

Entegre Şarj Fonksiyonlu Çok Fazlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Optimizasyonu

Design and Optimization of a Multi-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Integrated Charging Function

Musa Burak Yelek^{1, 2}, Murat Yılmaz¹

 0009-0002-3548-1791

 0000-0003-1584-1788

¹Elektrik-Elektronik Fakültesi/Elektrik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Teknik Üniversitesi

yelek17@itu.edu.tr, myilmaz@itu.edu.tr

²Devinno Teknoloji Yatırımları A.Ş.

musaburak.yelek@devinno.com.tr

Özet

Hafif elektrikli araçlar (HEA), sürdürülebilir ulaşım, sıfır emisyon ve kompaktlık gereksinimleri nedeniyle yüksek verimli ve çok işlevli itki sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada, entegre şarj özelliğine sahip, çok fazlı bir sürekli mıknatıslı senkron motor (PMSM) tasarlanmış ve hafif elektrikli araç uygulaması için ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Öncelikle simetrik 6-fazlı yapı esas alınarak dört farklı oluk-kutup kombinasyonu üzerinde analitik ön boyutlandırma yapılmış, ardından sonlu elemanlar analizleri (FEA) ile malzeme seçimi, faz sayısı ve rotor topolojilerinin performansa etkileri karşılaştırılmıştır. Double-V gömülü mıknatıslı (IPM), yüzey mıknatıslı (SPM) ve konsantrik sargılı yüzey mıknatıslı motor yapılarının, “Worldwide Harmonized Light-duty Vehicles Test Cycle (WLTC) Class-1” sürüş çevriminde ANSYS OptiSlang kullanılarak çok amaçlı optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre double-V gömülü mıknatıslı yapı, referans tasarıma kıyasla moment dalgalılığını %80’in üzerinde azaltmış, %94.9 nominal verim ve toplam kayıplarda %41.4 azalma sağlamıştır. Aktif malzeme kütlesi yaklaşık %12 düşerken, tahrik ve şarj modlarında çift yönlü enerji akışına uygun kompakt bir HEA tahrik motoru elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Entegre şarj, çok fazlı motor, sürekli mıknatıslı senkron motor (PMSM), hafif elektrikli araç (HEA), çok amaçlı optimizasyon, moment dalgalılığı, kayıp minimizasyonu

Abstract

Light electric vehicles (LEVs) require highly efficient and multifunctional propulsion systems to meet the demands of sustainable mobility, zero emissions, and compact design. In this study, a multiphase permanent magnet synchronous motor (PMSM) with integrated charging capability is designed and comprehensively analyzed for LEV applications. Based on a symmetric six-phase configuration, analytical pre-dimensioning is conducted for four different slot-pole combinations, followed by finite element analyses (FEA) to compare the effects of material selection, phase number, and rotor topology. Three motor configurations—double-V interior permanent magnet (IPM), surface-mounted permanent magnet (SPM), and concentric-wound surface-mounted SPM—are

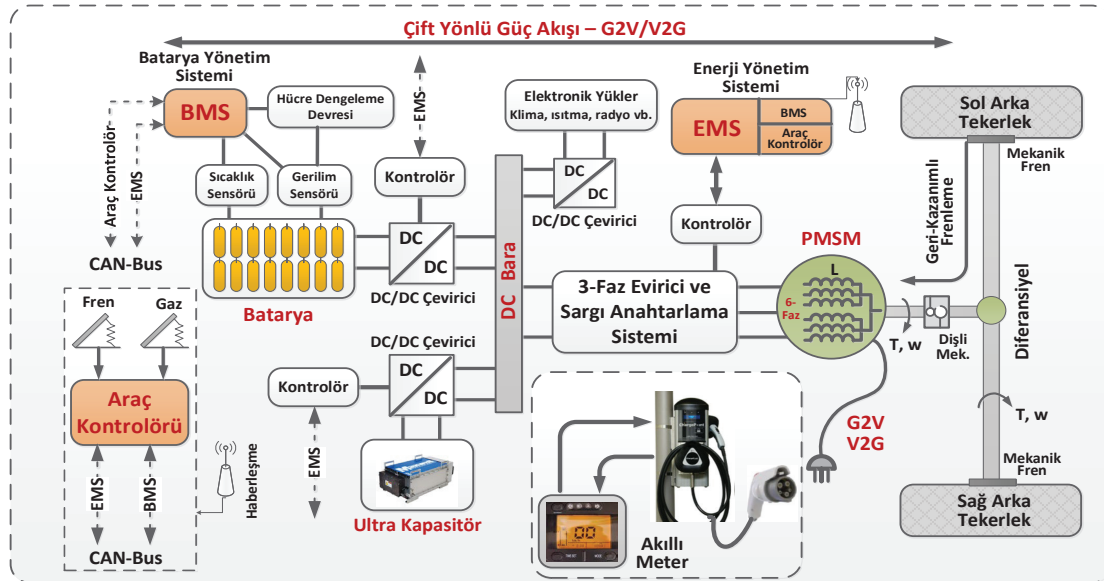
optimized using ANSYS OptiSlang under the “Worldwide Harmonized Light-duty Vehicles Test Cycle (WLTC) Class-1” driving conditions. According to the optimization results, the double-V IPM structure reduces torque ripple by more than 80% compared with the reference design, achieving 94.9% nominal efficiency and a 41.4% reduction in total losses. The active material mass is reduced by approximately 12%, yielding a compact LEV traction motor capable of bidirectional operation in both traction and charging modes.

Keywords: Integrated charging, multiphase motor, permanent magnet synchronous motor (PMSM), light electric vehicle (LEV), multi-objective optimization, torque ripple, loss minimization

1. Giriş

Günümüzde yakıt ekonomisi, petrol kaynakları ve fiyatlardaki dengesizlikler, enerji güvenliği, atık gaz yayını ve Avrupa Birliği’nin uygulamaya aldığı sıkı emisyon sınırlamaları, çevresel ve sağlık faktörleri, elektrikli araçlar (EV) ve itiş sistemleri üzerine yapılan araştırmaları hızlandırmıştır [1–3]. Bu kapsamda düşük maliyetli, yüksek verim ve güç yoğunluklu batarya şarj sistemleri, elektrik motorları, motor sürücüler ve aktarma organlarına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları, özellikle petrol bağımlısı olan ülkeler açısından kritik bir önem kazanmıştır.

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE), Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) ve Altyapı Çalışma Konseyi (IWC) gibi uluslararası kuruluşlar, araç kullanıcıları, üreticiler ve şebeke işletmecileri açısından güvenliği, uyumluluğu ve performansını düzenleyen batarya şarj sistem standartlarını ve kodlarını tanımlamış olup bu sistemler genel olarak araç-ıçi (on-board) ve araç-dışı (off-board) olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Araç-ıçi şarj sistemleri, hacim, ağırlık, maliyet ve termal sınırlar nedeniyle güç açısından sınırlıdır ve çoğunlukla yavaş şarj kapasitesi sunarken; boyut ve ağırlık sınırlaması bulunmayan araç-dışı şarj sistemleri çok daha yüksek şarj güçleri ile hızlı şarj imkanı sağlamaktadır [4–8]. Bununla birlikte EV’lerin, düşük maliyetli, yüksek güçlü (Seviye 2 ve Seviye 3), birim güç faktörlü, izolasyonlu ve çift yönlü güç akışına (Grid-to-Vehicle – G2V, Vehicle-to-Grid –



Şekil 1. Önerilen hafif bir elektrikli araç itiş ve çift yönlü güç akışını sağlayan entegre şarj sistemine ilişkin blok diyagramı.

V2G) imkan tanıyan araç-içi batarya şarj sistemlerine sahip olması hedeflenmektedir. Bu gereksinimleri karşılamak üzere geliştirilen entegre şarj mimarilerinde, araç park halindeyken veya dururken itiş sağlayan elektrik motorunun faz sargıları ile motor sürücüsünün (eviricinin) şarj sisteminin bir parçası olarak yeniden yapılandırılması, hem donanım paylaşımı sağlayarak maliyeti düşürmekte hem de tüm sistemin ağırlık ve hacmini azaltarak güç yoğunluğunu (kW/L, kW/kg) artırmaktadır [9–13]. Bu tip bir tümleşik motor/sürücü/batarya şarj sisteminde araç hareket halindeyken yüksek verim ve güç yoğunluklu bir motor ve sürücü ile itiş gücü sağlanmakta, geri kazanımlı frenleme gerçekleştirilebilmekte; araç dururken ise basit ve düşük maliyetli kontaktör veya anahtarlama elemanları aracılığıyla motor sargıları izole bir transformatör veya endüktans gibi yeniden yapılandırılmakta ve evirici çift yönlü bir güç elektroniği çeviricisi olarak görev yapmaktadır. Böylece toplam sistem maliyeti düşürülürken kullanılan donanım miktarının azalması sayesinde hacim ve ağırlık da azalmaktadır. Ancak bu tip sistemlerde hızlı şarja uygun akım-gerilim seviyeleri ve moment iptal gereklilikleri nedeniyle ek yeniden yapılandırma bileşenleri ve karmaşık kontrol stratejileri sistem tasarımını zorlaştırmaktadır [14–18]. İtiş sisteminin önemli elemanlarından biri olan elektrik motorunun tasarımının, bu kontrol ve yeniden yapılandırma gereksinimlerini destekleyecek şekilde yapılması, entegre şarj sisteminin başarımı açısından kritik hale gelmektedir. Bu kapsamda önerilen hafif bir elektrikli araç itiş ve çift yönlü güç akışını sağlayan entegre şarj sistemine ilişkin blok diyagram Şekil 1’de verilmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (PMSM), yüksek moment/akım oranı, kompakt yapı, yüksek verim ve geniş hız aralığında işletim kabiliyeti nedeniyle EV uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte PMSM’lerde mıknatıs maliyeti, sıcaklık hassasiyeti ve üretim sürecindeki tasarım kısıtları elektromanyetik optimizasyon gerekliliğini artırmaktadır. Bu bağlamda çok-fazlı motor mimarileri ve entegre şarj yapıları son yıllarda literatürde daha fazla incelenmiş olup özellikle PMSM tabanlı yapılar ve

moment iptal yaklaşımları, şarj sırasında net elektromanyetik momentin bastırılabilmesi ve yüksek güç yoğunluğu elde edilebilmesi açısından öne çıkmaktadır [19–22]. Gömülü mıknatıslı senkron motorlu (IPM) entegre araç-içi izole şarj cihazı (OBC) mimarileri, yüksek verim ve geniş alan zayıflatma aralığı ile uygulama olgunluğuna ulaşmış olup kontrol-topoloji bütünlüğü iyi tanımlanmış yapılarıdır [23]. Altı-faz yüzey mıknatıslı motorlarda farklı sargı yerleşimlerinin itiş ve şarj durumlarındaki performansa etkileri detaylı biçimde değerlendirilmiş [24], dokuz anahtarlı ve çoklu evirici tabanlı yapılar donanım paylaşımı ve yüksek güç faktörü avantajları nedeniyle literatürde önemli yer edinmiştir [25]. Çok-fazlı hızlı OBC yaklaşımları ise verim, moment eliminasyonu ve yüksek güç yoğunluğu gibi kriterleri ele alan çalışmalarda kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir [26–30].

Mevcut literatürde yüksek entegrasyon ve maliyet avantajlarına odaklanan entegre şarj sistemlerinin çoğunda, motorun elektromanyetik tasarımı sınırlı biçimde incelenmekte ve motor tasarımı şarj yapısıyla birlikte bir bütün olarak ele alınmamaktadır [31, 32]. Hafif e-mobilité uygulamaları için motor tasarımını entegre şarj gereksinimleriyle birlikte ele alan çalışmalar mevcut olmakla birlikte, çalışmalarda elektromanyetik tasarım parametrelerinin sistematik analizi, oluk/kutup kombinasyonlarının etkileri ve rotor topolojilerinin derinlemesine optimizasyonu çoğunlukla eksik bırakılmıştır [22]. Motor yapısına ilişkin güncel yayınlar incelendiğinde genel olarak bu tip uygulamalarda yaygın olarak kullanılan oluk/kutup sayısı oranının tercih edildiği görülmektedir [22–25]. Doğru olan itişli sistemlerde BLDC motor yapısı kullanılmakta olup bir-fazlı entegre şarj sistemi kapsamında literatürde incelenmiştir [26]. Mekanik kilitleme donanımı veya ek anahtarlama elemanları gerektiren üç fazlı motor yapıları literatürde incelenmişken [27], bu çalışmada mekanik gereksinimleri ortadan kaldıran 6-fazlı motor yapısı ele alınmaktadır. Sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans motorunun (PMSynRM) entegre şarj yapılarının incelendiği çalışmalarda, PMSM’li çözümlerin sunduğu moment yoğunluğu ve düşük moment titreşimi avantajları tam olarak

sağlanamamaktadır [28, 29]. Literatürdeki çözümlerin büyük bir kısmı, standart sargı konfigürasyonlarını kullanmakta ve çok fazlı motorların sunduğu tüm avantajlardan yararlanamamaktadır. Bu kapsamda literatür ve ticari uygulamalar incelendiğinde özellikle HEA'larda entegre şarja uygun çok-fazlı IPM motorların analitik, elektromanyetik tasarım ve optimizasyon çalışmaları oldukça sınırlıdır.

Hafif EV'ler için şebekeden şarj edilebilir, yüksek güç yoğunluklu, birim güç faktörlü ve çift yönlü güç akışına izin veren tümleşik araç-içi batarya şarj sistemlerine uygun, şarj sırasında moment üretimini ortadan kaldıracak şekilde 6-fazlı gömülü mıknatıs yapısında motorun tasarlanması ve optimizasyonu bu çalışmanın temel hedeflerini oluşturmaktadır. Çok-fazlı motorlar, iletken kullanım oranını artırıp moment titreşimlerinin azalmasını sağlarken faz başına stator akımı azaltılıp daha küçük boyutlu anahtarların kullanımıyla, kompakt, DC-bara akım harmoniklerinin düşürüldüğü ve yüksek güvenilirlikli motor sürücü sisteminin tasarımına da izin vermektedir. Gürültü özelliklerinin iyileştirilmesi ve stator bakır kaybının azaltılması çok-fazlı sistemlerin diğer avantajlarıdır. DC-bara harmoniklerinin azaltılması ile batarya paketindeki kayıplar optimize edilerek batarya üzerindeki olumsuz etkiler azaltılıp paket ömrü artırılabilir. Bu da doğrudan araç menzili ve batarya paketi kullanım süresini uzatmaktadır. Bu özellikler EV itiş sisteminin güç yoğunluğunu ve verimini de doğrudan artırmaktadır. Aynı zamanda araç-içi şarj sisteminin güç seviyesi klasik araç-içi şarjlara göre fazla olduğundan hızlı şarj sistemi gereksinimi azalırken harici şarj sistemi ortadan kalkmaktadır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmada, itiş sistem isteklerine ve entegre şarj sistemlerine uygun olarak 6-fazlı, mıknatıs miktarı azaltılmış, moment titreşimi iyileştirilmiş, alan zayıflatma kabiliyeti artırılmış yüksek verimli bir PMSM tasarlanarak motor geometrisi, sargı yapısı, oluk/kutup kombinasyonları, malzeme seçimi ve mıknatıs yerleşimine göre farklı rotor topolojileri özgün analitik ve nümerik yaklaşımlarla sistematik olarak ele alınmıştır.

Gerçekleştirilen çalışma, entegre şarj mimarileri üzerine mevcut literatürde yaygın olan kontrol ve yeniden yapılandırma odaklı çalışmalara kıyasla, tahrik motorunun elektromanyetik tasarımının şarj modunun gereksinimleriyle birlikte ele alınmasına odaklanmaktadır. Literatürde çok-fazlı entegre şarj çözümleri çoğunlukla moment oluşumunu engelleme ve güç elektroniği topolojileri bağlamında incelenmekte; motorun oluk/kutup kombinasyonu, faz sayısı, rotor topolojisi ve malzeme seçiminin sistematik karşılaştırması ile çok amaçlı optimizasyonun kapsamlı bir şekilde ele alındığı çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın özgün katkıları; (i) 3-faz ve 6-faz PMSM'lerin dört farklı oluk-kutup kombinasyonu için sayısal olarak karşılaştırılması, (ii) HEA istekleri altında SPM ve IPM rotor topolojilerinin bütüncül elektromanyetik değerlendirilmesi ve (iii) WLC Class-1 sürüş çevrimine dayalı çok amaçlı optimizasyon ile kayıp-moment dalgalılığı-aktif malzeme kullanımı arasında optimal tasarımın ortaya konulmasıdır.

