

Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi

Traction Motor Type Selection for Electric Car

Murat Fatih DEMİR¹ , Habib KAYMAZ² 

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

²Mercedes Benz Türk AŞ, Otobüs Geliştirme, Esenyurt, Türkiye

Öz

19. yüzyılın başında içten yanmalı motorların seri üretimiyle baş edemeyen elektrikli otomobiller, enerji krizleri, araç karbon salınımı ve sera etkisinin artmasıyla tekrar günlük hayatımıza girmeye başlamıştır. Fosil yakıtlı araçları bazı ülkelerde trafikten men etmesine yol açan bu durum, oto üreticilerini alternatif enerji kaynaklarıyla çalışan ve/veya alternatif sürüş sistemine sahip araçlar üretmeye zorlamıştır. Günümüzde ise birçok otomobil markası elektrikli araçlar üretmekte, bunu için yaygın bir tedarik zinciri ve servis ağı oluşturmaktadır. Bu çalışmada elektrikli otomobillerde sık kullanılan çekiş motor tipleri hakkında bilgi verilmesinin yanı sıra karar vericilerin elektrik motor tip seçimi yaparken göz önünde bulundurmaları gereken parametreler verilmiştir. Son olarak, sık kullanılan beş motor tipi karşılaştırılarak göreceli üstünlük ve zafiyetleri gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit araç (HEV), Elektrikli araç (EV), Elektrik motoru (DCM, ACIM, BLDC, PMSM, SRM)

Abstract

Electric cars, which could not cope with the mass production of internal combustion engines at the beginning of the 19th century, has started to enter our daily lives again with the energy crises, increases of carbon emission of the car and the greenhouse effect. This situation, which led some countries to ban fossil fuel vehicles from traffic, forced automakers to produce vehicles that operate with alternative energy sources and / or have alternative driving systems.

Today, many car firms produce electric vehicles and create a widespread supply chain and service network. In this study, besides giving information about the types of traction motors commonly used in electric cars, the parameters that the decision makers should consider when choosing the electric motor type are given. Finally, the relative advantages and disadvantages of five commonly used engine types were shown.

Keywords: Hybrid Vehicle (HEV), Electric Vehicle (EV), Electric Motor (DCM, ACIM, BLDC, PMSM, SRM)

1. Giriş

Günümüzün en yoğun teknolojik konularından biri olan elektrikli araçlar ve bu araçlarda kullanılan motorlar birçok akademik çalışmaya da konu olmaktadır. Zeina ve arkadaşları DC motorlu elektrikli aracın eğim ve farklı yüklerde durum performansını gösterir bir çalışma yapmıştır [1]. Tingting ve arkadaşları, kalıcı mıknatıslı senkron motor (PMSM) kullanan araç motorunun matematiksel modellemesi ile hız ve akım benzetim sonuçlarının değerlendirildiği bir çalışma yapmıştır [2]. Sezen ve arkadaşları hibrit araçlarda anahtarlamalı relüktans motor (SRM) kontrolü için (belirli referans girdilere bağlı olarak) kararlı hal, tork dengesizlikleri ve aşırı yüklenme değerlerinin gösterildiği bir modelleme çalışma yapmıştır [3]. Aktaş ve arkadaşları, asenkron motorların kontrolü ile ilgili dolaylı alan orantılı kontrol metodu (IFOC) ve direk tork kontrol metodunun (DTC) karşılaştırıldığı bir çalışma yapmıştır [4]. Werachet ve arkadaşları fırçasız doğru akım motoru (BLDC) kullanan araçlarda elektronik diferansiyel sisteme yönelik bir çalışma yapmıştır [5].

Elektrikli araçların sürüş sistemi tasarımında en önemli tercih çekiş motoru ve sürücü seçimidir. Motor tipi seçiminde, çekiş sisteminden beklenen performansı ile maliyet arasındaki denge önemlidir. Bunun için güç yoğunluğu, güvenilirlik, verim

ve maliyet gibi dört temel parametrenin yanında hata toleransı, termal limit, tork dengesizlikleri gibi birçok ikincil parametre üzerinden seçim yapılır. Elektrikli çekiş motoru olarak asenkron motor, DC Motor, PMSM, BLDC ve SRM gibi çeşitli motor tipleri kullanılmaktadır. Bu motorların kullanıldığı hibrit/elektrikli otomobiller aşağıdaki sürüş teknolojilerinden birine sahiptir:

