



DÜŞÜK GÜÇLÜ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN AKI TERSLEYEN MOTOR (ATM) TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Harun Serhat GERÇEKÇİOĞLU^{1*}

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tokat, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

Akı Tersleyen Motor, Sabit Mıknatıslı Motorlar, Optimizasyon, Elektrikli Araçlar. Son zamanlarda elektrikli araçlarda (EA) tahrik motoru olarak kullanılacak elektrik makineleri üzerine çalışmalar devam etmektedir. EA'larda yaygın olarak Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM), Anahtarlama Relüktans Motorlar (ARM) gibi motorlar kullanılmaya başlanmıştır. FDAM motorlar kolay kontrolü ve yüksek güç yoğunluğu sağlamasına rağmen, rotorunda bulunan mıknatıs sayısının fazla olması sebebiyle yüksek maliyetlidir. Belirli bir gücün üzerinde üretilmemeleri, sürücü ve konum sensörü gerektirmeleri ayrıca yüksek frekanslı osilasyonlara sahip olmaları gibi dezavantajlara sahiptir. ARM'lerde ise basit yapıda ve sağlam olmasına rağmen kontrolünün karışık olması, düşük verim ve gürültü-titreşim gibi unsurlar dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tip motorların avantaj ve dezavantajlarını düşündüğümüzde bu iki motorun geliştirilmiş veya hibritleştirilmiş hali olan Akı Tersleyen Motor (ATM) bulunmaktadır. ATM'de mıknatıslar azaltılmış olarak stator dişlerinin üstüne yerleştirilmiştir. Motor kontrolünde ise akı çevrimleri kullanılmaktadır. Bu makalede 350 W güç ve 500 d/d hız ile çalışan Akı Tersleyen Motor (ATM) tasarımı yapılmıştır. Parametrik ve optimizasyon analizleri ile tork, tork dalgalanması, verim, vuruş torku gibi parametrelerde iyileştirmeler yapılmıştır. Manyetik sınırlamaların içinde kalındığı gösterilerek tasarım çalışması sonlandırılmıştır.

DESIGN AND OPTIMIZATION OF FLUX REVERSAL MOTOR (FRM) FOR LOW POWER ELECTRIC VEHICLES

Keywords

Flux Reversal Motor, Permanent Magnethave Motors, Optimization, Electric Vehicles.

Abstract

Recently, studies on electric machines to be used as drive motors in electric vehicles (EVs) have been ongoing. Motors such as Brushless Direct Current Motors (BLDC) and Switched Reluctance Motors (SRM) have begun to be widely used in EVs. Although BLDC motors provide easy control and high power density, they are costly due to the large number of magnets in their rotors. They have disadvantages such as not being produced above a certain power, requiring a driver and position sensor, and having high-frequency oscillations. In SRMs, although they are simple and robust, their control is complicated, low efficiency, and noise-vibration are disadvantages. When we consider the advantages and disadvantages of these types of motors, there is a developed or hybridized version of these two motors, the Flux Reversal Motor (FRM). In FRM, the magnets are placed on the stator teeth in a reduced manner. Flux loops are used in motor control. In this article, a Flux Reversal Motor (FRM) operating with 350 W power and 500 rpm speed has been designed. Parametric and optimization analyses have improved parameters such as torque, torque ripple, efficiency, cogging torque, etc. The design study was concluded by demonstrating that the magnetic limitations were met.

Alıntı / Cite

Gerçekcioğlu, H. S., (2025). Düşük Güçlü Elektrikli Araçlar için Akı Tersleyen Motor (ATM) Tasarımı ve Optimizasyonu, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 412-425.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H.S. Gerçekcioğlu, 0000-0003-0058-7529

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	23.11.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	20.02.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	18.03.2025
Yayın Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: harun.gercekcioğlu@gop.edu.tr, +90-356-252-1616

DESIGN AND OPTIMIZATION OF FLUX REVERSAL MOTOR (FRM) FOR LOW POWER ELECTRIC VEHICLES

Harun Serhat GERÇEKÇİOĞLU[†]

1 Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Tokat, Türkiye

Highlights

- Flux Reversal Motor design for low power electric vehicles
- Torque, torque ripple, efficiency, and cogging torque values were improved
- Stayed within magnetic limitations
- Original motor sizing and rotor design

Graphical Abstract

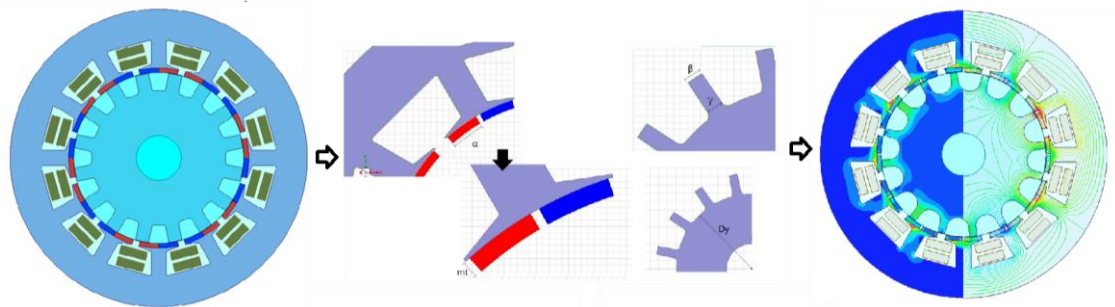


Figure. FRM design and optimization

Purpose and Scope

In this article, the aim and target of FRM design that can be used for electric vehicles has been made. The first model created with the help of theoretical expressions has been optimized and the rotor and permanent magnet geometries have been changed. Electrical and magnetic parameters have been made suitable and finalized.

Design/methodology/approach

The flow chart specified in the article content was followed in the FRM design. A model suitable for the initial parameters was created with the help of analytical calculations. Then, parametric and genetic algorithm-based optimization analyzes were applied to improve the performance parameters and the target values were reached.

Findings

In this study, FRM design was made for use as a drive motor in electric scooters or bicycles. Analytical calculations of FRM, which is designed to operate at 350 W power and 500 rpm speed, were included and its design was made in the simulation program. The flow chart for FRM design was followed and the result was reached. Dimensioning of the first state of FRM model was made by using analytical calculations. By examining the performance results of the first model, it was observed that torque ripple and cogging torque were high and efficiency was low. For this reason, an optimization study was made for the permanent magnets in the rotor and stator of FRM. As a result, an increase of 3.45% in output power, 3.27% in output torque and 23.35% in efficiency was achieved. Especially, torque ripple value decreased by 14.3 times and was observed as 10.5507%. It was observed that cogging torque decreased by 18.49 times. It was also shown that the finalized FRM design was within magnetic limitations.

Originality

Although there are studies on FRM in the international literature, there are none in the national literature. The dimensions and rotor part of the motor designed with certain powers and dimensions are a new design and are original.

[†] Corresponding author: harun.gercekciloglu@gop.edu.tr, +90-356-252-1616

1. Giriş (Introduction)

Teknolojik ilerleme, verimlilik iyileştirmeleri ve küresel ekonominin yapısındaki değişiklikler küresel ekonominin enerji yoğunluğunda düşüşü sağlamıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın 2024 yılı raporuna göre yenilenebilir enerjideki büyüme ve son kullanıcıların elektrik tüketimindeki artışı ile enerji sistemlerinin verimliliğini artırma konusu dikkat çekici konuma gelmektedir (Anonim, 2024a). Yeşil enerji olarak tanımlanan yenilenebilir enerji tüketimi kapsamında elektrikli araçlar önemli rol oynamaktadır. Özellikle sera gazının azaltılmasına yönelik Avrupa Ulaştırma ve Çevre Federasyonu'nun yaptığı çalışmalarda elektrikli araçların kullanımının önemine vurgular yapılmaktadır (Anonim, 2024b, Anonim, 2024c).