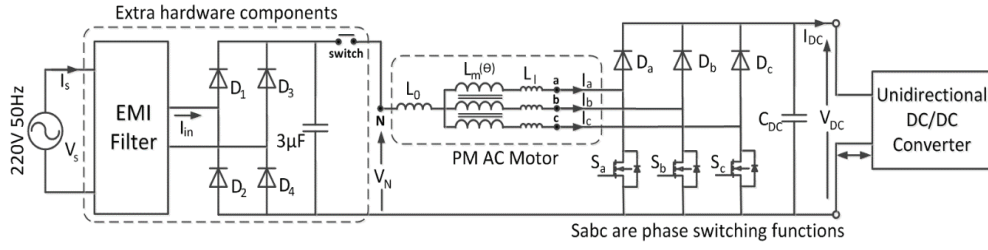
2. Elektrikli Araçlarda Entegre Batarya Şarj Sistemleri ve Gereksinimleri

Batarya şarj ünitesinin elektrik motoruna entegrasyonu ilk olarak 1985'te batarya şarj maliyetlerini ve ağırlığını en aza

indirmek için geliştirilmiş [19] ve W. Rippel ile A. Cocconi tarafından patentlenmiştir [20, 21]. Genel olarak entegre şarj sistemleri, izoleli ve izolesiz olmak üzere iki temel kategoride sınıflandırılabilir. Bu sistemler, şebekeden çekilen güce bağlı olarak bir-fazlı yavaş ve çok-fazlı hızlı şarj sistemleri olarak alt gruplara ayrılabilir. İzoleli şarj sistemleri ise, ayrı bir transformatörün kullanılması veya makine sargılarının yeniden yapılandırılması ile izolasyonun sağlanması şeklinde sınıflandırılabilir [5, 6, 11, 22–24]. Hem bir-fazlı hem de üç-fazlı veya çok-fazlı sargılara dayanarak, izole veya izolesiz araç-içi entegre şarj cihazları için literatürde farklı topolojiler önerilmiştir. Ayrı bir izolasyon transformatörü olmaksızın düşük maliyetle galvanik izolasyon sağlamanın en kolay yolu, şarj modu sırasında tahrik makinesini bir transformatör olarak kullanmaktır. Bu tip sistemlerde istenen özelliklerden biri, şarj modu sırasında elektromanyetik moment üretilmemesidir. Bu nedenle en basit önerilen topolojiler genellikle tek fazlı şarja dayanmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelerek hızlı şarj sisteminin oluşturulabilmesi için üçten daha fazla faza sahip çok-fazlı motorların kullanıldığı görülmektedir. Faz sayısının artırılması, motorun moment yoğunluğunu ve hata tolerans kapasitesini iyileştirirken; akım fazlar arasında paylaşıldığından daha düşük güç değerlerine sahip yariletken anahtarlar kullanılabilir, anahtarlar üzerindeki stresler azalmakta ve daha kompakt bir sürücü sistemi elde edilebilmektedir [10, 11, 14, 25–28].

A. Entegre Şarj Sistemlerinde Kullanılan Motor Teknolojileri

Literatürde önerilen entegre şarj sistemleri genelde EV'lerde yaygın kullanılan asenkron motor ve IPM motorlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Asenkron motorlarla gerçekleştirilen topolojiler, bir veya iki motor ve/veya bir veya iki evirici kullanılarak sınıflandırılabilir [29, 30]. 1992 yılında Rippel ve Cocconi tarafından patentlendirilen çözümde, iki asenkron motorlu ve iki bağımsız eviricili bir yapı kullanılmaktadır [21]. L. Tang ve G. J. Su tarafından, bir tanesinin ana motoru diğerinin de yardımcı motoru sürdüğü iki eviricinin ac/dc çevirici gibi çalıştığı, nötr noktalarının şebekeye bağlandığı ve iki adet üç fazlı motorun çeviricide endüktans olarak kullanıldığı bir topoloji gerçekleştirilmiştir [31]. Şarj modunda hem motorlar hem de eviriciler ac/dc yükselten dönüştürücü olarak çalışmaktadır [32]. Bu sistemin dezavantajları çok sayıda ekstra elemana sahip olması ve kontrol karmaşıklığıdır. S. Sharma ve arkadaşları, üç fazlı asenkron motorun sargılarının iki eşit parçaya bölünmesiyle sargıların etkin bir şekilde filtre olarak kullanıldığı entegre şarj sistemini önermişlerdir [33]. H. J. Raherimihaja ve arkadaşları, 6-fazlı bir asenkron makine ile ek mekanik anahtar veya röle gereksinimini ortadan kaldıran yüksek hata toleranslı entegre şarj sistemi önermişlerdir [34]. Vidya ve Kaarthik, bölünmüş-fazlı asenkron makine ile iki seviyeli tam-köprü evirici yapısını entegre şarj sisteminde birlikte kullanarak şarj modunda ek bir mekanizmaya gerek duyulmadan moment üretimini engellemişlerdir [35]. Dört tekerlekten çekişli yapılarda, üç fazlı dört asenkron motor ve evirici tarafından, aracı uygun mekanik anahtar düzenlemesiyle hareket ettirmek ve aynı zamanda entegre şarj fonksiyonunu sağlamak için oluşturulmuş topolojiler de mevcuttur [36]. Asenkron motorlar için önerilen bir diğer tasarım izoleli şarj sistemidir [37, 38]. Bu yapıda sargılı rotora sahip motor şarj esnasında düşük frekanslı bir izolasyon transformatörü olarak kullanılmakta, sürücü ise üç fazlı Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM)



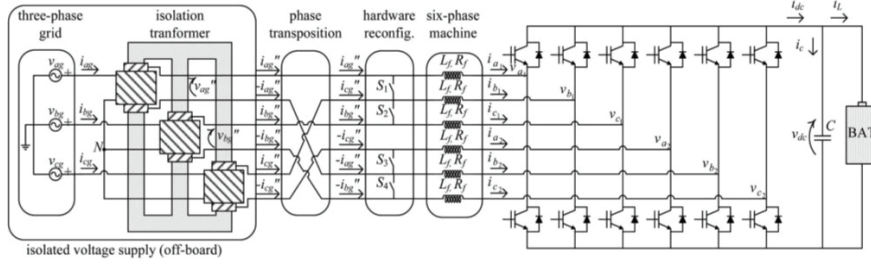
Şekil 2: Bir mobilet için geliştirilmiş IPM motora sahip entegre batarya şarj sistemi [30].

doğrultucu olacak şekilde modifiye edilerek şebeke ve batarya arasında galvanik izolasyon sağlanmaktadır.

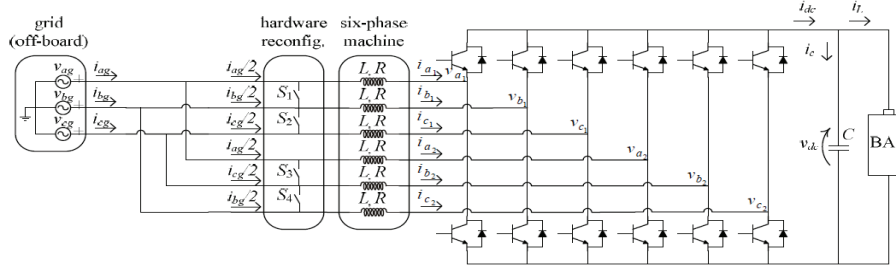
Chang [39], Barnes [40] ve Hagbhin [41] tarafından relüktans makinelerin kullanıldığı üç farklı entegre şarj sistemi önerilmiştir. Chang ve Liaw, anahtarlamalı relüktans motorlu (SRM) bir EV için gerilim yükselten ve araç-içi güç faktörü düzeltme (PFC) şarj özelliklerine sahip bir entegre sistem önermişlerdir [39]. Şarj sisteminde ekstra donanım olarak harici bir dc/dc çevirici gereksinimi olmasına rağmen, araç-içi şarj sistemi SRM faz sargıları ve SRM'nin asimetrik köprü çeviricisinin bileşenlerinden oluşmaktadır. M. Barnes ve C. Pollock [40] tarafından önerilen sistemde, SRM faz sargıları şarj işleminde bir transformatör olarak kullanılmış olup PFC kontrolü bulunmamaktadır. S. Hagbhin ve arkadaşları bir-fazlı AC kaynaktan şarj esnasında transformatör çalışma moduna sahip olabilmek için senkron relüktans motorun (SynRM) statorunun bir fazında ekstra sargılar kullanmışlardır [41]. Entegre şarj sistemlerinde yaygın kullanılan bir diğer motor ve sürücü sistemi, PMSM teknolojileridir [43–49]. Bu topolojilerde öne çıkan yapılardan biri, üç fazlı sargıların orta ucundan şebekeye bağlantının yapıldığı, üç-fazlı bir makine ve üçlü bir H-köprüden oluşan izole olmayan topolojidir [39, 42, 43, 50–52]. Ortadan bölünmüş sargılar birbirlerinin etkisini yok ettiğinden, rotorda döner alan üretilmemekte, stator ve rotor arasındaki manyetik bağlantı ortadan kaldırılmakta ve şarj sırasında moment üretimi oluşmamaktadır. Hızlı araç-içi şarj için ikinci bir yapı [42]'de önerilmekte olup motor filtre gibi kullanılırken dönüştürücü hem şarj hem de itiş için kullanılmakta, dönüştürücü yapısı üç-fazlı PFC'ye benzemektedir. Bu çözüm Valeo tarafından kullanılmak üzere değerlendirilmiştir [43]. Y. Lei arkadaşları, üç-fazlı PMSM ve asenkron motorlar için moment eliminasyonuna dayalı, yüksek güç yoğunluğuna sahip ve iki motor yapısını temel alan entegre hızlı batarya şarj sistemi önermişlerdir [44]. T. H. Liu tarafından önerilen bir-fazlı entegre şarj topolojisi; doğrultucu diyet köprü, evirici, PM motor, dijital sinyal işlemci, batarya seti ve ilave üç röleden oluşmaktadır [45]. EV'lerin tahrik sistemini kullanan bir-fazlı entegre şarj için basit, maliyeti düşürülmüş ve şarj sisteminin büyüklüğünü önemli ölçüde azaltan bir diğer topoloji [46]'da önerilmekte olup, EV'in mevcut çekiş sisteminin iki ucuna bağlanmak için yalnızca bir diyet köprüsü gerekmektedir. Bir diğer bir-fazlı topoloji, Şekil 2'de gösterildiği gibi IPM motorun e-mobitele uygulanmasına dayanmaktadır [30]. Bu yapıda PM AC motor sürücüsü PFC yükselten doğrultucu gibi çalışırken motor, üç-fazlı kuplajlı endüktans olarak görev yapmaktadır. Diğer bir topoloji ise özel sargı konfigürasyonlu PMaSynRM için geliştirilmiştir [47]. Her faz sarımı, şarj modunda stator etrafında simetrik olarak kaydırılan iki eşdeğer parçaya bölünmekte ve şarj sırasında istenen manyetik davranış elde edilmektedir.

S. Hagbhin ve arkadaşları, her faz için iki set eşit sargıya sahip IPM senkron motoru, izoleli ve yüksek güçlü entegre şarj sistemi yapısının oluşturulmasında kullanmışlardır [48]. Motorun çift sargısının kullanımıyla, aracın itiş modunda elektrik makinesi motor olarak çalışırken, şarj modunda izole edilmiş bir generatör/transformatör olarak; motor sürücüsü ise bir doğrultucu olarak çalışmakta ve çok terminalli bir motor/generatör seti elde edilmektedir. Sistemin önemli gereksinimi, şarj modunda motorun mekanik sistemden ayrılması için bir kavramaya gerek duyulmasıdır [37]. Statorun bir fazında ekstra sargının kullanılmasının diğer bir seçeneği ise, bir-fazlı AC besleme için transformatör çalışma moduna sahip olmasıdır. Motorun transformatör gibi davranacağı bu durumda stator simetrik olmayan sarımlara sahip olup şarj sırasında motorda dönüş olmayacaktır [49].

Üç fazlı sürekli mıknatıslı motorlar entegre şarj sisteminde kullanıldığında şarj esnasında sargılarından geçen akımlar moment oluşturur ve makineyi döndürmeye çalışır. Bunu engellemek için kullanılan mekanik sistemler nedeniyle titreşimler, akustik gürültü ve aktarma organlarının aşınmasından dolayı ömür kısaltmaları meydana gelir; aynı zamanda bu sırada enerji harcanması nedeniyle sistem verimi önemli ölçüde etkilenir. Özel çözümlere başvurulmadıkça üç fazlı bir makinenin hızlı şarj işlemine doğrudan entegrasyonu çoğunlukla uygun bir seçenek değildir. Eğer şarj sistemi bir-fazlı ise, bir faz akımının kalkış momenti üretememesinden dolayı bu problem söz konusu olmamaktadır. Bu da entegre şarj çözümlerinin çoğunun bir-fazlı şarj için önerilmiş olmasının arkasındaki ana nedendir; ancak bir-fazlı şebeke limitlerinden dolayı bir-fazlı entegre sistemlerle yalnızca yavaş şarj gerçekleştirilebilmektedir [38], [50], [51]. Şarj esnasında moment üretiminin engellenmesi için çözüm yollarından biri, rotoru sargılı senkron motor (WRSM) kullanılmasıdır; bu tip sistemlerde şarj sırasındaki uyarıtım kesilerek moment üretimi engellenir [52]. Moment üretimini ortadan kaldıran benzer bir çözüm, ticari olarak kullanılan ilk entegre hızlı şarj sistemi olan 43 kW “Chameleon” şarj cihazıdır [53], [54]. Bu sistem WRSM'ye uygulanmış olup Renault ZOE'de kullanılmış ve batarya kapasitesinin %80'ini yaklaşık 30 dakikada şarj edebilmektedir. Diğer bir yöntem, iki ayrı güç kaynağı ile çalışan sürücüler için entegre şarj çözümüdür ve J. Hong ile arkadaşları tarafından önerilmiştir [55]. Çoklu tahrik motorları kullanan entegre topolojiler de önerilmiştir [56]. Diğer bir çözüm ise, bir moment bağlayıcı üzerinden bağlanan saftlara sahip iki adet yüzey mıknatıslı senkron motora (SPM) sahip izole edilmemiş üç-fazlı hızlı entegre batarya şarj sistemidir [57–59]. İki makinenin sargıları yeniden konfigüre edildikten sonra giriş filtresi endüktansları olarak kullanılmakta ve şarj modunda üç-fazlı bir şebekeye bağlanmaktadır. Diğer bir çözüm ise entegre olmayan ilave elemanlar gerektirmeyen ve



Şekil 3: Simetrik altı-fazlı bir makineyi içeren izole şarj cihazının topolojisi [26].



Şekil 4: Asimetrik altı-fazlı entegre hızlı batarya şarj sistemi topolojisi [62].

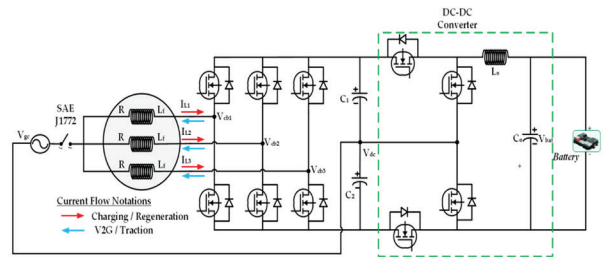
tek bir elektrik makinesinin kullanıldığı çözümdür [42, 60]. Bu yapıda stator sargılarının orta noktaları erişilebilir hale getirilmekte ve şebeke uçları bu noktalara bağlanabilmektedir. Uzaysal zıtlığa sahip bölmelenmiş yarım sargıların her bir çiftinden aynı akımlar geçirilerek sıfır moment üretimi elde edilebilmektedir.

B. Çok-Fazlı PMSM'li Entegre Şarj Sistemleri

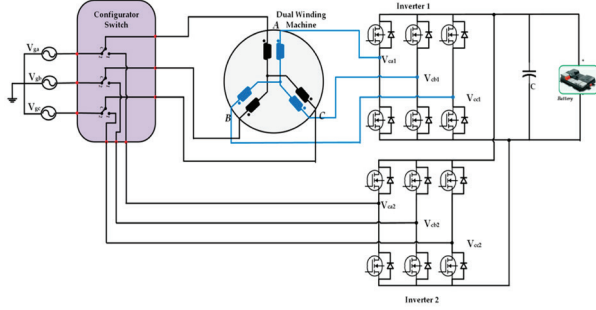
Entegre şarj sırasında moment üretimini ortadan kaldıracak şekilde entegre şarj sistemlerinin uygulandığı çok-fazlı makineler, 5, 6 ve 9 faz sayılarına sahiptir. Herhangi iki ardışık makine fazı arasındaki açılar aynı ise makine simetrik; fazlar farklı açılarla kaydırılırsa makine asimetrik sargılı olarak isimlendirilmektedir. Çok-fazlı makineler yaygın olarak çok-fazlı evirici üzerinden bir batarya ve opsiyonel çift yönlü bir dc/dc dönüştürücü ile beslenir [50]. Ancak faz sayısının artmasıyla beraber motor tasarımı ve üretimi karmaşıklaşmakta, sürücü tarafında kullanılan ekstra yarıiletkenlerle birlikte maliyet artmaktadır. Çok-fazlı sürücü sistemlerinin üç-fazlı sistemlere göre iki temel avantajı; yarıiletken anahtarlar üzerindeki akım seviyesinin azalması ve arızaya dayanıklı çalışma özellikleridir [38]. Genel olarak çok-fazlı makineler, kontrol açısından ilave serbestlik derecelerinin varlığı ile karakterize edilmektedir. Çok-fazlı makinelere dayalı entegre şarj sistemleri iki kategoriye ayrılabilir: birincisi üç fazlı şebekenin kullanıldığı [61–63], diğeri ise çok-fazlı gerilim beslemesinin kullanıldığı topolojilerdir [64–66].

