

Derleme makale

## Elektrikli araçlar: mekanik güç aktarma yapıları, elektrik güç sistemleri ve şarj yaklaşımları

M. Erhan Balcı<sup>1,2</sup>, Fuat Kılıç<sup>3</sup>, Oktay Karakaya<sup>1,4\*</sup>, İrem Dağlı<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ar-Ge Birimi, İŞBİR Elektrik Sanayii A.Ş., Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye

<sup>3</sup>Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye

<sup>4</sup>Elektrik ve Enerji Bölümü, Balıkesir Bigadiç Meslek Yüksek, Balıkesir, Türkiye

\*Correspondence: [karakaya@balikesir.edu.tr](mailto:karakaya@balikesir.edu.tr)

**Özet:** Küresel ölçekte nüfus artışı ve insanların artan hareketlilik ihtiyaçları sonucunda, gün geçtikçe ulaşım araçları daha önemli bir gereksinim haline gelmekte ve buna bağlı olarak trafiğe çıkan araç sayısı hızla artmaya devam etmektedir. Böylece, benzin ve dizel yakıtlı geleneksel içten yanmalı motorlara sahip araçların kullanımı, hem çevre kirliliğine sebep olmaları hem de doğadaki fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olmasından dolayı sürdürülebilir olmaktan çıkmaktadır. Bu durum karşısında, birçok gelişmiş ülke, elektrikli araç tasarımı ve üretimi üzerine çalışmalarını desteklemektedir. Ayrıca, bu ülkeler elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması için vergisel avantajlar ve zorlayıcı önlemler üzerine mevzuat düzenlemeleri yapmaktadır. Diğer taraftan, araştırmacıların elektrikli araç tasarım çalışmalarına ilgisi artmakta ve konu üzerine literatür sürekli bir gelişim göstermektedir. Bu makalede, elektrikli araçlarda kullanılan, mekanik güç aktarma yapıları, elektrik motorları, motor sürücü devreleri, bataryalar, batarya yönetim sistemleri ve şarj sistemleri üzerine kapsamlı bir literatür taraması sunulmuş, ayrıca bu bileşenlerde gerçekleşen son teknolojik gelişmeler tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araçlar, elektrik motorları, motor sürücü devreleri, bataryalar, şarj sistemleri.

**Abstract:** Due to the population surge on a global scale and increased mobility needs of people, transportation vehicles has become an even important requirement day by day, and the number of vehicles in traffic continues to increase rapidly. Thus, the use of conventional internal-combustion-engine vehicles with gasoline and diesel fuel is not be sustainable due to both their contribution to environmental pollution and limited fuel reserves in nature. Against this situation, many developed countries support the works on electric vehicle design and production, and also prepare regulations on tax subsidies and stricter regulations to expand the use of the electric vehicles. On the other hand, the researchers' interest on the electrical vehicle design studies has been in increase, and the related literature shows continuous growth. In this paper, a comprehensive literature survey on the mechanical powertrain structures, electric motors, motor driver circuits, batteries, battery management systems and charging systems used in electrical vehicles are presented, and the recent technological developments on these components are also discussed.

**Key words:** Electric vehicles, electric motors, motor drive circuits, batteries, charging systems.

### Kısaltmalar

BEA: Bataryalı Elektrikli Araç

EA: Elektrikli Araç

EM: Elektrik Motoru

İYM: İçten Yanmalı Motor

İYMA: İçten Yanmalı Motorlu Araç

MEA: Melez Elektrikli Araç

TEA: Tamamen Elektrikli Araç

\* Corresponding author. Tel.: +0-266-614-6911; fax: +0-266-614-6913.

E-mail address: [karakaya@balikesir.edu.tr](mailto:karakaya@balikesir.edu.tr)

ORCID: 0000-0001-8418-8917, 0000-0003-2502-3789, 0000-0003-3871-1724\*, 0000-0002-5660-0553

Received 18 September 2020; accepted 20 November 2020

Peer review under responsibility of Bandirma Onyedi Eylül University.

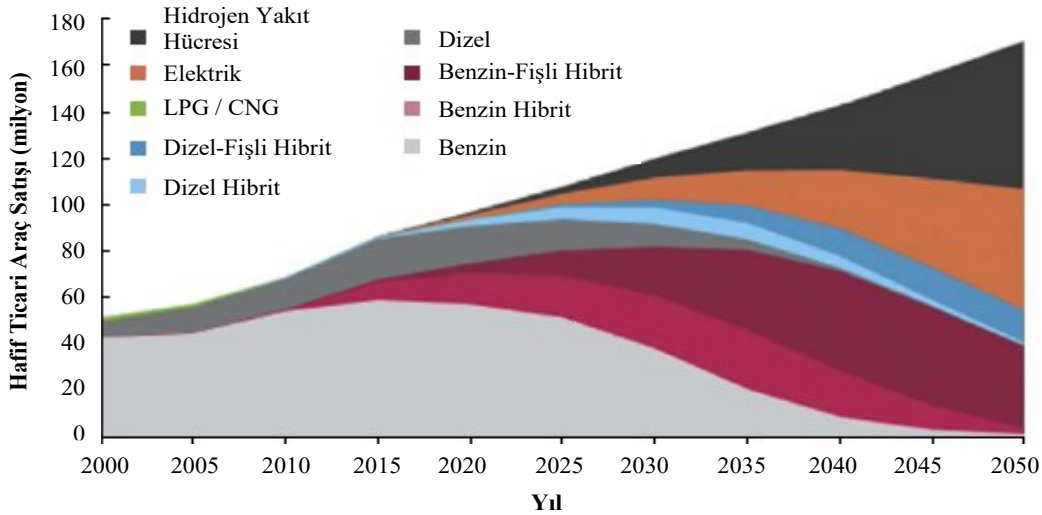
## 1. Giriş

Geleneksel, benzin veya dizel yakıt tüketen, içten yanmalı motorlu araçların (İYMA'ların) sayısındaki artış; küresel ısınmaya sebep olan sera gazlarında artışa ve hava kirliliğine yol açmaktadır (Qiao ve diğ., 2019). Ayrıca, ulaşımda fosil yakıtlara bağımlılık, rezerv bakımından zengin olan ülkelerde dahi, ekonominin yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalara hassasiyet göstermesine sebep olmaktadır (Khan ve Kar, 2009).

Bu sorunlara çözüm olarak; özellikle gelişmiş ülkelerde, Elektrikli Araçların (EA) geliştirilmesi, üretimi ve kullanımının yaygınlaşmasına yönelik çalışmalar hayata geçirilmektedir (Bubeck ve diğ., 2016; Li ve diğ., 2019; Palmer ve diğ., 2018). Bu çalışmalar doğrultusunda, Almanya'da 2020 yılından itibaren 1 milyon EA'nın trafikte olması hedeflenmiş (Bubeck ve diğ., 2016), İngiltere ve Fransa'da ise 2040 yılından itibaren İYMA satışının sınırlandırılması planlanmıştır (Li ve diğ., 2019). Alternatif enerji kaynakları temelli yeni nesil araçların kullanımının yaygınlaşmasını teşvik edici sübvansiyon ve özel vergi politikaları üzerine hazırlıklar, İngiltere, ABD, Japonya ve Çin başta olmak üzere birçok ülkede yürütülmektedir (Palmer ve diğ., 2018).

Diğer taraftan, Uluslararası Enerji Ajansı, enerji perspektifleri 2008 organizasyonunda, Mavi Harita (Blue Map) senaryosu olarak isimlendirilen ve 2005-2050 yılları arasında CO<sub>2</sub> emisyonunun yarıya indirilmesini hedefleyen bir rapor yayımlamıştır (Tanaka, 2008; Andwari ve diğ., 2017). Rapor, çeşitli sektörlerin ve paydaşların, bahsedilen hedef doğrultusunda yapması gerekenler ve rolleri üzerine öneriler sunmuştur. Ayrıca, aynı raporda Şekil 1'de verilen Mavi Harita senaryosuyla (Andwari ve diğ., 2017), teknoloji türlerine göre yıllık hafif ticari araç satış eğilimi hakkında bir öngörü yapılmıştır. Bu öngörüye göre; 2050 yılında küresel ölçekte, hafif ticari EA satışının her türden toplam araç satışının %50'si olacağı ve bunun neticesinde CO<sub>2</sub> emisyonunun %30 azalacağı beklentileri ortaya konmuştur.