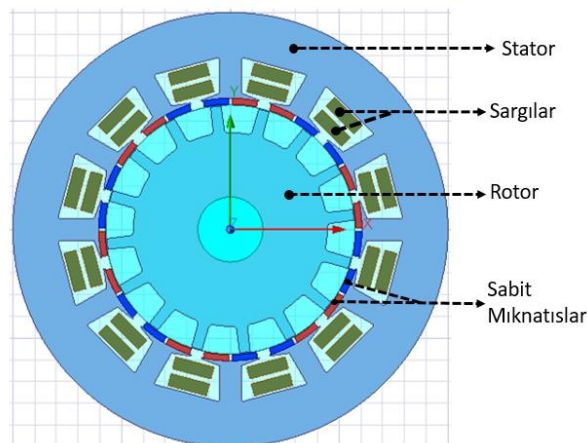
Elektrikli araçlarda yakıt olarak fosil yakıt kullanılmamaktadır. Ayrıca içten yanmalı motorlu araçlarda bulunan dişliler, şanzıman gibi onlarca malzeme de elektrikli araçlarda bulunmamaktadır. Son zamanlarda yoğun trafik problemi yaşanan şehirlerde kurumsal ve ticari ulaştırma araçlarının yanı sıra bireysel elektrikli araçların kullanımı artmaktadır. Özellikle elektrikli bisiklet ve e-scooterlar pratik kullanımları itibariyle öne çıkmıştır.

Son zamanlarda elektrikli araçlarda (EA) tahrik motoru olarak kullanılacak elektrik makineleri üzerine çalışmalar devam etmektedir. EA'lar için kullanılan motorlar arasında DC motorlar bulunmaktadır. DC motorların yüksek çalışma gürültüsü (high operating noise), düşük verim ve periyodik muayene gereklilikleri gibi dezavantajları bulunmaktadır. AC motorlar arasında yaygın kullanılan Asenkron Motorların ise karışık kontrolü, düşük başlangıç torku ve düşük güç yoğunluğu gibi dezavantajları karşımıza çıkmaktadır. Bu dezavantajlar düşünülerek farklı motor tasarımları yapılmaya devam edilmiş ve Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM), Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) gibi motorlar kullanılmaya başlanmıştır. FDAM motorlar kolay kontrolü ve yüksek güç yoğunluğu sağlamasına rağmen, rotorunda bulunan mıknatıs sayısının fazla olması sebebiyle yüksek maliyetlidir. Belirli bir gücün üzerinde üretilmemeleri, sürücü ve konum sensörü gerektirmeleri ayrıca yüksek frekanslı osilasyonlara sahip olmaları gibi dezavantajlara sahiptir. ARM'ler ise basit yapıda ve sağlam olmasına rağmen kontrolünün karışık olması, düşük verim ve gürültü-titreşim gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Bu iki motorun geliştirilmiş veya hibritleştirilmiş hali olan Akı Tersleyen Motor (ATM) bulunmaktadır. Statorunda azaltılmış mıknatıslar ve kontrolünde ise akı çevrimleri kullanılmaktadır (Kim ve Lee, 2004; Deodhart vd., 1996; Gao vd., 2017; Bharathi vd., 2019; Gao vd., 2021).

Bu çalışmanın ikinci bölümünde ATM ve çalışma prensibi ile ilgili bilgilere kaynak araştırmasından faydalanılarak yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ATM tasarımı süreci ile ilgili matematiksel hesaplamalar, tasarımın akış şeması, parametrik ve optimizasyon çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, yapılan çalışmanın tasarım ve optimizasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise bu çalışma ile elde edilmiş sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

ATM ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde tasarım çalışmalarına 1995 yılında başlandığı ve günümüzde de aktif olarak devam ettiği görülmektedir. Üç fazlı ATM'nin kesiti ve elemanları Şekil 1'de gösterilmiştir. (Liao vd., 1995; Boldea vd., 1999).

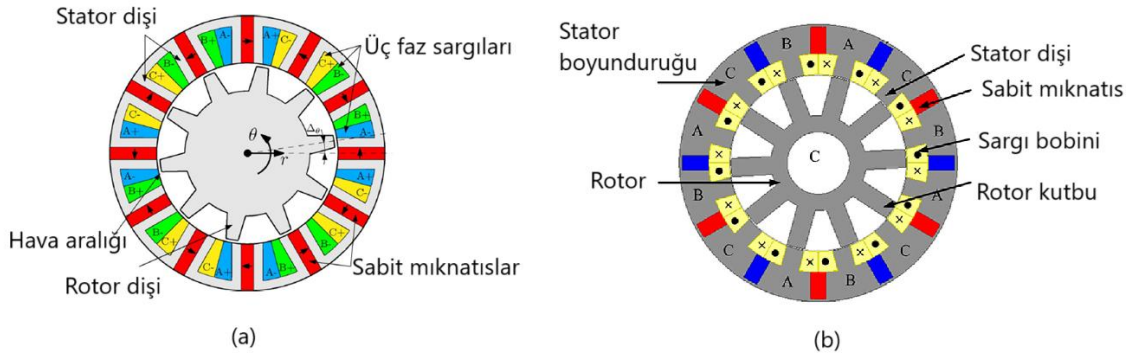


Şekil 1. ATM kesiti (FRM cross-section)

Rotorunda herhangi bir sargı veya sabit mıknatıs (SM) bulunmayan bir yapıdadır. Motor uyarımı asenkron motorlardaki sincap kafesli yapı veya fırçalı DC motorlarda bulunan uyarma sargıları yerine, stator dişleri üzerindeki SM'ler tarafından sağlanmaktadır. Bundan dolayı rotor bakır kayıpları bulunmamaktadır. Ayrıca

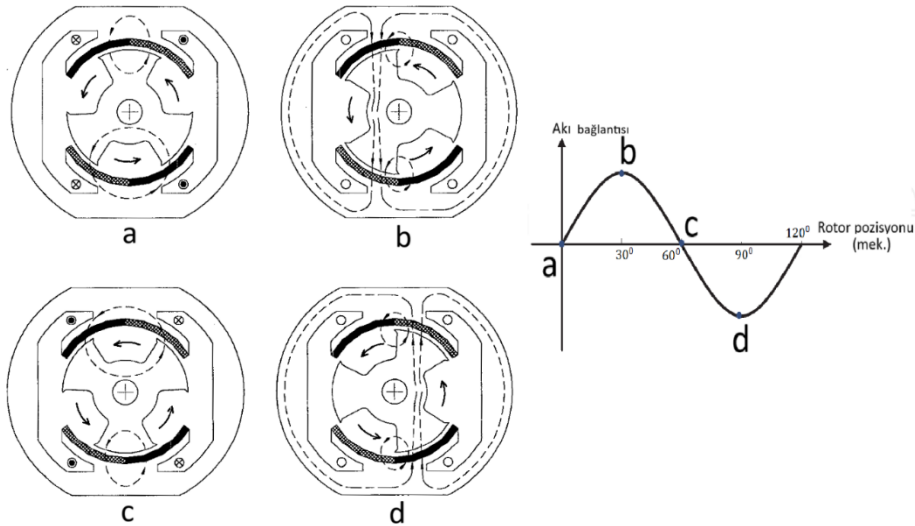
rotorunda SM bulunmaması yüksek hızlı ve yüksek sıcaklıkta çalışmasına olanak sağlamaktadır. Rotorun hafif ve düşük dönme ataletine sahip olması sebebiyle de hızlanma-yavaşlama tepkileri hızlıdır. Rotordaki bu olgular verimlilik konusunda ATM'lere pozitif yönde etki etmektedir (Sheth ve Rajagopal, 2007; More ve Fernandes, 2007). Statorunda ise armatür sargıları ve sabit mıknatıslar bulunmaktadır. Dağıtılmış veya üretimi kolay konsantre sargılar ile kullanılabilir (Ahn vd., 2008).