- Hibrit Sistem
- Şarj Edilebilir Hibrit Sistem (Plug-in Hibrit)
- Menzil Arttırıcı Sistem
- Tam Elektrikli Sistem

Hibrit araçlar, içten yanmalı ve elektrikli olmak üzere iki çeşit motor kullanılan araçlardır. Elektrikli motorların görevi, içten yanmalı olarak çalışan motorlara destek olmaktır. Ayrıca, fren yapıldığında elektrikli motor jeneratör gibi çalışır. Stator hızı, rotor hızından fazla olduğunda açığa çıkan enerji bataryayı şarj eder. Elektrikli ve içten yanmalı motorların ikisi de aracın çekişine katkıda bulunur. Farklı modellerde belirli hızlara kadar elektrikli motor çekiş görevini yerine getirir. Belirli hızın aşılmasıyla, içten yanmalı olarak çalışan motorlar devreye girer. Bu araçlar yoğun trafikte ekstra kazanç sağlamaktadır. Dur kalk esnasında elektrik motoru etkin olduğundan yakıt sarfiyatının düşmesine katkı yapar.

Şarj Edilebilir Hibrit Sistem (Plug-in Hybrid) araçların temel çalışma prensipleri Hibrit araç sistemlerine yakındır [6]. Ancak bu tip otomobillerde yüksek kapasiteli batarya grupları bulunmaktadır. Şartlar müsait olduğunda bu bataryalar şebekeye bağlanarak şarj edilebilir. Bu sayede elektrikli motorların enerjisi şebeke, içten yanmalı olarak çalışan motor veya fren enerjisinin de geri kazanılmasıyla temin edilebilmektedir.

Menzil Arttırıcı Sistem (Range Extender) araçların temel çalışma prensipleri hibrit araç sistemlerine yakındır. Şarj edilebilir özellikli hibrit sisteminde ki gibi araçlarda hem içten yanmalı hem de elektrikle çalışan motorlar bulunmaktadır ancak bu sistemdeki içten yanmalı motor, aracın çekişine katkıda bulunmaz. Elektrik motoru çekişi tamamen üstlenir. İçten yanmalı motor yalnızca bataryayı şarj etmektedir. Bu sistemde şebekeye bağlantı ve/veya fren enerjisinin geri kazanımıyla bataryayı şarj etmek mümkündür.

Tam Elektrikli araçlarda içten yanmalı motor bulunmaz ve araç sadece elektrikli motor ile hareket eder. Bundan dolayı bu araçlar Zero Emission Vehicle (ZEV) olarak da adlandırılır. Bu sistemde de şebekeye bağlantı ve/veya fren enerjisinin geri kazanımıyla bataryayı şarj etmek

mümkündür. Hibrit/elektrikli sürüş sistemine sahip araç tipleri Şekil 1 de gösterilmiştir [7].



Şekil 1. Elektrikli Sürüş Sistemine Sahip Araç Tipleri

2. Elektrikli Otomobillerde Kullanılan Çekiş Motorları

Elektrikli otomobillerde ağırlıklı beş temel tip elektrik çekiş motoru kullanılmıştır. Bunlar, içyapıları Şekil 2'de gösterilen Fırçalı DC motorlar (DCM), Asenkron Motorlar (ACIM), Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM), Fırçasız DC Motorlar (BLDC) ve Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (SRM) dir [8].



Şekil 2. Elektrikli otomobillerde kullanılan motorların içyapıları

2.1. Fırçalı DC motorlar (DCM)

DC Serisi motorun yüksek başlangıç tork kapasitesi, onu çekiş uygulaması için uygun bir seçenek haline getirir. Bu motorun avantajları hız kontrolünün kolay olması ve ani yük değişimlerine dayanmasıdır. Üretilen tork, akımın karesiyle doğru orantılıdır. Tüm bu özellikler onu ideal bir çekiş motoru yapar. Bu motorlar yüksek güçlü olarak demiryollarında

sıkça kullanılmaktadır [9]. DC motorun elektrikli araç uygulamalarında kullanımını sınırlayan dezavantajı ise mekanik fırçaların aşınmaya ve yıpranmaya elverişli olmaları ve arıza oranlarının yüksek oluşudur.

