

Hafif Elektrikli Araçlar İçin Altı Fazlı Asimetrik Sargılı Asenkron Motorun Tasarımı ve Analizi

Design of a Six-Phase Asymmetric Winding Induction Motor For Lightweight Electric Vehicles

¹Sercan TAŞCI , ²Cemil OCAK 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yenimahalle/Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/Ankara, Türkiye

¹23833001803@gazi.edu.tr, ²cemilocak@gazi.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 25 October 2025

Accepted : 11 January 2026

Keywords:

Six Phase, Induction Motor,
Electric Vehicle Applications

ABSTRACT

Technological advancements and the global climate crisis have paved the way for a new era in electric vehicle technologies. The traction power in electric vehicles can be supplied by various motor types. In the literature, motors are classified by parameters such as torque, speed, output power, safety, and efficiency. Conventional three-phase induction motors show performance degradation and efficiency loss under fault conditions such as phase failure. In this study, a four-pole six-phase induction motor was designed for light electric vehicle applications. The motor has a 48-slot asymmetric winding structure and a star connection configuration. Electromagnetic analyses were performed using ANSYS Maxwell software. Based on the Finite Element Method (FEM) results, the motor efficiency was 92.91%, and the torque ripple was 5.67%. The results demonstrate that the proposed motor provides higher efficiency and lower torque ripple compared with conventional three-phase designs.

© 2026 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 25 Ekim 2025

Kabul : 11 Ocak 2026

Anahtar Kelimeler:

Altı Fazlı, Asenkron Motor,
Elektrikli Araç Uygulamaları

ÖZET

Teknolojik gelişmeler ve küresel iklim krizi, elektrikli araç teknolojilerinde yeni bir dönemin başlamasına zemin hazırlamıştır. Elektrikli araçlarda tahrik gücü, çeşitli motor tipleriyle sağlanabilmektedir. Literatürde motorlar; tork, devir sayısı, çıkış gücü, güvenlik ve verimlilik gibi parametrelere göre sınıflandırılmaktadır. Geleneksel üç fazlı asenkron motorlar, faz kaybı gibi arıza durumlarında performans düşüşü ve verimlilik kaybı gibi dezavantajlar göstermektedir. Bu çalışmada, hafif elektrikli araç uygulamaları için dört kutuplu, altı fazlı bir asenkron motor tasarlanmıştır. Motor, 48 oluklu asimetrik sargı yapısına ve yıldız bağlantı konfigürasyonuna sahiptir. Elektromanyetik analizler ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile elde edilen sonuçlara göre motorun verimi %92,91, tork dalgalanması ise %5,67 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen motorun geleneksel üç fazlı tasarımlara kıyasla daha yüksek verimlilik ve daha düşük tork dalgalanması sağladığını göstermektedir.

© 2026 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. GİRİŞ

Küresel ısınmanın etkisi ile artan doğa olayları, dünya genelinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu tehditleri bertaraf edebilmek amacıyla, pek çok ülke tarafından çeşitli önlemler hayata geçirilmiştir. Bu önlemler arasında yer alan karbon emisyonlarının azaltılması, günümüzde küresel ölçekte öncelikli çevresel gündemlerden biri haline gelmiştir. Karbon emisyonlarına ilişkin tehdit, gelecek teknolojilerinin gelişim yönünü belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda, teknolojik gelişmelerin sağladığı avantajlar doğrultusunda elektrikli araçlara olan ilgi hızla artmıştır. Sıfır karbon emisyonuna sahip olmaları nedeniyle, içten yanmalı motorlara kıyasla daha çevre dostu olan elektrikli araçların, geleceğin ulaşım teknolojileri arasında ön plana çıkacağı öngörülmektedir [1]. Batarya teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, birim kWh başına düşen ortalama batarya maliyetlerinin her yıl istikrarlı bir şekilde azalmasını sağlamaktadır. Elektrikli araç teknolojilerinde maliyetlerin düşmesi, bu araçların içten yanmalı motor teknolojileriyle rekabet edebilir hâle gelmesine olanak tanımaktadır. Elektrikli araç teknolojilerine erişimin artmasıyla birlikte, araç edinim oranları da her geçen gün yükselmekte olup bataryaların ikinci ömür kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar yürütülmektedir [2]. Batarya teknolojilerindeki gelişmelere ek olarak, depolanan enerjinin tahrik sistemine maksimum verimle aktarılması, araç menzili açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, elektrikli araçlarda kullanılan motorların yüksek verimle çalışması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, çok fazlı motor teknolojileri kapsamında, sistemlerin arıza toleransını artırmaya yönelik çalışmalar gün geçtikçe artış göstermektedir. Özetle, elektrikli araç sistemleri, sıfır karbon emisyonunun yanı sıra elektrik motorlarının sunduğu sürüş konforu, yüksek verim ve güvenlik gibi çok sayıda avantaj sağlamaktadır [3]. Elektrik motorları, elektrikli araç sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır [4]. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı tipte motor teknolojilerinin öne çıkan farklı özellikleri sebebiyle elektrikli araç uygulamalarında tercih edildiği görülmektedir. Özellikle asenkron motorlar; düşük bakım gereksinimi, maliyet etkin yapısı ve yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyeti gibi öne çıkan çeşitli avantajlara sahiptir. Bu nedenlerle, asenkron motorlar hafif elektrikli araçlarda yaygın bir şekilde tercih edilmektedir [5]. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan bir diğer motor türü ise sabit mıknatıslı senkron motorlardır (SMSM). SMSM'ler, asenkron motorlara kıyasla daha yüksek moment yoğunluğu ve genel sistem verimliliği sağlayabilmektedir. Ancak SMSM'lerde kullanılan nadir toprak elementi içeren mıknatısların yüksek maliyetleri, dışa bağımlılık ve fiyat dalgalanmaları; üreticilerin orta ve uzun vadeli tedarik planlamalarında çeşitli belirsizliklere neden olmaktadır [6]. Buna ek olarak, yüksek sıcaklık koşullarında ortaya çıkan demanyetizasyon riski ve buna bağlı olarak etkin sıvı soğutma gereksinimleri, SMSM'lerin hafif elektrikli araçlardaki kullanımını sınırlamaktadır [7]. Örneğin, Çin'in Nisan 2025 tarihinde nadir elementlerin ihracatına getirdiği kısıtlama dikkate alındığında, ithal mıknatıs kullanan motor üreticileri açısından mıknatıs içermeyen asenkron motor teknolojileri her zaman stratejik bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Asenkron motorlar; basit yapıları, yüksek dayanıklılıkları, düşük maliyetleri, gelişmiş hız kontrol özellikleri ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kapasiteleri nedeniyle elektrikli araçların tahrik sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu nedenle, özellikle hafif elektrikli araç uygulamalarında asenkron motorlar yaygın şekilde kullanılmaktadır [8, 9]. Son yıllarda, elektrikli araçlarda kullanılan motorların arıza anında güvenli şekilde çalışmaya devam edebilmesi, sürüş konforu ve sistem kararlılığı açısından kritik bir gereklilik hâline gelmiştir. Bu kapsamda, çok fazlı motor yapılarının sunduğu yüksek hata toleransı ve verimlilik avantajı dikkat çekmektedir. Özellikle, altı fazlı asenkron motorlar; geleneksel üç fazlı motorlara kıyasla düşük tork dalgalanması, azaltılmış harmonik bileşenler ve arıza durumunda bile çalışmayı sürdürebilme yetenekleri sayesinde öne çıkmaktadır. Faz sayısının artırılması, aynı zamanda her bir fazdan geçen akımın azalmasını sağlayarak hem termal yükleri dengelemekte hem de sürücü devrelerinde daha küçük boyutlu anahtarlama elemanlarının kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bu avantajlar, altı fazlı asenkron motorları özellikle hafif elektrikli araç uygulamaları için güçlü bir aday hâline getirmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, altı fazlı asenkron motorun üç fazlıya göre avantajlarının sunulduğu çalışmada, altı fazlı asenkron motorun uzay vektör PWM ile doğrudan moment kontrolü ve hız denetimi gerçekleştirilmiştir [10]. Matlab/Simulink ortamında her iki motorun benzetim modeli oluşturularak yük altında ve boşta çalışma durumlarında üç fazlı asenkron motora kıyasla daha az akım çektiği ve sargı kayıplarının azaltıldığı belirtilmiştir. Kadaba ve arkadaşları, hafif elektrikli araçlara yönelik bir altı fazlı asenkron motor tasarımı gerçekleştirmiş ve bu motorun performansını üç fazlı bir motorla karşılaştırmıştır. Söz konusu çalışmada, 5 beygir gücünde, 60 Hz frekansında, 6 kutuplu ve sincap kafesli yapıya sahip bir üç fazlı asenkron motor tasarlanmış ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analiz edilmiştir. Bu motor, altı fazlı bir stator sargı konfigürasyonuna uygun şekilde yeniden tasarlanmış ve çeşitli faz kaybı senaryoları altında test edilmiştir. Test sonuçlarına göre, farklı arıza koşullarında altı fazlı asenkron motorların, üç fazlı muadillerine kıyasla daha yüksek performans ve güvenlik düzeyleri sunduğu tespit edilmiştir [11]. Ravikumar ve arkadaşları, beş fazlı bir asenkron motorun tasarımını ve performans analizini gerçekleştirmiştir. Dört kutuplu ve 24 oluklu bir motor, hem üç fazlı hem de beş fazlı yapı için tasarlanmış ve MATLAB/Simulink ortamında analiz edilmiştir. Geliştirilen motorlara ait sonuçlar incelendiğinde, beş fazlı asenkron motorun farklı faz kaybı durumlarında dahi sabit tork üretebildiği gözlemlenmiştir. Tek bir fazın devre dışı kaldığı durumda, beş fazlı asenkron motorun veriminin, üç fazlı asenkron motora kıyasla yaklaşık 1,92 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir [12]. Uçar'ın çalışmasında, inverter ile beslenen altı fazlı bir asenkron motor Matlab/Simulink ortamında modellenmiş; motorun hız, moment ve akım karakteristikleri incelenmiştir. Benzer şekilde, altı fazlı bir matris konvertör modeli oluşturularak bir RL devresine bağlanmış, çıkıştaki faz ve hat gerilimleri ile faz akımları farklı frekanslar altında analiz edilmiştir. Matris konvertör kullanılarak asimetrik altı fazlı asenkron motor devresi sürdürmüş ve açık çevrim

