrudan tekerlek tahriğini sağlaması amacıyla tasarlanan AR motoruna ait dinamik simülasyon çalışması sunulmaktadır. Simülasyonda makinanın lineer olmayan yapısı dikkate alınmakta ve konum algılayıcıları ile konverter devresi de çalışmaya dahil edilmektedir. Bu sayede makinanın farklı çalışma koşullarındaki dinamik analizi yapılabilmekte ve çalışma performansı izlenebilmektedir.

## 2. AR MOTORUNUN YAPISI

Anahtarlı relüktans motorları, hem statorunda hem de rotorunda çıkık kutuplar olan basit yapıdaki elektrik motorlarıdır. Statorda karşılıklı kutuplardaki sargılar seri veya paralel bağlanarak faz sargılarını oluşturmaktadır. Makinanın rotoru ise tamamen sac malzemeden oluşur ve üzerinde herhangi bir sargı, kısa devre halkası veya mıknatıs malzeme bulunmaz.

AR motorları stator/rotor kutup oranlarına göre sınıflandırılırlar. AR motorlarında sürekli bir dönme hareketinin sağlanabilmesi için stator ve rotor kutup sayıları birbirine eşit değildir. Yüksek moment istenen motor tasarımlarında rotor kutup sayısı, stator kutup sayısına yakın seçilmektedir.



Şekil 1. AR motorunun geometrik yapısı

Tablo 1. AR motorun geometrik boyutları

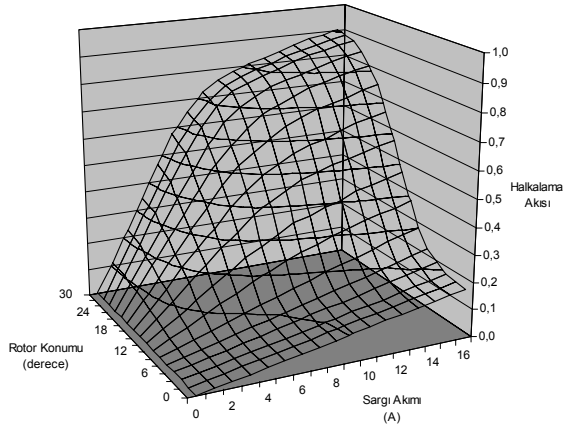
Güç	: 5 HP
Nominal hız	: 1500 d/dk
Nominal akım	: 13 A
Stator kutup sayısı	: 8
Rotor kutup sayısı	: 6
Stator kutup açısı	: 22°
Rotor kutup açısı	: 23°
Stator dış çapı	: 194 mm.
Rotor dış çapı	: 98 mm
Derinlik	: 200 mm.
Sarım sayısı	: 172
İletken kesiti	: 1.167 mm <sup>2</sup>

### 3. STATİK KARAKTERİSTİKLER

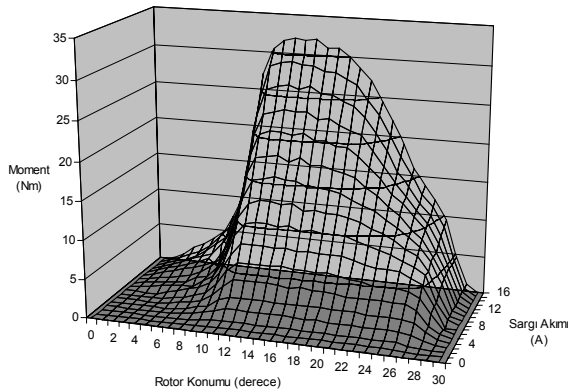
AR motorları endüstride kullanılan diğer elektrik motorlarından farklı olarak, yoğun biçimde doyma bölgesinde çalışırlar. Doyma etkisi ve makinadaki manyetik relüktansın sürekli olarak değişmesi nedeniyle, makinanın halkalama akısı, moment ve endüktans değerleri rotor konumuna ve akıma bağlı olarak değişen, lineer olmayan fonksiyonlardır. Bu nedenle, AR motorunun performans analizinin gerçekleştirilmesinde sonlu elemanlar analizi en uygun yöntemdir.

Halkalama akısı – sargı akımı – rotor konumu ve moment – rotor konumu – sargı akımı değişimleri, AR motorun en önemli karakteristik eğrileridir. Bu eğriler AR motorunun performansını göstermektedir.

Bir elektrik tahrikli taşıtın doğrudan tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla tasarlanan AR motoruna ait karakteristik eğrileri Şekil 2 ve Şekil 3 'te görülmektedir.



