

TAŞIT TAHRİĞİNDE KULLANILACAK BİR ANAHTARLI RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ

Mehmet Aytaç ÇINAR¹ Çiğdem GÜNDOĞAN² Feriha ERFAN KUYUMCU³

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

¹e-posta: aytac@kou.edu.tr ²e-posta: cdemgun@kou.edu.tr ³e-posta: erfan@kou.edu.tr

Anahtar sözcükler: Elektrikli Taşıt, Tekerlek Tahriği, Tasarım, Manyetik Analiz

ÖZET

Elektrikli taşıt tahrik yöntemleri arasında doğrudan tekerlek tahriğine duyulan ilgi, motor ve tekerlekler arasındaki mekanik elemanların ortadan kalkması nedeniyle son yıllarda giderek artmaktadır. Bu yöntemle, her bir motor diğerlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Bu çalışmada, bu amaçla kullanılacak bir motora yönelik tasarım çalışmasının ilk kısmı olan elektromanyetik tasarım aşaması sunulmaktadır. Tasarlanan motorun, elektrik tahrikli taşıtın dört tekerleğinin her birini tahrik etmesi öngörülmektedir. Öncelikle motorun fiziksel boyutları matematiksel olarak elde edilmektedir. İkinci kısımda ise ANSOFT Maxwell2D yazılımı kullanılarak, motorun farklı uyarma ve rotor konumları için halkalama akısı ve moment değerleri statik olarak elde edilmektedir.

1. GİRİŞ

Günümüzde Dünya üzerindeki taşıtların %98'i, enerji kaynağı olarak benzin, motorin ve LPG gibi petrol türevi yakıtlar kullanmaktadır. Bu yakıtların kullanımının çevre üzerinde olumsuz etkileri gözlenmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda, petrol türevi yakıtlar ve içten yanmalı motorlardan daha yüksek verim elde edilemeyeceği görüldüğünden, alternatif yakıt seçenekleri aranmaya başlanmıştır. Bu amaçla, içten yanmalı motorlara oranla daha yüksek verime sahip ve temiz bir kaynak olan elektrik enerjisinin taşıtlarda tahrik amacıyla kullanımı çalışmalara konu olmaktadır.

Elektrikli taşıt tahrik sistemlerinin en önemli bileşeni kuşkusuz kullanılan tahrik motorudur. Bu amaçla kullanılan motor tipinin, elektrikli taşıt tahrik uygulamalarındaki gereksinimleri karşılayabilecek özellikte olması gerekir. Bu çalışmada, doğrudan tekerlek tahrikli elektrikli taşıt sisteminin yapısında kullanılmak amacıyla, bir anahtarlı relüktans motorunun (ARM) tasarımı ve manyetik analizi gerçekleştirilmektedir. Tasarımın başlangıç aşamasında motorun gücü 5 HP, nominal hızı ise 1500 d/dk olarak belirlenmiştir. Buna göre motorun yaklaşık 24 Nm moment üretmesi öngörülmektedir.

Bu değer dört tekerlekten tahrik edilen bir taşıt yapısı için yeterlidir.

Çalışmanın ilk aşamasında, öngörülen temel parametrelere göre motorun fiziksel boyutları analitik olarak hesaplanmaktadır. İkinci aşamada ise, fiziksel boyutları elde edilen motorun manyetik analizi yapılmaktadır. Bilindiği gibi, AR motorunun lineer olmayan yapısından dolayı, sonlu elemanlar yönteminin kullanımı bu aşamada kolaylık sağlamaktadır. Bu amaçla, literatürde birçok elektromanyetik analiz yazılımı yaygın biçimde kullanılmaktadır [1],[2]. Bu çalışmada ise, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak statik manyetik analiz yapan ANSOFT Maxwell2D yazılımı kullanılmaktadır.