Yukarıda kısaca bahsedilen eğilime paralel olarak, EA'lar üzerine ülkemizde de çalışmalar hızlanmış ve Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu tarafından ilk yerli-milli EA'nın prototipleri üretilmiştir (Demir, 2020).



Şekil 1. Mavi harita senaryosunda teknoloji türüne göre yıllık hafif ticari araç satışları. [Şekil 1, (Andwari ve diğ., 2017)'den alınmıştır.]



**Şekil 2.** (a) TOGG TEA ve (b) Mitsubishi MEA.  
[Şekil 2, (TOGG, 2019) ve (Mitsubishi, 2017)'den alınmıştır.]

Bununla birlikte, ülkemizde EA'lar üzerine üniversite-sanayi iş birliğinde yürütülen çalışmaların yaygınlaşması, böylece, ülke olarak Dünya EA pazarında daha fazla söz sahibi olabilmemiz için çok hızlı gelişmekte olan ilgili literatürün takibi önemli bir gerekliliktir.

Bu çalışmada, EA araçlar üzerine son yıllarda yayımlanan çalışmaları içeren kapsamlı bir literatür taraması yapılmış, ilgili teknolojideki son gelişmeler, aktarma yapıları, elektrik motorları, motor sürücü devreleri, bataryalar, batarya yönetim sistemleri ve şarj sistemleri gibi önemli sistem bileşenlerine odaklanılarak incelenmiştir. Elde edilen çıktılar detaylı bir şekilde raporlanmıştır.

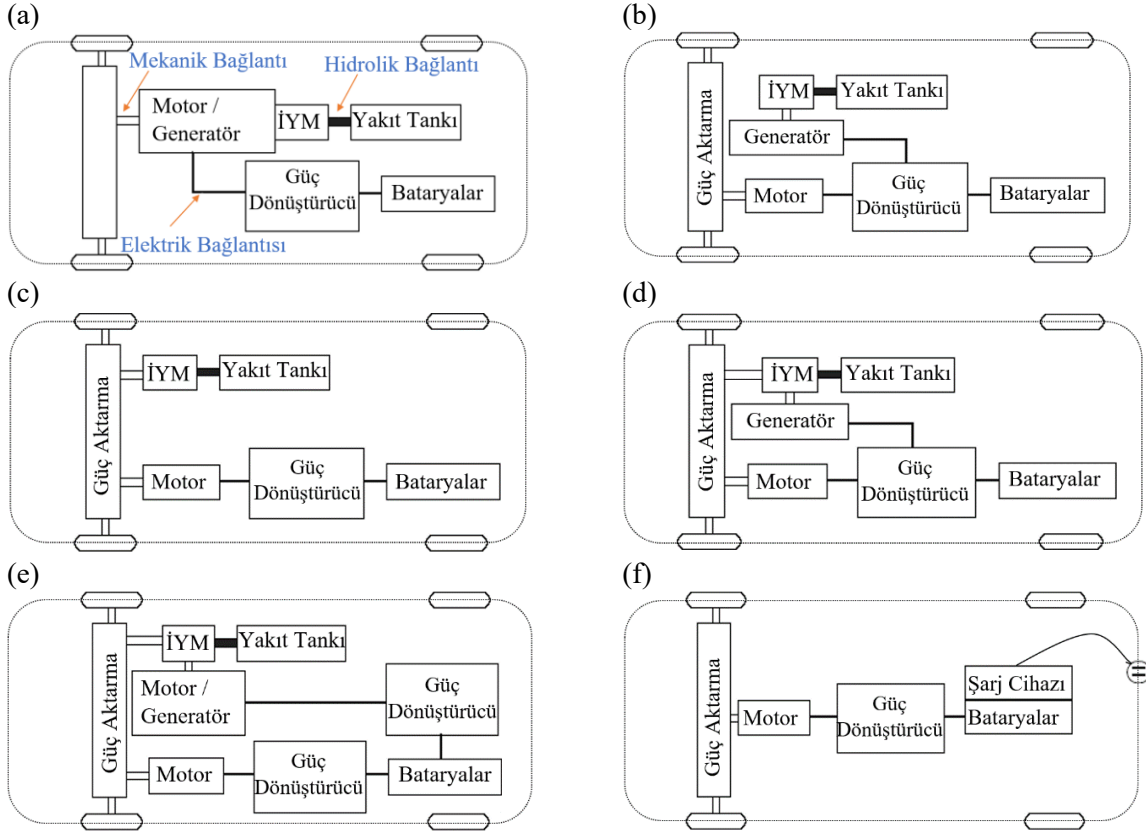
## 2. Elektrikli araç (EA) sınıfları

EA'lar; (i) geleneksel İçten Yanmalı Motor (İYM) ile beraber Elektrik Motorunun (EM) tahrikiyle hareket eden bir başka ifadeyle kısmen (melez) elektrikli araçlar ve (ii) sadece EM tahrikiyle hareket eden tamamen elektrikli araçlar olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilirler (Tie ve Tan, 2013; Kumar ve Jain, 2014; Yong ve diğ., 2015; Singh ve diğ., 2019; Li ve diğ., 2019). Şekil 2'de Tamamen Elektrikli Araç (TEA) ve Melez Elektrikli Araç (MEA) örneklerine ilişkin fotoğraflar (TOGG, 2019; Mitsubishi, 2017) sunulmuştur. MEA'lar, ayrıca, hafif MEA ve tam MEA olarak iki alt sınıfa sahiptirler (Tie ve Tan, 2013). Literatürdeki tam MEA topolojileri ise; seri, paralel, seri-paralel ve kompleks topolojiler olarak ifade edilebilir (Tie ve Tan, 2013; Kumar ve Jain, 2014; Singh ve diğ., 2019). Günümüzde, TEA'larda, batarya, hidrojen enerjisi, süperkapasitör, volan ve hidrolik akü olarak sıralayabileceğimiz çe-

şitli enerji depolama elemanları uygulanabilmektedir. Enerji üretiminde, yakıt pilleri, fotovoltaik hücreler, termoelektrik generatörler ve motorların rejeneratif frenlemesi yöntemleri karşımıza çıkmaktadır (Tie ve Tan, 2013; Li ve diğ., 2019). Ancak, ticarileşmiş TEA'larda genel olarak enerji depolama elemanı batarya olup enerji üretimi ise EM'nin rejeneratif frenleme durumuyla gerçekleştirilmektedir (Volkswagen Academy, 2013). Dolayısıyla, bu çalışmada TEA'ların sadece bataryalı tipleri (BEA) dikkate alınmıştır. BEA ve MEA topolojilerini izah eden şematikler (Tie ve Tan, 2013), Şekil 3'de verilmiştir.

BEA'lar, hareket tahriki için bataryanın beslediği EM bulunan araçlardır. Bu araçların benzin ve dizel yakıt tüketimleri olmaz ve İYM'li araçlarla (İYMA'larla) karşılaştırıldığında önemli derecede sessiz çalışırlar (Kumar ve Jain, 2014). BEA'ların yapılarında yer alan ana elemanlar; mekanik güç aktarma sistemi, EM, EM sürücü devresi, batarya grubu, araç üzeri şarj devresi ve batarya grubunu izleyen-kontrol eden enerji yönetim sistemidir (Tie ve Tan, 2013; Yong ve diğ., 2015; Hannan ve diğ., 2018). BEA'ların, İYMA'lara göre bir diğer önemli avantajı da EM'lerin İYM'lerden daha yüksek enerji verimliliğine sahip olmalarıdır (Li ve diğ., 2019).

Elektrik makinaları literatüründe rejeneratif frenleme olarak isimlendirilen, frenleme sırasında EM'nin generatör olarak çalıştırılması yeteneği, BEA'ların frenleme sürecinde kaybettikleri kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülerek batarya grubunun şarj edilmesine imkan verir (Kumar ve Jain, 2014; Yong ve diğ., 2015).



**Şekil 3.** (a) hafif MEA, (b) seri MEA, (c) paralel MEA, (d) seri-paralel MEA, (e) kompleks MEA ve (f) BEA topolojilerinin şematikleri.

[Şekil 3, (Tie ve Tan, 2013)'den alınmıştır.]