ATM'ler statorunda SM bulunan diğer motor türleri ile karşılaştırıldığında ise daha basit bir yapıdadır. Akı anahtarlamalı SM makinelerinin ve çift-çıkıntılı SM makinelerinin SM'leri, kurulum için uygun olmayan stator çekirdeği bölgelerine yerleştirilmektedir. Akı anahtarlamalı SM makinesinde, dişlerin ortasına SM yerleştirmek (Şekil 2a), oluk alanını azaltmaktadır ve çıkış torkunu etkilemektedir. Çift-çıkıntılı SM makinesinde, SM'leri stator boyunduruğuna yerleştirmenin motorun hacmini artıracak ve tork yoğunluğunu azaltma yönünde bir etkisi olmaktadır (Şekil 2b). ATM'lerde SM'ler stator dişlerinin iç yüzeyine yerleştirilerek, Akı anahtarlamalı SM makineler ve çift çıkıntılı SM makinelerdeki sorunlar ortadan kaldırılmış olmaktadır (Wang vd., 1999, Gysen vd., 2010, Sriwannarat vd., 2021).



Şekil 2. (a) Akı anahtarlamalı SM makine, (b) çift çıkıntılı SM makine

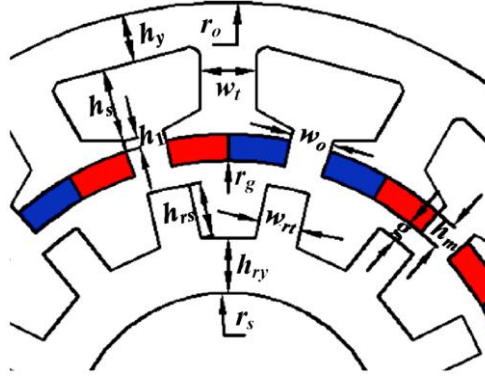
ATM'lerin çalışma prensibi, 2 kutuplu bir stator ve 3 kutuplu rotor modeli üzerinden Şekil 3'teki gibi açıklanmıştır (Deodhart vd., 1997).



Şekil 3. ATM çalışma prensibi (akı ve rotor mekanik pozisyonları arasındaki ilişki) (FRM working principle (relationship between flux and rotor mechanical positions))

Şekil 3'te, (a) mıknatıslar tarafından oluşturulan akının tamamen her bir stator kutbu içinde dolaştığı ve stator boyunduruğunda akı olmadığı denge konumundadır. Rotor (b) konumunda, saat yönünün tersine 30° yer değiştirmektedir, böylece rotor kutupları mıknatıslardan biri veya diğeri ile örtüşmektedir. Akı bu durumda sargılardan ve stator boyunduruğundan geçmektedir. Faz akısı bu konumda maksimumdur. Rotor (c) konumunda olduğunda ikinci bir denge konumundadır ve (a) konumundan 60° yer değiştirmiştir. Bu konumda yine stator boyunduruğunda ve sargıları birbirine bağlayan akı yoktur. Saat yönünün tersine 30° daha fazla yer değiştirildiğinde ise (b) konumunun tersi yönde maksimum olduğu (negatif yönde maksimum) (d)'de gösterilen konuma gelmektedir (Bharathi vd., 2019).

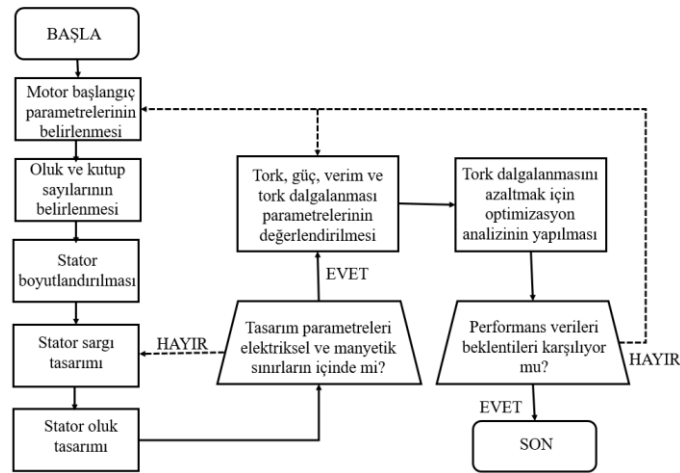
Literatürde ATM ile ilgili tasarım çalışmaları yapılmıştır. Stator, rotor ve SM'ler ile ilgili boyutlandırma eşitlikleri ve hesapları yapılmıştır. Örnek olarak Şekil 4'te ATM kesiti verilerek hesaplanabilecek uzunluklar gösterilmiştir (Boldea vd., 1999; Gao ve Liu, 2021).



Şekil 4. ATM stator, rotor ve SM geometrisi (FRM stator, rotor and PM geometry)

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada yapılan işlemler bir akış diyagramı olarak Şekil 5'te gösterilmektedir. Maksimum torkun elde edildiği akım açısını bulmak için parametrik analiz yapılmıştır. Ayrıca tork dalgalanmasını azaltmak için rotor ve SM'lerin boyutlandırma değişimlerini içeren optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. ATM tasarımı için akış şeması (Flow chart for FRM design)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Çok fazlı ATM için stator ve rotor kutup sayısı seçimleri için Eşitlik 1'de gösterilen oran seçilmektedir. Burada N_s stator kutup sayısı, N_r rotor kutup sayısı ve m faz sayısını ifade etmektedir.

$$\frac{N_s}{N_r} = \frac{m}{m+1} \quad (1)$$

Tasarımı yapılacak ATM için, $N_s/N_r = 3/4, 6/8, 12/16$ modelleri seçilmektedir. Tasarlamak istenilen motorun amacına uygun başlangıç değerleri belirlendikten sonra, rotor çapı D_r hesaplanmaktadır. Motor verimi n_b ile ilişkili Elektromanyetik güç P_{eb} , D_r 'yi bulmak için gereklidir. Ayrıca f_x olarak tanımlanan teğetsel kuvvet yoğunluk değeri $1.8 - 2.5 \text{ N/cm}^2$ aralığında seçilerek P_{eb} eşitliğinde kullanılmaktadır (Boldea vd., 1999; Gao ve Liu, 2021).

$$P_{eb} = \frac{P_b}{n_b} \quad (2)$$

$$P_{eb} = f_x (\pi D_r l) \frac{D_r}{2} \Omega_r = \frac{\pi}{2} f_x \alpha D_r^3 \Omega_r \quad (3)$$

Eşitlik 3'te α rotor çapı ile paket boyu l arasındaki bağıntı olup $\alpha = l/D_r = 1.1 - 1.8$ aralığında seçilebilir. Sonuç olarak D_r şu şekilde ifade edilmektedir;

$$D_r = \left(\frac{2P_{eb}}{\pi f_x \alpha \Omega_r} \right)^{1/3} \quad (4)$$

Elektromanyetik tork ifadesi Eşitlik 5'te gösterilmiştir.

$$T_{eb} = \frac{P_{eb}}{\Omega_{rb}} \quad (5)$$

Şekil 3'te ATM'nin stator ve rotor geometrisi verilmiştir. Eşitlik 6-16 arasında geometride gösterilen boyutların hesaplama eşitlikleri verilmektedir. Bunlar;

$$\phi_m = 2r_g l_{stk} B_m / P \quad (6)$$

Burada, r_g hava aralığı yarıçapı, P stator sargı kutup çifti sayısı, B_m akı yoğunluğu ve l_{stk} aktif paket boyunu ifade etmektedir (Boldea vd., 1999; Gao ve Liu, 2021).