Elde edilen statik karakteristikler değerlendirildiğinde, tasarlanan AR motorunun sunduğu performansın, elektrikli taşıtın tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla kullanımına uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca farklı sayıda tekerlek tahriğinde kullanılarak farklı amaçlı elektrikli taşıt uygulamalarına da uyarlanabilir.

2. ELEKTRİKLİ TAŞIT TAHRİĞİ

Elektrikli tahrik sistemleri üç ana kısımdan oluşurlar: elektrik motoru, konverter devresi ve kontrolör. DA motorları uygun karakteristiğe sahip olmakla birlikte, çeşitli dezavantajları nedeniyle günümüzde taşıt tahriğinde kullanılmamaktadır. Son yıllarda güç elektroniği ve sayısal kontrol yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte, sürekli mıknatıslı (SM) motorlar, asenkron motorlar ve anahtarlı relüktans motorlarının taşıt tahriği uygulamalarında kullanıldığı literatürden de anlaşılmaktadır. Makina tipinin seçiminde en önemli kriter makinanın moment yoğunluğudur. Tablo 1'de bu üç motor tipi için moment yoğunluğu değerleri verilmektedir.

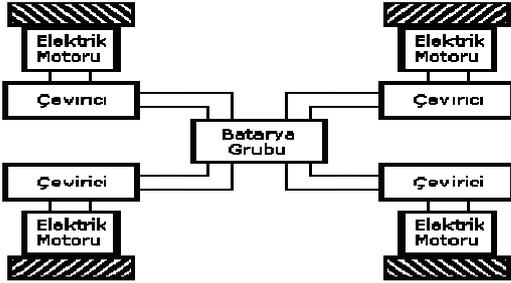
Görüldüğü üzere, sürekli mıknatıslı motorlar en yüksek moment yoğunluğuna sahip motorlardır. Bununla birlikte, sabit mıknatıslı akısı nedeniyle makinanın çalışma hızı aralığı sınırlıdır. Asenkron ve AR motorları ise birbirine yakın moment yoğunluğu değerlerine sahiptir. Buna karşın, AR motorlarının

çalışma hızı aralığı asenkron motorlardan daha geniştir. Bu nedenle taşıt tahrik uygulamalarında tercih edilirler.

Tablo 1. Farklı motor tipleri için moment yoğunlukları [3]

Makina tipi	M/V Nm/m ³	M/Cu ağırlığı Nm/kg Cu
Sürekli Mıknatıslı (SM)	28860	28,7 - 48
Asenkron	4170	6,6
Anahtarlı Relüktans (AR)	6780	6,1

Elektrikli taşıtların tahriğinde iki temel tahrik yöntemi sözkonusudur. Birinci yöntemde, içten yanmalı motorlu taşıtlara benzer şekilde, tahrik motorunda üretilen güç, taşıtın şaft ve mekanik diferansiyel gibi güç aktarım elemanları üzerinden tekerleklere aktarılır. Doğrudan tahrik olarak da adlandırılan ikinci yöntemde ise, elektrik motorları vasıtasıyla üretilen güç doğrudan tekerleklere uygulanır. Bununla birlikte, her tekerlek diğerlerinden bağımsız olarak kontrol edildiğinden, her bir tahrik motorunun hızı ve moment üretimi sürekli olarak kontrol edilmelidir.



Şekil 1. Doğrudan tahrikli bir taşıtta güç akışı

Doğrudan sürürlü tahrik yapısında mekanik güç aktarım elemanlarının olmayışı, taşıtın toplam ağırlığının azalmasına ve mekanik elemanlardaki kayıpların ortadan kalkması neticesinde taşıtın toplam veriminin artmasını sağlar. Ayrıca bu yöntemle, daha düşük güçlü ve küçük boyutlu elektrik motorları kullanılmaktadır.

3. AR MOTOR TASARIMI

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.