I. Subotic ve arkadaşları tarafından EV'ler için altı-fazlı makinenin kullanıldığı iki izole yapıda topoloji önerilmiştir [38]. İzolasyon şebeke tarafında (araç-dışı) yer alırken, şarj cihazının geri kalanı ise araca yerleştirilmiş motor ve güç elektroniklerinden oluşmaktadır. Bu 6-fazlı makine ve izole yapının genel şeması Şekil 3'te gösterilmektedir [26]. Y. Xiao ve arkadaşları, 6-fazlı PMSM için önerdikleri yöntemle şarj sırasında moment oluşumunu önlemişlerdir [67]. Z. Ullah ve arkadaşları ise e-Golf tahrik sistemi için özel olarak tasarlanmış çift üç-fazlı ve asimetrik sargılı 6-fazlı IPMSM kullanarak, şarj sırasında momentin sıfır olduğu V2G modlu

şarj sistemi önermişlerdir [68]. I. Subotic, E. Levi ve N. Bodo tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise iki izole nötr noktalı asimetrik 6-fazlı motor kullanılmış ve önerilen izolesiz hızlı entegre şarj sistemi Şekil 4'te verilmiştir [62]. Diğer 6-faz makineli şarj sisteminde, tahrik ve şarj modları arasında geçişe izin vermek için basit bir yeniden yapılandırma mekanizması ile simetrik altı-fazlı makine sargıları ve dokuz anahtarlı bir çevirici birlikte kullanılmaktadır [44]. Asimetrik sargılı 9-fazlı makineye dayanan sistemde üç-fazlı AC kaynağın faz uçları, 9-fazlı makinenin üç izole nötr noktasına doğrudan bağlanmakta ve makinenin üç fazlı sarım setine bağlı evirici bacaklarının aynı anda kontrol edilmesiyle faz sargıları filtre olarak kullanılıp şarj esnasında moment üretmeden, birim güç faktöründe çift yönlü çalışma sağlanmaktadır [61], [69]. 9-faz konsantrik sargılı, 9-oluk/8-kutup yapısındaki IPM motora dayalı izoleli entegre şarj sistemi de [25]'te önerilmektedir. Her ne kadar çok-fazlı makineler hızlı şarj ve şarj sırasında moment oluşumunu engellemek için kullanılsalar bile, bu sistemlerin bir-fazlı şarj yapıları da özellikle evlerde ve ofislerde bir-fazlı şebekeden yavaş şarjın gerçekleştirilebilmesi için literatürde önerilmiştir. İtiş ve şarj/V2G modu arasındaki donanımın yeniden yapılandırması ya tek bir anahtar kullanılarak ya da ilave anahtara gerek kalmadan gerçekleştirilebilmektedir [70–74]. İzolesiz üç fazlı motorlu entegre batarya şarj sistemi topolojisine tipik bir örnek Şekil 5'te, izole 6-faz motorlu entegre batarya şarj sistemi topolojisine ise Şekil 6'da yer verilmektedir.



Şekil 5: İzolesiz 3-faz motorlu entegre batarya şarj sistemi topolojisi [42]



Şekil 6: İzole 6-faz motorlu entegre batarya şarj sistemi topolojisi [30]

Çok-fazlı PMSM'ler, şarj modunda moment iptali ile titreşim ve akustik gürültüyü azaltmakta [22, 23, 29]; akım paylaşımı sayesinde yarıiletken stresleri ve filtre boyutları düşmekte [8, 10, 44]; faz arızalarında indirgenmiş güçte çalışmaya devam edebilen yüksek hata toleransı sağlamaktadır [26–28] ve çekiş modunda IPM/SPM topolojilerinin yüksek moment yoğunluğu, geniş alan zayıflatma aralığı ve yüksek verim avantajlarını sunmaktadır [1, 13, 15]. Bu nedenlerle çok-fazlı PMSM'li entegre şarj sistemleri, HEA'lar için sıkı hacim ve ağırlık hedefleri ile verim ve regülasyon/elektromanyetik uyumluluk (EMC) gereklilikleri arasında optimum dengeyi sağlayan yapılar olarak öne çıkmaktadır [11, 45].

Literatürdeki bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, entegre şarj fonksiyonlu çok-fazlı PMSM'lerde üç temel tasarım uzlaşması öne çıkmaktadır. İlk olarak, moment oluşumunu engellemek için kullanılan yeniden yapılandırma ve denetim stratejileri arttıkça donanım ve kontrol karmaşıklığı yükselmektedir. İkinci olarak, şarj modunda makinenin kuplaj endüktansı veya transformatör olarak kullanılabilmesi, sarğı parametreleri ve manyetik doyma sınırlarını kritik hale getirmektedir. Üçüncü olarak ise tahrik modunda yüksek güç faktörü, düşük kayıp ve geniş alan zayıflatma kabiliyeti rotor topolojisi ve oluk-kutup seçimine bağlı olmaktadır. Bu nedenle entegre şarj uyumlu PMSM tasarımında yalnızca topoloji veya kontrol değil, elektromanyetik tasarımın da sistem istleriyle birlikte optimize edilmesi gerekmektedir.

C. Önerilen Çok-Fazlı Entegre Şarj Sistemi ve Çalışma Modları

Bu çalışma kapsamında tasarlanan 6-fazlı PMSM'nin elektromanyetik boyutlandırması ve optimizasyonu, Şekil 6'da verilen izole altı-faz motorlu entegre batarya şarj sistemi topolojisi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yapıda, literatürde Pescetto ve Pellegrino tarafından önerilen IFI-OBC (Isolated Fully-Integrated OBC) benzeri bir mimari benimsenmekte; 6 fazlı PMSM, iki adet elektriksel olarak kaydırılmış üç-fazlı sarğı grubu ile hem çekiş modunda tahrik makinesi hem de şarj modunda izolasyonlu bir manyetik kuplaj elemanı (transformatör) olarak görev yapmaktadır. Şarj modunda şebekeye bağlı olan üç-faz seti primer, evirici ve batarya tarafına bağlı olan set ise sekonder sarğı gibi davranmakta; böylece ek bir güç transformatörüne gerek kalmaksızın galvanik izolasyon sağlanmakta ve aynı güç elektroniği donanımı üzerinden hem PFC işlevi hem de çift yönlü güç akışı (G2V/V2G) gerçekleştirilebilmektedir. Bu yapı, çalışmanın temel özgülüğü olan entegre şarj

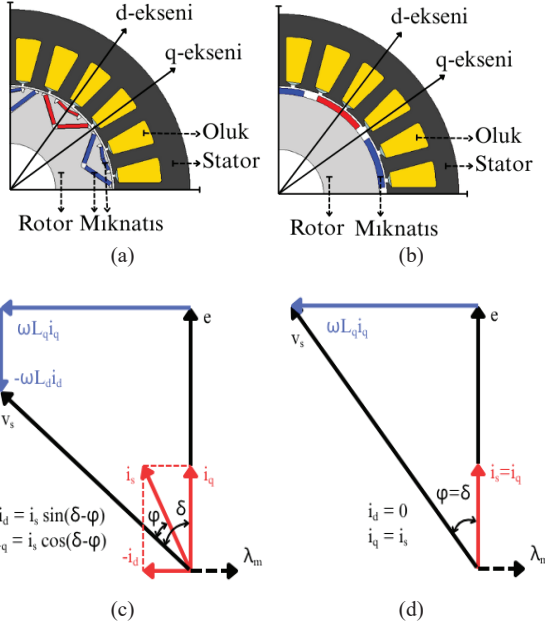
fonksiyonunun doğrudan motor tasarımına gömülü şekilde ele alınmasına imkan vermektedir [30].

Şarj modunda moment iptali için 6-fazlı sargıların vektörel dengelenmesine dayalı bir kontrol yaklaşımı öngörülmektedir. Bu kapsamda, iki üç-fazlı setin akı ve akım bileşenleri d-q eksen takımında ayrıştırılmakta; şebekeden PFC ile birim güç faktörüne yakın akım çekilirken, motorun manyetize edici akımı d-ekseni boyunca tutulmakta ve q-ekseni bileşeni iki set arasında zıt yönlü dağıtılarak net moment yaklaşık sıfıra indirilmektedir. Pratikte bu, bir sarğı setinin “şebeke tarafı H-köprüsü” olarak kullanılarak grid akımının regüle edilmesi, diğer setin ise “tork fazı” konfigürasyonunda yeniden bağlanarak aktif sıfır-moment denetleyicisi ile kontrol edilmesiyle sağlanmaktadır. Böylece Şekil 6'da gösterilen izole altı-fazlı entegre OBC yapısında, şarj süresince hem shaft momenti sıfırlanmakta hem de şebeke akımının THD ve güç faktörü gereksinimleri karşılanabilmektedir.

Önerilen entegre topolojide PMSM sargılarının şebeke frekansında etkin bir PFC endüktansı olarak kullanılması, motor nominal devri ile şarj devresinin endüktans gereksinimi arasında doğrudan bir tasarım uzlaşması (trade-off) doğurmaktadır. Sarım sayısının artırılması, manyetik endüktansı yükselterek ve faz sargısının PFC amacıyla kullanılabilen eşdeğer seri endüktansını büyüterek, şebeke akımının daha düşük dalgalılık ve harmonik içerikle kontrol edilmesini kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda zıt-EMK sabitini yükselterek nominal hızın yükselmesine, moment yoğunluğunun azalmasına yol açmaktadır. Buna karşılık sarım sayısının azaltılması, çekiş modunda hedeflenen moment-hız karakteristiğini desteklerken, entegre PFC evresinin ihtiyaç duyduğu endüktansın yetersiz kalmasına, dolayısıyla şebeke akımında daha yüksek dalgalılık ve THD değerlerine neden olabilmektedir. Bu nedenle çalışmada sarğı konfigürasyonu, hem 48 V seviyesinde 2500 rpm nominal hız ve 4.5 kW güç gereksinimlerini karşılayacak hem de Şekil 6'daki izole 6-fazlı entegre şarj yapısının PFC ve moment iptali koşullarını sağlayacak şekilde seçilmiş; elektromanyetik optimizasyon süreci bu çift yönlü kısıtlar altında yürütülmüştür.

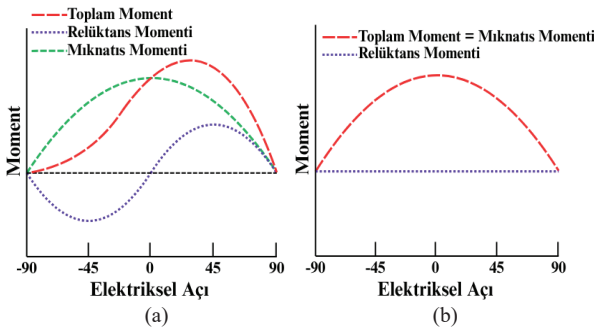
3. IPM ve SPM Motorların Temel Prensipleri ve Ana Tasarım Parametreleri

HEA uygulamaları için entegre şarj sistemine uygun iki ayrı altı-fazlı sürekli mıknatıslı motor tasarımı geliştirilmiştir: IPM ve SPM. IPM motorlar, mıknatısların rotor içine gömülü olmasıyla yüksek relüktans momenti üretirken, SPM motorlarda ise mıknatıslar hava aralığına eşdeğer manyetik geçirgenliğe sahip olduğundan d- ve q-ekseni relüktansları yaklaşık olarak eşittir ve relüktans momenti üretimi olmamaktadır. [75, 76]. Her iki motor, statorunda simetrik veya asimetrik 6-fazlı sargılar içerir ve bu yapı, 3-fazlı motorlara kıyasla daha düşük faz akımı, yüksek hata toleransı ve kontrol serbestliği sağlar [77, 78]. Bu özellikler, entegre şarj sistemlerinde stator sargılarının transformatör veya filtre olarak kullanılmasına olanak tanır. Bu kapsamda, IPM ve SPM motorların elektromanyetik prensipleri, temel tasarım parametreleri ve entegre şarj sistemine uygunlukları modellemeler ile ele alınmıştır.



Şekil 7: (a) IPM motor yapısı, (b) SPM motor yapısı, (c) IPM'nin fazör diyagramı, (d) SPM'nin fazör diyagramı

IPM motorlarda, rotor içindeki sürekli mıknatıslar hava boşluğuyla yaklaşık aynı manyetik geçirgenliğe sahiptir; bu nedenle mıknatısın bulunduğu d-ekseninde yüksek relüktans (R_d) ve düşük endüktans (L_d) gözlenir. Mıknatısın bulunmadığı q-ekseninde ise daha düşük relüktans ve daha yüksek endüktans (L_q) mevcuttur. Bu fark, IPM motorlarda d-q eksenlerini oluşturur ve bu eksenler ile IPM'nin fazör diyagramı Şekil 7'de gösterilmiştir [76, 79]. Bu eksenler arasındaki endüktans farkı, relüktans momenti oluşmasına neden olur. IPM motorlarda bu fark ($L_d - L_q$) belirgin olduğundan, toplam moment hem mıknatıs akısından hem de relüktans bileşeninden elde edilir. Buna karşılık SPM motorlarda mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirildiği için hava aralığı manyetik geçirgenliği yakın olup relüktans momenti ihmal edilebilir; moment büyük ölçüde mıknatıs akısına bağlıdır [75, 80]. Mıknatıs, relüktans ve toplam momentin grafiksel temsili Şekil 8'de sunulmuştur [77].



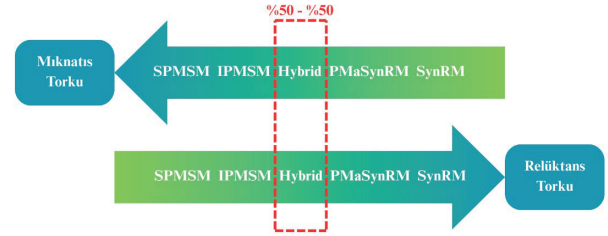
Şekil 8: (a) IPM motorlarda mıknatıs, relüktans ve toplam moment grafiği, (b) SPM motorlarda mıknatıs, relüktans ve toplam moment grafiği

Relüktans momentinin artırılabilmesi için IPM tasarımında mıknatıs yerleşimi, çıkıklık (saliency) oranını (L_q/L_d) maksimize edecek şekilde düzenlenmektedir. IPM motorun elektromanyetik momentini Denklem 1 ile ifade edilir.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot [\lambda_{md} \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (1)$$

Burada, (p), kutup çifti sayısı; (λ_{md}), mıknatıs akısı; (i_d) ve (i_q), d ve q eksen akımları; (L_d) ve (L_q), d ve q eksen endüktanslarıdır. İlk terimi mıknatıs momentini, ikinci terimi ise relüktans momentini temsil eder. Relüktans ve mıknatıs momentine bağlı motor tipleri Şekil 9'da sunulmuştur.

Moment dalgalılığının azaltılması, IPM ve SPM motor tasarımlarında kritik bir gerekliliktir. Bu amaçla, her iki tasarımda da zıt-EMK dalga formunun mümkün olduğunca sinüzoidal olması hedeflenir; bu, rotor hareketinden kaynaklanan elektromanyetik kuvvet harmoniklerinin kontrolü ile sağlanmaktadır [82]. Altı-fazlı IPM ve SPM motorlarda, alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yaygın biçimde uygulanmaktadır. FOC, motor akım vektörü ile senkronize edilmiş d-q koordinat sisteminde çalışarak akı ve moment bileşenlerini bağımsız kontrol etmeye olanak tanır [80, 81]. Bu bağlamda, d-ekseni akımı motor akısını, q-ekseni akımı ise momentini yönetir. FOC stratejisi, rotor manyetik akısı ile stator akısı arasındaki açının 90° olmasını sağlayarak maksimum moment üretimine imkan tanır [79, 81].



Şekil 9: Relüktans momenti ve mıknatıs momentinin değişimine bağlı motor tipleri

IPM motorlar, sürekli mıknatıs akısını relüktans etkisiyle birleştirerek yüksek moment yoğunluğu ve verim sunarken, SPM motorlar mıknatıs akısı sayesinde düşük harmonik içeriğiyle öne çıkar [75, 82]. Altı-fazlı yapı, entegre şarj modunda stator sargılarının filtre görevi üstlenmesine imkan tanır; böylece şarj sırasında moment üretimi iptal edilerek mekanik titreşimler ve akustik gürültü bastırılır [15, 26, 57].