Stator boyunduruğundaki ortalama akı yoğunluğunu B_y olarak tanımlanırsa, h_y stator boyunduruğu kalınlığı şu şekilde çıkarılabilir;

$$h_y = \frac{\phi_m}{2B_y k_{stk} l_{stk}} = \frac{r_g B_m}{P B_y k_{stk}} \quad (7)$$

Benzer şekilde, stator dışının ortasındaki ortalama akı yoğunluğunu B_t olarak tanımlanırsa, stator dışı genişliği şu şekilde hesaplanabilir;

$$w_t = \frac{\phi_m}{3(SPP)B_t k_{stk} l_{stk}} = \frac{4r_g B_m}{Z_s B_t k_{stk}} \quad (8)$$

Burada SPP Kutup-faz başına oluk sayısını ve Z_s stator diş sayısını ifade etmektedir.

Büyük bir tork yoğunluğunu aynı anda korumak ve SM manyetikliğinin kaybolma riskini azaltmak için SM kalınlığının Eşitlik 9'da verilen ifadeyi sağlaması önerilmelidir.

$$h_m = 4g \sim 6g \quad (9)$$

Burada g hava aralığı uzunluğudur. Stator oluk açıklığı genişliği ise Eşitlik 10 da verilmiştir.

$$w_o = \pi(r_g + h_m) / 2Z_s \quad (10)$$

Stator dış yarıçapı D_o 'ın hesaplanabilmesi için önce toplam oluk alanı A_{slot} hesaplanması gerekmektedir. A_{slot} hesabında elektriksel sargı yükü A_e , akım yoğunluğu j_e ve oluk dolgu faktörü S_{fg} kullanılmaktadır (Gao ve Liu, 2021).

$$A_{slot} = 2\pi(r_g + h_m)A_e / j_e S_{fg} \quad (11)$$

$$A_{slot} = \pi(r_g + h_m + h_1 + h_s)^2 - \pi(r_g + h_m + h_1)^2 - Z_s w_t h_s \quad (12)$$

Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 nin birleşimiyle slot derinliği h_s hesaplanabilmektedir. Sonuç olarak stator dış yarıçapı Eşitlik 13 te verilmiştir. (Gao ve Liu, 2021).

$$r_o = r_g + h_m + h_1 + h_s + h_y \quad (13)$$

Her rotor boyunduruğunun ve rotor dışının ortasının ortalama akı yoğunluğunu sırasıyla B_{ry} ve B_{rt} olarak tanımlanmıştır. Rotor boyunduruğu kalınlığı h_{ry} ve rotor dış genişliği w_{rt} , Eşitlik 7 ve Eşitlik 8 ile benzer türetme prosedürü kullanılarak elde edilmektedir. Son olarak h_{ry} ve w_{rt} Eşitlik 14 ve 15'te gösterilmiştir;

$$h_{ry} = r_g B_m / Z_r B_{ry} k_{stk} \quad (14)$$

$$w_{rt} = 4r_g B_m / Z_r B_{rt} k_{stk} \quad (15)$$

Rotor oluk derinliği h_{rs} ise;

$$h_{rs} = r_s + h_{ry} \quad (16)$$

Faraday indüksiyon yasasına göre, sargı geriliminde indüklenen hava aralığı akısı bağlantısı;

$$\Psi_m = N_s k_w \omega \Phi_m \quad (17)$$

Burada N bir fazdaki sarım sayısı, k_w ise sargı faktörüdür.

İndüklenen gerilimin RMS değeri ve faz sargılarındaki maksimum akı yoğunluğu Eşitlik 18 ve 19'da verilmiştir;

$$E_m = \frac{1}{\sqrt{2}} e_m = \frac{1}{\sqrt{2}} N k_w \omega \Phi_m \quad (18)$$

$$\Phi_m = l' \tau_p \alpha_i B_\delta \quad (19)$$

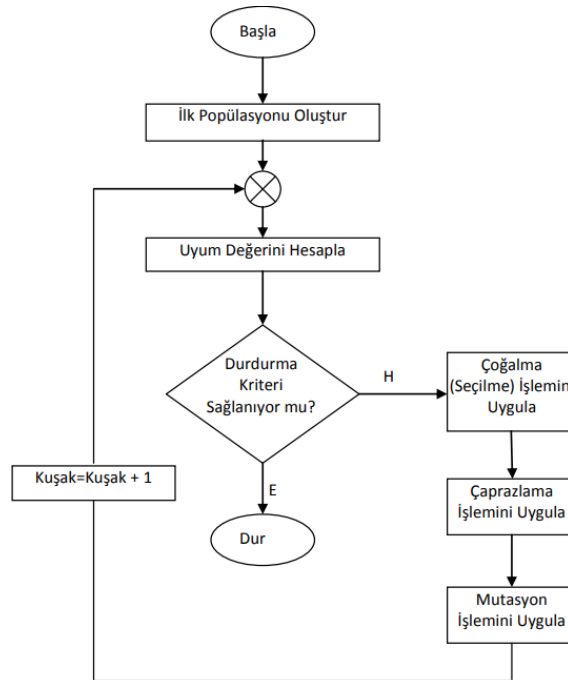
$\alpha_i B_\delta$, hava aralığı akı yoğunluğunun ortalama değerini temsil etmektedir. l' ise paket boyudur.

Bir fazdaki sarım sayısı Eşitlik 17,18 ve 19 yardımıyla bulunmaktadır (Pyrhönen vd., 2021).

$$N_s = \frac{\sqrt{2} E_m}{k_w \omega \Phi_m} = \frac{\sqrt{2} E_m}{k_w \omega l' \alpha_i B_\delta} \quad (20)$$

3.2. Optimizasyon Tekniği (Optimization Technic)

Bu çalışmada tasarlanan başlangıç modelinin performans değerlerinin iyileştirilmesi için bir optimizasyon çalışması yapılması gerekmektedir. Optimizasyon tekniği olarak Genetik Algoritma (GA) seçilmiştir. Yapılan çalışmada bütün çözüm varyasyonlarının geleneksel yöntemlerle çözülmesi hesaplama süresini uzatmaktadır. Genetik algoritma, doğruluğu güvenilir olan performans sonuçlarına ulaşım süresini azaltmaktadır. Genetik algoritmalar özellikle çözüm varyasyonlarının karmaşık, geniş aralıkta ve süreksiz olduğu durumlarda başarılı sonuçlar vermektedir.



Şekil 6. Genetik Algoritma (GA) akış şeması (Genetic Algorithm (GA) flowchart) (Anonim, 2024d)

Genetik algoritma hedef amaçlarına ulaşılabilen bir optimizasyon tekniğidir. Genetik algoritma tek bir veriden değil veri havuzundan yani geniş bir alandan seçim yapmaktadır. Olası sonuçlar içeren kural dizileri kullanmaktadır. Türev ve benzeri yardımcı bilgileri kullanmamaktadır ve sadece amaç fonksiyonu bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Genel anlamda genetik algoritma çoğalma, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin dizilerden oluşan bir popülasyona (nesil) uygulanmasını içermektedir. Bu operatörlerin uygulanmasından sonra yeni bir popülasyon (yavru nesil) oluşmaktadır. Yeni nesil eski ebeveyn nesil ile yer değiştirmektedir. Her dizinin

(kromozomun) bir uyum değeri bulunmaktadır. Yeni nesiller (yeni diziler) bu uyum değerlerine göre seçilmektedir. Her yeni üretilen nesilde hedef değerlere yaklaşarak, iyi nesiller üretilmeye çalışılmaktadır (Burke vd., 1994). Şekil 6'da GA akış şeması gösterilmiştir (Anonim, 2024d).