Farklı kutup ve sargı yapılarına sahip AR motorları tasarlanabilmesine karşın, taşıt tahriği için kullanılması planlanan motorun statorunda sekiz, rotorunda ise altı adet çıkık kutup bulunan dört fazlı yapıda olması uygun görülmüştür. Bu sayede, 6/4 kutup yapısına sahip AR motorlarında büyük oranda görülen ve bu makinaların en önemli dezavantajlarından biri olan moment dalgalılığının kısmen de olsa önüne geçilmektedir [4]. Ayrıca kontrol devresi için gereken ve makinanın faz sayısı ile orantılı olarak artan yarıiletken anahtarlar elemanlarının sayısı da minimum düzeyde tutulmaktadır. Bir taşıtın doğrudan tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla tasarımı yapılacak olan AR motora ait temel tasarım parametreleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. AR motoruna ait temel tasarım değerleri

Güç	: 5 HP
Nominal hız	: 1500 d/dk
Nominal akım	: 13 A

Yukarıda belirtilen temel değerler göz önüne alındığında, motorda, her bir tekerlek tahriği için yeterli görülen,

$$M = \frac{P_{hp} * 746}{2\pi \left(\frac{n}{60}\right)} = \frac{5 * 746}{2\pi \left(\frac{1500}{60}\right)} = 23,75 Nm. \quad (1)$$

moment üretilmesi öngörülmektedir.

AR motorunun diğer boyutlarının belirlenmesi için IEC (International Electrotechnical Commission) standartlarının belirlediği temel boyutlar referans olarak alınmaktadır.

AR motorun statorunda üretilen toplam akı;

$$\phi_s = B_s \cdot A_s \quad (2)$$

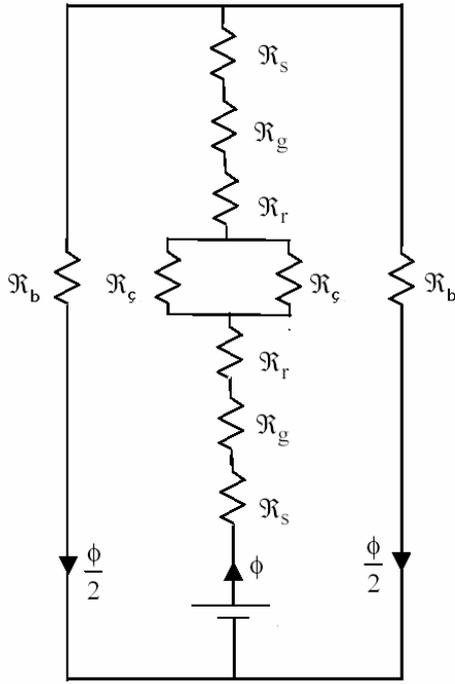
şeklinde yazılır. Burada B_s stator kutbu akı yoğunluğunu, A_s ise stator kutbu alanını ifade eder. Stator kutbu akı yoğunluğu için sınır değeri, makinada kullanılan manyetik malzemenin BH eğrisinin dirsek noktasının değeri belirler. Stator boyunduruğu akı yoğunluğu için bu değer 0,5 katı, rotor çekirdeği akı yoğunluğu için ise 0,8 katı sınır değer olarak belirlenmiştir. Bu sayede motordaki gürültü önemli ölçüde azalmaktadır [4]. Buradan yola çıkarak, motorun stator ve rotor kutupları, hava aralığı, stator boyunduruğu ve rotor çekirdeği için elde edilen manyetik alan şiddetleri ve ortalama uzunluklar yardımıyla relüktans değerleri hesaplanabilir.

$$\mathfrak{R} = \frac{H \cdot l}{\phi} \quad (3)$$

Toplam ampersarım değeri, stator ve rotor kutuplarının tamamen çakışık olduğu konum dikkate alınarak,

$$N \cdot i = 2 \cdot (H_s l_s + H_g l_g + H_r l_r) + \frac{H_\zeta l_\zeta}{2} + \frac{H_b l_b}{2} \quad (4)$$

olarak elde edilir. Makinanın manyetik eşdeğer devresi ise Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. AR motorunun manyetik eşdeğer devresi