Şekil 2. Bir faza ait halkalama akısı – akım – rotor konumu değişimi



Şekil 3. Bir faza ait moment – rotor konumu – akım değişimi

### 4. AR MOTORUNUN MATEMATİKSEL MODELİ VE SİMÜLASYONU

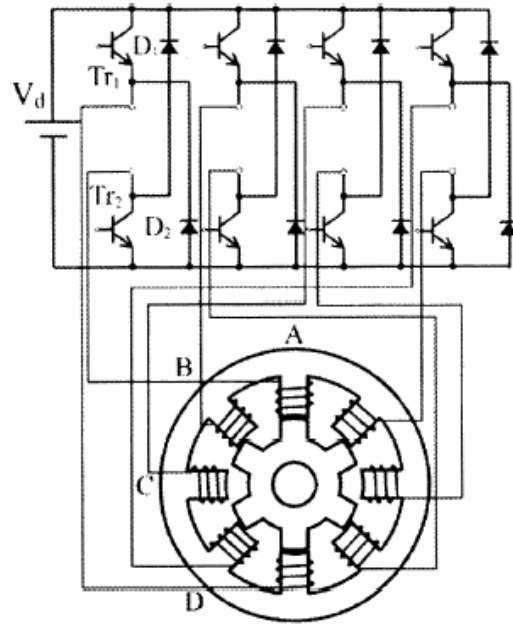
AR motorunun dinamik davranışını ifade eden matematiksel denklemler,

$$V_j = R.i_j + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

$$T_e = J.\frac{d\omega}{dt} + B.\omega + T_L \quad (2)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

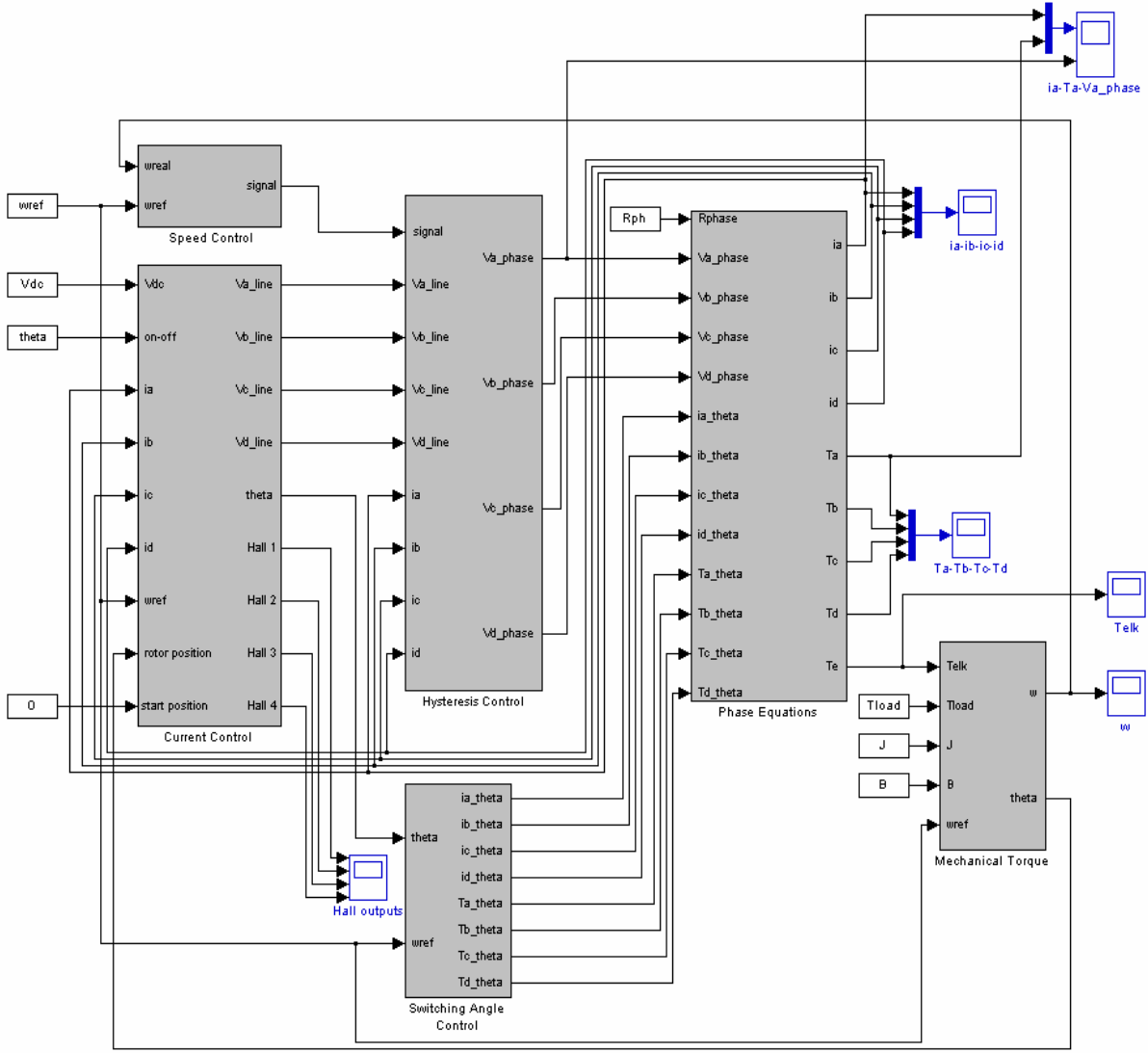
olarak yazılır. Burada  $V_j$ ,  $i_j$  ve  $\psi_j$  sırasıyla makinanın j. fazına ait gerilim, akım ve halkalama akısını;  $\theta$  ve  $\omega$  konum açısı ve açısal hızı;  $J$ ,  $R$  ve  $B$  sırasıyla atalet momenti, faz sargı direnci ve sürtünme katsayısı;  $T_e$  motor momenti ve  $T_L$  yük momentini simgeler. Fazlar arası karşılıklı endüktans ihmal edilmektedir [3].