4. Hafif Elektrikli Araç Modellemesi, Uygulama Gereksinimleri ve Kısıtları

Hafif elektrikli araçlar, düşük enerji tüketimi, çevre dostu yapıları ve kompakt tasarımlarıyla ulaşım çözümlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu araçların performansını belirleyen temel bileşenlerden biri, elektrik motorudur. PMSM'ler, yüksek verim, düşük moment dalgalılığı, kompakt yapı ve geniş bir moment-hız aralığında etkin çalışma kabiliyetiyle HEA'lar için ideal bir seçimdir. Ancak bu motorların tasarımı, endüstriyel motorlardan farklı olarak değişken sürüş koşullarında maksimum verim, minimum ağırlık ve hacimle çalışacak şekilde optimize edilmelidir [69]. Bu kapsamda, PMSM tasarımı hem analitik hem de sayısal yöntemlerin bir kombinasyonunu gerektirir ve maliyeti azaltmak için mıknatıs kullanımını azaltmayı hedefler. Şekil 10, HEA gereksinimlerini karşılamak için geniş bir moment-hız aralığında çalışacak PMSM'nin tasarım aşamalarını veren akış şemasını göstermektedir. PMSM tasarım süreci, HEA'nın

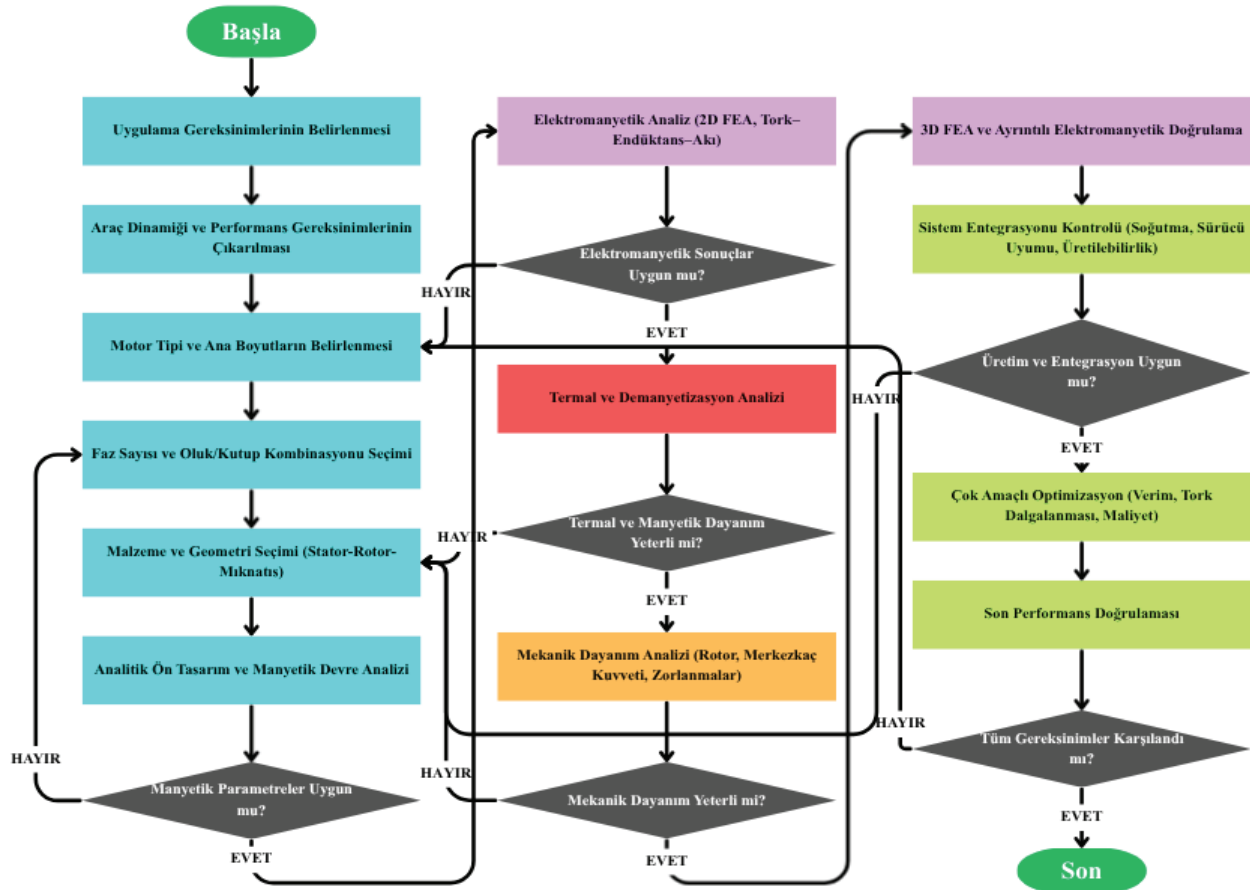
gereksinimlerinin tanımlanmasıyla başlamaktadır. Aracın kullanım senaryolarına uygun şekilde hız, ivmelenme, menzil ve tırmanma performansı gibi parametreler belirlenmiş ve MATLAB/Simulink ortamında araç modeli oluşturularak dinamik davranışların benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Tüm sistemin benzetim çıktılarından elde edilen motor performans gereksinimleri (nominal - maksimum moment, güç, hız vb.) doğrultusunda uygun motor tipinin belirlenmesiyle geliştirilen analitik modelleme ile analizler gerçekleştirilmiştir. Motorun elektromanyetik ve termal performansını etkileyen kritik parametrelerin optimize edilebilmesi amacıyla çok amaçlı bir karşılaştırma çalışması yürütülmüştür. Motorun 3-fazlı ve 6-fazlı versiyonları dikkate alınarak çok fazlı sistemlerin performansa etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca dört farklı oluk/kutup kombinasyonu ($p = 10 - N_s = 24$; $p = 14 - N_s = 24$; $p = 10 - N_s = 36$; ve $p = 14 - N_s = 36$) seçilerek motorun performansı ve elektromanyetik davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Malzeme seçimlerinin performansa etkisi ve bununla birlikte, her biri farklı akı yönlendirme prensiplerine ve manyetik davranışlara sahip yedi farklı rotor geometrisi tasarlanarak detaylı karşılaştırmalara tabi tutulmuştur: V-Type, Surface Radial, Surface Parallel, Spoke, Surface Breadloaf, Double V-Type ve Double U-Type. Elektromanyetik analizler, ANSYS Maxwell sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş; analizlerde moment üretimi, vuruşu momenti, zıt-EMK dalga formları, toplam harmonik bozulma (THD), relüktans moment katkısı ve verim gibi performans kriterleri değerlendirilmiştir. Bu aşamada referans bir V-tipi

IPM modeli ile karşılaştırmalı analiz yapılmış, en uygun rotor geometrisi belirlendikten sonra OptiSLang yazılımı ile çok amaçlı optimizasyon süreci başlatılmıştır. Optimizasyon döngüsünde, motorun boyutsal parametreleri ve rotor geometrisine ilişkin değişkenler hedeflenerek verimi artırmak, moment dalgalılığını, mıknatıs miktarını ve maliyeti düşürmek amacıyla çoklu kriterler optimize edilmiştir. Sonuçta elde edilen optimize edilmiş tasarım; gereksinimleri karşılayan, referans modele kıyasla daha yüksek verim sunan, daha düşük moment dalgalılığına sahip olan ve maliyet açısından avantaj sağlayan optimal motor geometrisi olarak tanımlanmıştır.

A. Uygulama Gereksinimlerinin Belirlenmesi

PMSM tasarım sürecinin ilk adımı, HEA'nın hareketi sırasında karşılaştığı boylamsal kuvvetlerin analiz edilmesidir. Bu amaçla, aracın boylamsal modeli kullanılarak sistemin ihtiyaç duyduğu karşı kuvvetler hesaplanmıştır. Bu model, aracın hareketi sırasında karşılaştığı karşı kuvvetlere dayanır ve motorun momenti, güç ve performans gereksinimleri bu kuvvetlerden türetilir. Karşı kuvvetler şu şekilde tanımlanır: tekerlek sürtünme kuvveti (F_w) aracın tekerleklerinin yolda oluşturduğu sürtünme kuvvetidir ve Denklem 2 ile hesaplanır, aerodinamik direnç (F_a) hıza ve aerodinamik yapıya bağlı olarak havanın oluşturduğu direnç kuvvetidir ve Denklem 3 ile belirlenir, ivmelenme kuvveti (F_{ac}) aracın hızlanması için gereken kuvvettir ve Denklem 4 ile ifade edilir, tırmanma kuvveti (F_s) yokuş yukarı hareketlerde yer çekiminden kaynaklanan kuvvettir ve Denklem 5 ile hesaplanır [83].



Şekil 10: HEA için motor tasarım akış şeması

$$F_w = c_t \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

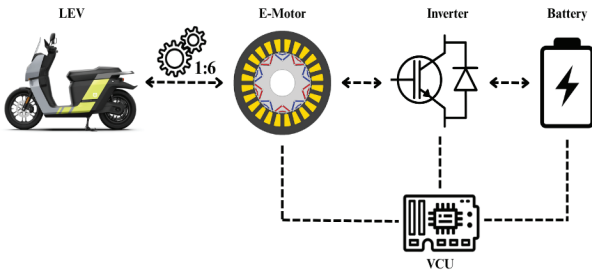
$$F_a = 0.5 \cdot c_d \cdot \rho \cdot A_f \cdot (v \pm v_o)^2 \quad (3)$$

$$F_{ac} = \delta \cdot m \cdot a \quad (4)$$

$$F_s = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

Bu kuvvetler, aracın toplam kütlesi (m: 320 kg), hızı (v), araca göre net hava hızı (v_o), ön yüzey alanı (A_f : 0.75 m²), hava yoğunluğu (ρ : 1.23 kg/m³), yuvarlanma direnci katsayısı (c_t : 0.015) ve sürüklenme katsayısı (c_d : 0.88) gibi parametrelere bağlı olarak hesaplanır. Parametreler, ilgili denklemlerde kullanılarak toplam karşıt kuvvet ve bu kuvvet tekerlek yarıçapıyla çarpılarak motorun üretmesi gereken moment belirlenir. Ayrıca, yardımcı elektrik yükleri (örneğin, gösterge paneli, araç kontrol ünitesi ve koruma devreleri, sürtüş kontrol sistemleri, eğlence ve güvenlik sistemleri, klima vb.) ve mekanik gereksinimler de dikkate alınır. Dişli oranı (1:6), çekiş sistemi kayıpları ve ek yükler hesaba katılarak motorun hızı, momentini ve gücü belirlenir.

Maksimum yokuş eğimi ve maksimum hızlanma dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, motorun nominal gücü 2500 rpm'de (44 km/h) 4.5 kW, maksimum gücü 9 kW, maksimum hızı 6000 rpm ve maksimum momentini 34 Nm olarak tanımlanmıştır. HEA'larda kullanılan elektrik motorları aksa doğrudan bağlanabilir veya dişli ya da kayış-kasnak mekanizmasıyla bağlanabilir. Bu çalışmada, motor 1:6 dişli oranıyla sisteme bağlanmıştır. Şekil 11'de, HEA'nın elektrikli itiş sisteminin genel şeması verilmektedir. Araç isterleri ise Tablo 1'de sunulmaktadır.



Şekil 11: HEA'nın elektrikli tahrik sistemi

Tablo 1: HEA için isterler

Parametre	Değer	Birim
Teker yarıçapı	0.28	m
Maksimum araç hızı @ 320 kg	100	km/h
Maksimum hız @ 3% eğim	90	km/h
Maksimum araç kütlesi	320	kg
Dişli oranı	6	-
Soğutma yöntemi	Hava	-
30 km/h hızda maksimum süre @ 15% eğim	3000	s
20 km/h hızda maksimum süre @ 25% eğim	30	s
Nominal hız @ 10% eğim	50	km/h

B. Analitik Analiz ve PMSM'nin Ana Boyutlarının Belirlenmesi

Analitik tasarım süreci, motorun elektromanyetik performansını belirleyen ana boyutların hesaplanması ile başlar. Bu amaçla, motorun çıkış gücü rotor çapı (D_r), istif uzunluğu (l_i) ve mekanik hız (ω_r) ile ilişkilendirilmiştir. Çıkış katsayısı yaklaşımı kullanılarak motor gücü Denklem 6 ile ifade edilmektedir [84].

$$P = C \cdot D_r^2 \cdot l_i \cdot \omega_r \quad (6)$$

Burada C faydalanma katsayısıdır ve bu çalışmada 37 kNm/m³ alınmıştır. Rotor çapı $D_r = 92$ mm ve istif uzunluğu $l_i = 55$ mm olarak belirlenmiş olup elde edilen çıkış gücü $P_{out} = 4.5$ kW'dır. Çıkış gücü ve momentin doğrulanabilmesi için giriş gücü ve görünür güç hesaplamaları da dikkate alınmıştır ve Denklem 7 ile ilişkileri ifade edilmiştir [85, 86].

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}, \quad S_{in} = \frac{P_{out}}{\eta \cdot \cos\phi} \quad (7)$$

Buradan elde edilen giriş gücü üzerinden terminal akımı 6-faz motorlar için Denklem 8 ile hesaplanır [87].

$$I_{ph} = \frac{P_{in}}{6 \cdot V_{ph} \cdot \cos\phi}, \quad I_t = I_{ph} \quad (8)$$

Oluk-kutup kombinasyonu olarak $2p = 5$ kutup çifti ve $N_s = 24$ oluk, $2p = 7$ kutup çifti ve $N_s = 24$ oluk, $2p = 5$ kutup çifti ve $N_s = 36$ oluk ve $2p = 7$ kutup çifti ve $N_s = 36$ oluk seçilmiştir. Bu oluk/kutup sayısı kombinasyonları yüksek sargı faktörü ile daha yüksek verim sağlamak ve vuruş momentini minimize ederek gürültü ve titreşimin azaltılmasına katkı sunmaktadır. Sargı faktörü dağılımı, kısa adım ve eğiklik katsayısının çarpımı ile ifade edilmektedir ve Denklem 9 ile hesaplanır [84].

$$k_w = k_d \cdot k_p \cdot k_{skew} \quad (9)$$

Hava aralığının boyutlandırılmasında Carter faktörü ve saçaklanma etkileri dikkate alınarak efektif hava aralığı belirlenmiştir. Bu tasarım için elde edilen efektif hava aralığı değeri $g_{eff} = 0.5$ mm'dir. Ortalama hava aralığı manyetik akı yoğunluğu $B_{av} = 0.97$ T hesaplanmış ve hedef manyetik yükleme ile uyumlu bulunmuştur. Ortalama manyetik yükleme Denklem 10 ile hesaplanmaktadır [85].

$$B_{av} = \frac{2p \cdot \phi_p}{\pi \cdot D \cdot l_i} \quad (10)$$

Hesaplanan faz akımı $I_{ph} = 45$ A_{rms} olup, hava soğutmalı bir sistem tercih edildiğinden akım yoğunluğu 5 A/mm² ile sınırlandırılmıştır. Faz başına EMK Denklem 11 ile verilir [87].

$$E_{ph} = 4.44 \cdot f \cdot N_{tp} \cdot k_w \cdot \phi_p \quad (11)$$

V-tipi IPM topolojisi için faz başına EMK $E_{ph} = 17$ V_{rms} olarak elde edilmiştir. Elektriksel yükleme katsayısı Denklem 12 ile ifade edilmektedir [84].

$$a_c = 3 \cdot N_{tc} \cdot N_{cpph} \cdot I_c / (\pi \cdot D) \quad (12)$$

Analistik hesaplamalar sonucunda $a_c = 60$ kA/m olarak bulunmuştur. Malzeme seçiminde M235-35A silikonlu sac ve N42 sınıfı NdFeB mıknatıslar kullanılmış, elde edilen sayısal değerler tasarım hedefleriyle uyumlu bulunmuştur.

Çalışma kapsamında FEM analizlerinden elde edilen moment dalga formunun tepe-tepe genişliğine dayalı normalize edilmiş moment dalgalılığı tanımı kullanılmıştır. Bir elektriksel periyotta elde edilen maksimum (T_{max}), minimum (T_{min}) ve ortalama moment (T_{avg}) değerleri esas alınarak moment dalgalılığı Denklem 13 ile hesaplanmıştır. PMSM E-Motor tasarımı için çıkarılan isterler ise Tablo 2’de verilmiştir.

$$T_{ripple} = \frac{T_{max}-T_{min}}{T_{avg}} \times 100 \quad (13)$$

Tablo 2: PMSM E-Motor için isterler

Parametre	Değer	Birim
Güç (Nom/Maks)	4500 / 9000	W
Moment (Nom/Maks)	17.2 / 34.4	Nm
Hız (Nom/Maks)	2500 / 6000	rpm
Gerilim	48	V
Verim	>94	%
Güç faktörü	>0.92	
Motor uzunluğu	155	mm
Motor dış çapı	184	mm
Stator dış çapı	160	mm
İstif uzunluğu	55	mm
Manyetik yükleme	1	T
Elektriksel yükleme	60	kA/m
Hava aralığı	0.5	mm
Moment dalgalılığı	<1	%
Sargı izolasyon sınıfı	Class H (180°C)	
Neodyum mıknatıs sınıfı (N42)	UH (180°C)	

5. Faz Sayısı, Oluk-Kutup Kombinasyonu, Rotor Topolojisi ve Malzeme Seçimi

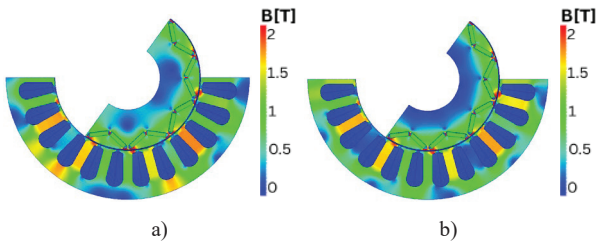
Entegre şarj fonksiyonlu PMSM’nin tasarımında en kritik adımlardan biri faz sayısı ve oluk/kutup sayısı kombinasyonunun belirlenmesidir. Bu seçim, motorun elektromanyetik davranışını, kayıp bileşenlerini, mıknatıs miktarı ve mekanik titreşim karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Çalışmanın başlangıç aşamasında dört farklı kombinasyon (24/10, 24/14, 36/10 ve 36/14) hem 3-fazlı hem de 6-fazlı stator yapıları için incelenmiş, elektromanyetik performans analizleri ANSYS Motor-CAD tabanlı sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde elde edilen verim, moment dalgalılığı, güç faktörü, bakır ve demir kayıpları gibi parametreler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, böylece 6-fazlı motorun 3-fazlı yapıya kıyasla sunduğu avantajlar sayısal çıktılarla ortaya koyulmuştur. Özellikle üç-fazlı yapıdan 6-fazlı yapıya geçiş, moment dalgalılığı, güç faktörü ve kayıp dağılımları açısından önemli iyileştirmeler sağlamıştır. 24/10 kombinasyonu incelendiğinde, üç-fazlı motor %6.3 seviyesinde moment dalgalılığı üretirken, 6-fazlı eşleniğinde bu değer %1.6’ya kadar gerilemiş; bu durum 6-fazlı motorun moment üretiminde çok daha düzgün bir profil sunduğunu açıkça göstermiştir. Aynı kombinasyonda verim %90.8’den %91.7’ye yükselmiş, güç faktörü ise 0.88’den

0.91’e çıkarak evirici ve şebeke etkileşimi açısından daha elverişli çalışma koşulu sağlamıştır. 24/14 kombinasyonunda ise 6-fazlı yapının moment dalgalılığını %0.25 gibi oldukça düşük bir değere indirdiği görülmüş, ancak güç faktörünün 0.83’e düşmesi bu seçeneği pratik uygulamalar için kısıtlı hale getirmiştir. Yüksek oluk sayısına sahip 36 oluklu kombinasyonlar teorik olarak daha iyi harmonik dağılımına imkan verse de, moment dalgalılığının %7–11 aralığında kalması ve güç faktörünün 0.70–0.90 bandında seyretmesi, özellikle HEA uygulamaları için gerekli moment ve evirici boyutlandırması açısından dezavantaj oluşturmıştır.