hız kontrolü sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, motorun farklı hız değerlerinde hem yüksüz hem de yüklü koşullar altında sistem tepkisinin hızlı ve minimum hata ile gerçekleştiği gözlenmiştir [13]. Rezazadeh ve arkadaşları, güçlü, güvenilir ve düşük maliyetli bir çözüm olarak tanımladıkları psödo-konsantre sargılarla donatılmış altı fazlı dış rotorlu bir asenkron motor tasarımı gerçekleştirmiştir. Önerilen motor yapısının çeşitli tasarım parametreleri incelenmiş, kaykıt etkisini de dikkate alan değiştirilmiş sargı fonksiyonuna dayalı analitik bir modelleme yaklaşımı sunulmuştur. Sargılar için farklı sarım sayılarının kullanılması durumunda, bu değişkenliğin psödo-konsantre sargı yapısına etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Güç faktörü ile verimi maksimize etmek ve çıkış torkundaki dalgalanmaları minimize etmek amacıyla uygun bir optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Tasarlanan motorun doğrulaması, hem matematiksel modelleme hem de SEY analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, tasarlanan motorun üstün performans değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur [14]. Shata ve arkadaşları, çok fazlı bir asenkron motorun matematiksel modellemesini gerçekleştirmiştir. Çalışmanın temel amacı, hem motorun kontrolüne hem de performans değerlendirmesine yönelik kapsamlı bir modelleme yaklaşımı sunmaktır. Yüksek derecede doğrusal olmayan elektriksel ve mekanik sistemlerin modellenmesinde, kesirli dereceli diferansiyel modelleme yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, normal işletim ve açık faz hatası koşulları altında, farklı nötr düzenlemeleriyle yapılandırılmış asimetrik altı fazlı bir asenkron motor için, geliştirilmiş vektör uzayı ayrışım (VSD) tabanlı kesirli dereceli bir model önerilmiştir. Modelde kullanılan uygun türev dereceleri, simülasyon ve deneysel dalga formları arasındaki hata fonksiyonunun optimize edilmesiyle belirlenmiştir. Sonuçlar, geleneksel kesirli hesap tabanlı modelle karşılaştırılmıştır. Deneysel doğrulama, 1,5 HP gücünde prototip bir asenkron motor kullanılarak gerçekleştirilmiştir [15]. Literatürde sunulan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, çok fazlı sistemlere ilişkin farklı motor tipleri ve işletme koşulları altında çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Çok fazlı motor modelleri ile güvenli çalışma, yüksek verim, düşük moment dalgalanması ve arıza toleransı gibi pek çok açıdan önemli avantajlar elde edilebileceği ortaya konulmuştur [11]. Bu tür makineler; yapısal konfigürasyonu, verimliliği, tork dalgalanması, hız karakteristikleri, maliyeti ve dayanıklılığının yanı sıra, arıza durumunda çalışma performansı, hız aralığı, bağlantı türü ve sargı yapısı gibi teknik farklılıklar ile incelenmekte ve performans sonuçları değerlendirilmektedir. Literatürde, çok fazlı asenkron motorlara yönelik çeşitli tasarım ve kontrol yaklaşımları geliştirilmiş olsa da, hafif elektrikli araçlara yönelik optimize edilmiş, asimetrik sargı yapısına sahip altı fazlı motorlara ilişkin çalışmalar sınırlıdır. Özellikle, performans kriterlerinin (verim, tork dalgalanması, sargı kayıpları vb.) sonlu elemanlar yöntemiyle detaylı biçimde analiz edildiği, özgün geometri ve sargı konfigürasyonuna dayalı sistematik tasarım çalışmalarına literatürde nadiren rastlanmaktadır. Bu bağlamda hem elektromanyetik karakteristikleri optimize edilmiş hem de üretilebilirliği gözetilmiş bir motor topolojisi sunulmuştur. Bu çalışmanın temel amacı; hafif elektrikli araçlarda kullanılmak üzere, dört kutuplu ve asimetrik sargı yapısına sahip altı fazlı bir asenkron motorun elektromanyetik tasarımını gerçekleştirmek ve performansını SEY ile analiz etmektir. Çalışmada, hafif elektrikli araç uygulamaları için özelleştirilmiş, asimetrik sargı yapısına sahip, dört kutuplu, 9,33 V, 65 Hz, 1950 rpm ve 12 kW maksimum çıkış gücüne sahip altı fazlı asenkron motor tasarlanarak performans sonuçları ortaya konmuştur. Tasarlanan motor, geleneksel üç fazlı yapılara kıyasla daha düşük tork dalgalanması ve daha yüksek verimlilik hedefiyle yapılandırılmıştır. Makale dört ana bölüme ayrılmıştır. İkinci bölümde, altı fazlı asenkron motorun elektromanyetik tasarım ilkeleri, sargı konfigürasyonu ve yapısal parametreleri detaylandırılmıştır. Üçüncü bölümde, ANSYS Maxwell yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen SEY analiz sonuçları sunulmuş; motorun akım, gerilim, tork ve verimlilik gibi performans göstergeleri değerlendirilmiştir. Son bölümde ise, elde edilen bulgular ışığında genel bir değerlendirme yapılmış ve gelecek çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. ALTI FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI

Alternatif akım makinalarının tasarımı, sargı yerleşiminden geometrik oranlara kadar çok sayıda parametrenin eş zamanlı olarak optimize edilmesini gerektirir. Bu parametreler arasında; oluklara yerleştirilen bobinlerin fazlara atanma düzeni, fazlar arası bobin bağlantı topolojisi, bobinlerin akım yönü, sarım sayısı ve iletken kesit geometrisi gibi unsurlar yer almaktadır. Tasarımın temel amacı, çok fazlı alternatif akım sargılarına uygulanan sinüzoidal akımlar aracılığıyla döner alan oluşturmaktır. Bu sayede, sürekli çalışma koşulları altında elektromekanik tork üretimi sağlanır [8]. Asenkron motorların boyutlandırılmasında temel amaç, belirlenen performans hedeflerini sağlayacak optimum geometrik ve elektromanyetik yapıların oluşturulmasıdır. Bu doğrultuda, seçilen yapı tipi ile geometrik boyutlar arasında karşılıklı ilişkiler kurularak en uygun tasarım parametreleri elde edilmeye çalışılır. Sıcaklık artışı, kalkış akımı, maksimum moment gibi termal ve dinamik parametreler dikkate alınarak yürütülen bu süreçte, aynı zamanda malzeme kullanımı ve üretim maliyetleri açısından da verimli çözümler hedeflenmektedir [16]. Motorun elektromanyetik tasarımı, genel boyutlandırma denklemleri temel alınarak başlatılmaktadır. Bu kapsamda, ilk olarak stator iç çapı, denklem 1 yardımıyla hesaplanır.

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2.P_1 P_l S_{gap}}{\pi.\lambda f_1 C_0}} \quad (1)$$

Bu denklemde, P_l kutup sayısını, S_{gap} hava aralığı görünür gücünü, f_1 motorun çalışma frekansını ve C_0 Esson sabitini ifade etmektedir. Hava aralığı gücü ise denklem 2 de verildiği gibi bulunur.

$$S_{gap} = \frac{KEP_n}{\eta_n \cos\phi_n} \quad (2)$$

Denklemden, K_F stator kaçak reaktansına bağımlı sargı emk katsayısını, P_n anma gücünü, η_n motor verimini, $\cos\phi_n$ güç faktörünü ifade eder. Stator paket uzunluğu L , denklem 3 ile belirlenmekte olup; bu denklemde D_{is} stator iç çapını, P_l kutup sayısını, λ paket uzunluğunun kutup adımına oranını ifade eder [16].

$$L = \lambda \left(\frac{\pi D_{is}}{2P_l} \right) \quad (3)$$

Üç fazlı sargılar, tek katmanlı ya da çift katmanlı olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Elektrik motorlarında sargı topolojisinin doğru bir şekilde yapılandırılması, motorun elektromanyetik performansını doğrudan etkileyen kritik bir tasarım parametresidir. Sargıların optimal yerleşimi ve oluklara düzgün dağılımı sayesinde toplam bakır kayıpları ve ilave elektromanyetik kayıplar en aza indirilebilir. Aynı zamanda hava aralığında ideal bir manyeto-motor kuvveti (MMK) profili elde edilebilir. Bobinlerden kaynaklanan döner MMK bileşenleri, stator sargılarında sinüzoidal bir elektromotor kuvvet (EMK) oluşturacak şekilde manyetik akı üretir. Komşu oluklara yerleştirilen bobinlerin neden olduğu MMK bileşenleri, elektriksel radyal açı cinsinden, α kadar faz kayması ile yer değiştirir [11, 16]. Oluklar arasında ki elektriksel açı denklem 4 yardımıyla kutup ve oluk sayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada, P kutup sayısını, N_s ise stator oluklarının sayısını ifade etmektedir [11].

$$\alpha_{es} = \frac{\pi.P}{N_s} \quad (4)$$

Faz başına düşen oluk sayısı, stator çevresi boyunca toplam oluk sayısının faz sayısına bölünmesiyle elde edilir ve denklem 5 ile ifade edilir.

$$A = \frac{N_s}{m} \quad (5)$$

Burada, A faz başına düşen oluk sayısını, N_s stator oluk sayısını ve m ise stator sargısı faz sayısını ifade eder [11].

2.1. Altı Fazlı Asimetrik Sargıların Oluklara Yerleştirilmesi

Tek katmanlı ve tam adımli sargı yapılarında, bobinlerin içe ve dışa bakan kolları her bir faz için birbirinden ayrılmış ayrı oluklara yerleştirilir. Bu durumda, faz başına düşen bobin sayısı $N_s/2m$ olarak elde edilir. Stator üzerindeki toplam oluk sayısı ise kutup, faz ve oluk dağılım ilişkisi dikkate alınarak denklem 6 ile hesaplanır.

$$N_s = 2p.q.m \quad (6)$$

Denklemden p kutup çiftini, q kutup başına faz başına düşen oluk sayısını, m ise faz sayısını ifade eder [16]. Dengeli ve tam adımli bir sargı yapısının oluşturulabilmesi için, toplam oluk sayısının faz başına kutup başına en az bir oluk düşecek biçimde ve genellikle 3'ün katı olacak şekilde seçilmesi gerekir. Örneğin, dört kutuplu bir üç fazlı asenkron motor için minimum oluk sayısı 12 olmalıdır. Tablo 1 incelendiğinde, üç ve altı fazlı asenkron motorlar için farklı kutup sayısı ve oluk sayısı kombinasyonlarına bağlı olarak yeniden yapılandırma yapılabileceği görülmektedir. Bu kombinasyonlar sayesinde, bazı üç fazlı motor topolojileri, gerekli dönüşüm kurallarına uyularak altı fazlı yapılara dönüştürülebilir [11].