Şekil 4. Asimetrik konverter devre yapısı

Literatürde, AR motoruna ait farklı yapılar da konverter devreleri sunulmaktadır. Bunların arasında en yaygın olarak kullanılan devre, asimetrik konverter devre yapısıdır (Şekil 4). Faz başına iki yarıiletken güç anahtarı ve iki diyottan oluşan bu devrenin en büyük avantajı, her bir faz sargısının diğer fazlardan bağımsız olarak kontrol edilebilmesidir [4]. Bu nedenle, çalışmada asimetrik konverter devresi simüle edilmektedir.

Şekil 5'te simülasyona ait ana blok diyagramı görülmektedir.



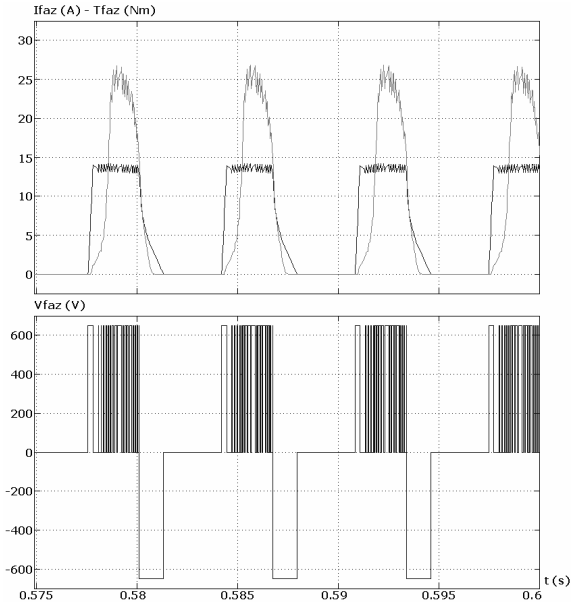
Şekil 5. Anahtarlı relüktans motorunun dinamik simülasyonuna ait ana blok diyagramı

Uygun faz sargısının doğru zamanda enerjilendirilmesi, AR motorunun çalışması esnasında moment dalgalılığının azaltılması için büyük önem taşır. Son yıllarda algılayıcısız kontrole yönelik çalışmalar yoğun olarak yapılmakla birlikte, bu çalışmada rotor konum bilgisinin yüksek doğrulukla elde edilmesi için alan etkili algılayıcılar kullanılmakta ve bunlara ait çıkış sinyalleri simülasyonda gözlemlenebilmektedir.

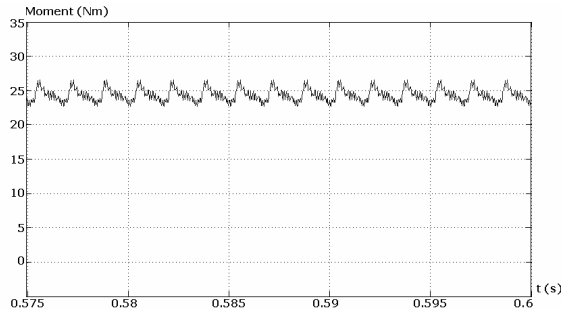
AR motorunun manyetik analizi ile elde edilen halkalama akısı ve moment değerleri, simülasyonun gerilim eşitliklerini içeren kısmına, iki boyutlu look-up tablolar olarak dahil edilmektedir. Bu değerlerin doğru olarak elde edilmesi, simülasyonun doğruluğunu da etkileyeceğinden büyük önem taşımaktadır..