Altı-fazlı yapı aynı zamanda akımın daha fazla faza dağıtılması sayesinde yarıiletken elemanların akım stresleri düşmekte, termal yük paylaşımı ve hata toleransı iyileşmektedir. Bu özellikler, entegre şarj modunda da kritik önem taşımaktadır; çünkü şarj sırasında faz sargılarının transformatör veya filtre endüktansı gibi davranması, akımın düzgünlüğü ve EMI açısından faz sayısının yüksekliğinden doğrudan fayda görmektedir. Literatürde de benzer şekilde 6-fazlı PMSM tasarımlarının özellikle yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda öne çıktığı vurgulanmıştır [72]. Çalışmada elde edilen sayısal çıktılar literatürdeki genel eğilimleri doğrular niteliktedir. Sonuç olarak yapılan kapsamlı analizler 24/10 oluk/kutup sayısı kombinasyonunun 6-fazlı mimaride en iyi çözümü sunduğunu göstermiştir. Bu yapı hem düşük moment dalgalılığı hem de yeterli güç faktörü ile elektromanyetik performans, kayıp dağılımı ve sistem entegrasyonu arasında optimum dengeyi sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3’te, 24/10 kombinasyonuna ait üç-fazlı ve 6-fazlı akı dağılımları karşılaştırmalı olarak Şekil 12’de verilmiştir. Bu bulgular ışığında, 24/10 6-fazlı konfigürasyon sonraki rotor topolojisi ve optimizasyon çalışmalarının temel platformu olarak seçilmiştir.

Tablo 3: Farklı oluk–kutup kombinasyonları için 3-faz ve 6-faz motor performans karşılaştırmaları

Oluk/ Kutup	Faz Sayısı	P_{out} [W]	Verim [%]	Moment Dalgalılığı [%]	PF
10/24	3	4500	90.841	6.3188	0.882
10/24	6	4500	91.74	1.5507	0.9082
14/24	3	4500	90.413	3.8676	0.8144
14/24	6	4500	91.54	0.2452	0.8304
10/36	3	4500	93.688	10.583	0.9038
10/36	6	4500	93.635	10.646	0.9044
14/36	3	4500	91.253	6.8858	0.7098
14/36	6	4500	91.18	6.9508	0.7087

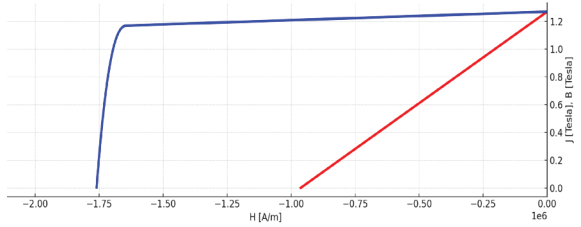


Şekil 12: 24/10 kombinasyonunda a) 3-faz ve b) 6-fazın elektromanyetik akı dağılımları

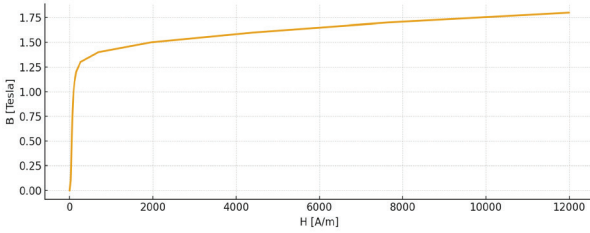
Malzeme seçimi sürecinde motorun performansını doğrudan etkileyen sürekli mıknatıs ve sac malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Yüksek kalıcı manyetik akı yoğunluğu (≈ 1.3 T) ve sıcaklık kararlılığı nedeniyle N42UH sınıfı NdFeB mıknatıs tercih edilmiştir. Sac malzemesi tarafında ise düşük histerezis ve girdap akımı kayıpları, yüksek manyetik geçirgenlik ve endüstride yaygın üretim avantajı sayesinde M235-35A elektrik çeliği öne çıkmıştır. Alternatif olarak incelenen M250-35A benzer sonuçlar verse de güç faktörünün düşük kalması nedeniyle tercih edilmemiştir. Yapılan FEM analizlerinde N42/M235-35A kombinasyonu, 4522.6 W çıkış gücü, %91.74 verim, %1.55 moment dalgalılığı ve 0.91 güç faktörü ile en iyi performansı sunmuş; bakır kayıpları 254.4 W, toplam kayıplar ise 407.2 W olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te, malzeme karakteristikleri ise Şekil 13'de verilmiştir.

Tablo 4: Farklı mıknatıs-sac kombinasyonlarının elektromanyetik performans karşılaştırması

Malzeme Özellikleri	P _{out} [W]	Verim [%]	Moment Dalgalılığı [%]	PF	P _{loss} [W]
N42 M250-35A	4500	91.718	1.4748	0.9019	407.3
N35 M250-35A	4500	91.047	1.0036	0.8498	444.8
N42 M235-35A	4500	91.74	1.5507	0.9082	407.2
N35 M235-35A	4500	91.114	1.0825	0.8595	439.0



a)



b)

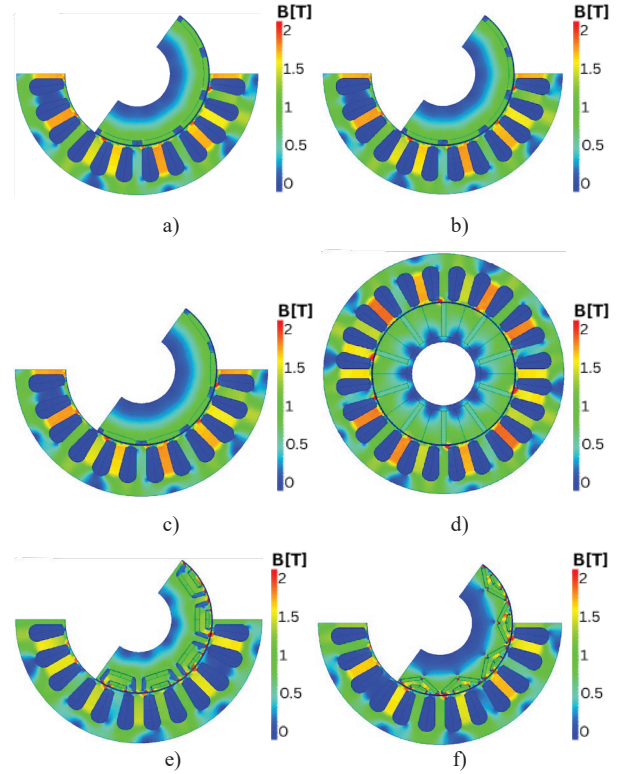
Şekil 13: (a) N42 NdFeB mıknatısına ait demanyetizasyon eğrisi (b) M235-35A elektrik çeliğine ait B-H eğrisi

Mıknatıslı motor performansını belirleyen en kritik unsurlardan biri olan rotor geometrisi, mıknatıs miktarı, mıknatıs akı dağılımını, relüktans moment katkısını ve moment dalgalılığının karakterini doğrudan şekillendirmektedir. Bu çalışmada hem yüzey mıknatıslı hem de gömülü mıknatıslı yapıları içeren altı farklı rotor tipi tasarlanmış ve ANSYS MotorCAD üzerinden FEA yöntemi ile ayrıntılı elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Değerlendirilen

yapılar arasında Surface Radial, Surface Parallel, Surface Breadloaf, Spoke, Double-U ve Double-V konfigürasyonları yer almakta olup, her biri moment dalgalılığı, güç faktörü, verim ve kayıplar açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'te, öne çıkan rotor yapılarının manyetik akı dağılımları ise Şekil 14'de sunulmuştur.

Tablo 5: Farklı rotor topolojilerinin (SPM ve IPM) elektromanyetik performans karşılaştırması (FEM sonuçları).

Rotor Tipi	P _{out} [W]	Verim [%]	Moment Dalgalılığı [%]	PF	P _{loss} [W]
Surface Radial (SPM)	4500	92.73	1.7566	0.965	352.8
Surface Parallel (SPM)	4500	92.72	2.1256	0.965	353.5
Surface (SPM) Breadloaf	4500	92.71	2.4512	0.96	355.1
Spoke (IPM)	4500	92.57	2.8606	0.965	362.2
Double V-Type	4500	91.6	0.63759	0.889	413.0
Double U-Type	4500	90.15	0.81501	0.792	492.9



Şekil 14: İncelenen rotor topolojilerine ait manyetik akı dağılımları: (a) Surface Radial, (b) Surface Parallel (c) Surface Breadloaf (d) Spoke (IPM), (e) Double-U (f) Double-V.

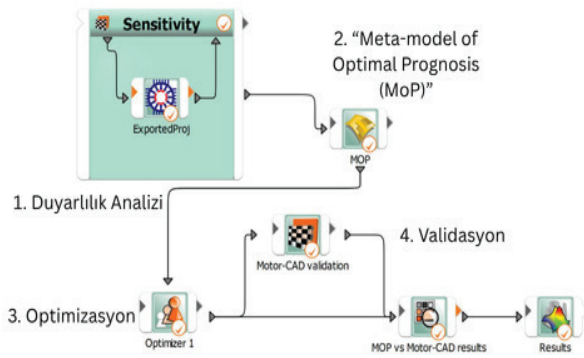
Rotor topolojisi karşılaştırmaları, mıknatıs yerleşim geometrisinin motor performansı üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır. SPM yapılarında Surface Radial ve Surface Parallel konfigürasyonları %92.7 düzeyinde verim ve yaklaşık %1.8–2.1 aralığında moment dalgalılığı ile öne çıkmış, özellikle yüksek güç faktörü (≈ 0.96) sayesinde evirici açısından avantaj sağlamıştır. Surface Breadloaf tipi ise benzer verim

sunmasına rağmen dalgalılık değerinin %2.5 seviyesine çıkması nedeniyle ikinci planda kalmıştır. IPM yapıları arasında ise Double-V yapısı %91.6 verim ve %0.64 moment dalgalılığı ile öne çıkmıştır.

Spoke tipi rotor daha yüksek çıkış gücü üretmiş olsa da moment dalgalılığının %2.9 seviyesine çıkması ve toplam kayıpların artması, bu tasarımın tercih edilmesini sınırlandırmıştır. Double-U yapısı ise düşük güç faktörü (0.79) ve yüksek kayıplarıyla diğer seçeneklere göre daha zayıf performans göstermiştir. Bu sonuçlar, SPM tasarımlarının yüksek verim ve güç faktörü avantajına, IPM tasarımlarının ise düşük moment dalgalılığı ve relüktans moment katkısına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Böylece optimizasyon çalışmaları için Surface Radial (SPM) ve Double-V (IPM) topolojileri temel tasarım adayları olarak seçilmiştir.

6. OptiSLang ile Entegre-PMSM E-Motor Optimizasyonu

Entegre-PMSM motorun optimizasyon süreci, Motor-CAD ↔ optiSLang Integrated Export iş akışı kullanılarak yapılmıştır. Söz konusu yöntem, elektromanyetik tasarım modelleri ile çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının bütünleşik ve otomatik bir şekilde çalışmasına olanak sağlamakta olup iş akışı genel şeması Şekil 15’de verilmektedir.



Şekil 15: Optimizasyon iş akışının genel şeması

Motor geometrisi Motor-CAD ortamında ratio-mode prensibiyle parametrik hale getirilerek geometrik oranların korunarak fiziksel tutarlılık sağlanmıştır. Optimizasyon için seçilen tasarım değişkenleri arasında istif uzunluğu, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs V-açısı, oluk derinliği ve diş kalınlığı yer alınıp, tanımlanan sınırlamalar (constraints - moment ve güç gereksinimleri, maksimum mekanik gerilme limitleri ve termal sınırlar) ile birlikte optiSLang’e aktarılmıştır. Hedef fonksiyonlar toplam kayıpların en aza indirgenmesi, aktif malzeme ağırlığının azaltılması, moment dalgalılığının minimize edilmesi olarak tanımlanmış, ek olarak moment ve güç parametrelerinin belirlenen sınırlar içerisinde kalması sağlanmıştır. Böylece “Integrated Export” yaklaşımı, sonlu elemanlar analiz ortamı ile optimizasyon platformu arasında kesintisiz veri akışı ve tutarlılık elde edilmesine imkan tanımıştır.

Optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenleri ve aralıkları, amaç fonksiyonları ve uygulanan kısıtlar Tablo 6’da

ayrıntılı olarak verilmektedir. OptiSLang ortamına aktarılan tüm geometrik parametrelerin değişim aralıkları, sistem gereksinimlerinden türetilen kısıtlar ve çok amaçlı optimizasyon kapsamında tanımlanan performans hedefleri sunulmuştur. Seçilen değişkenler Motor-CAD’de parametrik tanımlanmış olup, istif uzunluğu, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs V-açısı, oluk derinliği ve diş genişliği gibi elektromanyetik performansı doğrudan etkileyen kritik boyutsal parametreleri kapsamaktadır. Buna ek olarak, moment ve güç gereksinimleri, mekanik dayanım sınırları, termal güvenlik limitleri, akım yoğunluğu ve harmonik içerik gibi zorunlu çalışma kriterleri optimizasyonun kısıtları olarak tanımlanmıştır. Çok amaçlı optimizasyon hedefleri ise toplam kayıpların minimize edilmesi, moment dalgalılığının azaltılması, mıknatıs kütlelerinin düşürülmesi ve 4.5 kW çalışma noktasında verimin maksimize edilmesi şeklinde belirlenmiştir. Bu yapı sayesinde OptiSLang, tasarım alanını geniş kapsamlı bir arama stratejisi ile tarayarak hem elektromanyetik performans hem de malzeme/üretim maliyeti açısından en iyi tasarım çözümleri elde edebilmiştir.

Optimizasyon akışının ikinci aşamasında duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu adımda, tasarım değişkenleri ile performans çıktıları arasındaki ilişkilerin ortaya konulabilmesi için “Advanced Latin Hypercube Sampling (ALHS)” yöntemi kullanılmış ve Motor-CAD üzerinde yaklaşık yüz farklı tasarım noktası değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar optiSLang ortamında işlenerek, değişkenlerin sistem yanıtları üzerindeki etkileri “Coefficient of Importance (CoI)” değerleriyle nicel olarak ifade edilmiştir. Paralel olarak, tahmin modellerinin doğruluk seviyesini değerlendirmek amacıyla “Coefficient of Prognosis (CoP)” analizi yapılmış; yüksek CoP değerleri, seçilen değişkenlerin motor verimi, moment dalgalılığı ve kayıp dağılımları üzerinde güçlü belirleyiciliğe sahip olduğunu göstermiştir. Bu analizler sonucunda oluşturulan “Meta-model of Optimal Prognosis (MoP)”, gerçek FEM çözümlerine yakın doğrulukla yanıt üretebilen bir yaklaşım modeli olarak devreye alınmış ve sonraki optimizasyon aşamalarında kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Üçüncü aşamada, oluşturulan MoP üzerinde çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte optiSLang, “Evolutionary Algorithm (EA)” tabanlı arama yöntemleri kullanarak geniş bir tasarım uzayında binlerce sanal çözüm üretmiş ve bu çözümler arasından “Pareto front” çıkarılmıştır. Böylece, birbirleriyle çelişen hedefler olan toplam kayıpların en aza indirgenmesi ve aktif malzeme ağırlığının azaltılması arasında denge kuran tasarımlar elde edilmiştir. Optimizasyonun yönlendirilmesinde, duyarlılık analizi sonuçları referans alınmış; yüksek CoI değerlerine sahip değişkenlerin optimizasyon çıktıları üzerindeki etkisi detaylı biçimde incelenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde yalnızca verim ve moment dalgalılığı açısından değil, aynı zamanda malzeme kullanımının etkinliği ve kayıp dağılımı bakımından da iyileştirilmiş tasarım adayları belirlenmiştir.