ATM için GA uygulanırken rotor ve SM lerin boyutlandırılmalarında verilen parametreler (mıknatıs boyu, mıknatıs genişliği, rotor dişi uzunluğu, boyunduruk uzunluğu vb.) için bir başlangıç ve sonuç aralığı (alt değer-üst değer) belirlenmiştir. Ayrıca istenilen bir hedef belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda bu algoritma sayesinde istenilen hedef için uygun parametre uzunlukları elde edilmiştir. Bu çalışma için Ansys Electronics-Maxwell paket programı içerisinde bulunan optimizasyon modülü kullanılmıştır.

Elektrikli scooterlar veya bisikletler için tahrik motoru kullanım amacı taşıyan motor tasarımları çalışmaları incelenmiş ve Tablo 1'de gösterilen başlangıç değerleri seçilmiştir (Ravi vd., 2006; Song vd., 2010; Gruber vd., 2011; Shenoy ve Kumar, 2016; Lee vd., 2017; Omac, 2022; Gör ve Dalçalı, 2024; Sinaga vd., 2024). Yapılan optimizasyon çalışmasında kullanılacak parametreler ve değişim yapılacak boyutlandırma aralıkları optimizasyon analizi bölümünde belirtilmiştir.

Tablo 1. ATM başlangıç performans parametreleri (Initial performance parameters of FRM)

PARAMETRELER	TANIM	DEĞER
P_o	Güç	350 Watt
V	Gerilim	33.8 V
ω	Hız	500 d/d
g	Hava aralığı	0.5 mm
N_s	Stator oluk sayısı	12
N_r	Rotor dişi sayısı	16
η	Verim	% 70
h_m	Sabit mıknatıs genişliği	3 mm

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Seçilen başlangıç değerlerine göre ANSYS Electronics-Maxwell 2D benzetim programında çalışmalar başlatılmış ve başlangıç için ATM modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan motor için stator, rotor boyutlandırma ve performans parametre değerleri Tablo 2 ve Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. ATM başlangıç boyutlandırma parametreleri (Initial sizing parameters of FRM)

ATM ELEMANLARI	PARAMETRELER	TANIM	DEĞER
Stator	D_o	Stator dış çapı	200 mm
	h_y	Stator boyunduruk uzunluğu	21 mm
	h_1	Stator diş genişliği	1.5 mm
	h_s	Stator oluk derinliği	15 mm
	w_o	Stator oluk açıklığı	5 mm
	w_t	Stator oluklar arası mesafe	10 mm
	BS_1	Stator oluk üst genişliği	22.84 mm
	BS_2	Stator oluk alt genişliği	30.88 mm
	h_m	Sabit mıknatıs genişliği	3 mm
Rotor	D_r	Rotor dış çapı	140 mm
	h_{rs}	Rotor diş derinliği	11.5 mm
	h_{ry}	Rotor boyunduruk uzunluğu	30 mm
	w_{rt}	Rotor diş genişliği	8.9443 mm
	L	Paket boyu	100 mm
Stator sargıları	W_1	Oluk başına sarım sayısı	36
	a_1	Paralel kol sayısı	1
	d_{co}	Sargı çapı	2.906 mm
	R_s	Stator sargı direnci	0.122 ohm
	K_{fill}	Stator oluk dolgu faktörü	% 77.375

Tablo 3. ATM başlangıç performans parametreleri (Initial performance parameters of FRM)

PERFORMANS	P_o	Güç	383.6942 Watt
	T_o	Tork	7.3280 Nm
	T_{ripple}	Tork dalgalanması	% 150,8992
	I_{rms}	Stator akım değeri	7.7731 A
	η	Verim	% 64.3499

4.1. Parametrik Analiz (Parametric Analysis)

ATM modelinde sargı uyarımlarda, analiz süresini hızlandırmak ve maksimum tork açısını akım eşitliğinde kullanmak için akım kaynağı kullanılmıştır. Uygulanacak üç fazlı akımlar sinüs dalga formunda olup aşağıdaki eşitliklerle gösterilmiştir.

Rotor açısal hızı Ω_r ;

$$\Omega_r = 2\pi\omega/60 \quad (17)$$

$$\Omega_e = \Omega_r N_r \quad (18)$$

Burada N_r rotor dişlerinin sayısıdır.

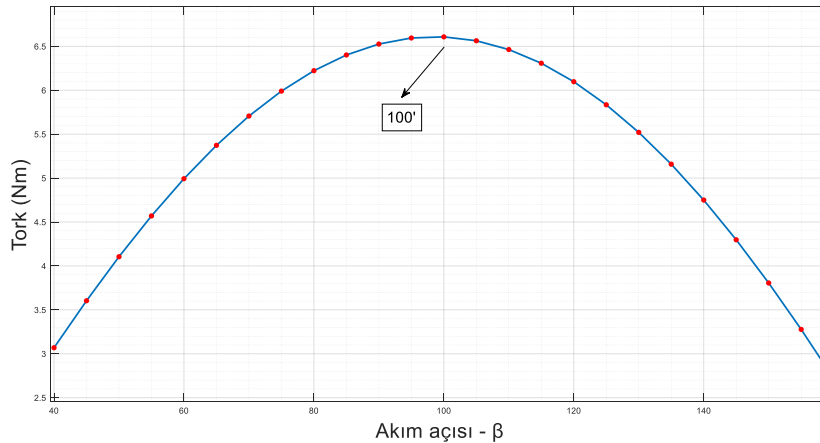
Uygulanacak üç fazlı akımlar;

$$I_A = I_{max} \sin(\Omega_e t + \beta) \quad (19)$$

$$I_B = I_{max} \sin(\Omega_e t + \beta + 120^\circ) \quad (20)$$

$$I_C = I_{max} \sin(\Omega_e t + \beta - 120^\circ) \quad (21)$$

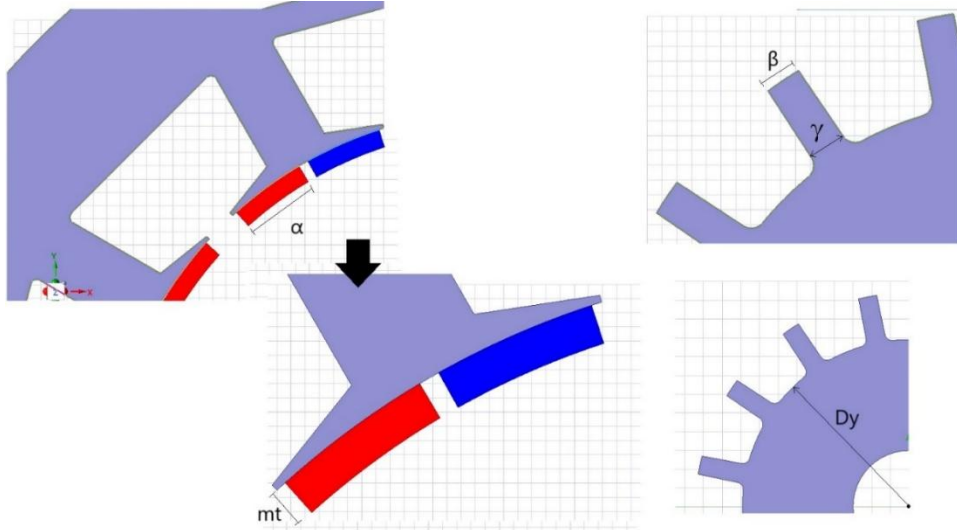
Burada β bir açı değeri olup uygulanan akım değerinde maksimum tork elde etmemiz için önemli bir parametredir. β değerinin bulunması için ATM de belirli aralıklarla açı değişimi yapılmıştır ve maksimum tork elde ettiğimiz açı bulunmuştur. Parametrik analizde akım açısı 5° aralıklarla değiştirilerek tork değeri gözlenmiştir. Bu analiz sonucunda Şekil 6'da gösterildiği üzere maksimum tork değerinin 100° de olduğu görülmüştür. Bundan sonraki analizlerde akım açısı 100° olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 7. Maksimum tork açısı (MTPA) (Maximum torque angle (MTPA))

4.2. Optimizasyon Analizi (Optimization Analysis)

Tasarlanan ATM'nin başlangıç modelinde, tork dalgalanması parametresinin azaltılması için rotor tarafında ve sabit mıknatıslarda optimizasyon analizi yapılmıştır. Optimizasyon tekniği olarak literatürde çok sayıda kullanıldığı bilinen Genetik Algoritma yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyonda kullanılacak parametreler Şekil 8'de gösterilmiştir. Tablo 4'te ise optimizasyon yapılacak aralıklar belirtilmiştir.