Fırçalı DC Motor Sürücüsü: Motor hızı değişen voltaj ile ayarlanır. Fırçalı DC motorlar, voltajına ve güç çıkışına bağlı olarak iki, dört veya altı kutba sahip olabilir. Şönt veya seri alan sargılarına sahip olabilir. Seri motorlar şönt motorlardan daha iyi kontrol edilebilir. Harici olarak uyarılan DC motorlar, ayrıştırılmış akı ve tork kontrol özellikleri nedeniyle alan zayıflaması için doğal olarak uygundur. Ancak, komütatör ve fırçalar arasındaki sürtünme, maksimum motor hızını kısıtlamaktadır.

2.2. Asenkron Motorlar (ACIM)

Asenkron endüksiyon motoru, değişen manyetik alanındaki iletkenlerin iletken boyunca bir EMF indüklediği elektromanyetik endüksiyon prensibine dayanmaktadır. Rotor ve stator akısının etkileşimiyle motor döner. Yaygın olarak sincap kafesli asenkron motorlar kullanılmaktadır. Asenkron motorun avantajları yapısal basitlik, düşük maliyet ve düşük bakım ihtiyacıdır. Kıvılcım çıkaran fırçalar yoktur. Bu nedenle patlayıcı alanlar, su ve tozlu kirli ortamlarda çalıştırılabilirler. Dezavantajı ise hız kontrolünün zor olmasıdır. Motor düşük güç faktöründe çalışır. Bu nedenle bazı güç faktörü düzeltme cihazları gereklidir. Yüksek bakır kayıpları verimin düşmesine yol açar. Hava aralığının fazla olması verim düşmesine, bazen de mekanik sürtünmeye yol açabilir.

Asenkron Motor Sürücüleri: Asenkron endüksiyon motorunun hız kontrolü voltaj frekansının değiştirilmesiyle elde edilir. Vektör kontrollü AC motor sürücülerinde her bir motor akımı, sürücü içerisindeki akım kontrolörü tarafından kontrol edilir. Ani moment artışları bu kontrol ünitesi tarafından algılanır. Motorun yeni momenti karşılama için ilgili faz sargılarına anlık olarak darbe gerilimleri uygulanarak motor akımına ani darbe artışları verilir ve motorun yeni moment değerine sıçraması sağlanır. Motor yeni moment değerinde kararlı çalışmaya başladıktan sonra vektör kontrol işlevini yapmıştır ve sürücü normal olan özellikleri ile çalışmasını sürdürür. Bu zor kontrol yapısı, asenkron motorların kontrol sürücülerini DC motorlardan daha karmaşık ve maliyetli yapmaktadır.

2.3 Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM)

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların alan uyarımı, sabit mıknatıslar tarafından sağlanır. Bu motorlar temelde sinüzoidal zıt EMK dalga formuna sahip bir AC senkron

motordur. PMSM, yapısal olarak fırçasız DC motor ile endüksiyon motorun birleşimidir. Fırçasız bir DC motor gibi, statorda sargıları ve kalıcı bir mıknatıs rotoru vardır. Aynı zamanda, makinenin hava boşluğunda sinüzoidal bir akı yoğunluğu üretmek için yapılmış sargılı stator yapısı vardır, bu yapı endüksiyon motorlara benzer [10]. Rotor bakır kayıplarının olmaması soğutma açısından PM motorlara avantaj sağlamaktadır. Dezavantaj olarak yüksek ısı ve yük koşulları mıknatıslanma özelliklerinin kayıp olmasına neden olur.

PMSM Sürücüleri: Kalıcı mıknatıslarla PMSM sıfır hızda tork üretebilir ancak bu tip operasyonlar için dijital kontrollü invertör gerekir. PMSM sürücüleri yüksek verimli ve yüksek performanslı motor sürücülerdir ve motorun tüm hız aralığında, düzgün dönüş, yüksek performanslı motor kontrolü, sıfır hızda tam tork kontrolü, hızlanma ve yavaşlama gibi tüm fonksiyonlarda etkindir. Bu kontrolü elde etmek amacıyla, PMSM için vektör kontrol teknikleri kullanılır. Vektör kontrol yöntemleri, alan yönlendirmeli kontrol yöntemi, akı zayıflatma yöntemi ve doğrudan moment kontrol yöntemi olarak sıralanabilir. Alan yönlendirmeli kontrol yöntemi (field oriented control, FOC) stator akımlarının dönen eksen takımlarına dönüştürmesiyle yapılır.

2.4. Fırçasız DC Motorlar (BLDC)

Kalıcı mıknatıslı DC motor, rotorun stator ile aynı hızda döndüğü senkron bir motordur. Rotorun alan sargısının yerini sabit mıknatısla değiştirmesiyle geleneksel DC motordan farklılaşır. Kalıcı mıknatıslı senkron motor BLDC olarak da adlandırılır.