Bu yetenek özellikle, BEA'ların enerji verimliliği yönünden İYMA'lara göre daha üstün olmasına yol açmaktadır. BEA'ların İYMA'larla mukayese edildiğinde ön plana çıkan en önemli dezavantajı ise; uzun menziller ve büyük araçlar için gerekli olan kapasiteye sahip batarya gruplarının maliyetinin yüksek ve şarj süresinin uzun olmasıdır (Kumar ve Jain, 2014; Yong ve diğ., 2015). TEA'ların yukarıda özetlenen dezavantajları sebebiyle, MEA'lar İYMA ile TEA arasında geçiş sürecinde köprü görevi görmüş ve MEA'lara yönelik çalışmalar ön plana çıkmıştır (Singh ve diğ., 2019). MEA'larda bulunan başlıca elemanlar; mekanik güç aktarma sistemi, İYM, EM, EM sürücü devresi, batarya grubu ve batarya grubunu izleyen-kontrol eden enerji yönetim sistemidir (Singh ve diğ., 2019; Hannan ve diğ., 2018). Daha önce belirtildiği gibi MEA'ların ilk tipi olan hafif MEA topolojisinde, EM ve İYM aynı şaft üzerine bağlı olup EM aracın çalıştırılması, boşta çalışma ve yüksek eğimli yol sürüşlerinde İYM'ye destek amacıyla kullanılmakta-

dır. Dolayısıyla, hafif MEA'larda, emsal boyuttaki EA topolojilerine göre daha küçük güç değerinde EM'ler kullanılır. Buna bağlı olarak, hafif MEA topolojisinde batarya ve sürücü devresi de küçük boyutludur. Bu topolojide, diğer EA'larda olduğu gibi EM, rejeneratif frenlemeyle bataryaları şarj edebilme yeteneğine sahiptir (Benajes ve diğ., 2019).

Genişletilmiş menzilli MEA olarak da isimlendirilen seri MEA'lar; diğer tam MEA topolojilerine göre en basit yapıya sahiptir. Seri topolojide aracın hareketi için gerekli olan tahrik gücü EM tarafından üretilir. İYM, bataryaların şarj edilmesiyle görevli generatörün tahrik edilmesinde kullanılır (Yong ve diğ., 2015). Bu görev paylaşımı sonucu, İYM en yüksek verim değerine karşılık gelen optimal hızda çalışacak boyut ve özelliklerde tasarlanabilir (Shen ve diğ., 2011). Generatör gücüne ve yakıt kapasitesine bağlı olarak batarya boyutu azaltılabilir (Tie ve Tan, 2013). Tahrikte sadece EM kullanılması, çok dişli şanzıman ihtiyacını ortadan kaldırır (Singh ve diğ., 2019). Bununla birlikte, bu topolojinin dezavantajlarından biri, EM'ye

ilaveten bir generatöre ihtiyaç duyulmasıdır. Seri MEA'nın bir diğer dezavantajı ise; İYM tarafından üretilen mekanik enerjinin generatöre aktarımı ve generatörde üretilen elektrikle de EM'nin beslenmesi döngüsünün, kayıpları arttırması ve verimi düşürmesidir (Singh ve diğ., 2019). Rejeneratif frenleme haricinde de batarya şarjına imkan veren yapısı sebebiyle, seri MEA'lar daha çok sık dur-kalk'ların yaşandığı şehir içi trafikte tercih edilmektedir (Tie ve Tan, 2013; Yong ve diğ., 2015).

Paralel MEA'larda hem İYM hem de EM mekanik güç aktarma organlarına bağlıdır. Böylece hareket için gerekli olan tahrik gücü, İYM ve EM'nin birlikte veya birinin çalışmasıyla sağlanabilir (Singh ve diğ., 2019; Shen ve diğ., 2011). İYM ve EM'nin paralel çalışabilme durumuna bağlı olarak, bu topolojinin emsal güç ve fiziksel özelliklere sahip araç uygulamalarında, seri MEA'ya kıyasla verimi daha yüksektir (Tie ve Tan, 2013; Yong ve diğ., 2015). Yine aynı şartlar için paralel MEA, daha küçük boyutta EM ve bataryaya ihtiyaç duyar (Yong ve diğ., 2015). Paralel MEA'lar, İYM ve EM'nin farklı sürüş şartlarında birbirini destekleyebilme yeteneğinden dolayı, şehir içi yanı sıra otoyol trafiği için de istenen bir MEA tipidir. Ancak, bu topoloji, seri topolojiye göre daha karmaşık yapıya sahip ve maliyetlidir (Tie ve Tan, 2013).

Seri-paralel MEA'larda, seri ve paralel topolojilerin bir araya getirilmiş halidir. Dolayısıyla, bu topoloji, seri ve paralel topolojilerin avantajlarını alırken, dezavantajlarını ortadan kaldırır. Seri-paralel MEA'lar, temel yapıları paralel topoloji üzerine kurulu olduğu için seri topolojideki kıyasla daha küçük boyutta EM'ye sahiptirler. Ayrıca, seri topolojinin rejeneratif frenleme haricinde batarya şarjına imkan veren yapısı sebebiyle, paralel topolojinin şehir içi dur-kalk çalışma şartlarındaki dezavantajı ortadan kaldırılmıştır. Böylece, son yıllarda birçok MEA üreticisi tarafından seri-paralel topoloji, tasarımlarda tercih edilmiştir (Sabri ve diğ., 2016).

Karmaşık MEA'lar, seri-paralel MEA'lar ile çok benzer yapıya sahiptirler (Yong ve diğ., 2015; Chau ve Wong, 2002). Aradaki fark, seri-paralel topolojideki generatorün, karmaşık topolojide ekstra bir sürücü devresi üzerinden bataryalara bağlanmış olmasıdır. Bu değişiklik, seri-paralel MEA'lardaki generatörün, karmaşık MEA'larda sürüş sırasında ikinci bir EM

haline gelmesine ve rejeneratif frenlemede generatör olarak çalışarak bataryayı şarj etmesine imkan verir. Böylece karmaşık topolojide tahrik hareketi için iki EM ve bir İYM kullanılmış olur.

Burada şu belirtilmelidir ki; MEA'ların sürüş menzilin ve yakıt ekonomisinin daha iyileştirilmesi amacıyla, araçta bulunan batarya grubunun dışarıdan bir elektrik kaynağından şarj edilebilir tipleri mevcuttur. Bunlar, literatürde ve elektrikli araç piyasasında fişli MEA olarak isimlendirilmiştir. TEA'lara göre daha iyi dinamik cevap ve daha uzun menzil avantajlarına sahip MEA'ların, TEA'larla karşılaştırıldığında dezavantajları ise yapım maliyetlerinin daha yüksek olması ve yapılarında bulunan enerji kaynaklarının (yakıt deposu ve batarya) optimal yönetimi için karmaşık algoritmalar gerektirmeleridir (Yong ve diğ., 2015; Chau ve Wong, 2002; Tie ve Tan, 2013).

### 3. Mekanik güç aktarma yapıları

EA'larda uygulanan, literatürde yaygın olarak bilinen mekanik güç aktarma tipleri tek motorlu ve iki motorlu araç aktarma tipleri olmak üzere iki ana kategoride incelenebilir. Tek motorlu araç aktarma tipleri; geleneksel, şanzımsız (arka motor-ön tekerlek) ve şanzımsız (ön motor-ön tekerlek) olmak üzere üç sınıfa ayrılır. İki motorlu araç aktarma tiplerinin de şanzımsız, tekerlek içi sabit dişlili ve tekerlek içi sabit dişlisiz olmak üzere üç alt sınıfı vardır (Tie ve Tan, 2013; Park ve diğ., 2015). Bu mekanik güç aktarma tiplerine ilişkin şematikler (Park ve diğ., 2015), Şekil 4 (a)- (e)'de sunulmuştur. Şekil 4 (a)'da şematığı verilen, geleneksel aktarma tipi, İYMA'larda kullanılan geleneksel mekanik güç aktarma sistemidir. Bu aktarma tipinde şanzıman, debriyaj ve diferansiyel mevcuttur. Dolayısıyla, geleneksel aktarma yapısında, İYM yerine EM yerleştirilerek pratik bir şekilde EA tasarımında kullanılabilir. Bu aktarma tipi, ticari EA'larda en çok tercih edilen aktarma yapısıdır. Geleneksel tip-ten, şanzıman ve debriyaj kaldırıldığı takdirde, şematikleri sırasıyla Şekil 4 (b) ve (c)'de verilen, motoru arkada yerleştirilmiş-ön tekerlek tahrikli şanzımsız ve motoru önde yerleştirilmiş-ön tekerlek tahrikli şanzımsız tipler gerçekleştirilebilir.