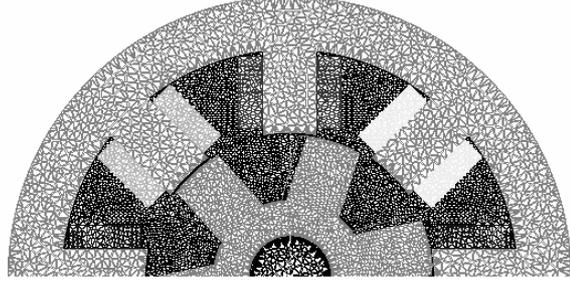
Manyetik alan şiddeti (H), ortalama uzunluk (l) ve relüktans (\mathfrak{R}) ifadelerinde kullanılan s , g , r , ζ ve b indisleri sırasıyla stator kutbu, hava aralığı, rotor kutbu, rotor çekirdeği ve stator boyunduruğunu ifade etmektedir. Makinanın boyutlarına ilişkin analitik hesaplamalarla elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, bu boyutlar üzerinde performans artırıcı yönde çeşitli iyileştirmeler yapılabilir. Bunun sonucunda elde edilen ve manyetik analizi yapılan AR motoruna ilişkin boyutlar Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. AR motorun geometrik boyutları

Stator / Rotor kutup sayısı	: 8 / 6
Stator kutup açısı	: 22°
Rotor kutup açısı	: 23°
Stator dış çapı	: 194 mm.
Rotor dış çapı	: 98 mm
Derinlik	: 200 mm.

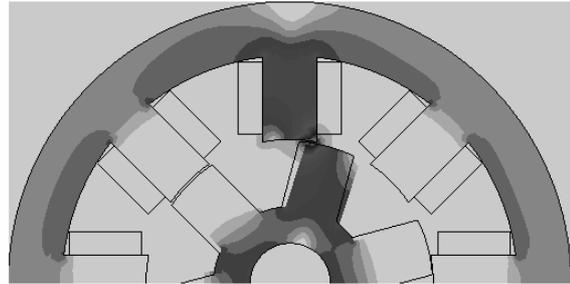
4. ARM'İN MANYETİK ANALİZİ

Günümüzde endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılan konvansiyonel elektrik motorlarından farklı olarak, AR motorları yoğun olarak doyma bölgesinde çalışırlar. Hem doyma etkisi, hem de makinadaki manyetik relüktansın sürekli olarak değişmesi nedeniyle, makinanın halkalama akısı, moment ve endüktans eğrileri, rotor konumuna ve akıma bağlı olarak değişen, lineer olmayan fonksiyonlardır. Bu nedenle, makinanın performans analizinin gerçekleştirilmesinde sonlu elemanlar analizi en uygun yöntemdir.

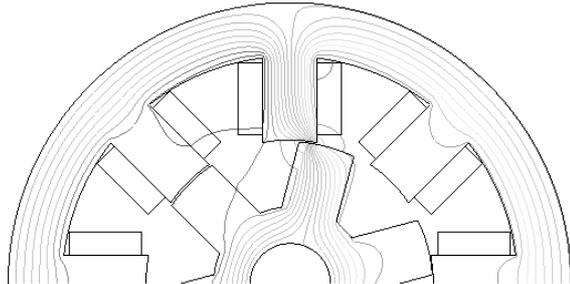


Şekil 3. Manyetik analizi yapılan AR motoruna ait sonlu elemanlar yüzeyi

Makinanın manyetik analizi için rotor konumu ve sargı akımı, giriş değişkenleridir. Kullanılan yazılım önce rotor konumuna bağlı olarak, makinanın sonlu elemanlar yüzeyini oluşturmakta ve faz endüktansları, halkalama akısı, moment ve kuvvet gibi temel çıkış büyüklüklerini hesaplamaktadır. Şekil 4 ve Şekil 5'te, sırasıyla bir faz sargısı enerjili durumdayken makinanın manyetik akı yoğunluğu ve halkalama akısının dağılımı görülmektedir. Simetrik yapıdan dolayı, makinanın sadece bir yarısına ait şekiller verilmektedir.