Fırçasız DC motor veya Kalıcı mıknatıslı Fırçasız DC motor, DC beslemeyle çalışır ve mekanik (komütatör-fırça) değişim yerine elektronik olarak sürülür. Küçük boyutları sayesinde güç yoğunluğu yüksektir. Alan sargıları olmadığından (bakır, ısı vb) kayıpları daha azdır. Verimleri yüksektir. Kalıcı mıknatıs kullanarak, motorlar manyetik kutuplar üretmek için enerji ihtiyacını ortadan kaldırır. Böylece DC motorlardan, endüksiyon motorlarından ve SRM'ler den daha yüksek verim elde edebilirler. Dezavantajı motorun DC serisi ve AC endüksiyon motorlarından daha maliyetli olmasıdır. Mıknatısın pahalı olması ve mıknatısın mekanik gücünün motorda büyük bir tork oluşmasını zorlaştırır. PM BLDC motorlarında hızı sınırlamak için fırça yoktur ancak iç rotor tipli motorlarda maksimum hızı kısıtladığı için mıknatısın sabitleme yoğunluğu konusundaki sorunlar devam etmektedir [11].

Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız DC Motor Sürücüleri: Fırçasız DC motorların çalıştırılması ve kontrolü oldukça

zordur. Bu motorlar, yapıları gereği elektronik olarak kontrol edilir ve doğru akım komütasyonu için kontrol işleminde rotor pozisyon bilgisi gerektirirler. Fırçasız DC motorların kontrolünde, iki ayrı kapalı çevrim kullanılır. Birincisi, iç kontrol çevrimidir ve burada motor akımı veya momenti kontrol edilir. Bu amaçla, motor faz sargılarının akımları sürekli takip edilerek, referans akımı izlemesi sağlanır. İkincisi ise, dış kontrol çevrimidir. Bu çevrimde, motor hızı kontrol edilir. Geri besleme olarak, pozisyon sensörlerinden alınan gerçek motor hız ve konum bilgisi hız denetleyicisinde işlenmektedir..

2.5. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (SRM)

Anahtarlamalı relüktans motorları, basit bir yapıya sahiptir. Hem statoru hem de rotoru çıkık kutuplu yapıdadır. Bundan dolayı motorlar çift çıkık relüktans motorlar olarak da adlandırılır.

Anahtarlamalı relüktans motorları, 1838 de bir lokomotif hareket ettirmek amacıyla İskoçya’da, Davidson tarafından kullanılmıştır. O zamanlar bu motorun kontrolü zor olmasından dolayı kullanımı azdı. Günümüzde ise motor ve sürücü tekniğinin gelişimi SRM’lere ilgiyi artırmıştır. Anahtarlamalı relüktans motorları, statorunda sargı bulundurmazlar. Bu yüzden oldukça yüksek hızlara ulaşırlar.

Anahtarlı relüktans motorun düzgün bir şekilde çalışabilmesi için sürekli bir moment üretilmesi gerekir. Sürekli moment üretilmesi rotor ve stator kutbunun konum algılayıcılar ile izlenip uygun faz sırasıyla beslenmesine bağlıdır. Bu nedenle de güç elektroniği devre elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. AC, stator sargılarına uygulandığında stator bobinlerinden sinüzoidal bir akım akar ve değişen bir manyetik akı meydana gelir. Rotor bu manyetik akının kutup yüzeyindeki hareketinin sağladığı etki ile döner. Anahtarlamalı relüktans motorun, rotorunun konumu farklı durumlar bulunur. Bunlardan bir tanesi yüz yüze durumudur. Rotor kutbu ile statorun bir kutbunun tamamen karşı karşıya gelmesi durumudur. Stator ve rotor yüz yüze konumundayken statorundan akım akıtıldığında moment üretilmez. Rotor bu konumdayken hava aralığı minimum, manyetik geçirgenlik maksimum olur. Bu durumda relüktans değeri minimum olur. Son olarak endüktans değerinin

maksimum olduğu görülür. SR motorun avantajları şunlardır:

Rotorunda sargı veya kalıcı mıknatıs yoktur. Bu sebeple üretimi oldukça basittir.