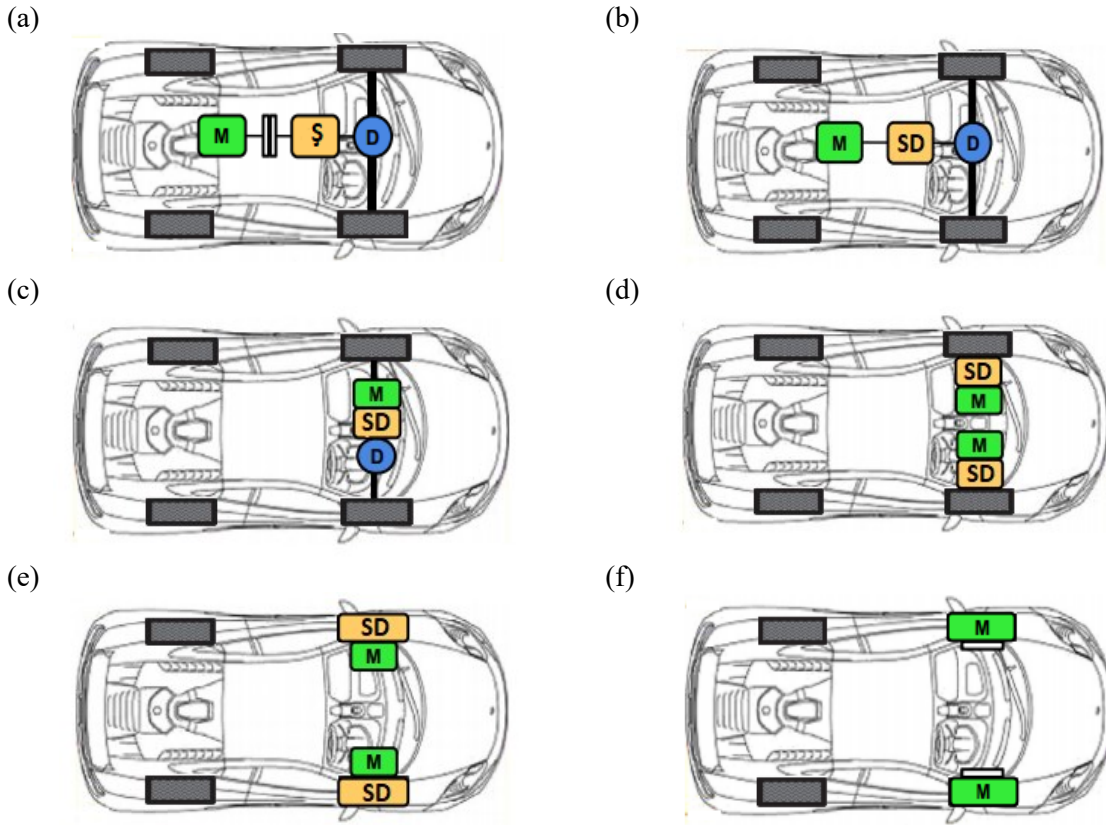
Bu iki tipte de, diferansiyel varlığını korur. Bunlar arasındaki fark, ilk tipte arkadaki motordan diferansiyele tahrik gücü sabit dişli ve shaft üzerinden aktarılırken, ikinci tipte tahrik



gücünün aktarımında ara eleman olarak şaft ortadan kalkmıştır (Park ve diğ., 2015).

İYMA'larda olduğu gibi, tek motorlu EA aktarım tiplerinde de diferansiyel elemanı, tekerleklerin farklı hızlarda dönmesine ve böylece aracın savrulmadan viraj dönüşüne imkan tanır. İki motorlu EA aktarma tiplerinde ise tekerleklerin hız ayarı EM sürücü devreleriyle gerçekleştirilir. Dolayısıyla, şematikleri sırasıyla Şekil 4 (d), (e) ve (f)'de verilen şanzımsız, tekerlek içi motorlu-sabit dişlili ve tekerlek içi motorlu-sabit dişlisiz iki motorlu araç aktarma tiplerinde diferansiyel bulunmaz. Bunlardan, şanzımsız tipte motor tekerlek dışındadır ve

sabit dişli üzerinden tahrik gücü tekerleklere aktarılır. Tekerlek içi motorlu-sabit dişlili tipte, motor tekerlek içindedir ancak tahrik gücü tekerleklere yine sabit dişli üzerinden aktarılır. Tekerlek içi motorlu-sabit dişlisiz tipte, tekerleklere tahrik gücü tekerlek içine yerleştirilmiş motorlardan doğrudan verilir (Park ve diğ., 2015). Şekil 4 (a)'dan (f)'ye doğru, aktarım sistemlerinin, tahrik gücünün iletimi sırasında meydana gelen kayıpları azaltacak biçimde daha kompakt hale geldiği görülmektedir. Diğer taraftan, aynı değişim, EM'nin daha yüksek tork değerlerine sahip olmasını gerekli hale getirmektedir (Tie ve Tan, 2013).



M: Elektrik Motoru, D: Diferansiyel, Ş: Şanzıman, SD: Sabit Dişli

**Şekil 4.** Aktarma tiplerine ait şematikler: tek motorlu EA'lar için (a) geleneksel tip, (b) şanzımsız (arka motor-ön tekerlek), (c) şanzımsız (ön motor-ön tekerlek) ve iki motorlu EA'lar için (d) şanzımsız, (e) tekerlek içi motorlu-sabit dişlili ve (f) tekerlek içi motorlu-sabit dişlisiz.

[Şekil 4, (Park ve diğ., 2015)'den alınmıştır.]

#### 4. Elektrik motor teknolojisi

Bu bölümde, EA'larda kullanılan EM'lerin tipleri ve bunların kontrolünde kullanılan sürücü devreleri hakkında bilgi verilecektir.

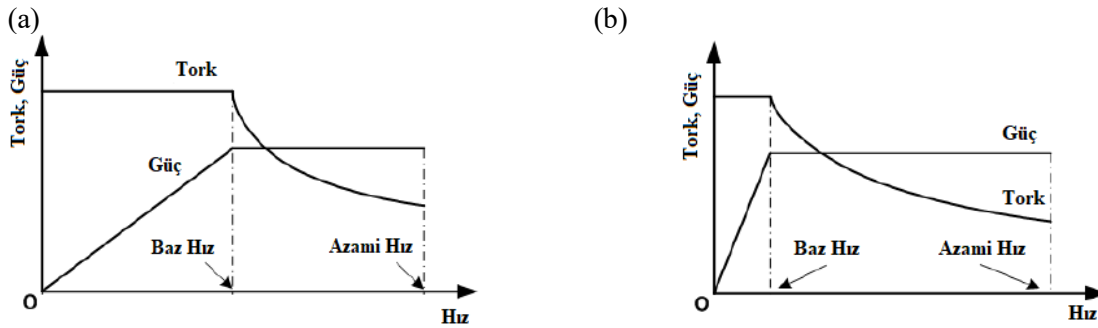
##### 4.1. Motor tipleri

EA'larda kullanılan EM'lerin çeşitli yol koşullarında, sıklıkla durması ve kalkması bir başka deyişle yüksek ivmelenme ve yavaşlama kabiliyetine sahip olması gerekir. Ancak, endüstriyel uygulamalarda EM'ler genellikle belirli koşullar altında anma hızlarında çalışmak üzere işletilirler. Bu sebeple, EA'lardaki EM'lerden beklenti endüstriyel uygulamalardaki beklentiye göre farklıdır. EA uygulamalarında EM'ler; kalkış için yüksek tork değeri, tepe tırmanışlarında düşük hızda çalışabilme, ani hızlanma durumları için yüksek güç yoğunluğu, yüksek hızlarda yüksek güç üretebilme, geniş hız aralıkları için yüksek verim, sabit güç bölgesinde geniş bir hız aralığında çalışabilme (Şekil 5 (Xue ve diğ., 2008)'e bakınız), rejeneratif frenleme ve ani tork cevabı gösterebilme yeteneklerine sahip olmalıdır. Bunlara ilaveten, yüksek kontrol edilebilirlik, hafif ve sağlam olma, arızaya dayanıklılık, düşük maliyet, düşük gürültü seviyesi ve minimum tork dalgalanması, EA uygulamalarında EM'lerin tasarımı için dikkate alınan diğer performans parametreleridir (Kumar ve Jain, 2014; Xue ve diğ., 2008; Riba ve diğ., 2016).