Tablo 1. 3 ve 6 faz için Farklı oluk, kutup, faz sayısı kombinasyonu [11].

Oluk Sayısı	Kutup Sayısı	Faz Sayısı	Faz Başına Kutup Başına Oluk Sayısı	Faz Sayısı	Faz Başına Kutup Başına Oluk Sayısı
12	2	3	2	6	1
	4		1		1/2
	6		2/3		1/3
24	2	4	4	2	2
	4		2		1
	6		4/3		2/3
36	2	6	6	3	3
	4		3		3/2
	6		2		1
48	2	8	8	4	4
	4		4		2
	6		8/3		4/3
60	2	10	10	5	5
	4		5		5/2
	6		10/3		5/3
72	2	12	12	6	6
	4		6		3
	6		4		2

Tablo 1'de verildiği üzere, kutup başına faz başına düşen oluk sayısının kesirli bir değere sahip olması durumunda sargı yerleşiminde simetri sağlamak güçleşmekte ve harmonik bileşenleri artmaktadır [11]. Bu nedenle, örneğin 6 kutuplu 12 oluklu veya 6 kutuplu 60 oluklu makine konfigürasyonları, üç fazlıdan altı fazlıya yeniden yapılandırma açısından uygun değildir. Böyle kombinasyonlarda, düzgün sargı dağılımı ve dengeli faz gerilimleri elde etmek

teknik olarak zorlaşmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu sınırlamaları dikkate alarak, dört kutuplu ve 48 oluklu bir yapı tercih edilmiştir. Bu yapı, hem üç fazlı hem de altı fazlı motor konfigürasyonları için uygunluk sağlayan, dengeli ve üretilebilir bir topoloji sunmaktadır.

2.2. Stator Sargısının Üç Fazdan Altı Faza Yapılandırılması

Üç fazlı bir sargı yapısının altı fazlı yapıya yeniden dönüştürülmesinde, tek katmanlı, dağıtılmış ve tam adımli bobin yapısına sahip bir sargı topolojisi tercih edilmiştir. Bahse konu sarım kurallarına göre, 48 oluklu stator ve 4 kutuplu rotor yapısı için faz başına kutup başına düşen oluk sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$m=3$ fazlı motor için;

$$N_s = 2p \cdot q \cdot m; 48 = 4 \cdot q \cdot 3 \quad (7)$$

Denklem 7 yardımıyla faz başına kutup başına oluk sayısı değeri 4 olarak bulunur.

$m=6$ fazlı motor için;

$$N_s = 2p \cdot q \cdot m; 48 = 4 \cdot q \cdot 6 \quad (8)$$

Denklem 8 yardımıyla faz başına kutup başına oluk sayısı değeri 2 olarak bulunur.

48 oluklu ve 4 kutuplu bir asenkron motor için, oluklar arasındaki elektriksel açı denklem 9 yardımıyla bulunur.

$$\alpha_{estator} = \frac{\pi \cdot 2p}{N_s} = \frac{\pi \cdot 4}{48} = 15^\circ \quad (9)$$

Bu durumda, komşu stator olukları arasında 15° elektriksel açı bulunmaktadır. 48 oluklu bir stator yapısında, dört kutup için her kutup başına 12 oluk düşmektedir. Bu bilgiye dayanarak, üç fazlı sargı konfigürasyonunda bobinlerin nasıl yerleştirileceği Tablo 2’de gösterilmektedir. Bu yerleşime karşılık gelen fazör dağılımı ise Şekil 1(a)’da verilmiştir.

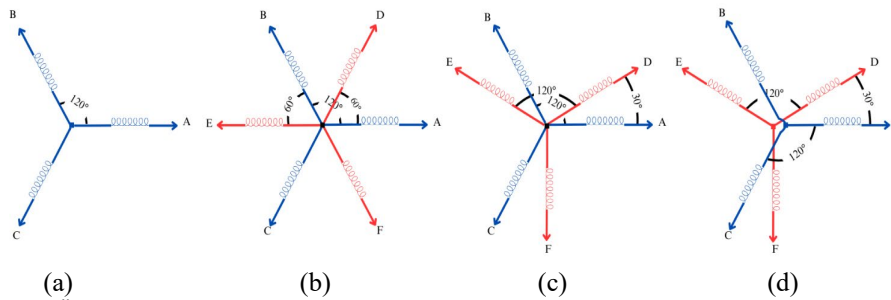
Tablo 2. Tek katmanlı, 48 oluklu 4 kutuplu üç fazlı asenkron motorda bobinlerin yerleşimi.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	A	A	A	c	c	c	c	B	B	B	B	a	a	a	a	C	C	C	C	b	b	b	b
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
A	A	A	A	c	c	c	c	B	B	B	B	a	a	a	a	C	C	C	C	b	b	b	b

48 oluklu ve 4 kutuplu bir asenkron motorun üç fazdan altı fazlı yapıya dönüştürülmesi durumunda, faz başına kutup başına düşen oluk sayısı 4’ten 2’ye düşmektedir. Bu yeni yapılandırmada, faz başına iki oluk düşecek şekilde sargıların yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu yapıda, 15° ’lik oluklar arası elektriksel açı ve kutup başına 12 oluk adımı dikkate alındığında, simetrik altı fazlı dağılım için 60° ’lik bir faz farkı oluşturmak mümkün olmamaktadır. Faz açıları ile fiziksel oluk konumları arasındaki uyumsuzluk nedeniyle altı fazlı konfigürasyonda simetrik yerine asimetrik sargı yapısı tercih edilmiştir. Sargıların asimetrik yerleşimi temel alınarak geliştirilen altı fazlı motorun bobin yerleşimi Tablo 3’te gösterilmektedir. Bu yerleşime karşılık gelen fazör dağılımı ise Şekil 1(c)’de renk uyumu sağlayacak biçimde verilmiştir.

Tablo 3. Tek katmanlı, 48 oluklu 4 kutuplu altı fazlı asenkron motorda bobinlerin yerleşimi.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	A	D	D	c	c	f	f	B	B	E	E	a	a	d	d	C	C	F	F	b	b	e	e
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
A	A	D	D	c	c	f	f	B	B	E	E	a	a	d	d	C	C	F	F	b	b	e	e



Şekil 1. (a) Üç fazlı , (b) simetrik altı fazlı , (c) asimetrik altı fazlı, (d) çift nörlü asimetrik altı faz.

Gerilim fazörleri arasındaki elektriksel yer değişimini sağlamak amacıyla, üç fazlı sistemde yer alan her bir bobin grubu iki alt gruba ayrılarak grupların başlangıç ve bitiş uçları Tablo 3’te gösterilen bağlantı şemasına uygun şekilde yeniden düzenlenmektedir. Bu bağlantı yapısı sayesinde altı fazlı bir sargı konfigürasyonu elde

edilmektedir. Şematik gösterimde büyük harflerle belirtilen faz uçları pozitif yönü, küçük harflerle belirtilen faz uçları negatif yönü, Kırmızı ve mavi harflerle belirtilen faz uçları ise faz gruplarını temsil etmektedir.