Optimizasyon sürecinin son aşamasını doğrulama oluşturmaktadır. Bu aşamada, Pareto front üzerinde seçilen tasarım noktaları Motor-CAD ortamında yeniden çözülerek MoP tahminleri ile tam FEM sonuçları karşılaştırılmıştır. Doğrulama çalışmaları sonucunda, toplam kayıplarda tahmin ile gerçek değerler arasındaki farkların %0.5–1.5 aralığında, verim tahminlerindeki sapmaların ise <%0.1 seviyesinde kaldığı görülmüştür. Söz konusu süreç yalnızca Double-V için değil, aynı zamanda Surface Radial ve concentric-wound Surface Radial topolojileri için de uygulanmış ve her üç motor tipinde de MoP modelleri güvenilir şekilde doğrulanmıştır.

Tablo 6: Optimize edilmiş entegre PMSM E-motor sonuçları

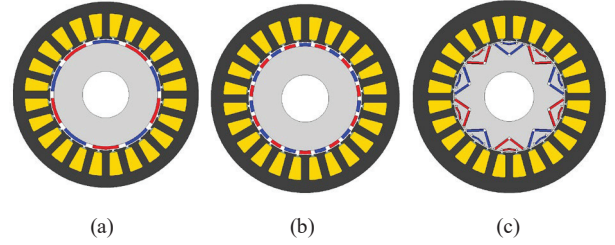
Kategori	İster / Parametre	Arahk / Limit / Hedef
Amaç fonksiyonları	Toplam kayıpların azaltılması	< %6
	Moment dalgalılığının azaltılması	< %1 hedefi (ideal < %0.1)
	Mıknatıs kütlesinin azaltılması	≤ 190 g başlangıç referansı
	Nominal çalışma veriminin artırılması	≥ %94 @ 4.5 kW
Optimize Edilen Boyutsal Parametreler	İstif uzunluğu (l _i)	45–70 mm
	Mıknatıs kalınlığı (t _{PM})	1.5–3.0 mm
	Mıknatıs V-açısı (θ _V)	100°–180°
	Oluk derinliği (h _s)	15–23 mm
	Diş genişliği (b _t)	4–8 mm
Kısıtlar	Nominal moment	≥ 17.2 Nm
	Tepe moment	≥ 34 Nm
	Nominal güç	≥ 4.5 kW @ 2500 rpm
	Tepe güç	≥ 9 kW
	Rotor mekanik gerilmesi	< 400 MPa (M235-35A sınırı)
	Mıknatıs sıcaklığı	< 150 °C (N42UH demanyetizasyon sınırı)
	Sargı sıcaklığı	< 180 °C (H-sınıfı termal sınır)
	Akım yoğunluğu	≤ 5 A/mm ²
	İtiş modu güç faktörü	PF ≥ 0.9
	Zıt-EMK THD	< %10 (hedef < %1)

7. HEA için Optimize Edilmiş Entegre PMSM E-Motor Modeli

Optimizasyon sürecinin tamamlanmasının ardından üç farklı rotor topolojisi için nihai tasarımlar elde edilmiştir. Bunlar; Surface Radial (SPM), Double-V Skewed (IPM) ve concentric-wound Surface Radial (SPM) yapılarıdır. Yapılan çok amaçlı optimizasyon sonucunda her üç yapı da 4.5 kW çıkış gücü hedefini karşılamış, ancak verim, moment dalgalılığı, güç faktörü ve kayıp dağılımları açısından farklı performans profilleri ortaya koymuştur. Surface Radial (SPM) tasarımı %94.6 verim, %0.038 moment dalgalılığı ve 0.99 güç faktörü ile öne çıkmış; Double-V Skewed (IPM) yapı %94.9 ile en yüksek nominal verimi sunarken moment dalgalılığı %0.34 seviyesinde kalmıştır. Concentric-wound Surface Radial (SPM) ise %92.5 verim ve %0.034 moment dalgalılığı değerleri ile dikkat çekmiş, ancak güç faktörünün 0.90 seviyesinde olması nedeniyle evirici uyumluluğu açısından diğer iki topolojiye göre daha sınırlı kalmıştır. Elde edilen optimize motor geometrileri Şekil 16'de verilmiş, çıktılarının ayrıntılı karşılaştırması Tablo 7'de sunulmuştur.

Optimize edilen üç motor tipinin kayıp dağılımları ve aktif malzeme miktarları incelendiğinde belirgin farklılıklar ortaya

çıkılmaktadır. Surface Radial (SPM) tasarımında toplam kayıplar 257.2 W, bakır kayıpları 116.8 W ve stator demir kayıpları ise 103.1 W olarak hesaplanmıştır. Bu yapı, düşük moment dalgalılığı ve yüksek güç faktörü ile birlikte kayıp bileşenleri açısından dengeli bir profil sunmuştur. Double-V Skewed (IPM) topolojisi ise 242 W ile en düşük toplam kayıpları üretmiş, özellikle stator demir kayıplarını 74.3 W seviyesine düşürerek avantaj sağlamıştır; buna karşın bakır kayıpları 126.8 W ile daha yüksek kalmıştır. Concentric-wound Surface Radial (SPM) tasarımında toplam kayıplar 364.2 W'a yükselmiş, stator demir kayıpları 171.3 W seviyesine çıkmış ve bu durum verim değerini sınırlamıştır. Aktif malzeme kütlesi açısından ise tüm yapılar benzer değerlerde bulunmuş, 7.0–7.5 kg aralığında seyreden toplam aktif malzeme kullanımı üretim maliyetleri açısından kayda değer bir farklılık oluşturmamıştır. Optimize edilmiş motor geometrilerinin manyetik akı dağılımları Şekil 17'de, moment dalgalılığını gösteren grafikler ise Şekil 18'de verilmiştir.



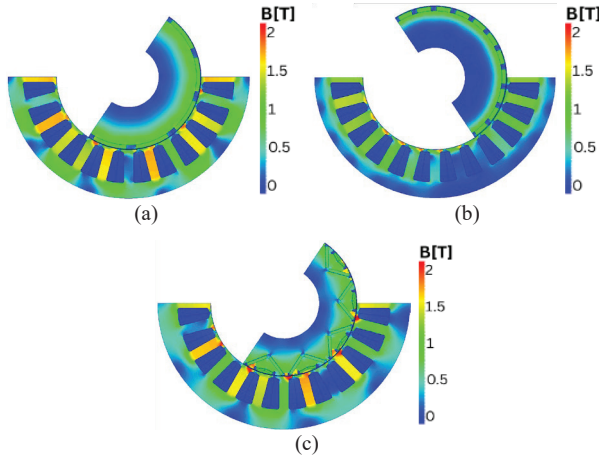
Şekil 16: Optimize edilmiş motor geometrileri: (a) Dağıtılmış Sargılı Surface Radial (SPM), (b) Konsantrik Sargılı Surface Radial (SPM), (c) Dağıtılmış Sargılı Double-V Skewed (IPM)

Tablo 7: Optimize edilmiş entegre PMSM E-motor sonuçları

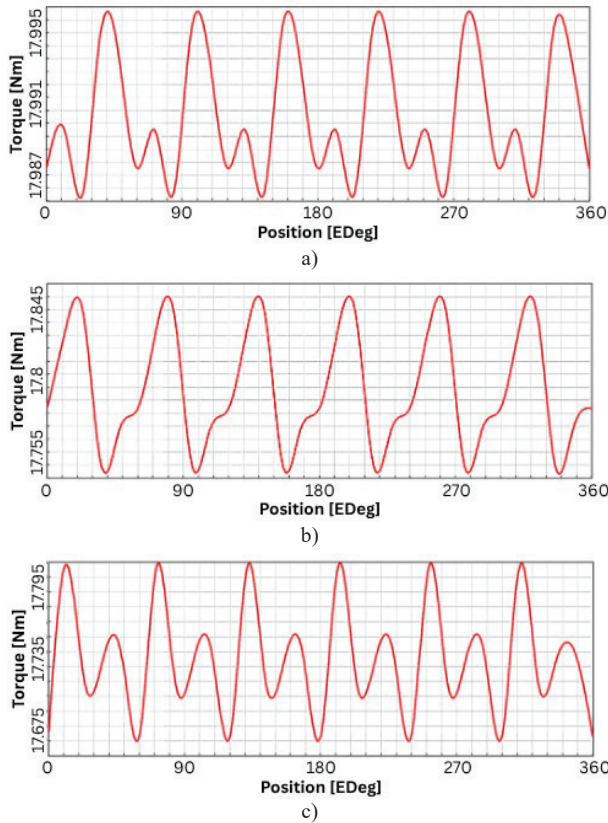
Topoloji	P _{out} [W]	Verim [%]	Moment Dalgalılığı [%]	PF	P _{loss} [W]
Surface Radial (SPM)	4500	94.61	0.0381	0.989	257.2
Double-V Skewed (IPM)	4500	94.92	0.3396	0.973	242.0
Concentric-Wound Surface Radial	4500	92.52	0.0340	0.898	364.2

Optimizasyon sürecinde rotor geometrisine ek olarak manyetik kayıpları azaltmaya ve moment titreşimini iyileştirmeye yönelik yöntemler de uygulanmıştır. Double-V Skewed topolojisinde rotor skewing kullanılmış, bu sayede vuruntu momenti yaklaşık %35 oranında azaltılmış ve moment dalgalılığı %0.34 seviyesinde tutulabilmektedir. Buna ek olarak, mıknatıs kayıplarını sınırlamak için NdFeB mıknatıslar üzerinde dikey segmentasyon uygulanmış, segmentasyon sayesinde mıknatıs eddy akım kayıpları yaklaşık %20 oranında düşürülmüş ve maksimum mıknatıs sıcaklıkları 15–20 °C daha düşük seviyelere çekilmiştir. Surface Radial ve concentric-wound Surface Radial tasarımlarında ise yalnızca mıknatıs segmentasyonu uygulanmıştır. Özellikle concentric-wound Surface Radial yapıda elektriksel frekansın daha yüksek olması nedeniyle segmentasyonun etkisi çok daha belirgin olmuş; mıknatıs kayıplarının %45'e varan oranda azaldığı ve termal sınırların güvenli seviyede korunduğu görülmüştür. Surface Radial tasarımında segmentasyonun katkısı daha sınırlı olmakla birlikte, yüksek hız bölgelerinde mıknatıs kayıplarının

dengelemesine ve verim değerlerinin korunmasına katkı sağlamıştır. Bu iyileştirmeler sonucunda, rotor skew ve mıknatıs segmentasyon uygulamaları motorların yalnızca elektromanyetik verimini değil, aynı zamanda termal dayanıklılığını ve uzun vadeli güvenilirliğini de artırmıştır.



Şekil 17: Optimize edilmiş motor geometrilerine ait manyetik akı dağılımları: (a) Dağıtılmış Sargılı Surface Radial (b) Konsantrik Sargılı Surface Radial (c) Dağıtılmış Sargılı Double-V Skewed (IPM)



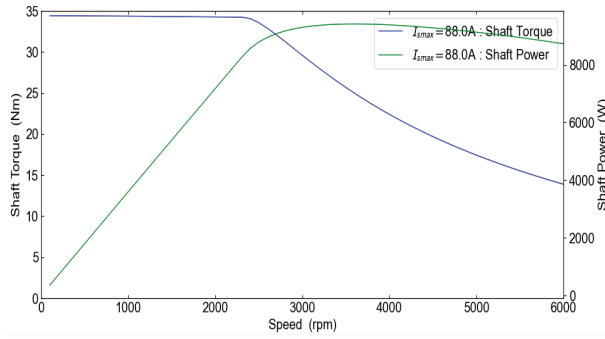
Şekil 18: Optimize edilmiş motor geometrilerinin moment grafikleri: (a) Dağıtılmış Sargılı Surface Radial (SPM), (b) Konsantrik Sargılı Surface Radial (SPM), (c) Dağıtılmış Sargılı Double-V Skewed (IPM)

Üç motor tipinin optimizasyon sonrası performansları yalnızca elektromanyetik çıktılar açısından değil, aynı zamanda uygulama senaryoları bakımından da değerlendirildiğinde farklı öncelikler ortaya çıkmaktadır. Surface Radial (SPM) yapısı, yüksek güç faktörü (≈ 0.99) ve düşük moment dalgalılığı ile özellikle evirici uyumluluğu ve sürtüş konforu açısından avantaj sağlamaktadır. Double-V Skewed (IPM), relüktans moment katkısı ve rotor skew sayesinde hem yüksek verim (%94.9) hem de düşük vuruş momenti ile öne çıkmış; ayrıca d-q endüktans farkından kaynaklanan alan zayıflatma kabiliyeti sayesinde geniş hız-moment aralığında çalışmaktadır. Bu nedenle IPM motor yapısı, geniş bir hız aralığında moment ihtiyacının olduğu senaryolar için güçlü bir adaydır. Concentric-wound Surface Radial (SPM) ise elektromanyetik performans bakımından sınırlı avantajlara sahip olsa da sargı yerleşimi ve bobin formasyonu açısından otomasyona daha uygun olmasıyla üretim perspektifinden öne çıkmaktadır. Bu tasarım, özellikle yüksek adetli seri üretimlerde bobin sarım süresini kısaltarak üretim maliyetlerini düşürme potansiyeli taşımaktadır.

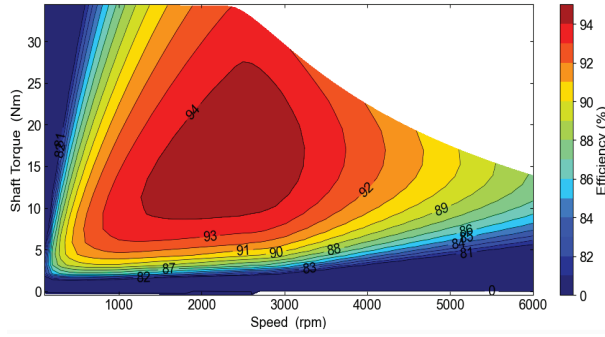
Bu üç tasarım arasında özellikle Double-V Skewed (IPM) mimarisi hem elektromanyetik hem de sistem-seviyesi performans çıktıları dikkate alındığında belirgin biçimde öne çıkmıştır. Bunun temel nedenleri; (i) relüktans moment katkısı sayesinde geniş bir hız aralığında daha yüksek moment üretimi, (ii) rotor skewing nedeniyle düşük vuruş momenti ve iyileştirilmiş NVH karakteristiği, (iii) segmentasyonlu mıknatıs yapısı sayesinde yüksek hız bölgesinde düşen mıknatıs kayıpları (iv) d-q eksenli çıkıklık farkı sayesinde gelişmiş alan zayıflatma kabiliyetidir. Şekil 19'da verilen moment-hız ve güç-hız karakteristikleri, Double-V Skewed yapısının 2500–6000 rpm bandında sabit gücü koruyarak 9 kW seviyesine sorunsuz şekilde çıkabildiğini ve moment eğrisinin yüksek hızlarda istekleri karşılayacak şekilde kaldığını göstermektedir. Şekil 19'da verilen verim haritası, IPM topolojisinin 1500–3500 rpm aralığında %94–95 bandında geniş bir yüksek-verim bölgesi oluşturduğunu, özellikle 10–25 Nm moment aralığında verimin sürekli olarak %94'ün üzerinde kaldığını ortaya koymaktadır. Bu geniş yüksek-verimli çalışma bölgesi, HEA uygulamalarının tipik hız-yük profilini doğrudan karşılamakta olup, IPM yapısını hem enerji tüketimi hem de termal performans açısından diğer iki topolojiye göre daha avantajlı bir noktaya taşımaktadır. Sonuç olarak Double-V Skewed (IPM), geniş hız bölgesinde sabit güç gerektiren HEA uygulamalarında, optimize edilmiş verim haritası ve geniş hız aralıklarında moment üretimi ile uygulama açısından en güçlü aday olarak değerlendirilmektedir.