Bütün bu kriterler doğrultusunda, EM seçimi EA tasarımında anahtar faktörlerden biridir. Literatürde yapılan çalışmalardan, ilk EA uygulamalarından itibaren tercih edilen EM'lerin; Fır-

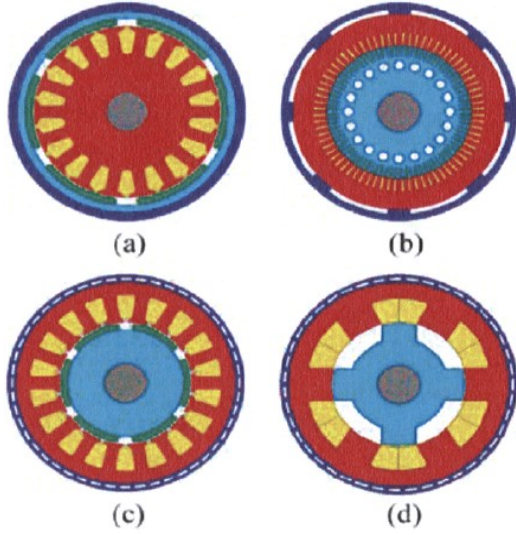
çalı Doğru Akım (FDA), Asenkron (AS), Kalıcı Mıknatıslı (KM) ve Anahtarlamalı Relüktans (AR) motorları olduğu ifade edilebilir (Kumar ve Jain 2014; Xue ve diğ., 2008; Hashemnia ve Asaei, 2008; Rind ve diğ., 2017; Patil ve Dhamal, 2019). Bu motorların yapılarını gösteren şematikler (Hashemnia ve Asaei, 2008), Şekil 6'da verilmiştir.

**FDA motor:** Yüksek yol alma torkları ve hız kontrollerinin basitliği sebebiyle FDA motorlar geleneksel olarak EA uygulamalarında kullanılan EM tipidir. FDA motorların tork-hız karakteristiği EA'ların tahriki için gerekli olan tork-hız karakteristiğine çok yakındır (Kumar ve Jain 2014; Xue ve diğ., 2008; Patil ve Dhamal, 2019). Ayrıca, özellikle yabancı uyarımlı FDA'lar, birbirinden bağımsız tork ve manyetik akı karakteristiklerinden dolayı yüksek hızlarda seyirin bir gerekliliği olan alan zayıflatma çalışma durumu için doğal olarak uygundur (Kumar ve Jain, 2014). Ancak, büyük ve ağır yapıları, düşük güç yoğunlukları, düşük verimleri ile komütatör-fırça elemanlarına sahip olmaları, bu motor tipinin hafif, yüksek hızlı, yüksek verimli, az bakım gerektiren ve sağlam olması istenen EA'larda kullanımı için dezavantajlarıdır (Kumar ve Jain, 2014; Xue ve diğ., 2008; Rind ve diğ., 2017; Patil ve Dhamal, 2019). Bunlara ilaveten, güç elektroniğinde meydana gelen ilerlemeler, EA'larda bu motor tipi yerine komütatörsüz/fırçasız, dolayısıyla daha az bakım gerektiren, daha sağlam ve komutasyona bağlı kayıpları olmayan (daha yüksek verimli) AS, KM ve AR motorların kullanımını hızlandırmıştır (Kumar ve Jain, 2014).



Şekil 5. (a) Endüstriyel uygulamalardaki EM'lerin tipik tork/güç-hız karakteristiği ve (b) EA uygulamalarında EM'lerden beklenen tork/güç-hız karakteristiği.

[Şekil 5, (Xue ve diğ., 2008)'den alınmıştır.]



**Şekil 6.** (a) FDA, (b) AS, (c) KM ve (d) AR motor yapıları.

[Şekil 6, (Hashemnia ve Asaei, 2008)'den alınmıştır.]

**AS motor:** AS motorların, basit yapıları, yüksek güvenilirlikleri, sağlamlıkları, geniş hız aralıkları, düşük bakım ihtiyaçları, düşük tork dalgalanmaları, düşük maliyetleri ve zor koşullarda çalışabilme yetenekleri, EA'larda tercih edilmelerine sebep olan önemli avantajlarıdır (Kumar ve Jain, 2014; Xue ve diğ., 2008; Riba ve diğ., 2016; Hashemnia ve Asaei, 2008). Alan yönlendirmeli kontrol ile AS motorlarda, tork ve manyetik akı karakteristikleri birbirinden bağımsız şekilde kontrol edilerek, FDA motorların EA uygulamalarında gösterdiği yüksek performans yakalanabilir. Ayrıca, bu motorların, alan zayıflatma yöntemiyle sabit güç bölgesindeki hızları anma hızlarının 4-5 katına kadar yükseltilebilir, böylece EA uygulamaları için en önemli gerekliliklerden biri sağlanmış olur. Bununla birlikte, şu ifade edilmelidir ki; AS motorların yüksek hızlarda çalışma koşullarında sabit güç aralığı, devrilme momenti (tork) değeriyle sınırlıdır (Kumar ve Jain, 2014; Xue ve diğ., 2008; Riba ve diğ., 2016). Uygun evirici (sürücü) devresi seçimiyle besleme gerilimi ve frekansı ayarlanarak azami yol alma torku düşük akım seviyelerinde elde edilebilir (Kumar ve Jain, 2014; Riba ve diğ., 2016). Diğer taraftan, rotor kayıplarından dolayı KM ve AR motorlara göre verimi düşüktür, aynı güç değeri için KM motorlara göre daha ağırdır, ayrıca FDA motorlara göre sürücü devreleri daha yüksek maliyetlidir. AS motorların düşük güç faktörüne sahip olması bir diğer dezavantajdır (Kumar ve Jain, 2014).

**KM motor:** Son yıllarda, EA üreticileri tarafından tasarımlarda KM motorlar öncelikle dikkate alınmaya başlanmıştır. KM motorlar besleme gerilimi ve akımı dalga şekillerine göre Kalıcı Mıknatıslı Doğru Akım (KMDA) ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron (KMS) motorlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu motorlar için sırasıyla; fırçasız doğru akım ve fırçasız alternatif akım motoru isimleri de literatürde kullanılmaktadır. İki motorun yapıları aynı olmakla birlikte KMDA dikdörtgen veya trapezoidal dalga formunda gerilimle beslenirken, KMSM sinüzoidal dalga formunda gerilimle beslenir (Kumar ve Jain, 2014; Riba ve diğ., 2016). KM motorlar genellikle radyal akılı tipte tasarlanmaktadır, ancak tekerlek içi uygulamalarda eksenel akılı tipte tasarımların kullanımı tercih edilmektedir (Riba ve diğ., 2016). KM motorlar diğer motor tipleriyle kıyaslandığında, kalıcı mıknatıslarla uyartımdan kaynaklanan; daha düşük ağırlık ve hacimde daha yüksek güç üretebilme, yüksek verim, kompakt yapı, güvenilir olma, düşük bakım ihtiyacı ve düşük soğutma gereksinimi avantajlarına sahiplerdir (Kumar ve Jain, 2014; Riba ve diğ., 2016). Bu avantajlarına karşın, kalıcı mıknatısla uyartımın getirdiği bazı dezavantajları vardır. Bunlar, düşük alan zayıflatma yeteneklerine bağlı olarak kısa sabit güç aralıklarının olması ve yüksek maliyetleridir. Kalıcı mıknatısların mekanik dayanımları, motorda yüksek tork değerlerinin üretilmesini sınırlayan bir diğer faktördür (Kumar ve Jain, 2014; Riba ve diğ., 2016; Rind ve diğ., 2017). Ayrıca, yüksek sıcaklık ve endüvi reaksiyonu sonucu mıknatısların demanyetize olması mümkündür (Hashemnia ve Asaei, 2008; Rind ve diğ., 2017). Diğer taraftan, yüksek hızlarda geri elektromanyetik kuvvetin kontrolünün gerekliliği, sürücü devrelerinin anma güçlerinin dolayısıyla boyut ve maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır (Kumar ve Jain, 2014).