Şekil 8. ATM rotor ve SM optimizasyon parametreleri (Rotor and PM optimization parameters of FRM)

Tablo 4. ATM rotor ve SM optimizasyonunda uygulanacak boyutlandırma aralıkları
(Sizing ranges to be applied in FRM rotor and PM optimization)

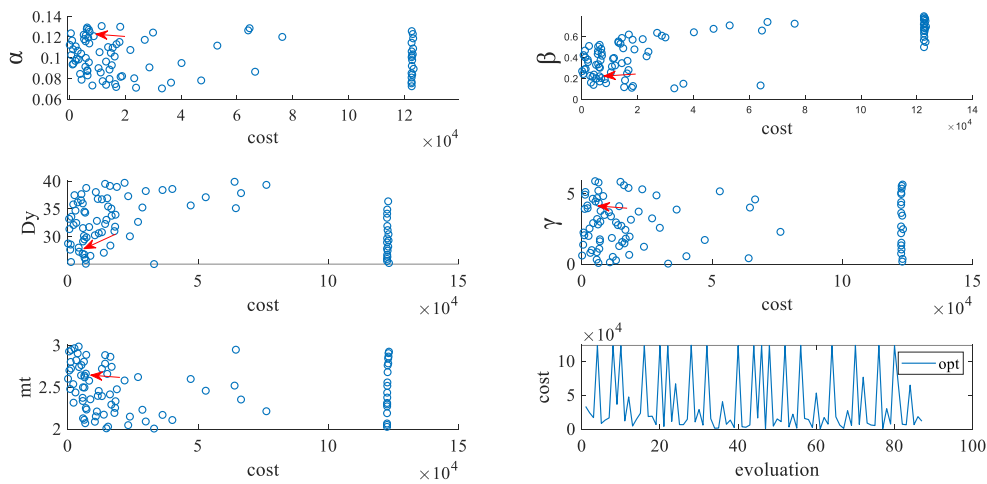
PARAMETRELER	TANIM	ALT DEĞER	ÜST DEĞER
α	Sabit mıknatis genişliği	0.1 *	0.14 *
mt	Sabit mıknatis uzunluğu	2.5 mm	3 mm
β	Rotor dış üst genişliği	0.1 *	0.6 *
γ	Rotor dış alt genişliği	0^0	6^0
D_y	Rotor boyunduruk yarıçapı	26 mm	40 mm

* Benzetim programında genişlik birimi olarak kullanılan aralıklar.

Tablo 5. ATM optimizasyonu için hedef performans değerleri (Target performance values for FRM optimization)

PARAMETRELER	TANIM	HEDEF DEĞER
P_o	Çıkış gücü	≥ 350 Watt
T_{ripple}	Tork dalgalanması	$\leq \% 15$

Optimizasyon aralıkları belirlendikten sonra hedef seçimi yapılmıştır. Hedef olarak ATM çıkış gücü alt sınır olarak 350 Watt olarak belirlenmiştir. Ayrıca tork dalgalanması değerinin %15'in altına indirilmesi hedeflenmiştir (Tablo 5).



Şekil 9. Optimizasyon analizinde parametre değişimlerinin gelişimi
(Evolution of parameter changes in optimization analysis)

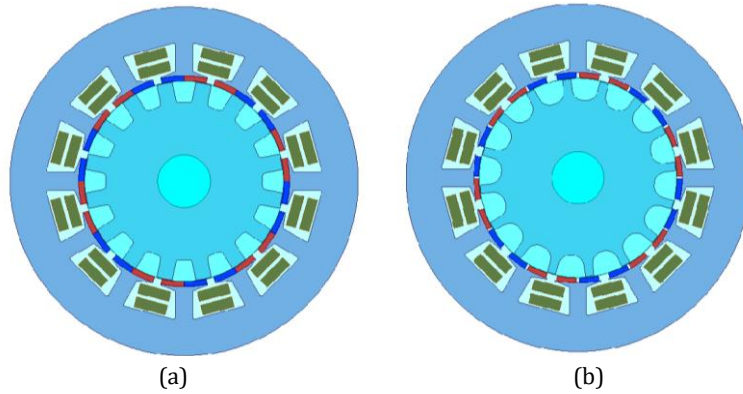
Yapılan optimizasyon sonucu rotor ve sabit mıknatısların geometrisi değişmiştir. Verilen hedeflere göre tork dalgalanması değeri en düşük değerdeki model seçilmiştir. Analizin gelişimi sonucu, parametrelerin değişimleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Optimizasyon grafiklerinde, analiz boyunca seçilen parametrelerin değişimleri gösterilmiştir. Bu grafikte görüldüğü üzere bazı değerlerde sonuçların yoğunlaştığı görülmektedir. Burada uygun

çözümlerin yoğunlaşmış bölgelerde olduğu anlamına gelmektedir. Özellikle α ve β parametrelerinin amaçlanan hedefteki etkisi diğer değişkenlere göre fazla görülmektedir. Şekil 10'da optimizasyon öncesi ve sonrası, rotor ve sabit mıknatısların görünümündeki değişim gösterilmiştir. Optimizasyon öncesi/sonrası değişen parametrelerin ve performans değerleri ise Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Optimizasyon sonucu ATM rotor ve mıknatısların boyutları ve performans sonuçları
(Optimization result FRM rotor and magnets dimensions and performance results)

PARAMETRELER	TANIM	BAŞLANGIÇ	OPTİMİZASYON SONRASI
α	Sabit mıknatıs genişliği	0.1 *	0.1242 *
mt	Sabit mıknatıs uzunluğu	2.5 mm	2.7998 mm
β	Rotor dış üst genişliği	0.1 *	0.2196 *
γ	Rotor dış alt genişliği	0 ⁰	0.606 ⁰
D_y	Rotor boyunduruk yarıçapı	26 mm	29.5267 mm
P_o	Çıkış gücü	383.6942 Watt	396.9113 Watt
T_{ripple}	Tork dalgalanması	%150.8992	% 10.5507
T_o	Çıkış torku	7.3280 Nm	7.5675 Nm
η	Verim	%64.3499	%79.3728

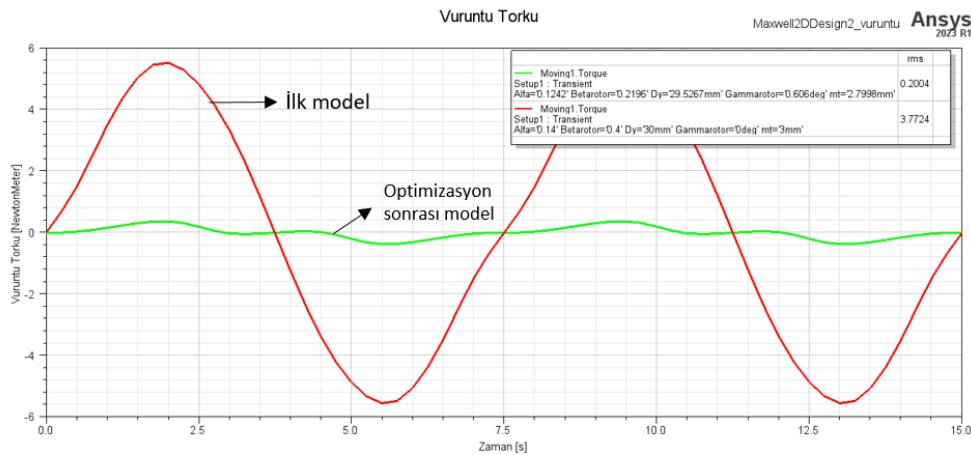
* Benzetim programında genişlik birimi olarak kullanılan aralıklar.