Şekil 1(c)'de görüldüğü üzere, faz A ile faz D arasında, faz B ile faz E arasında ve faz C ile faz F arasında 30°'lik bir elektriksel açı farkı bulunmaktadır. Bu yerleşim yapısı, fazlar arasında 60°'lik simetrik açı farkı oluşturulamayan fiziksel koşullarda, asimetrik bir yerleşimin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır [13]. Bu çalışmada kullanılan motorun sargı yapısı, Şekil 1(c)'de gösterilen asimetrik altı fazlı konfigürasyona uygun şekilde tasarlanmıştır.

Altı fazlı asenkron motorlar, üç fazlı sargı setinin iki ayrı set hâlinde tasarlanmasıyla elde edilebildiğinden, bu motorlar hem çift nötrlü hem de tek nötrlü olarak yapılandırılabilir. Söz konusu iki bağlantı tipinin karşılaştırıldığı çalışmalar temelde harmonik bileşenlerin etkileri ve hata tolerans performansları üzerine yoğunlaşmaktadır. Tek nötr noktalı bağlantı tipi ile sıfır bileşenli akımların nötr noktasından akışı ile akım harmoniklerinin arttığı ifade edilmektedir. Çift nötr noktalı bağlantı tipinde ise, sıfır bileşenli akımların akışı mümkün olmadığından daha düşük akım harmonik bileşenleri elde edilmektedir. Faz arızası yaşanması durumunda, tek nötr noktalı yapının daha iyi arıza sonrası çalışma özellikleri sunduğu ve arıza sonrası kontrol stratejisi için daha fazla esneklik sağladığı ifade edilir [17].

Altı fazlı motor yapılarında, faz başına düşen akımın azalması ile güç anahtarlarının anma akımı faz sayısı ile ters orantılı olarak düşmektedir. Bu sayede, motorun daha düşük akım taşıma kapasitesine sahip anahtarlama elemanları ile sürülebilmesine olanak tanıyarak sürücü devrelerinin daha ekonomik bileşenlerle tasarlanmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, düşük akım kapasitesi sayesinde güç anahtarlarında meydana gelebilecek termal zorlanmalar ve arıza olasılıkları azalarak sistemin genel çalışma güvenliğine katkı sağlamaktadır. Bu gelişmeler, sistemin toplam maliyetinde olumlu bir etki yaratmaktadır [13]. Hafif elektrikli araçlara yönelik olarak geliştirilen altı fazlı asenkron motor, hedeflenen güç, hız ve tork gereksinimlerine uygun şekilde tasarlanmıştır. Sargı yapısı oluşturulurken, sargı ve manyetik nüve üzerindeki kayıplar en aza indirgenecek şekilde tasarım kriterleri dikkate alınmıştır.

2.3. Tasarlanan Motor ve Fiziksel Özellikleri

Bu çalışmada, hafif elektrikli araç uygulamaları için düşük güçlü olarak tasarlanan altı fazlı asenkron motor, dört kutuplu ve 48 oluklu bir stator yapısına sahiptir. Motorun sargı topolojisi, altı fazlı asimetrik yapı esas alınarak oluşturulmuştur. Tasarlanan asenkron motora ait etiket değerleri Tablo 4'te, fiziksel özellikleri Tablo 5'te ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

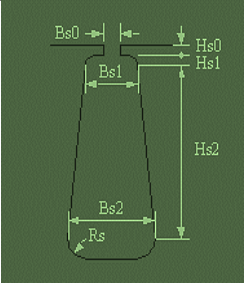
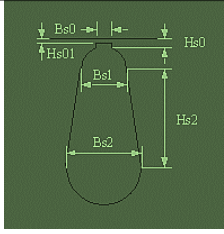
Tablo 4. Tasarlanan altı fazlı asenkron motorun etiket değerleri.

PARAMETRE	DEĞER
Maksimum Güç (kW)	12 (S2-2min)
Anma Hızı (rpm)	1888
Anma Frekansı (Hz)	65
Anma Gerilimi (V)	9,33V
Kutup sayısı	4
Faz Sayısı	6
Bağlantı Türü	Yıldız (Tek Nötr Noktalı)

Tasarlanan motorun maksimum gücü 12 kW belirlenmiş olup, anma hızı 1888 RPM'dir. Motor, Şekil 1(c)'de gösterildiği üzere tek nötr noktalı yıldız bağlantı yapısına sahiptir. Günümüzde, tepe değeri yaklaşık olarak DC batarya besleme gerilimine eşit olacak şekilde motor sürücüsü üzerinden istenilen AC faz gerilimleri elde edilebilmektedir. Bu olanak sayesinde, bakır kayıpları ve motor performansı üzerine etkilerinin daha ayrıntılı incelenebilmesi amacıyla, DC bara gerilimi 13,2 V ve anma faz gerilimi 9,33 V olarak belirlenmiştir. Tasarlanan elektrikli aracın boyutları ve güç gereksinimleri doğrultusunda kullanılan gerilim seviyeleri değişkenlik gösterebilmektedir. Hafif elektrikli araç uygulamalarında, 12, 24, 48, 60, 80 ve 96 V DC giriş gerilimine sahip alçak gerilim AC motor sürücüleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sürücüler, 100V altı alçak gerilim sınıfında yer almaları nedeniyle yüksek akım değerleri ile çalışmaktadır. Bu çalışmada 13,2 V DC gerilim seviyesinin referans alınmasının temel nedeni, 12 V'luk batarya paketine sahip forkliftler ve transpaletler gibi endüstriyel araçların yaygın olarak kullanılmasıdır. Halihazırda düşük gerilim uygulamalarında kullanılan AC sürücüler incelendiğinde bir çoğunun 12V-48V giriş gerilim aralığında çalıştığı görülmektedir. Sürücü gücü, giriş gerilimi ve sürücünün akım kapasitesi ile orantılı olduğundan, aynı güç değeri için en yüksek faz akımlarının 12V giriş geriliminde görüleceği açıktır. 6 fazlı motor ile temelde 3 fazlı muadillerine kıyasla aynı giriş geriliminde neredeyse yarı yarıya düşük faz akımları söz konusu olmaktadır. Böylelikle, özellikle 12V giriş gerilim seviyesinde 6 fazlı motor yapısı kullanılarak sürücülerin daha düşük anma akım kapasitesinde çalışabilmesi mümkün olmaktadır.