Hız aralıklarının anma hızlarının 3-4 katına yükseltilmesi ve bu yüksek hızlarda yüksek verimle çalışmaları mümkündür. Ancak, bu yetenekler sürücü devrelerinde uygulanacak yonteme bağlıdır (Kumar ve Jain, 2014).

**AR motor:** AR motorlar, rotorlarında uyartım sargısı ve mıknatıs bulundurmamaları sebebiyle, yüksek hızlarda ve yüksek sıcaklıklarda çalışmak için uygundur (Kumar ve Jain, 2014; Rind ve diğ., 2017). EA uygulamalarıyla örtüşen geniş sabit güç aralığı ve tork-hız karakteristiği, arızaları yüksek derecede tolere etme kapasitesi, düşük rotor eylemsizliği, çok çabuk



ivmelenme, yüksek güvenilirlik ve sağlamlık özellikleri vardır (Kumar ve Jain, 2014; Xue ve diğ., 2008; Riba ve diğ., 2016). Uygun kontrol yöntemleri uygulanarak, sabit güç bölgesi anma hızının 7 katına kadar genişletilebilir (Kumar ve Jain, 2014; Riba ve diğ., 2016; Rind ve diğ., 2017). Ancak, yüksek tork dalgalanmaları, akustik gürültü ve özel sürücü topolojisi gerektirmesi, AR motorların olumsuz yönleridir (Kumar ve Jain, 2014; Hashemnia ve Asaei, 2008). Bununla birlikte, AR motorların, EA'larda kullanımında, tork dalgalanması ve akustik gürültü sorunlarının çözümü için makine tasarım yaklaşımları ve sürücü kontrol

yöntemleri üzerine çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur (Gan ve diğ., 2018). AR motorların maliyeti, KM motor maliyetine göre düşük ve AS motor maliyetine göre yüksektir (Kumar ve Jain, 2014).

Buraya kadar detaylı bir şekilde incelenen EM'lerin, performanslarını karşılaştırmak için çeşitli parametreler bakımından en kötünden en iyiye doğru 1 ile 5 arasındaki puanlamaları (Kumar ve Jain, 2014), Tablo 1'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** FDA, AS, KM ve AR motorların karşılaştırması.

[Tablo 1, (Kumar ve Jain, 2014)'den alınmıştır.]

Karakteristik	Kömütatörlü Motorlar		Kömütatörsüz Motorlar	
	Fırçalı Doğru Akım (FDA) Motoru	Asenkron (AS) Motor	Kalıcı Mıknatıslı (KM) Motor	Anahtarlamalı Relüktans (AR) Motor
Kontrol edilebilirlik	5	5	4	3
Boyut ve ağırlık	3	4	4.5	4
Sağlamlık	3.5	5	4	4.5
Güvenilirlik	3	5	4	4.5
Güç yoğunluğu	3	4	5	3.5
Verimlilik	3	4	5	4.5
Hız aralığı	2.5	4	5	5
Dayanım ömrü	3.5	5	4	4.5
Tork yoğunluğu	3	3.5	5	4
Teknik uygunluk	5	4.5	4	3.5
Maliyet	3.5	5	3	4
Aşırı yüklenme kabiliyeti	3	4	4.5	4
Tork dalgalanması/gürültü	3.5	4.5	4	3
Üretilebilirlik	3	5	3	4
Potansiyel gelişme	2.5	3	4.5	5

#### 4.2. Motor sürücü devreleri

EA'larda kullanılan sürücü sistemlerinin temel gereksinimleri;

- Motor ve generatör işletmesi için çift yönlü güç akışı,
- Boyut ve ağırlıkların azaltılması için yüksek verimlilik ve yüksek güç yoğunluğu,
- Yüksek kapasite (sürekli, aşırı gerilim, aşırı yük durumlarında),
- Titreşim, şok ve aşırı ısı artışı durumlarına dayanıklılık,
- Modüler tasarım ve güvenilirlik,
- Düşük maliyet ve düşük Elektromanyetik Girişim (EMG),

şeklinde sıralanabilir (Dabala ve diğ.,2019).

EA'lardaki motor sürücü eviricisi ve ona bağlı sistemler, Güç Yönetimi Entegre Devreleri (GYED), Mikrodenetleyici Ünitesi (MDÜ), yüksek güçlü IGBT veya SiC (Silikon-Carbide) güç modülleri ve ısı sensörleri, yüksek gerilimli batarya, doğru akım (DA) barası kondansatörü, sinyal algılama blokları ile koruma ve izleme devrelerinden meydana gelir. Evirici devresinde yarı iletken anahtarlar, en kritik bileşenlerdir. Bu anahtarlar, bir MDÜ ve eviricinin bir bacağına oluşturan üst taraf ve alt taraf anahtarlarını süren kapı sürücü devreleri ile kontrol edilir. Anahtarların sürülmesinde kullanılan Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) işaretlerinin üretilmesinde, genellikle Uzay Vektör DGM (UVDGM) tekniği kullanılır. Motor çalışmada, gerilim, akım ve konum işaretleri algılanır ve evirici modülasyon işaretlerinin güncellenmesi için mikrodenetleyiciye geri beslenir. Mikrodenetleyicide, iki faz akımı ve konum işaretleri işlenerek, Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) tekniği ile makinanın kontrolü gerçekleştirilir (Dearien, 2019; Drobnik ve Jain, 2013).

Son yıllardaki, EA motor sürücü teknolojisindeki ilerleme, yarı iletken anahtar, bileşenlerin modüler şekilde entegrasyonu ve soğutma konularındaki gelişim neticesinde meydana gelmiştir. Özellikle, geniş band aralıklarına sahip olan SiC ve GaN (Galyum-Nitride) malzeme temelli anahtarların geliştirilmesi sürücülerin performans ve kapasite artışına doğrudan etki eden bir faktör olmuştur. Bu anahtarlar;

- Yüksek gerilim bloklama kapasitesi,
- Daha hızlı anahtarlama,
- Yüksek ısı aralığında çalışma,
- Yüksek ısı iletkenliği,
- Boyutların azaltılması,
- Manyetik yayılım üstünlüğü,

özelliklerine sahiptirler (Shajarati ve diğ., 2018; Mitsubishi Electric).

Son araştırmalarda, 100 kW gücünde 2 seviyeli evirici uygulaması için 80 kHz anahtarlama frekansında sürülen SiC MOSFET modüllerinin 10 kHz anahtarlama frekansında sürülen Si IGBT modüllere kıyasla yalnızca 1/4 oranında anahtarlama kaybına sahip olduğu görülmüştür (Zhang ve diğ., 2018; Kim ve diğ., 2016).

EA'larda, gerilim kaynaklı evirici (GKE), akım kaynaklı evirici (AKE) ve Z Kaynaklı evirici (ZKE) devreleri motor sürücü olarak yaygın bir şekilde kullanılan evirici tipleridir (Patil ve Kalkhambkar, 2017; Krishna ve Suresh, 2016; Verma ve Gupta, 2016).

**Gerilim kaynaklı eviriciler (GKE):** Şekil 7'de GKE 2 seviyeli (2S) ve 3 seviyeli (3S) topolojileri görülmektedir (Ye ve diğ., 2012; Choudhury, ve diğ., 2014). GKE 3S topolojisi DA bara geriliminin ayrık iki kondansatöre bölüştürülerek kondansatörler üzerindeki gerilimin azaltılması bakımından GKE 2S topolojisine kıyasla avantajlıdır. Aynı DA bara geriliminde, yarı iletken anahtarlarda daha küçük gerilim düşümü olması ve yüksek çalışma frekansları için anahtarlama kayıplarının azalması 3S eviricilerin 2S eviricilere göre diğer avantajlardır (Choudhury, ve diğ., 2014).