Optimize edilmiş nihai IPM motor modelinin geometrik boyutları ve elektromanyetik tasarımı belirleyen kritik parametreler Tablo 8'de sunulmuştur. Bu parametreler Motor-CAD/Maxwell ortamında optiSLang ile gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonunda elde edilen final tasarım değerleridir. Optimize edilen IPM motor tasarımının mekanik dayanımı, %20 aşırı hız koşullarında (7200 rpm) rotor üzerinde gerçekleştirilen yapısal analizlerle doğrulanmıştır. Motor-CAD/ANSYS Mechanical ortamında elde edilen sonuçlara göre, rotor sac malzemesinin akma dayanımı 460 MPa olup maksimum Von-Mises gerilmesi 227.6 MPa değerinde olmuştur. Bu sonuç, rotor laminasyonu için akma dayanımı oranının 0.4948, güvenlik katsayısının ise 2.02 seviyesinde olduğunu göstermekte ve optimize IPM motor geometrisinin yüksek hızlı çalışma koşullarında güvenli olduğunu

doğrulamaktadır. Von-Mises gerilme dağılımı Şekil 20’de verilmekte olup şekilde gerilmelerin rotor köprü bölgelerinde lokalize olduğu, sac gövdesinin ise düşük gerilme seviyelerinde kaldığı görülmektedir.



a)

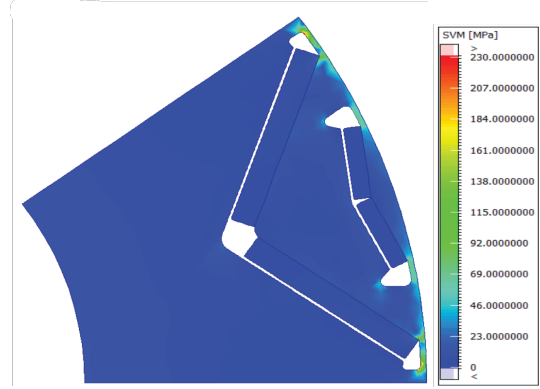


b)

Şekil 19: (a) IPM motor moment-hız ve güç-hız karakteristikleri eğrisi (b) IPM motor verim haritası

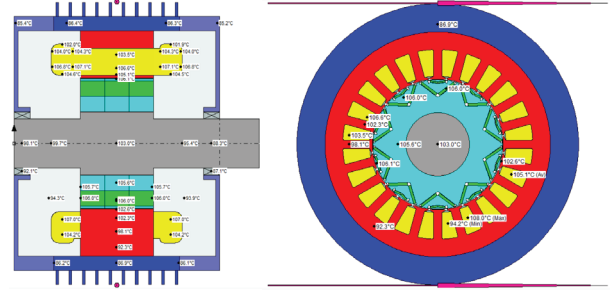
Tablo 8: Optimize edilmiş entegre IPM e-motor boyutları

Parametre	Değer	Birim
Stator dış çapı	160	mm
Stator iç çapı	92.96	mm
Oluk sayısı	24	—
Dış genişliği	6.20	mm
Oluk derinliği	21.02	mm
Hava aralığı	0.50	mm
Rotor çapı	91.96	mm
Kutup sayısı	10	—
Mıknatıs tabaka sayısı	2	—
1. mıknatıs kalınlığı	1.7	mm
1. mıknatıs V-açısı	105	°
1. mıknatıs genişliği	13.41	mm
2. mıknatıs kalınlığı	1.2	mm
2. mıknatıs V-açısı	160	°
2. mıknatıs genişliği	5.31	mm
Şaft çapı	45	mm

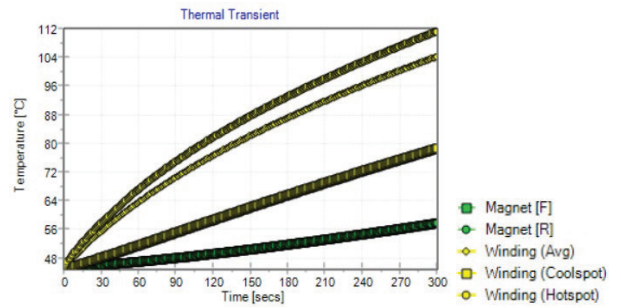


Şekil 20: Optimize edilmiş Double-V IPM rotorunun 7200 rpm’de Von-Mises gerilme dağılımı

IPM motor tasarımının termal performansını, gövdeye 3 m/s hızında, radyal yönde dik uygulanan zorlanmış hava soğutması altında değerlendirilmiştir. Analizler nominal çalışma noktası olan 2500 rpm – 17 Nm (4.5 kW) sürekli çalışma koşulu esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Sürekli-hal durumunda sarı sonlarında elde edilen maksimum sıcaklık 108 °C olup bu değer, H-sınıfı izolasyon (180 °C) ve N42UH mıknatısların 150 °C demanyetizasyon sınırı açısından güvenli çalışma aralığının oldukça altındadır. Eksenel ve radyal yönlerdeki sıcaklık dağılımı Şekil 21’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, rotor bölgesinin iyi soğutulduğu, stator dış uçlarında ise manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak lokal sıcaklık artışları olduğu görülmektedir; ancak bu bölgelerdeki sıcaklıklar da termal sınırların oldukça altındadır.



Şekil 21: Optimize IPM motor tasarımının radyal ve eksenel sıcaklık dağılımları



Şekil 22: Optimize IPM motor tasarımının geçici-hal sıcaklık yükselme eğrisi (2500 rpm – 34 Nm, 45 °C ortam)

Maksimum güç koşulları ise 2500 rpm – 34 Nm (≈ 9 kW) yük altında, 45 °C ortam sıcaklığında 300 saniyelik (5 dakika) bir

geçici-hal termal analiz ile değerlendirilmiştir. Bu koşullarda motor sıcaklığı zamanla yükselmiş ve en kritik noktada Şekil 23’de görüldüğü gibi 110 °C değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, optimize edilen IPM motor tasarımının maksimum güç modunu 5 dakikadan daha uzun süre boyunca güvenle sağlayabildiğini, termal olarak sınırlayıcı bir davranış göstermediğini ve HEA sürüş çevrimlerinin gerektirdiği tepe güç gereksinimlerini karşılayabildiğini ortaya koymaktadır.

Altı-fazlı motor yapısı, elektriksel olarak kaydırılmış iki üç-fazlı setten oluştuğundan, şarj modunda faz akımlarının vektörel toplamı dengelenmekte ve shaft üzerinde net moment oluşumu önlenmektedir. Bu yapı akımın fazlar arasında eşit paylaştırılarak yarıiletken elemanlardaki akım stresini ve harmonik bozunumları azaltmaktadır. Bu yönüyle optimize edilen sürekli mıknatıslı motor tasarımları, entegre şarj sistemi bakımından hem kompaktlık hem de güç yoğunluğu açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

8. Sonuçlar

Bu çalışmada, hafif elektrikli araç uygulamaları için entegre şarj fonksiyonuna sahip 6-fazlı PMSM’nin elektromanyetik tasarımı, parametrik optimizasyonu ve performans değerlendirmesi bütüncül bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Farklı faz sayıları, oluk/kutup kombinasyonları, rotor topolojileri ve malzeme seçenekleri sistematik olarak karşılaştırılmış; elde edilen bulgular, özellikle 6-fazlı yapının itiş ve şarj modlarını birlikte destekleyen sistemlerde önemli performans üstünlükleri sunduğunu ortaya koymuştur. Analitik tasarım ve sonlu elemanlar analizleri, üç-fazlı yapıya kıyasla 6-fazlı topolojinin moment dalgalılığı, güç faktörü ve kayıplar açısından belirgin avantaj sağladığını göstermiştir. 24/10 kombinasyonunda üç-fazlı yapı %6.31 moment dalgalılığı üretirken, 6-fazlı eşleniği bu değeri %1.55 seviyesine düşürmüştür ve güç faktörü 0.882’den 0.908’e yükselmiştir. Bu iyileşme, hem evirici boyutlandırması hem de entegre şarj sırasında faz akımlarının düzgün dağılımı açısından önemlidir. Mıknatıs segmentasyonu ve rotor skewing gibi tekniklerin uygulanmasıyla vuruğu momenti %35’e, mıknatıs eddy akım kayıpları ise %40–45 düzeyinde azaltılmıştır. Bu iyileştirmeler termal yükün düşmesine ve mıknatıs sıcaklıklarının güvenli çalışma aralıklarında tutulmasına katkı sağlamıştır.

Çok amaçlı optimizasyon çalışmaları sonucunda üç nihai entegre motor tasarımı elde edilmiştir: Surface Radial (SPM) modeli %94.6 verim ve 0.99 güç faktörü ile evirici uyumluluğu ve düşük harmonik içerik bakımından avantaj sağlamıştır. Relüktans moment katkısına sahip Double-V Skewed (IPM) yapısı ise %94.9 verime ulaşarak üç tasarım arasında en yüksek nominal verimi sunmuş; d–q eksen çıkıklık farkından kaynaklanan geniş alan zayıflatma kabiliyeti sayesinde 2500–6000 rpm bandında sabit güç bölgesini koruyabilmiştir. Bu değerler literatürde raporlanan IPM tabanlı entegre şarj çözümleri (%93–95 verim, sınırlı alan zayıflatma aralığı) ile kıyaslandığında, tasarımın güncel çalışmalara göre rekabetçi bir performans vermektedir. Üç tasarım arasında aktif malzeme ağırlığı yaklaşık %12 oranında azaltılmış, toplam kayıplar ise optimize edilen IPM motorda %41.4’e varan seviyelerde düşürülmüştür. Bu bulgular, entegre PMSM’nin çift yönlü güç akışı uygunluk, verim, kompaktlık ve maliyet ve açısından önemli iyileştirmeler sunmaktadır.

Literatürde IPM tabanlı entegre şarj çözümleri ve çok-fazlı entegre OBC yaklaşımlarında nominal çalışma noktasında raporlanan verim değerlerinin genellikle %93–95 aralığında, moment dalgalılığı değerlerinin ise topolojiye bağlı olarak yaklaşık %0.2–2 bandında değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada optimize edilen Double-V Skewed IPM modelinin 4.5 kW çalışma noktasında %94.92 verim ve %0.34 moment dalgalılığı değerine ulaşması, kayıp minimizasyonu ve NVH açısından literatürde raporlanan sonuçlarla rekabetçi bir performans sunmaktadır. Benzer şekilde Surface Radial SPM modelinde elde edilen %94.61 verim ve %0.038 moment dalgalılığı, özellikle düşük titreşim gerektiren HEA uygulamaları için literatürde tipik olarak raporlanan değerlere göre daha düzgün bir moment profiline işaret etmektedir.

Çalışma kapsamında, entegre şarj modunda stator sargılarının filtre/kuplaj elemanı olarak kullanılmasına uygun bir PMSM tasarımını elektromanyetik optimizasyon perspektifinden ele almış olup, literatürde çoğu zaman ihmal edilen elektromanyetik–sistem entegrasyonu etkileşimi açık biçimde ortaya koyulmuştur. Bununla birlikte bu çalışma bazı sınırlılıklar içermektedir. Entegre şarj moduna ilişkin nümerik analizler tamamlanmış olmakla birlikte, yüksek akı yoğunluklu şarj senaryolarında ortaya çıkabilecek manyetik doyma, AC kayıplar ve sıcaklık dağılımı etkilerinin deneysel doğrulaması bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca altı fazlı makineler özgü faz arızası (açık devre/kısa devre) senaryolarının itiş ve şarj modlarında birlikte ele alınması, gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Optimizasyon süreci yalnızca WLTC Class-1 sürüş çevrimi altında yürütüldüğünden, farklı sürüş profilleri (şehir içi, eğimli yol, yüksek hız) ve şarj güç seviyeleri için çok senaryolu optimizasyon yaklaşımlarının tasarımın genellenebilirliğini artıracak değerlendirilmektedir.

9. Sembol Listesi

Genel elektromanyetik büyüklükler;

Sembol	Açıklama	Birim
P	Çıkış gücü	W
P _{in}	Giriş gücü	W
S _{in}	Görünür güç	VA
η	Verim	%
T _e	Elektromanyetik moment	Nm
T _{avg}	Ortalama moment	Nm
T _{max} , T _{min}	Maksimum ve minimum moment	Nm
T _{ripple}	Normalize moment dalgalılığı	%
B _{av}	Ortalama hava aralığı akı yoğunluğu	T
λ _{md}	Mıknatıs akı bağlantısı	Wb
φ _p	Kutup başına manyetik akı	Wb
f	Elektriksel frekans	Hz
THD	Toplam harmonik bozunumu	%

Makine geometrisi ve boyutlar;

Sembol	Açıklama	Birim
D_r	Rotor çapı	mm
D_s	Stator dış çapı	mm
l_i	İstif uzunluğu	mm
g	Hava aralığı	mm
g_{eff}	Efektif hava aralığı	mm
b_t	Dış genişliği	mm
h_s	Oluk derinliği	mm
t_{PM}	Mıknatıs kalınlığı	mm
θ_V	Mıknatıs V-açısı	°
N_s	Oluk sayısı	–
p	Kutup sayısı	–

Elektriksel parametreler ve sargı büyüklükleri;

Sembol	Açıklama	Birim
I_{ph}	Faz akımı (RMS)	A
I_l	Faz terminal akımı	A
N_{tph}	Faz başına sarım sayısı	tur
N_{tc}	İletken sayısı	–
N_{cph}	Faz başına paralel yol sayısı	–
E_{ph}	Faz-EMK (RMS)	V
ac	Elektriksel yükleme	kA/m
k_w	Sargı faktörü	–
k_d	Dağılım katsayısı	–
k_p	Kısa adım katsayısı	–
k_{skew}	Eğiklik katsayısı	–

d–q eksen büyüklükleri ve IPM/SPM parametreleri;

Sembol	Açıklama	Birim
i_d, i_q	d- ve q-eksen akımları	A
L_d, L_q	d- ve q-eksen endüktansları	H
$\Delta L = L_q - L_d$	Çıkıklık farkı	H

Kayıplar ve termal büyüklükler;

Sembol	Açıklama	Birim
P_{cu}	Bakır kaybı	W
P_{Fe}	Demir kaybı	W
P_{PM}	Mıknatıs kaybı	W
P_{loss}	Toplam kayıp	W
J	Akım yoğunluğu	A/mm ²
T_{PM}	Mıknatıs sıcaklığı	°C
T_{coil}	Sargı sıcaklığı	°C

Araç dinamiği ve mekanik büyüklükler;

Sembol	Açıklama	Birim
m	Araç kütlesi	kg
v	Araç hızı	m/s
v_o	Rüzgar hızı	m/s
a	İvme	m/s ²
α	Yol eğim açısı	°
A_f	Ön yüzey alanı	m ²
ρ	Hava yoğunluğu	kg/m ³
c_d	Aerodinamik sürüklenme katsayısı	–
c_t	Yuvarlanma direnç katsayısı	–
F_w	Tekerlek sürtünme kuvveti	N
F_a	Aerodinamik direnç	N
F_{ac}	İvmelenme kuvveti	N
F_s	Tırmanma kuvveti	N

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen “TÜBİTAK 1002 - 125E129” kodlu “Hafif E-Mobilité Uygulamalarında Entegre Şarj Sistemi için Yüksek Verimli ve Güç Yoğunluklu Çok-Fazlı E-Motor Tasarımı ve Geliştirilmesi” başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Destek için TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

10. Kaynaklar

- [1] Emadi, A., Lee, Y., Rajashekara, K., “Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric and plug-in hybrid electric vehicles”, IEEE Trans. Ind. Electron., 55(6), 2237–2245, 2008.n
- [2] Yılmaz, M., Krein, P. T., “Review of integrated charging methods for plug-in electric and hybrid vehicles”, IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES, 346-351, 2012.
- [3] Hagbini, S., Khan, K., Lundmark, S., Alakula, M., Carlson, O., Leksell, M., Wallmark, O., “Integrated Chargers for EV’s and PHEV’s: Examples and New Solutions”, in Proc. ICEM, 2010.
- [4] Valente, M., Wijekoon, T., Freijedo, F., Pescetto, P., Pellegrino, G., Bojoi, R., “Integrated on-board EV Battery Chargers: New perspectives and challenges for Safety Improvement,” 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 349-356, 2021.
- [5] Sam, C. A., Jegathesan, V., “Bidirectional integrated on-board chargers for Electric Vehicles—a review”, Springer Sādhana, 46(26), 1-14, 2021.
- [6] Bak Y., Kang, H. S., “Control Methods for performance improvement of an integrated on-board battery charger in Hybrid Electric Vehicles”, MDPI Electronics, 10(20), 2506, 2021.
- [7] Yılmaz, M., Krein, P. T., “Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles”, IEEE Trans. Power Electron., 28(5), 2151-2169, 2013.