Şekil 10. (a) ATM başlangıç modeli, (b) ATM optimizasyon sonrası modeli
(a) FRM initial model, (b) FRM post-optimization model)

4.3. Vuruntu Torku (Cogging Torque)

Motor performansının artırılması ile ilgili diğer bir konu da vuruntu torkudur. Kalıcı mıknatıslı motorlarda önemli bir konu olan vuruntu torku, kalıcı mıknatıslar ile laminasyonların çelik dişleri arasındaki çekim kuvvetinden kaynaklanır. Vuruntu torku ortalama motor tork değerinin azalmasına neden olmasa da motor gürültüsü ve titreşiminin en önemli faktörlerinden biridir. Bu kuvvet tork dalgalanması değerini etkilemektedir (Kim vd., 2005; Gao vd., 2017).

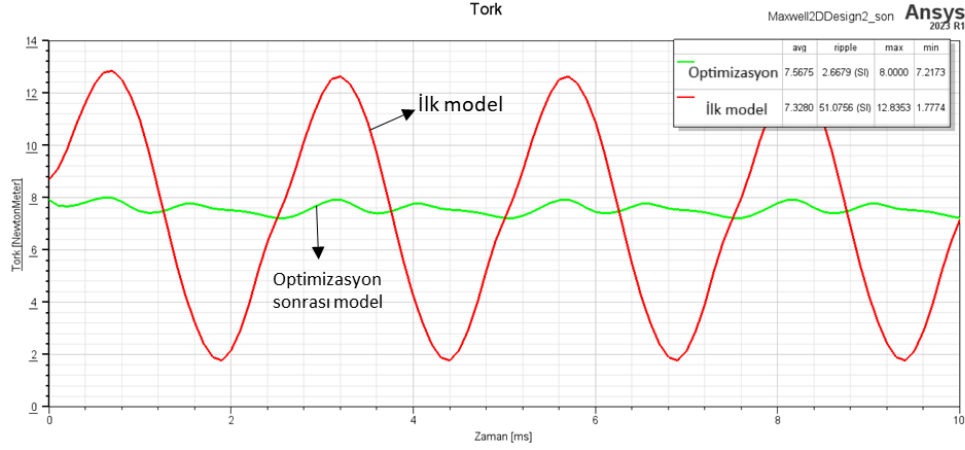


Şekil 11. ATM Vuruntu torku grafiği (Cogging torque graphic of FRM)

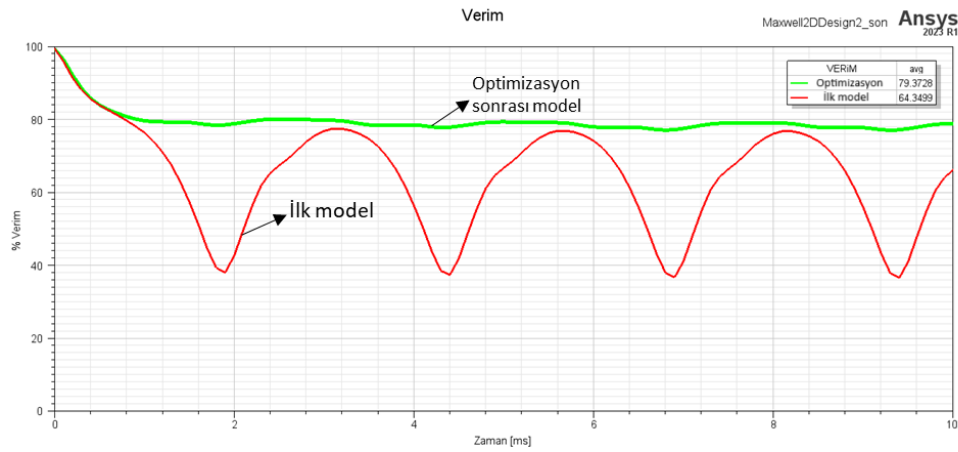
Bu çalışmada yapılan optimizasyon analizi ile vuruñtu torkunda da iyileştirme yapılmıştır. şekil 11’de vuruñtu torkunun optimizasyon öncesi ve sonrası performans grafiği gösterilmiştir.

4.4. Performans Grafikleri (Performance Graphics)

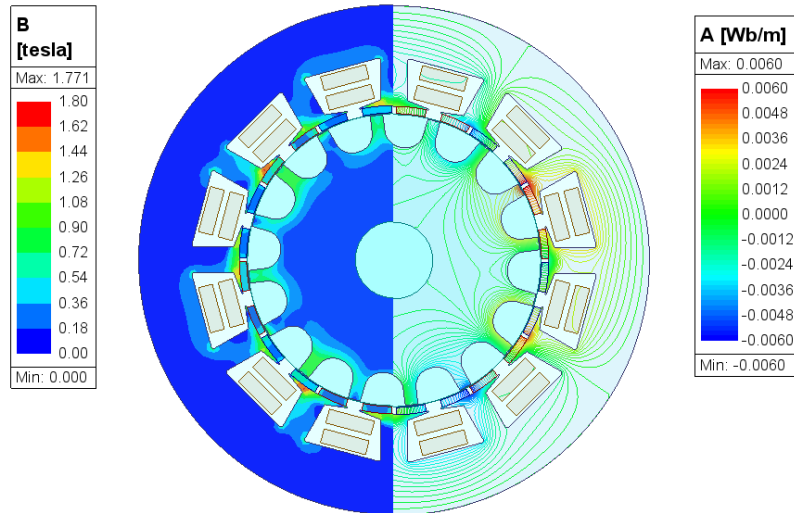
Bu bölümde ATM’nin optimizasyon sonrası oluşan model ve başlangıç modellerinin karşılaştırmalı grafiklerine yer verilmiştir. şekil 12’de tork, şekil 13’te verim grafikleri gösterilmiştir.