Nüve kaynaklı kayıpların azaltılması amacıyla, birim kütle başına düşük (W/kg) kayıp değerine sahip silisli sac malzeme tercih edilmiştir. Ayrıca, rotor ve stator bölgesinde oluşan ve motorun toplam verimini doğrudan etkileyen önemli kayıplardan biri olan bakır kayıplarını minimize etmek üzere, oluk geometrileri yüksek doluluk oranı sağlayacak ve fiziksel yerleşime imkan sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

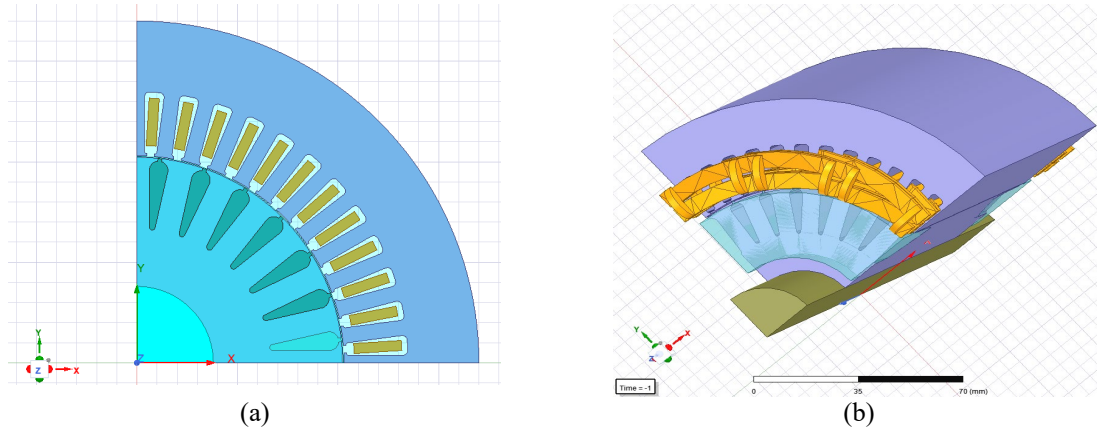
Tablo 5. Tasarlanan altı fazlı asenkron motorun fiziksel özellikleri.

STATOR		ROTOR			
Stator Oluk Sayısı	48	Rotor Oluk Sayısı	28		
Stator Dış çapı (mm)	170	Hava Aralığı (mm)	0.4		
Stator İç Çapı (mm)	103	Rotor İç Çapı (mm)	38		
	hs0 (mm)	0.63		hs0 (mm)	0.7
	hs1 (mm)	0.5		hs2 (mm)	14.15
	hs2 (mm)	13.59		bs0 (mm)	1
	bs0 (mm)	1.9230		bs1 (mm)	4.67
	bs1 (mm)	3.1206		bs2 (mm)	1.5
	bs2 (mm)	4.9020		Nüve Malzemesi	M270-50A
rs (mm)	1.2	Rotor Bar ve Kısa Devre Halkası	Alüminyum		
Faz başına kutup başına oluk sayısı	2				
İletken Başına Tel Sayısı	15				
Tel Çapı (mm)	1				
Nüve Malzemesi	M270-50A				

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) Sonuçları

Tasarımı gerçekleştirilen altı fazlı asenkron motor, ANSYS Maxwell ile Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı modellenmiş ve analiz edilmiştir. Altı fazlı asimetrik sargı yapısına göre konfigüre edilen motorun elektromanyetik performansı sargı akımları, tork üretimi, stator ve rotor sargı akım yoğunlukları ile kayıplar ve verim dikkate alınarak elde edilmiştir.



Şekil 2. (a) 2B asimetrik altı fazlı asenkron motor (1/4), (b) 3B asimetrik altı fazlı asenkron motor (1/4)

Şekil 2’de Ansys Maxwell ortamında modellenen asimetrik sargı yapısına sahip altı fazlı asenkron motorun rotor ve stator geometrisi 2B ve 3B olarak verilmektedir.

Zamana bağlı (transient) çözüm yöntemiyle gerçekleştirilen analizler sonucunda, 500 ms anındaki stator ve rotor manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 3’te sunulmuştur. Elde edilen akı dağılımı ile kullanılan manyetik nüvenin doyum karakteristikleri birlikte değerlendirildiğinde, akı yoğunluğunun tasarım sırasında belirlenen limitler içerisinde kaldığı görülmektedir.

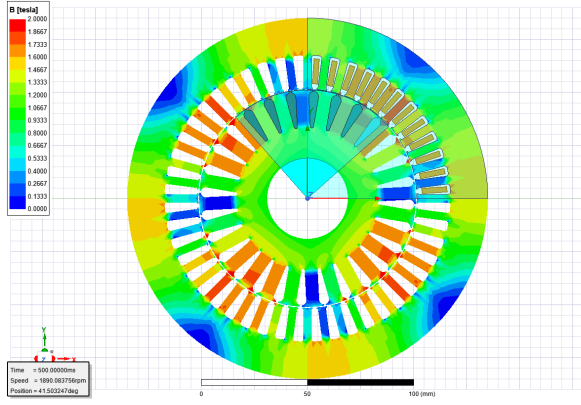
Analizler sonucunda, 500 ms anındaki stator ve rotor sargılarına ait akım yoğunluğu dağılımı Şekil 4’te sunulmuştur.

3.2. Analiz Sonuçları ve Karşılaştırma

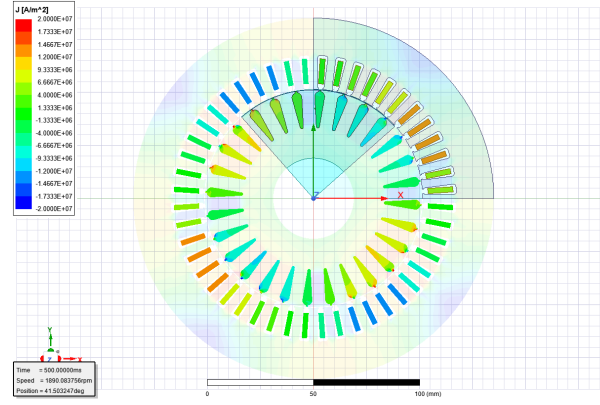
Tasarlanan altı fazlı asenkron motorun analizleri sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Şekil 5’te, altı fazlı makinanın her bir fazına uygulanan sargı gerilimlerinin zamanla değişimi gösterilmektedir.

Motorun analiz edilmesi sonucunda elde edilen sargı akımları grafiği ve 400-500 ms aralığında ki rms değerleri Şekil 6’da sunulmuştur.