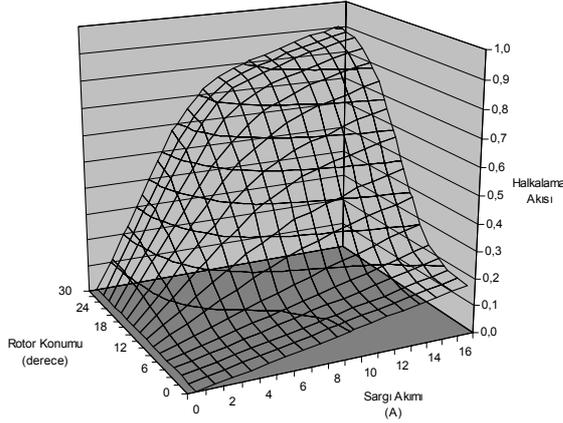


Şekil 4. Manyetik akı yoğunluğu

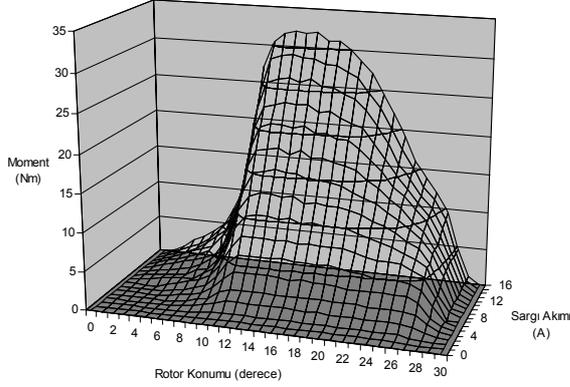


Şekil 5. Manyetik akı çizgilerinin dağılımı

Halkalama akısı - sargı akımı - rotor konumu ve moment - rotor konumu - sargı akımı değişimleri, AR motorunun en önemli karakteristik eğrileridir. Bu eğriler makinanın dinamik performansını gösterir. Manyetik analizi yapılan makineye ait eğriler Şekil 6 ve Şekil 7’de görülmektedir. Bu eğrilerde 0° makinanın bir fazına ait stator ve rotor kutuplarının tamamen ayrık olduğu konumu, 30° ise 8/6 kutup sayısındaki AR motorunun bir fazı için kutupların tam çakışık konumunu temsil etmektedir.



Şekil 6. Bir faza ait halkalama akısı – akım – rotor konumu değişimi



Şekil 7. Bir faza ait moment – rotor konumu – akım değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, elektrik tahrikli bir taşıtın tekerleğini doğrudan tahrik edecek bir anahtarlı relüktans motorun tasarımı ve manyetik analizi gerçekleştirilmektedir. Sözkonusu motora ait temel büyüklükler, tasarım amacını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Makinanın sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan manyetik analizi sonucunda, istenen çıkış büyüklüklerinin elde edildiği görülmektedir. Bu özelliklerdeki bir AR motorunun, dört tekerlektan tahrik edilen bir taşıtın ihtiyaçlarına cevap verebileceği sonucuna varılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Wu W., Dunlop J.B., Collocott S.J., Kalan B.A., “Design Optimization of a Switched Reluctance Motor by Electromagnetic and Thermal Finite-Element Analysis”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.39 No.5, 2003.
- [2] Srinivas K.N., Arumugam R., “Dynamic Characterization of Switched Reluctance Motor By Computer-Aided Design and Electromagnetic Transient Simulation”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.39 No.3, 2003.
- [3] Ehsani M., Gao Y., Gay S., “Characterization of Electric Motor Drives for Traction Applications”, The 29th Annual Conference of the IEEE, Vol.1 pp.891-896, Nov 2003.
- [4] 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.