AR motorunun hız kontrolü bir PID kontrolör ile, akım kontrolü ise histeresiz kontrol yöntemiyle sağlanmaktadır. Motor düşük hızlarda çalışırken faz akımını referans değerinde sabit tutmak, faz gerilimini kırpma ile mümkündür (kayıp modu). Yüksek hızlarda ise faz sargısına tek bir gerilim darbesi uygulanır. Bu çalışma, tek darbe modu olarak adlandırılır.

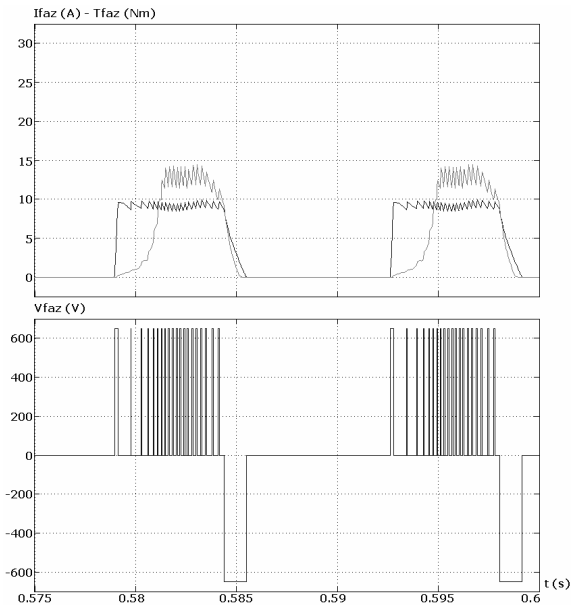
Bu çalışmada oluşturulan simülasyon, AR motorunun farklı yük değerlerinde ve farklı hızlarda çalışması durumlarını analiz etmek için kullanılmakta ve elde edilen çıkış dalga şekilleri yorumlanmaktadır.



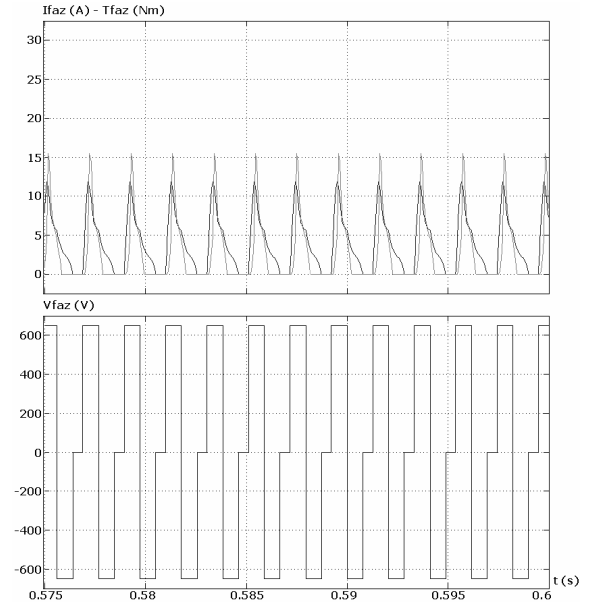
Şekil 6. Tam yük ve nominal hızda bir faza ait akım, moment ve gerilim dalga şekilleri



Şekil 7. Tam yük ve nominal hızda motorda üretilen toplam moment



Şekil 8. Yarım yükte ve yarım hızda bir faza ait akım, moment ve gerilim dalga şekilleri



Şekil 9. Yüksek hızda bir faza ait akım, moment ve gerilim dalga şekilleri

## 5. SONUÇLAR

AR motorlarının lineer olmayan yapısından dolayı, yapılan simülasyon çalışmalarının doğruluğu, makinanın dinamik davranışının analizinde büyük önem taşır. Bu çalışmada, motorun karakteristik eğrileri sonlu elemanlar analizi ile elde edilmekte ve simülasyonda kullanılmaktadır. Farklı çalışma koşulları için alınan simülasyon sonuçlarında, motorun tasarım aşamasında öngörülen akım ve moment değerlerini sağladığı, bir başka deyişle doğru sonuçlar verdiği görülmektedir. Oluşturulan simülasyon çalışması, basit ve esnek yapısından dolayı, karakteristik eğrileri bilinen farklı AR motorlarına da kolaylıkla adapte edilerek, dinamik analizlerinin yapılmasında kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Vijayraghavan P., "Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives", PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [2] Akhter H.E., Sharma V.K., Chandra A., Al-Haddad K., "Performance Simulation of Switched Reluctance Motor Drive System Operating With Fixed Angle Control Scheme" Electrimecs 2002, August 18-21.
- [3] Tsukii T., Nakamura K., Ichinokura O., "SPICE Simulation of SRM Considering Nonlinear Magnetization Characteristics", Electrical Engineering in Japan, Vol.142 No.1, 2003.
- [4] Mir S., "Classification of SRM Converter Topologies for Automotive Applications", SAE Technical Paper Series, 2000-01-0133.