GKE'ler, DA barasına yerleştirilen kondansatör bankasından veya senkron arttıran tip DA-DA çeviriciden beslenirler. Bu eviriciler, EA'larda ağırlıklı olarak tercih edilmektedir. Bunun sebebi yapılarının basit olması ve maliyetlerinin düşük olmasıdır (Patil ve Kalkhambkar, 2017). Diğer taraftan, evirici çıkış faz-faz arası gerilimi, DA bara geriliminden büyük olamaz. Bundan dolayı, GKE'ler düşürücü tip evirici sınıfına girerler (Krishna ve Suresh, 2016; Verma ve Gupta, 2016). Bu kısıt göz önüne alınarak, DA barasının gerilimini yükseltmek için baranın önüne yükseltici tip DA-DA çeviricisi entegre edilen uygulamalar literatürde mevcuttur (Franke ve diğ., 2008). DA barasında büyük kapasiteli kondansatör bankalarının kullanımı,

darbe akımlarının daha iyi filtrelenmesi ve gerilim kararlılığının sağlanması bakımından önemlidir (Franke ve diğ., 2008).

Eviricinin her bacağına üst ve alt kısmındaki yarı iletken anahtarlar, kısa devreden kaçınmak için aynı anda anahtarlanamaz. Her iki anahtarlama elemanının devreye girme zamanları arasında ölü zaman olarak nitelenen zaman farkı bulunur. Ancak, ölü zaman motor çıkış akımı ve torkunda dalgalanma oluşturur. Bu durum etkisini özellikle alçak devirlerde gösterir (Patil ve Kalkhambkar, 2017; Ye ve diğ., 2012).

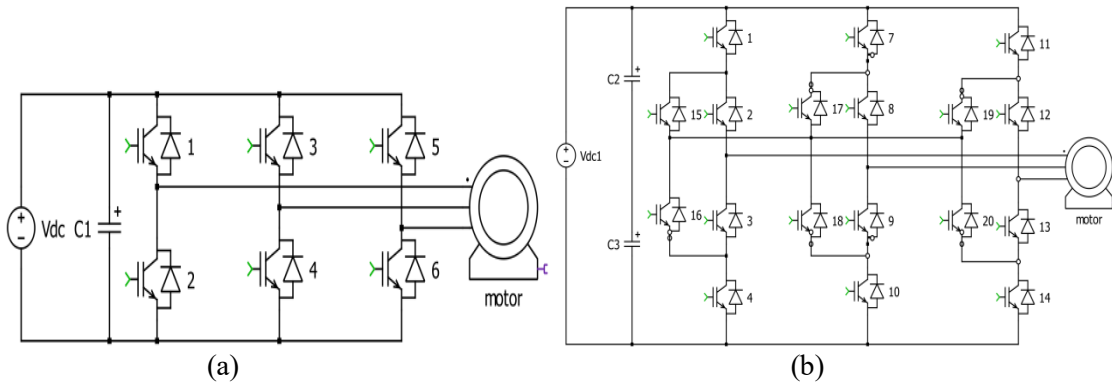
Şekil 8’de görülen AKE’lerde çıkış gerilimi DA geriliminden daha büyük olduğu için yükseltici tip evirici sınıfında yer alırlar (Un-Noor ve diğ., 2017; Wu ve Su, 2008). Bu tip eviricilerde, DA bara kondansatörü kullanılmaz, bunun yerine çok daha küçük kapasiteye sahip AA filtre kondansatörleri kullanılır. DA bara kondansatörlerine sahip olmayan AKE’lerde, enerji depolama bileşeni olarak DA barası tarafında bir bobin yer alır. EA uygulamalarında, AKE’ler, (i) yarı iletken anahtarlarda anti paralel diyotlara ihtiyaç duymazlar, (ii) kısa devre koruma kapasitesi sağlarlar ve (iii) çıkışındaki kondansatörler sayesinde sinüzoidale çok yakın gerilim verirler (Wu ve Su, 2008). Bu tip eviricilerde akım akışı tek yönlüdür ve diyotlar IGBT’lere seri olarak bağlanır. Yukarıda sayılan avantajlarına rağmen, AKE’ler GKE’lerden daha düşük verime sahiptirler. Ayrıca rejeneratif frenlemede anındaki enerjisi geri kazanmak

için ilave DA-DA çeviriciye ihtiyaç duyarlar (Ye ve diğ., 2012).

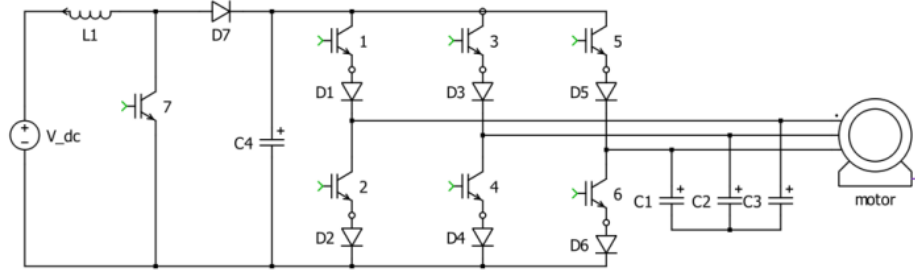
Şekil 9’da görülen ZKE’ler, GKE ve AKE eviricilerin avantajlarını bir araya getirmeyi amaçlayan evirici topolojisidir (Zhu ve Yu, 2010). Bu evirici yükseltici ve alçaltıcı çalışma modlarına sahiptir. İlk çalışma modunda, eviricinin her bacağındaki üst anahtar ve alt anahtarların kontrollü bir şekilde aynı anda kapanması veya kısa devre durumunun meydana gelmesi sağlanarak, çıkış geriliminin yükseltilmesi amaçlanır. İkinci çalışma modunda ise klasik evirici çalışması işlemiyle çıkış gerilimi düşürülür. ZKE’lerin verimleri, AKE ve GKE’lere göre daha düşüktür. ZKE’deki aktif anahtar sayısı yükseltici tip çevirici ve GKE eviriciden daha düşük olmasına karşın pasif eleman (bobin, kondansatör) sayısı daha fazla olduğu için maliyeti daha yüksektir.

Motor gücünün yüksek olduğu uygulamalarda, eviriciler paralel veya kaskad bağlantılı olarak kullanılabilirler. Şekil 10’da görülen bu evirici yapıları literatürde çift evirici adıyla anılmaktadırlar (Wiechmann ve diğ., 2008).

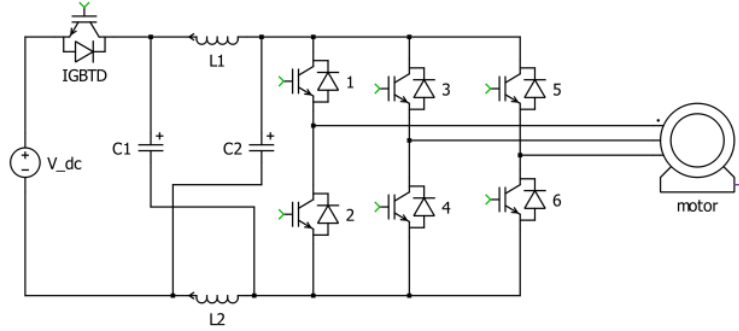
Bir diğer topoloji yapısı ise motor çalışma ve yerleşik batarya şarjını olanaklı hale getiren entegre evirici/doğrultucu topolojisidir (Mande ve diğ., 2020; Chen ve Ge, 2018). Bu yapıya ilişkin detaylı bilgi şarj devre topolojileri kısmında sunulacaktır.