- [8] Hagbabin, S., Lundmark, S., Alakula, M., Carlson, O., "Grid-connected integrated battery chargers in vehicle applications: Review and new solution", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60(2), 459–473, 2013.
- [9] Foti, S., Testa, A., Scelba, G., De Caro, S., Tornello, L. D., "A V2G integrated battery charger based on an open end winding multilevel configuration", *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 1, 216–226, 2020.
- [10] Wang, Z., Zhang, Y., You, S., Xiao, H., Cheng, M., "An integrated power conversion system for electric traction and V2G operation in electric vehicles with a small film capacitor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(5), 5066–5077, 2020.
- [11] Jaman, S., Chakraborty, S., Tran, D. D., Geury, T., El Baghdadi, M., Hegazy, O., "Review on integrated on-board Charger-traction systems: V2G topologies, control approaches, standards and power density state-of-the-art for electric vehicle", *Energies*, 15(15), 5376, 2022.
- [12] Lei, Y., Du, G., Li, T., Yang, Z., "An electric vehicle integrated battery charger with high utilization rate of the three-phase open-winding permanent-magnet-synchronous-motor", *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 51(3), 1417–1439, 2022.
- [13] Bhule D., Kaarthik, R. S., "A Grid Voltage Sensor-less Control Scheme for Single-Phase Integrated Battery Charger", *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 2023.
- [14] Lacroix, S., Laboure, E., Hilaiet, M., "An Integrated Fast Battery Charger for Electric Vehicle", in *Proc. IEEE VPPC*, 2010.
- [15] Solero, L., "Nonconventional On-Board Charger for Electric Vehicle Propulsion Batteries", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 50(1), 144–149, 2001.
- [16] De-Sousa, L., Bouchez, B., "Combined Electric Device for Powering and Charging", *International Patent WO 2010/057892 A1*, 2010.
- [17] Kempton, W., Tomic, J., "V2G power implementations: from stabilizing the grid to supporting large scale renewable energy", *Power Sources*, 144(1), 268–279, 2005.
- [18] Lee, Y., Khaligh, A. ve Emadi, A., "Advanced integrated bi-directional AC/DC and DC/DC converter for plug-in hybrid electric vehicles", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 58(3), 3970–3980, 2009.
- [19] Thimmesch, D., "An SCR Inverter with an Integral Battery Charger for Electric Vehicles", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 21(4), 1023–1029, 1985.
- [20] Rippel, W. E., "Integrated traction inverter and battery charger apparatus", *US Patent 4920475*, 1990.
- [21] Rippel, W. E., Cocconi, A. G., "Integrated motor drive and recharge system", *US Patent 5099186*, 1992.
- [22] Sousa, T. J., Pedrosa, D., Monteiro, V., Afonso, J. L., "A review on Integrated Battery Chargers for Electric vehicles", *Energies*, 15(8), 2756, 2022.
- [23] Cordeiro, A., Pires, V. F., Foito, D., Silva, J. F., Silva, J. F., "A three-phase on-board Integrated Battery Charger for EVs using a drive based on triple inverters", *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2022.
- [24] Metwly, M. Y., Abdel-Majeed, M. S., Abdel-Khalik, A. S., Hamdy, R. A., Hamad, M. S., Ahmed, S., "A review of integrated on-board EV Battery Chargers: Advanced topologies, recent developments and optimal selection of FSCW slot/pole combination", *IEEE Access*, 8, 85216–85242, 2020.
- [25] Abdel-Khalik, A. S., Massoud, A., Ahmed, S., "Interior permanent magnet motor-based isolated on-board integrated battery charger for electric vehicles", *IET Electr. Power Appl.*, 12(1), 124–134, 2018.
- [26] Raherimihaja, H. J., Xu, G., Zhang, Q., "Review and Novel Options of Three-Phase Integrated Battery Chargers for EVs", 2020 *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Gijon, Spain, 1–5, 2020.
- [27] Pires, V. F., Cordeiro, A., Foito, D., Silva, J. F., Silva, J. F., "A three-phase on-board Integrated Battery Charger for EVs with six-phase machine and nine-switch converter", 2019 *IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, 2019.
- [28] Bousungnoen, P., Pao-La-Or, P., "A Single-Phase Integrated Battery Charger Simulation Compare On-board Battery Charger with PFC Boost Converter and PSFB DC-DC Converter", 2023 *International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Krabi, Thailand, 2023.
- [29] Woo, D. G., Choe, G. Y., Kim, J. S., Lee, B. K., Hur, J., Kang, G. B., "Comparison of Integrated Battery Chargers for plug-in electric vehicles: Topology and Control", *Proc. IEMDC*, 1294–1299, 2011.
- [30] Pescetto, P., Pellegrino, G., "Integrated Isolated OBC for EVs with 6-phase Traction Motor Drives", *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, 4112–4117, 2020.
- [31] Tang, L., Su, G. J., "A Low-Cost, Digitally-Controlled Charger for Plug-in Hybrid electric Vehicles", *Proc. IEEE ECCE*, 3923–3929, 2009.
- [32] Woo, D. G., Choe, G. Y., Kim, J. S., Lee, B. K., Hur, J., Kang, G. B., "Comparison of Integrated Battery Chargers for plug-in electric vehicles: Topology and Control", *Proc. IEMDC*, 1294–1299, 2011.
- [33] Sharma, S., Aware, M. V., Bhowate, A., "Integrated Battery Charger for EV by Using Three-Phase Induction Motor Stator Windings as Filter", *IEEE Tran. Transportation Electrification*, 6(1), 83–94, 2020.
- [34] Raherimihaja, H. J., Zhang, Q., Na, T., Shao, M., Wang, J., "A three-phase integrated battery charger for EVs based on six-phase open-end winding machine", *IEEE Trans. Power Electronics*, 35(11), 12122–12132, 2020.
- [35] Vidya, V., Kaarthik, R. S., "Modeling and control of an integrated battery charger with split-phase machine", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 57(2), 1588–1597, 2021.
- [36] Sul, S. K., Lee, S. J., "An Integral Battery Charger for Four-wheel Drive Electric Vehicle.", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 31(5), 1096–1099, 1995.
- [37] Lacressonniere, F., Cassoret, B., "Converter used as a battery charger and a motor speed controller in an industrial truck" *Proc. EPE*, 1–7, 2005.
- [38] Subotic, I., Levi, E., Jones, M., Graovac, D., "Multiphase integrated on-board battery chargers for electrical vehicles.", 15th *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013.
- [39] Chang, H. C., Liaw, C. M., "Development of a Compact Switched-Reluctance Motor Drive for EV Propulsion with Voltage-Boosting and PFC Charging Capabilities", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 58(7), 3198–3215, 2009.
- [40] Barnes, M., Pollock, C., "Forward converters for dual voltage switched reluctance motor drives." *IEEE Trans. Power Electronics*, 16(1), 83–91, 2001.

- [41] Hagbhin, S., Alakula, M., Khan, K., Lundmark, S., Leksell, M., Wallmark, O., Carlson, O. "An Integrated Charger for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Based on a Special Interior Permanent Magnet Motor" Proc. IEEE VPPC, 2010.
- [42] Lacroix, S., Laboure, E., Hilairat, M. "An Integrated Fast Battery Charger for Electric Vehicle." Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), 2010.
- [43] Sandulescu, A. P., Meinguet, F., Kestelyn, X., Semail, E., Bruyere, A. "Flux-weakening operation of open-end winding drive integrating a cost-effective high-power charger", IET Electrical Systems in Transportation, 3(1), 10–21, 2013.
- [44] Liu, T. H., Yi, Y. C., Yi, P. H., Chen, J. L. "Integrated battery charger with power factor correction for electric-propulsion systems", IET Electr. Power Appl., 9(3), 229–238, 2015.
- [45] Shi, C., Tang, Y., Khaligh, A. "A Single-Phase Integrated Onboard Battery Charger Using Propulsion System for Plug-in Electric Vehicles", IEEE Trans. Veh. Technol., 66(12), 2017.
- [46] Khan, K., Hagbhin, S., Leksell, M., Wallmark, O. "Design and Performance Analysis of a Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for an Integrated Charger Application", ICEM Konferansı Bildirileri, 1-6, 2010.
- [47] Hagbhin, S., Lundmark, S., Alakula, M., Carlson, O. "An Isolated High-Power Integrated Charger in Electrified Vehicle Applications", IEEE Trans. Veh. Technol., 60(9), 4115-4126, 2011.
- [48] Kong, P., Wang, S., Lee, F. C., Wang, C. "Common-mode EMI study and reduction technique for the interleaved multichannel PFC converter", IEEE Trans. Power Electronics, 23, 2576–2584, 2008.
- [49] Subotic, I., Bodo, N., Levi, E., Dumnicevic, B., Milicevic, D., Katic, V. "Overview of fast on-board integrated battery chargers for electric vehicles based on multiphase machines and power electronics", IET Electric Power Applications, 10(3), 217–229, 2016.
- [50] Zaja, M., Oprea, M., Suarez, C. G. "Electric vehicle battery charging algorithm using PMSM windings and an inverter as an active rectifier", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), 1–6, 2014.
- [51] Dupuy, P. "Electric traction chain for an automobile", US Patent No. US 2011/0187185 A1, 2011.
- [52] Renault. "Renault ZOE: the electric supermini for everyday use", www.media.renault.com, Son erişim tarihi: Eylül, 2025.
- [53] Loudot, S., Briane, B., Ploix, O. "Fast charging device for an electric vehicle" US Patent No. US 2012/0286740 A1, 2013.
- [54] Hong, J., Lee, H., Nam, K. "Charging method for the secondary battery in dual-inverter drive systems for electric vehicles", IEEE Trans. Power Electron., 30(2), 909–921, 2015.
- [55] Subotic, I., Jones, M., Levi, E. "A fast on-board integrated battery charger for four-motor EVs", Proceedings of the Int. Conf. Electrical Machines (ICEM), 2066–2072, 2014.
- [56] Ali, S. Q., Mascarella, D., Joos, G., Tan, L. "Torque elimination for integrated battery charger based on two permanent magnet synchronous motor drives for electric vehicles" IET Electric Power Applications, 11(9), 1627–1635, 2017.
- [57] Woo, D. G., Joo, D. M., Lee, B. K. "On the Feasibility of Integrated Battery Charger Utilizing Traction Motor and Inverter in Plug-In Hybrid Electric Vehicles", IEEE Trans. Power Electronics, 30(12), 2015.
- [58] Hemeida, A., Metwly, M. Y., Abdel-Khalik, A. S., Ahmed, S. "Optimal design of a 12-slot/10-Pole Six-phase SPM machine with different winding layouts for integrated on-board EV Battery charging", Energies, 14(7), 1848, 2021.
- [59] Hagbhin, S., Guillen, I.S. "Integrated motor drive and non-isolated battery charger based on the torque cancelation in the motor", Proc. IEEE Int. Conf. on Power Electron. and Drive Systems PEDS, 824–829, 2013.
- [60] Subotic, I., Bodo, N., Levi, E. "On-board integrated battery charger for EVs using an asymmetrical nine-phase machine", IEEE Trans. Ind. Electron., 62(5), 3285–3295, 2015.
- [61] Subotic, I., Levi, E., Bodo, N. "A Fast On-Board Integrated Battery Charger for EVs Using an Asymmetrical Six-Phase Machine", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), 1-6, 2014.
- [62] Subotic, I., Bodo, N., Levi, E. "An EV drive-train with integrated fast charging capability", IEEE Trans. Power Electron., 31(2), 1461–1471, 2015.
- [63] Subotic, I., Levi, E., Jones, M. "An integrated battery charger for EVs based on an asymmetrical six-phase machine", Proc. IEEE Industrial Electronics Society Conf. IECON, 7242–7247, 2013.
- [64] Subotic, I., Levi, E., Jones, M. "Multiphase integrated on-board battery chargers for electrical vehicles", Proc. European Power Electronics and Applications Conf. EPE-ECCE, 1–10, 2013.
- [65] Subotic, I., Levi, E. "An integrated battery charger for EVs based on a symmetrical six-phase machine", IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics ISIE, 2074–2079, 2014.
- [66] Xiao, Y., Liu, C., Yu, F. "An Effective Charging-Torque Elimination Method for Six-Phase Integrated On-Board EV Chargers," IEEE Trans. on Power Electron., 35(3), 2776-2786, 2020.
- [67] Ullah, Z., Abdel-Khalek, A. S., Ahmed, S. "Integrated Onboard Battery Charger for EVs using Six-Phase IPMSM with Dual Three-phase and Asymmetrical Winding Configurations", IEEE Int. Electric Machines & Drives Conf. (IEMDC), CA, USA, 1-7, 2023.
- [68] Bodo, N., Levi, E., Subotic, I., Espina, J., Empringham, L., Johnson, C. M. "Efficiency Evaluation of Fully Integrated On-Board EV Battery Chargers With Nine-Phase Machines", IEEE Trans. Energy Conversion, 32(1), 2017.
- [69] Yelek, M. B. ve Yılmaz, M., "Design and optimization of a multiphase PMSM with integrated charging for light electric vehicles", ELECO 2025 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Konferansı, Bursa, Kasım 2025.
- [70] Subotic, I., Bodo, N., Levi, E. "Single-Phase On-Board Integrated Battery Chargers for EVs Based on Multiphase Machines", IEEE Trans. Power Electron., 31(9), 2016.
- [71] Bodo, N., Subotic, I., Levi, E., Jones, M. "Single-phase on-board integrated battery charger based on a nine-phase machine", Proc. IEEE Ind. Electron. Soc. Conf., Dallas, TX, USA, 3210–3216, 2014.
- [72] Hagbhin, S., Alakula, M. "Electrical apparatus comprising drive system and electrical machine with reconnectable stator winding", Int. Patent WO/2011/159241, 2011.
- [73] Truntić, M., Konjedic, T., Milanović, M., Šlibar, P., Rodić, M. "Control of Integrated Single-Phase PFC Charger for

- Electric Vehicle.”, IET Power Electronics, 11(11), 1804-1812, 2018.
- [74] Diab, M. S., Elserougi, A. A., Abdel-Khalik, A. S., Massoud, A. M., Ahmed, S. “A Nine-Switch-Converter-Based Integrated Motor Drive and Battery Charger System for EVs Using Symmetrical Six-Phase Machines”, IEEE Trans. Ind. Electron., 63(9), 2016.
- [75] Gieras, J. F., “Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications”, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
- [76] Jahns, T. M., “Flux-Weakening Regime Operation of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive”, IEEE Trans. Ind. Appl., 23(4), 681–689, 1987.
- [77] Boldea, I., Tutelea, L., Reluctance Electric Machines: Design and Control., CRC Press, Boca Raton, FL, 2018.
- [78] Levi, E., “Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications”, IEEE Trans. Ind. Electron., 55(5), 1893–1909, 2008.
- [79] Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., Pekarek, S., “Analysis of Electric Machinery and Drive Systems”, 3rd ed., Wiley-IEEE Press, 2013.
- [80] Blaschke, F., “The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed-Loop Control System for Rotating-Field Machines”, Siemens Review, 34, 217–220, 1972.
- [81] Vas, P., “Vector Control of AC Machines”, Oxford University Press, Oxford, UK, 1990.
- [82] Zhu, Z. Q., Howe, D., “Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, Proc. IEEE, 95(4), 746–765, 2007.
- [83] Gillespie, T. D., “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, SAE International, Warrendale, PA, 1992.
- [84] Pyrhönen, J., Jokinen, T. ve Hrabovcová, V., “Design of Rotating Electrical Machines”, 2nd ed., Wiley, Chichester, UK, 2013, 612 pp., ISBN: 9781118300842.
- [85] Hanselman, D. C., “Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2nd ed., Magna Physics Publishing”, Lebanon, OH, USA, 2006, 434 pp., ISBN: 1-881855-15-5.
- [86] Agarwal, R. K., “Principles of Electrical Machine Design”, S. K. Kataria & Sons, New Delhi, India, 2010, ISBN: 9788188458522.
- [87] Sawhney, A. K., “A Course in Electrical Machine Design”, Dhanpat Rai & Co., New Delhi, India, 2011, ISBN: 9788177000159.

Özgeçmiş



Musa Burak Yelek, Elektrik Mühendisliği alanındaki lisans derecesini 2022 yılında, yüksek lisans derecesini ise 2025 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Hâlen Devinno Teknoloji Yatırımları A.Ş.'de E-Motor Tasarım Mühendisi olarak görev yapmakta olup, motor ve aktüatör sistemlerinin uçtan uca tasarımı üzerine çalışmaktadır. Kasım 2024'ten bu yana Devinno'da; gereksinim tanımı, topoloji seçimi, analitik boyutlandırma, sonlu elemanlar analizleri (ANSYS Maxwell, Motor-CAD), prototip geliştirme, doğrulama ve tedarikçiye devretme süreçlerini kapsayan tasarım faaliyetlerini yürütmektedir. Çalışma kapsamı kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (PMSM), fırçasız doğru akım motorları (BLDC), endüksiyon ve sargılı alanlı senkron makineler, eksenel akıllı makineler ile lineer ve döner ses bobinli aktüatörleri (VCA) içermektedir. Ağustos 2023-Ekim 2024 tarihleri arasında Ford Otosan'da E-Drive ve Yüksek Gerilim Sistemleri Mühendisi olarak görev yapmış; elektrikli güç aktarma sistemlerine ilişkin müşteri geri bildirimlerinin kök neden analizleri, garanti verisi değerlendirmeleri ve tasarım değişikliği süreçlerinde yer almıştır. Şubat 2022-Haziran 2023 döneminde Devinno'da yarı zamanlı E-Motor Tasarım Mühendisi olarak çalışmış; elektrikli scooter uygulamaları için dış rotorlu BLDC motor tasarımı, elektromanyetik analiz ve prototip doğrulama çalışmalarını yürütmüştür.

Özgeçmiş



Murat Yılmaz, İstanbul Teknik Üniversitesi - İTÜ, Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde 1995 yılında Lisans, 1999 yılında Yüksek Lisans ve 2006 yılında Doktorasını tamamlamıştır. 1996-1999 yılları arasında Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı - TTGV ve TÜBİTAK projelerinde araştırmacı olarak projelerde çalıştıktan sonra 1999 yılında İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC) Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde 2007-2008 yılları arasında UIUC doktora sonrası araştırmacı bursu, 2011-2012 yılları arasında ise TÜBİTAK doktora sonrası araştırmacı bursu ile misafir araştırmacı olarak bulunmuş ve elektrikli araç teknolojileri ve itiş sistem gereksinimlerine yönelik uluslararası projelerde görev almıştır. 2014 yılında İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Öğretim Üyesi olarak göreve başlamış olup aynı bölümde görevine devam etmektedir. Aynı zamanda 2022 yılında TÜBİTAK BiGG kapsamında kurucu ortak olarak bulunduğu EVİNNO A.Ş. firması kapsamında Ar-Ge çalışmalarına da devam etmektedir. Araştırma alanları arasında güç elektroniği devrelerinin tasarımı, modellemesi, kontrolü ve uygulamaları; elektrik makinalarının uygulamaya yönelik olarak tasarımı, modellemesi, kontrolü ve optimizasyonu; elektrikli ve karma araç teknolojileri, modellemesi, itiş sistemi tasarımı, enerji yönetim sistemi (EMS) ve şebeke ile etkileşimleri (V2G/G2V); enerji depolama sistemleri, batarya teknolojileri, modellemesi, SoX kestirim algoritmaları ve yönetimi (EMS), batarya şarj sistemleri ve altyapı gereksinimleri bulunmaktadır.