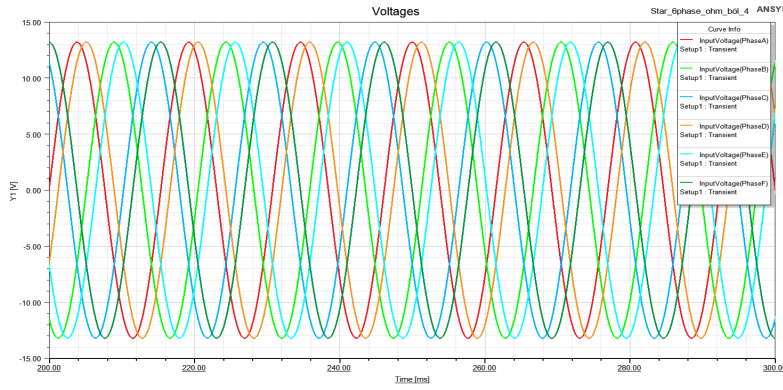
Çok fazlı elektrik motorlarının tork dalgalanmalarının düşük seviyelerde gerçekleştiği, birçok akademik çalışmada vurgulanmıştır [16, 18]. Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen tork grafiği Şekil 7’de sunulmaktadır. Şekilden de görülebileceği üzere, 400–500 ms zaman aralığında ortalama tork değeri yaklaşık



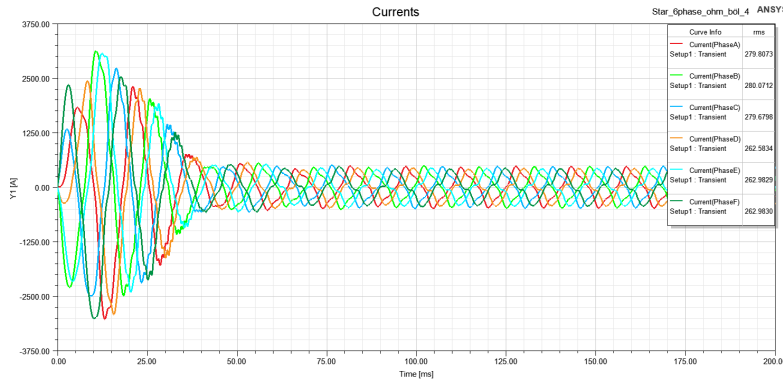
Şekil 3. Stator ve rotor manyetik akı yoğunluğu dağılımını (500ms'de)



Şekil 4. Stator ve rotor sargıları akım yoğunluğu dağılımını (500ms'de)



Şekil 5. Tasarlanan asimetrik altı fazlı asenkron motora ait sargı gerilimleri.



Şekil 6. Tasarlanan asimetrik altı fazlı asenkron motorun faz akımlarının değişimi.

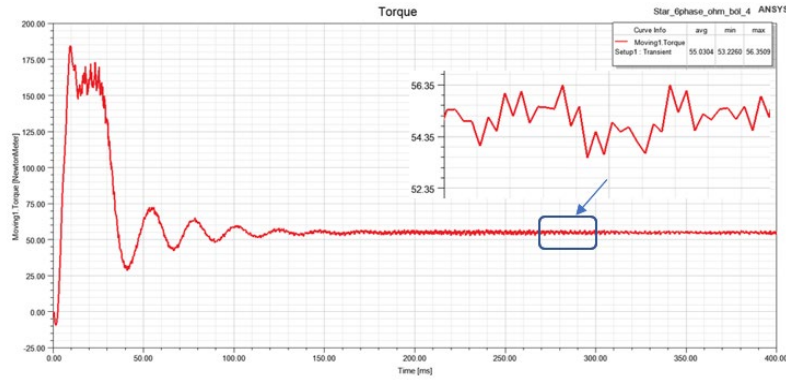
55 Nm seviyesinde sabit kalmaktadır. Tork dalgalanması ise, denklem 10 yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [19].

$$\Delta T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100\% \quad (10)$$

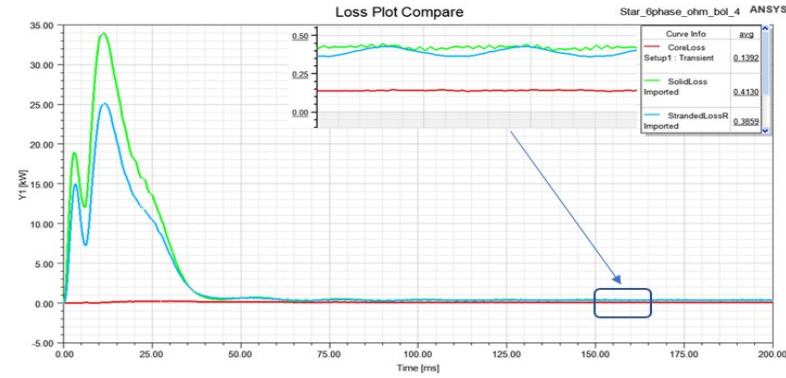
Denklemden, T_{max} maksimum tork değerini, T_{min} ise minimum tork değerini ifade eder. Şekil 7. de yer alan maksimum ve minimum tork değeri denklem 10 temel alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, altı fazlı asenkron motorun tork dalgalanması %5,67 olarak bulunmuştur. Tork-zaman grafiği incelendiğinde, motorun düşük seviyede tork dalgalanması sergilediği ve kararlı duruma geçiş süresinin oldukça kısa olduğu görülmektedir. Ayrıca, motorun 150 ms civarında kararlı duruma ulaşmaya başladığı gözlemlenmiştir.

Literatürde altı fazlı asenkron makinelerle ilişkin yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu makinalarda sargı kayıplarının azaldığı ve buna bağlı olarak geleneksel üç fazlı motorlara kıyasla daha yüksek verimlilik seviyelerine ulaşıldığı ifade edilmektedir [12]. Bu çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına göre 350–400 ms zaman aralığında ortalama sargı kayıpları 385 W olarak hesaplanmıştır.

Şekil 8'de sunulan kayıplar, ısıya dönüşerek motorun istenilen termal sınırlar içerisinde çalışma performansını belirler. Özellikle sargılarda meydana gelen ısı artışı, belirlenen sıcaklık sınırlarının aşılması durumunda ek bir soğutma sistemine duyulan ihtiyacı beraberinde getirebilir. Bununla birlikte, faz başına düşen akımın azalması,

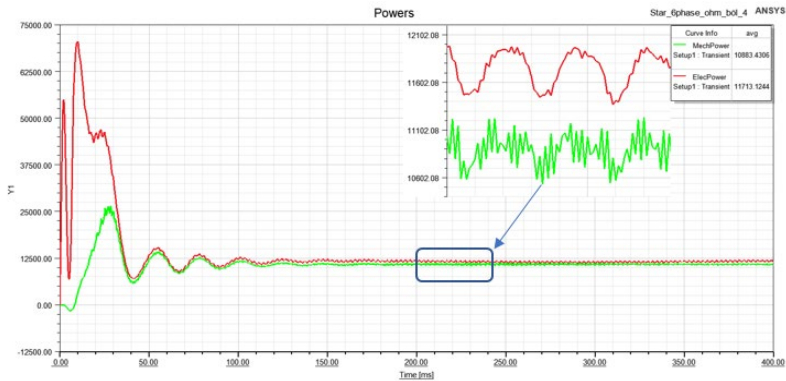


Şekil 7. Tasarlanan asimetrik altı fazlı asenkron motorun çıkış torku.



Şekil 8. Tasarlanan asimetrik altı fazlı asenkron motorun stator sargı kayıpları.

yalnızca motor veriminde iyileşmeye değil, aynı zamanda sürücü devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanlarının termal güvenliğine de olumlu katkı sağlamaktadır [20]. Çok fazlı sistemlerde harmonik bileşenlerden kaynaklanan kayıpların azaldığı literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır [21]. Tüm bu etkenler değerlendirildiğinde, toplam kayıpların en aza indirgenmesi yalnızca verimi artırmakla kalmayıp, motorun termal limitler içerisinde sağlıklı çalışması ve hizmet ömrü açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır. Nitekim Şekil 9'da gösterildiği üzere, tasarlanan altı fazlı asenkron motorda mekanik kayıplar hariç tutulduğunda %92,91 oranında bir verimle çalıştığı görülmektedir.