- Rotoru fırçasızdır. Bu sayede yüksek hızda çalışabilir.
- Yüksek güç ve moment elde edilebilir.
- Sadece statorunda sargı olduğu için soğutması kolaydır.
- Fazlar birbirinden bağımsızdır, bir faz arıza yapsa bile motor çalışmaya devam eder.
- Verimi oldukça yüksektir.

SR motorun dezavantajları şunlardır:

- Stator endüktansı büyüktür.
- Anahtarlama anında sargı endüktansının uçlarında yüksek gerilim oluşur.
- Faz uyarımı sırasının belirlenmesi için motor miline sensör yerleştirilmelidir.
- Bir fazdan diğerine geçerken gecikme olduğu zaman moment azalır. Bu yüzden yüksek gürültü çıkarır [12].

Anahtarlamalı Relüktans Motor Sürücüler: SRM diskleri elektrikli araç uygulamaları için bir potansiyele sahiptir. Bu motor sürücülerini sağlam ve basit yapı, hataya dayanıklı çalışma, kolay kontrol ve olağanüstü tork-hız özellikleri gibi belirli avantajlara sahiptir. SRM sürücülerinin tork-hız karakteristikleri elektrikli araç yük karakteristikleriyle iyi bir şekilde eşleşir. SRM sürücü, geniş sabit bir güç bölgesiyle yüksek hızda çalışma kapasitesine sahiptir. Motor, yüksek başlangıç torkuna ve yüksek tork-atalet oranına sahiptir. Basit yapısı ve düşük rotor ataleti nedeniyle SRM çok hızlı bir hızlanmaya ve son derece yüksek hızda çalışmaya sahiptir. Geniş hız aralığı çalışması nedeniyle SRM özellikle EV tahrikinde dişli olmadan çalışma için uygundur. Ayrıca rotorda manyetik kaynakların (yani sargılar veya sabit mıknatıslar) olmaması SRM’yi soğutmayı nispeten kolaylaştırır ve yüksek sıcaklıklara duyarlılaştırır. SRM sürücülerinin dezavantajları, tork dalgalanması ve akustik gürültüden muzdarip olmalarıdır [13].

Bahsi geçen bu beş motor tipinin kullanıldığı örnek araç modelleri Tablo.1 de verilmiştir.

Tablo 1. Araç Modelleri ve Kullandığı Motorlar

ARAÇ MODEL	MODEL	MOTOR TİPİ	GÜÇ KW/HP	TORK Nm	REF.
NISSAN LEAF	2020	PMSM	110/147	320	[14]
JAGUAR I-PACE	2020	PMSM	298/400	696	[15]
TESLA MODEL S Performance SR	2020	ACIM	568/762	980	[16,17,18]
TESLA MODEL X Performance SR	2020	ACIM	568/762	990	[16-19]
TESLA MODEL 3 RWD	2018	ACIM	204/274	350	[16-20]
PORSCHE Mission E (TAYCAN) 4S	2020	ACIM	320/429	600	[21-22]
CHEVROLET BOLT EV	2020	BLDC	150/201	360	[23-24]
BMW i8	2018	PMSM	170/228	320	[25-26]
BMW i3	2019	PMSM	125/167	250	[25]
TOYOTA PRİUS	2020	PMSM	53/71	163	[27]
HYUNDAI KONA ELECTRIC	2019	PMSM	150/201	395	[28-29]
MERCEDES-BENZ GENERATION EQ	2019	ACIM	300/402	760	[30]
AUDI E-TRON 55 QUATRO	2019	ACIM	265/356	561	[31-32]
VOLVO XC40 RECHARGE P8	2021	PMSM	300/402	660	[33-34]
HOLDEN ECOMMODORE	2007	SRM	55/73.7	-	[35]
LUCAS CHLORIDE	-	SRM	-	-	[36]
MAZDA BONGO	-	SHUNT DC	-	-	[37]
FIAT PANDA ELETTRA	-	SERİ DC	-	-	[37]