şekil 12. ATM tork grafiği (Torque graphic of FRM)



şekil 13. ATM verim grafiği (Efficiency graphic of FRM)



şekil 14. (B)ATM manyetik akı yoğunluğu, (A) manyetik alan şiddeti ((B) magnetic flux density, (A) magnetic field strength of FRM)

Yapılan optimizasyon sonrasında performans değerlerinin başarı ile iyileştirildiği görülmüştür. Son olarak tasarımı yapılan ATM'nin manyetik sınırlar içinde kalındığı Şekil 14'te gösterilmiştir. ATM'de manyetik akı yoğunluğunun: Stator boyunduruğunda 1-1,5 T aralığında, stator dişlerinde ise 1,6-2 T aralığında olması gerekmektedir (Pyrhönen vd., 2014). Manyetik akı yoğunluğu (B) ve manyetik alan şiddeti (A) grafikleri ile manyetik sınırlar içinde kalındığı gösterilmiştir. Manyetik akı yoğunluğunun en fazla olduğu yerler, stator dişlerinin ince olduğu bölgelerde görülmüştür.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada elektrikli scooter veya bisikletlerde tahrik motoru olarak kullanılması amaçlanan ATM tasarımı yapılmıştır. 350W gücünde ve 500 d/d hızla çalışması tasarlanan ATM'nin analitik hesaplarına yer verilmiş ve benzetim programında tasarımı yapılmıştır. ATM tasarımı için akış şeması takip edilerek sonuca ulaşılmıştır. ATM modelinin ilk hali için analitik hesaplardan faydalanarak boyutlandırılması yapılmıştır. İlk modelin performans sonuçları incelenerek tork dalgalanması ve vuruş torkunun yüksek olduğu, veriminin ise düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple ATM'nin rotoru ve statorunda bulunan sabit mıknatısları için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak çıkış gücünde % 3.45, çıkış torkunda % 3.27 ve verimde % 23.35 oranında artış sağlanmıştır. Özellikle tork dalgalanması değeri 14.3 kat düşerek % 10.5507 olarak gözlenmiştir. Vuruş torkunun ise 18.49 kat düştüğü gözlenmiştir. Sonuçlandırılmış ATM tasarımının, manyetik sınırlamaların içinde olduğu da ayrıca gösterilmiştir.

Yapılan tasarım ve analizler, 2D olarak yapılmıştır. İlgili motorun prototip üretimi yapılması planlanacak ise 3D tasarımları ile analizlerinin yapılması analiz sonuçların doğruluğunu arttıracaktır. İlerleyen çalışmalarda ise ATM'nin eksenel akılı modelleri tasarlanıp analizleri yapılarak, prototip üretimi ile elektrikli araçlarda kullanılabileceği tahmin edilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Ahn, J., Choi, J.H., Kim, S., 2008. Parametric variance consideration in speed control of single-phase flux reversal machine. IET Electric Power Applications. 2008;2(4):266-274.
- Anonim, 2024a. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Erişim tarihi: 07.10.2024
- Anonim, 2024b. European Federation for Transport and Environment AISBL. Erişim tarihi: 07.10.2024
- Anonim, 2024c. <https://www.transportenvironment.org/topics/cars>. Erişim tarihi: 15.10.2024
- Anonim, 2024d. <https://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/OptimizasyonTeknikleri/OptimizasyonTeknikleri-5.Hafta-GenetikAlgoritma.pdf>. Erişim tarihi: 01.11.2024
- Bharathi, M., Kumar, M.K., Sekhar, O.C., Ramamoorthy, M., 2019. A Review of Recent Advancements in Flux Reversal Permanent Magnet Machine (FRPMM), International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-7, Issue-6, March 2019.
- Boldea, I., Wang, C., Nasar, S.A., 1999. Design of a Three- Phase Flux Reversal Machine. Electric Machines & Power Systems, 27:8, 849-863, DOI: 10.1080/073135699268885.
- Burke, E.K., Elliman, D.G., Weare, R.F., 1994. A genetic algorithm based university timetabling system. International Conference on Computer Technologies in Education, Crimea, Ukraine, 1, 35-40.
- Deodhart, R.P., Andemon, S., Boldea, I., Miller, T.J., 1996. The flux-reversal machine: a new brushless doubly-salient permanent-magnet machine. IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, 2, 786-793 vol.2.
- Deodhart, R.P., Andersson, S., Boldea, I., Miller, T.J., 1997. The flux-reversal machine: A new brushless doubly-salient permanent-magnet machine. IEEE Transactions on Industry Applications. 1997;33(4):925-934.
- Gao, Y., Qu, R., Li, D., Li, J., 2017. Torque Performance Analysis of Three-Phase Flux Reversal Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 2110-2119, May-June 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2677356.
- Gao, Y., Li, D., Qu, R., Li, J., 2017. Design Procedure of Flux Reversal Permanent Magnet Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 5, pp. 4232-4241, Sept.-Oct. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2695980.
- Gao, Y., Liu, Y., 2021. Flux Reversal Machine Design. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.92428.
- Gruber, W., Bäck, W., Amrhein, W., 2011. Design and implementation of a wheel hub motor for an electric scooter. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-6), IEEE.
- Gör, H., Dalcı, A., 2024. Design and optimization of a high-performance multi-barrier IPMS motor for an electric scooter and bicycle. Royal Society open science, 11(3), 231650.
- Gysen, B. L. J., İlhan, E., Meessen, K. J., Paulides, J. J. H., Lomonova, E. A., 2010. Modeling of Flux Switching Permanent Magnet Machines With Fourier Analysis. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6, pp. 1499-1502, June 2010, doi: 10.1109/TMAG.2009.2039921.
- Kim, T.H., Lee, J., 2004. A study of the design for the flux reversal machine. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, no. 4, pp. 2053-2055, July 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.832488

- Kim, T.H., Won, S.H., Bong K., Lee, J., 2005. Reduction of cogging torque in flux-reversal machine by rotor teeth pairing. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 10, pp. 3964-3966, Oct. 2005, doi: 10.1109/TMAG.2005.855182.
- Liao, Y., Liang, F., Lipo, T.A., 1995. A novel permanent magnet motor with doubly salient structure. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 5, pp. 1069-1078, Sept.-Oct. 1995, doi: 10.1109/28.464521.
- Lee, J.Y., Woo, B.C., Kim, J.M., Oh, H.S., 2017. In-wheel motor design for an electric scooter. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 12(6), 2307-2316.
- More, D.S., Fernandes, B.G., 2007. Novel three phase flux reversal machine with full pitch winding. *International Conference on Power Electronics*. 2007. pp. 1007-1012.
- Omaç, Z., 2022. Investigation of an Outer Rotor In-Wheel Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles by Finite Element Method. *Turkish Journal of Science and Technology*, 17(1), 55-64. <https://doi.org/10.55525/tjst.1057940>.
- Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcova, V., 2014. *Design of rotating electrical machines*. ISBN 978-1-118-58157-5.
- Ravi, N., Ekram, S., Mahajan, D., 2006. Design and development of a in-wheel brushless DC motor drive for an electric scooter. *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems* (pp. 1-4), IEEE.
- Shenoy, K.L., Kumar, M.S., 2016. Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor for electric scooter application. *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)* (pp. 1541-1545), IEEE.
- Sheth, N.K., Rajagopal, K.R., 2007. Performance of flux reversal motor at various rotor pole arcs. *International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2007. pp. 1517-1522.
- Sinaga, D., Sembiring, M.A.R., Salman, R., Sinuraya, A., Hernando, B., Aulia, M.A., 2024. Performance Analysis of Lithium-Ion Batteries on Electric Bike With 350 W BLDC Motor. *Proceedings of the 5th International Conference on Innovation in Education, Science, and Culture, ICIESC 2023*, 24 October 2023, Medan, Indonesia.
- Song, B.M., Chang, K.C., Choi, J.Y., 2010. Design of an outer-rotor-type permanent magnet motor for electric scooter propulsion systems. *The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-* (pp. 2763-2742), IEEE.
- Sriwannarat, W., Seangwong, P., Siritaratiwat, A., Fernando, N., Dechgummarn, Y., Khunkitti, P., 2021. Electromagnetic Torque Improvement of Doubly Salient Permanent Magnet Machine Using Pole Ratio Adjustment Technique. *Front. Energy Res.* 9:726164. doi: 10.3389/fenrg.2021.72616.
- Wang, C., Nasar, S.A., Boldea, I., 1999. High speed control scheme of flux reversal machine. *International Conference on Electric Machines and Drives*. 1999. pp. 779-781.
- Yuefeng, L., Feng, L., Lipo, T. A., 1995. A novel permanent magnet motor with doubly salient structure. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 5, pp. 1069-1078, Sept.-Oct. 1995, doi: 10.1109/28.464521.