Şekil 9. Tasarlanan asimetrik altı fazlı asenkron motorun giriş ve çıkış güçlerinin değişimi.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, hafif elektrikli araç uygulamaları için altı fazlı bir asenkron motorun tasarlanarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan motor, 48 oluklu, 4 kutuplu, asimetrik sargı yapısına sahip olup yıldız bağlantı konfigürasyonunda oluşturulmuştur. 65 Hz çalışma frekansı, 13,2 V besleme gerilimi, 1950 rpm nominal hızı ve 12 kW maksimum güç değerine sahip sistemin analizi ANSYS Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Analizler kapsamında motorun gerilim, akım, tork, kayıplar, verim ve elektromanyetik akı dağılımı incelenmiştir. SEY tabanlı analiz sonuçlarına göre, tasarlanan motorun verimi %92,91; tork dalgalanması ise %5,67 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, altı fazlı motorun geleneksel üç fazlı motorlara kıyasla daha yüksek verimlilik ve daha düşük tork dalgalanması sunma potansiyelini ortaya koymaktadır. Tork dalgalanmasının düşük olması, özellikle askeri uygulamalar ve otomotiv gibi yüksek güvenlik gerektiren sistemler için kritik öneme sahiptir. Anahtarlama teknolojilerindeki gelişmeler ve faz başına düşen akım değerlerinin azalması sayesinde, çok fazlı motorlar

sürücüler açısından daha güvenli çalışma koşulları sunmakta ve güç elektroniği bileşenlerinin maliyetini olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca, çok fazlı yapıların harmonik bileşenleri azaltıcı etkisi sayesinde, sistem genelinde kayıplar düşmekte ve verim artmaktadır. Hafif elektrikli araçlar açısından bakıldığında, bu durum bataryada depolanan enerjinin daha etkin kullanılmasını sağlayarak menzil kapasitesini artırma potansiyeline sahiptir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, üç fazlı ve altı fazlı asenkron motorların benzer çalışma koşulları altında karşılaştırılması değerlendirilmesi, faz sayısının artırılmasının tork dalgalanması, farklı arıza durumlarındaki performansların karşılaştırılması, kayıplar ve genel verim üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı biçimde ortaya konmasına olanak sağlayacaktır.

Yazar Katkıları

Tüm yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKÇA

- [1] M. Huda, M. Aziz, and K. Tokimatsu, "The future of electric vehicles to grid integration," 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), pp. 4592–4597, Hong Kong, 2018.
- [2] N. Frontera and G. Cappuccino, "Optimal Traction Battery Module Sizing for Cost-effective Second Life Reuse," 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), pp. 1-5, Madrid, 2020.
- [3] S. Chen, H. Li, B. Ma and Z. Ran, "Ride Comfort Control of Electrical Vehicle in the Process of Speed Regulation", 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 8297–8300, Dalian, 2006.
- [4] I. Boldea, L. N. Tutelea, L. Parsa, and D. Dorrell, "Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, pp. 5696–5711, 2014.
- [5] C. Ocak and B. Yenipinar, "Design and application of an induction motor for light electric vehicles," Eur. J. Sci. Technol., no. 26, pp. 228–233, 2021.
- [6] J. Cui, M. Kramer, L. Zhou, F. Liu, A. Gabay, G. Hadjipanayis, and D. Sellmyer, "Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets," Acta Materialia, vol. 158, pp. 118–137, 2018.
- [7] S. Ruoho, J. Kolehmainen, J. Ikaheimo and A. Arkkio, "Interdependence of Demagnetization, Loading, and Temperature Rise in a Permanent-Magnet Synchronous Motor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 3, pp. 949-953, 2010.
- [8] J.M. Terras, A. Neves, D.M. Sousa, and A. Roque, "Estimation of the induction motor parameters of an electric vehicle," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, pp. 1–6, Lille, 2010.
- [9] Z. Bitar and S. Al Jabi, "Studying the performances of induction motor used in electric car," Energy Procedia, vol. 50, pp. 342–351, 2014.
- [10] İ. Sarıgül, "Asimetrik altı fazlı asenkron motorun uzay vektör PWM ile doğrudan moment kontrolü," M.S. thesis, Dept. Electr. Eng., Fırat University, Elazığ, 2021.
- [11] A. Kadaba, S. Suo, G. Y. Sizov, C. -C. Yeh, A. Sayed-Ahmed and N. A. O. Demerdash, "Design and modeling of a reversible 3-phase to 6-phase induction motor for improved survivability," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-5, Detroit, 2011.
- [12] P.S. Varma, K.P.P. Rao, C.V. Ravikumar, G. Pau, K. Sathish and R. P. Nelapati. "Development and Performance Analysis of Five Phase Induction Motor," IEEE Access, vol. 11, pp. 112515–112525, 2023.
- [13] G. Uçar, "Matris konverterden beslenen altı fazlı asenkron motorun bulanık mantık tabanlı hız kontrolü," M.S. thesis, Dept. Electr. Eng., Fırat University, Elazığ, 2023.
- [14] G. Rezazadeh, F. Tahami, G. -A. Capolino, Z. Nasiri-Gheidari, H. Henao and M. Sahebazamani, "Improved Design of an Outer Rotor Six-Phase Induction Motor With Variable Turn Pseudo-Concentrated Windings," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 37, no. 2, pp. 1020-1029, 2022.
- [15] A.M. Shata, A.S. Abdel Khalik, R. A. Hamdy, M.Z. Mostafa and S. Ahmed, "Improved Mathematical Modeling of Six Phase Induction Machines Based on Fractional Calculus", IEEE Access, vol. 9, pp. 53146–53155, 2021.
- [16] I. Boldea and S.A. Nasar, Induction Machines Handbook, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2020.
- [17] F. Patkar and M. Jones, "Performance of an asymmetrical six-phase induction machine in single-and two-neutral point configurations," 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), pp. 1-6, Dublin, 2013.
- [18] M.H. Holakooie and G. Iwanski, "Virtual subspace-based DTC strategy for torque ripple minimization in six-phase induction motors," IEEE Access, vol. 9, pp. 154692–154703, 2021.
- [19] D. Marcsa and M. Kuczmann, "Design and control for torque ripple reduction of a 3-phase switched reluctance motor," Comput. Math. Appl., vol. 74, pp. 89–95, 2017.
- [20] G. Hysa, "Beş-fazlı asenkron motor sürücülerinin kontrol yöntemi ve arıza toleransı çalışması," M.S. thesis, Dept. Electr. Eng., Ege University, İzmir, 2021.
- [21] S.J. Juanchi, Hector, R. Nikaido, T. Miyajima, A. Chiba, "Structure, characteristics and analysis of poly-phase induction motor for automotive traction applications," JMAG Users Conference, pp. 1–36, Tokyo, 2022.