3. Elektrik Motorlarının Seçim Kriterleri ve Mukayesesi

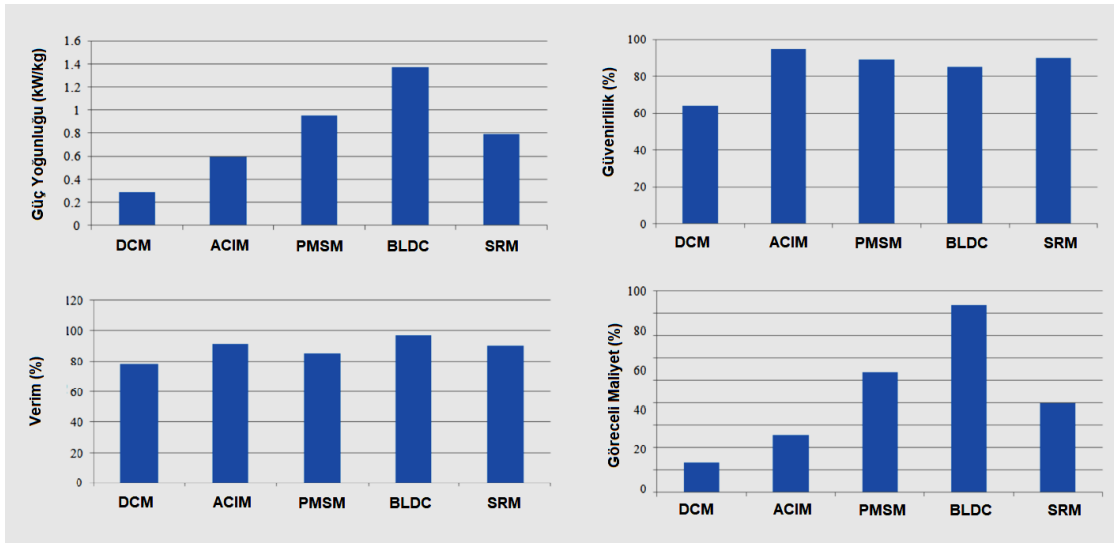
Araçlarda hangi tip elektrik motorunun kullanılacağı kararı için tasarımcıların/karar vericilerin Maliyet, Tork/güç yoğunluğu, Verim, Yapısal Basitlik, Kontrol kolaylığı, Güvenilirlik, Fiziksel Boyut, Aşırı yüklenme kapasitesi, Sağlamlık, Alan gücü, Hata toleransı, Termal limit, Düşük tork salınımı (düşük gürültü ve titreşim), Ömür, Potansiyel gibi kriterleri göz önünde bulundurmaları, kararlarının saha ve

müşteri beklentilerini en iyi şekilde karşılayan çözüme göre vermeleri gerekmektedir. Tablo 2 de yukarıda anlatılan beş farklı elektrik motor tipinin bu kriterlere göre mukayesesi verilmektedir [38-39]. (Tabloda kullanılan “0” değerlendirme ilgili kriter açısından diğer motor tiplerine göre ortalamayı, “-” ve “—” değerlendirmesi ilgili kriter açısından diğer motor tiplerine göre dezavantajlı durumu, “+” ve “++” değerlendirmesi ise ilgili kriter açısından diğer motor tiplerine göre avantajlı durumu temsil etmektedir.)

Tablo 2. Elektrik Motorlarının Seçim Kriterleri ve Değerlendirme Sonuçları

KRİTER	DCM	ACIM	PMSM	BLDC	SRM
Maliyet	0	++	-	-	+
Tork/Güç Yoğunluğu	-	0	++	++	0
Verim	-	+	++	++	+
Basitlik	++	++	0	+	++
Kontrol Kolaylığı	++	++	0	+	++
Güvenilirlik	-	++	+	+	++
Boyut	-	+	++	++	+
Aşırı Yüklenme Kapasitesi	-	+	+	+	++
Sağlamlık	0	++	+	+	++
Alan Gücü	++	++	+	-	++
Hata Toleransı	+	++	-	-	++
Termal Limit	0	+	-	-	++
Tork Ripple	-	++	++	—	-
Ömür	-	++	+	+	++
Vade	++	++	+	+	+
Potansiyel	-	++	++	0	++

Elektrikli araçlarda sık kullanılan beş motor tipi için dört temel parametre (güç yoğunluğu, güvenilirlik, verim ve maliyet) üzerinden yapılan değerlendirme Şekil 3’ de verilmiştir [40].



Şekil 3. Sık kullanılan beş motor tipi için temel karşılaştırma

4. Sonuç

Bu çalışmada elektrikli otomobillerde sık kullanılan elektrik motor tipleri hakkında bilgi verilmesinin yanı sıra tasarımcıların/karar vericilerin elektrik motor tip seçimi yaparken göz önünde bulundurmaları gereken parametreler verilmiştir. Son olarak ta, sık kullanılan beş motor tipi bu kriterlere göre karşılaştırılarak birbirlerine olan üstünlük ve zafiyetleri gösterilmiştir. Birbirlerine göre çeşitli parametrelerde üstünlük sağlayan bu motor tipleri içinde gerek maliyet ve gerekse uzun dönemli sorunsuz çalışma (güvenirlilik) üstünlüğünden dolayı alternatif akım indüksiyon motorları (ACIM) bir adım öne çıkmaktadır. Vektör kontrollü sürücülerin gelişmesiyle zaten sağlam, basit yapı, düşük maliyet, uzun ömür ve hata toleranslarının yüksek oluşu gibi özellikler bu motorları elektrikli otomobiller için avantajlı duruma getirmiştir. Mevcut üretilen araçlarda kullanımı fazladır.

Basit ve ucuz güç elektroniği sayesinde düşük güç uygulamaları için ideal bir seçenek olan DC motorların en büyük zafiyeti komütatör ve fırçalar arasındaki sürtünmenin arızalara yol açması ve hata toleranslarının düşük oluşudur. İlk dönemler sınırlı birkaç modelde kullanılmasına karşın mevcut üretilen araçlarda kullanımı bulunmamaktadır.

Güç yoğunluğu, yüksek verimlilik avantajlarıyla indüksiyon motorlara göre daha verimli [41] olan BLDC ve PMSM motorlar, yapılarındaki kalıcı mıknatıslar için nadir yer elementlerine ihtiyaç duymalarına sebebiyle maliyetleri yüksektir ve güçlü otomobiller için uygun değildir [42].

BLDC ve PMSM motorlara göre motor ve kontrolör maliyeti çok daha az olan SRM'ler, güvenirlilik, iyi verimlilik ile olağanüstü bir seçenek sunar. Ancak yüksek tork

salınımına bağlı yüksek gürültü ve titreşim en büyük dezavantajdır.

Endüstriyel çalışmalar için tasarlanan bu motor tipleri artık otomotiv dünyasının en önemli malzemelerinden biri olmaya namzettir ve gerek endüstriyel ve gerekse akademik çalışmaların gittikçe daha artan konusu olmaya başlamıştır. Artan motivasyon, teknolojiye paralel olarak motor tip ve özelliklerinin gelişmesine yol açacaktır.

Kaynaklar

- [1] Zeina Bitara, Samih Al Jabia, Imad Khamisb. Modeling and Simulation of Series DC Motors in Electric Car. Proceedings of the ScienceDirect, 2015, Volume 50, Pages 460-470, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.056>
- [2] Tingting Liu, Guojin Chen, Shigang Li. Application Of Vector Control Technology For Pmsm Used in Electrical Vehicles. The open Automation and Control Systems Journal 2014, 6, 1334-1341
- [3] Serkan Sezen, Ercument Karakas, Kadir Yilmaz, Murat Ayaz. Finite element modeling and control of a high-power SRM for Hibrit electric vehicle. Proceedings of the ScienceDirect, 2016, Volume 62, Pages 49-67, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.01.06>
- [4] Mustafa Aktas, Khaled Awaili, Mehrdad Ehsani, Aydemir Arisoy. Direct torque control versus indirect field-oriented control of induction motors for electric vehicle applications. Proceedings of the ScienceDirect, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.04.002>
- [5] Werachet Khan-Ngern, Wiwat Keyoonwong. High Performance BLDC Motor Control for Electric Vehicle.

- Proceedings of the IEEE, 2018, inspec accession number: 18026803
- [6] V.Sreedhar, Plug-In Hybrid Electric Vehicles With Full Performance. Proceedings of IEEE, 2006, inspec accession number: 9529651
- [7] Url, <https://docplayer.biz.tr/50157533-Hibrid-ve-elektrikli-araclar.html>, 04.04.2020
- [8] Freescale, newest digital controller for energy conversion and motor control. Url, <https://www.yumpu.com/en/document/read/21059104/digital-control/5>
- [9] BySri Hari Karthik. Url, <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev>, 2019
- [10] T. Porselvi, Srihariharan , M. K, Ashok.J, Ajith Kumar. S, Selection of Power Rating of an Electric Motor for Electric Vehicles. Proceedings of the IJESC, 2017, Volume 7 Issue No.4
- [11] Url, <https://tr.farnell.com/motor-control-permanent-magnet-sync-motor-pmsm-technology>, 04.04.2020.
- [12] Samet Özgül. Url, <https://www.elektrikport.com/makale-detay/anahtarlamali-manyetik-reluktans-motor/18630#ad-image-0>. 2016
- [13] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, and N. C. Cheung. Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles. Proceedings of the ResearchGate, 2009, Url, https://www.researchgate.net/publication/224400819_selection_of_electric_motor_drives_for_electric_vehicles
- [14] Nissan Leaf 2.0 (PMSM). Url, <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf/build-price.html#configure/A/version>, 06.04.2020
- [15] Jaguar I-Pace (PMSM). Url, <https://www.jaguar-turkiye.com/jaguar-range-i-pace>, 2020
- [16] Tesla Model S-X-3 (Asenkron). Url, <https://cleantechnica.com/2018/03/11/tesla-model-3-motor-in-depth/>, 06.04.2020
- [17] Tesla Model S Performance Sr. Url, <https://www.evspecifications.com/en/model/7700e2>, 06.04.2020
- [18] Tesla Model S. Url, https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S, 06.04.2020
- [19] Tesla Model X Performance Sr. Url, <https://www.evspecifications.com/en/model/2d24e4>, 06.04.2020
- [20] Tesla Model 3. Url, <https://www.ultimatespecs.com/tr/arabateknik-ozellikler/Tesla/M8753/Model-3>, 06.04.2020
- [21] Porsche Mission E (Taycan) (Asenkron). Url, https://tr.wikipedia.org/wiki/Porsche_Taycan, 06.04.2020
- [22] Porsche Mission E (Taycan) (Asenkron). Url, <https://www.evspecifications.com/en/model/0c44ce>, 06.04.2020
- [23] Chevrolet Bolt EV (PM). Url, https://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet_Bolt, 06.04.2020
- [24] Chevrolet Bolt EV. Url, <https://www.evspecifications.com/en/model/0545d6>, 06.04.2020
- [25] BMW i8-i3 (Asenkron). Url, <https://www.bmwusa.com/vehicles/bmw/i8/pricing-features.html>, 06.04.2020
- [26] BMW i8 (Asenkron). Url, https://en.wikipedia.org/wiki/BMW_i8, 06.04.2020
- [27] Toyota Prius Acs (PMSM). Url, <https://www.toyota.com/prius/features/mpg/1221/1223/1225>, 06.04.2020
- [28] Hyundai Kona Electric (PMSM). Url, <https://www.hyundai.com/au/en/cars/suvs/kona/kona-electric>, 06.04.2020
- [29] Hyundai Kona Electric (PMSM). Url, <https://www.evspecifications.com/en/model/2dee6c>, 06.04.2020
- [30] Mercedes-Benz Generation EQ (Asenkron). Url, https://en.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_EQC, 06.04.2020
- [31] Audi E-Tron. Url, <https://www.evspecifications.com/en/model/fff46a>, 06.04.2020
- [32] Audi E-Tron. Url, https://www.audiusa.com/models/audi-e-tron/2019/build/summary.html?pr=default-etron-2019-GE#layer=/models/audi-e-tron/2019/build.summary_layer_techdata.html, 06.04.2020
- [33] Volvo XC40 Recharge P8 (PMSM). Url-21, https://en.wikipedia.org/wiki/Volvo_XC40, 06.04.2020
- [34] Volvo XC40 Recharge P8 (PMSM). Url-22, <https://www.evspecifications.com/en/model/4c9afb>, 06.04.2020
- [35] Mounir Zeraoulia, Mohamed Benbouzid, Demba Diallo. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006, 55 (6), pp.1756-1764.
- [36] Lalit Kumar n, Shailendra Jain. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. Proceedings of the ScienceDirect, 2014, Volume 29, Pages 924-940, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.014>
- [37] C.C. Chan and K.T. Chau. Modern Electric Vehicle Technology. Oxford University Press, 2001
- [38] Thomas Finken, Matthias Felden and Kay Hameyer. Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles. Proceedings of IEEE, 2009, inspec accession number: 10545119
- [39] Muhammed Ali BEYAZIT, Url, <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/elektrikli-araclarda-kullanilan-motorlar-ve-ozellikleri/21929#ad-image-0>, 2018
- [40] Pooja Naresh Bhatta, Hemant Meharb, Manish Sahajwanib, Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study, Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA) 2019
- [41] Shahriar Sharifan, Seyyedmilad Ebrahimi, Ashknaz Oraee and Hashem Oraee. Performance Comparison Between Brushless PM and Induction Motors for Hibrit Electric Vehicle Applications. Proceedings of IEEE, 2016, inspec accession number: 16061528
- [42] The Difference between PMSM & BLDC Motor, Texas Instruments page:29