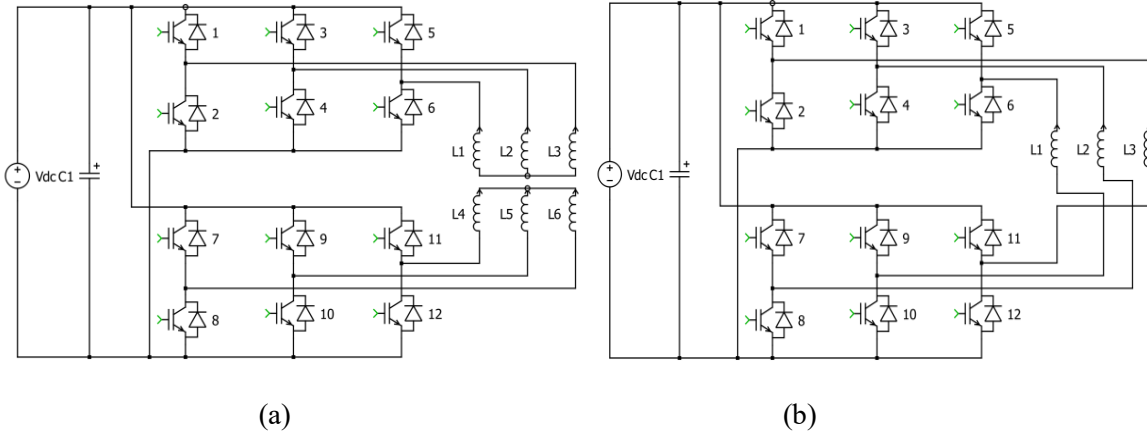
**Şekil 7.** Gerilim kaynaklı evirici devreleri: (a) 2 seviyeli evirici ve (b) 3 Seviyeli diyot nötr kenetleme evirici.



Şekil 8. Akım kaynaklı evirici devresi.



Şekil 9. Z kaynaklı (empedans kaynaklı) evirici devresi.



Şekil 10. Çift evirici devreleri: (a) paralel bağlantı ve (b) kaskad bağlantı.

## 5. Batarya teknolojisi

Bataryalar, EA'ların sürüş menzilinun uzunluğu ve şarj süresiyle doğrudan ilişkili sistem elemanlarıdır. Bundan dolayı, batarya teknolojisindeki ilerleme, EA'ların gelişimi ve yaygınlaşması üzerinde büyük etkiye sahiptir (Andwari ve diğ., 2019; Sun ve diğ., 2019). EA uygulamalarında, bataryalardan genel beklenti; yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, düşük maliyet, yüksek güvenilirlik ve uzun ömürdür (Tie ve Tan, 2013; Yong ve diğ., 2015). Bu beklentilere ulaşmak için yapılan araştırma çalışmaları neticesinde, çeşitli batarya tipleri pazara girmiştir. Günümüzde, EA'larda yaygın olarak kullanılan batarya tipleri; kurşun-asit, nikel temelli ve lityum temelli

bataryalardır (Sun ve diğ., 2019). Aşağıda, sırasıyla bu üç batarya ve diğer yeni nesil batarya tipleri tanımlanmıştır.

### 5.1. Kurşun-Asit bataryalar

En eski ve halen kullanılan şarj edilebilir batarya tipi olan kurşun-asit batarya (Tie ve Tan, 2013; Yong ve diğ., 2015), 1850'li yılların sonunda Fransız fizikçi Gaston Plante tarafından bulunmuştur (Sun ve diğ., 2019; Cho ve diğ., 2015). Kurşun-asit bataryalarda, negatif yüklü elektrotta kurşun, pozitif yüklü elektrotta kurşun dioksit ( $PbO_2$ ) ve elektrolit olarak sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) kullanılmaktadır (Sun ve diğ., 2019; Cho ve diğ., 2015).



Kurşun-asit bataryaların, sulu ve valf ayarlı olmak üzere iki tipi vardır (Sun ve diğ., 2019; Misra ve diğ., 1994). Sulu tip kurşun-asit bataryalar, en ucuz batarya tipidir (Sun ve diğ., 2019). Valf ayarlı kurşun asit bataryalarda, elektrolit, cam elyaf veya jel malzemeye emdirilmiştir. Bu bataryalarda, elektrolitin durağan olması ve havadan yalıtılmış olması sebeplerinden, elektrolit seviyesinin düzenli kontrolü gerekmez. Dolayısıyla, literatürde, valf ayarlı kurşun-asit batarya, bakım gerektirmeyen batarya olarak da anılır (Sun ve diğ., 2019; David ve Thomas (2001).

Kurşun-asit bataryaların, üretimleri ve geri dönüşümleri sırasında çevreye olumsuz etkileri vardır (Tie ve Tan, 2013; Yong ve diğ., 2015; Sun ve diğ., 2019). Ancak, günümüzde, kurşun-asit bataryaların toplanma ve yeniden kazanım oranları, özellikle Avrupa Birliği ve ABD’de %99’un üzerine çıkmıştır (Sun ve diğ., 2019).

### 5.2. Nikel temelli bataryalar

Bu tip bataryalar, pozitif elektrotta nikel hidroksit, negatif elektrotta farklı materyaller ve elektrolit olarak potasyum hidroksit içerirler. Nikel temelli bataryaların, negatif elektrotundaki materyale göre; nikel metal hidroksit (Ni-MH), nikel-demir (Ni-Fe), nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-çinko (Ni-Zn) ve nikel-hidrojen (Ni-H<sub>2</sub>) çeşitleri vardır (Sun ve diğ., 2019; Shukla ve diğ., 2001). Bu çeşitler arasında, Ni-MH bataryalar 1990 yılından beri EA’larda kullanılmaktadır (Sun ve diğ., 2019).

### 5.3. Lityum temelli bataryalar

Bu tip bataryalar ilk olarak 1991 yılında Sony firması tarafından ticarileştirilmiştir (Hannan ve diğ., 2018; Sun ve diğ., 2019). Lityum temelli veya lityum iyon bataryalarda pozitif elektrot olarak lityum metal oksitler, katot olarak karbon ve elektrolit olarak da lityum tuzu ve organik çözücüler bulunur (Hannan ve diğ., 2018). Pozitif elektrotta kullanılan metal oksit cinsine göre; lityum kobalt oksit (LiCoO<sub>2</sub>), lityum mangan oksit (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), lityum demir fosfat (LiFePO<sub>4</sub>), lityum nikel mangan kobalt oksit (LiNiMnCoO<sub>2</sub>), lityum nikel alüminyum kobalt oksit (LiNiCoAlO<sub>2</sub>) ve lityum titanat (Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) çeşitleri vardır (Hannan ve diğ., 2018; Sun ve diğ., 2019). Bunlar arasında, LiFePO<sub>4</sub> bataryalar, diğer lityum-iyon bataryalara nazaran daha yüksek deşarj akımı ve daha düşük maliyete sahiptirler (Sun ve diğ., 2019).

### 5.4. ZEBRA (Sodyum Nikel Klorid) bataryalar

Sodyum Nikel Klorid bataryalar, Ni-MH bataryalarla aynı zamanda EA’lara uygulanmaya başlanmıştır (Yong ve diğ., 2015). Bu batarya tipinin, bir diğer adı da Türkçe de “sıfır emisyon batarya araştırma aktivitesi” manasına gelen, İngilizce “Zero Emission Battery Research Activity” kelimelerinin baş harflerinin kısaltması olan ZEBRA’dır (Sun ve diğ., 2019). ZEBRA batarya hücresinin ana bileşenleri, erimiş sodyum anot, bir seramik beta-alüminyum oksit katı hal elektroliti ve reaktifin NiCl<sub>2</sub> olduğu gözenekli bir katottur. Katot ayrıca yeterli iyonik iletkenlik elde etmek için sıvı NaAlCl<sub>4</sub> içerir (Aksoy ve Soytaş, 2019).

### 5.5. Laboratuvar sürecindeki gelecek nesil bataryalar

Mevcut durumda ticarileşmemiş ve laboratuvar geliştirme fazında olan yüksek performanslı bazı batarya çeşitleri arasında, lityum-sülfür (Li-S), çinko-hava (Zn-Hava) ve lityum-hava (Li-Hava) sayılabilir (Tie ve Tan, 2013; Yong ve diğ., 2015).

Li-S batarya diğer lityum tabanlı bataryalara kıyasla yüksek enerji yoğunluğuna sahip olup en önemli avantajı pahalı olmayan sülfür sebebiyle maliyetinin düşük olmasıdır. Ancak, bu tip bataryanın yüksek kendi kendine deşarj oranı ve kısa ömrü vardır. Li-S bataryaya benzer şekilde, Zn-Hava batarya da yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, ancak kısa ömür ve düşük güç yoğunluğu olumsuz yanlarıdır. Li-Hava bataryanın teorik olarak 1700 Wh/kg civarındaki güç yoğunluğu, İYM’lerin ulaştığı güç yoğunluğu değerlerine oldukça yakındır (Yong ve diğ., 2015).

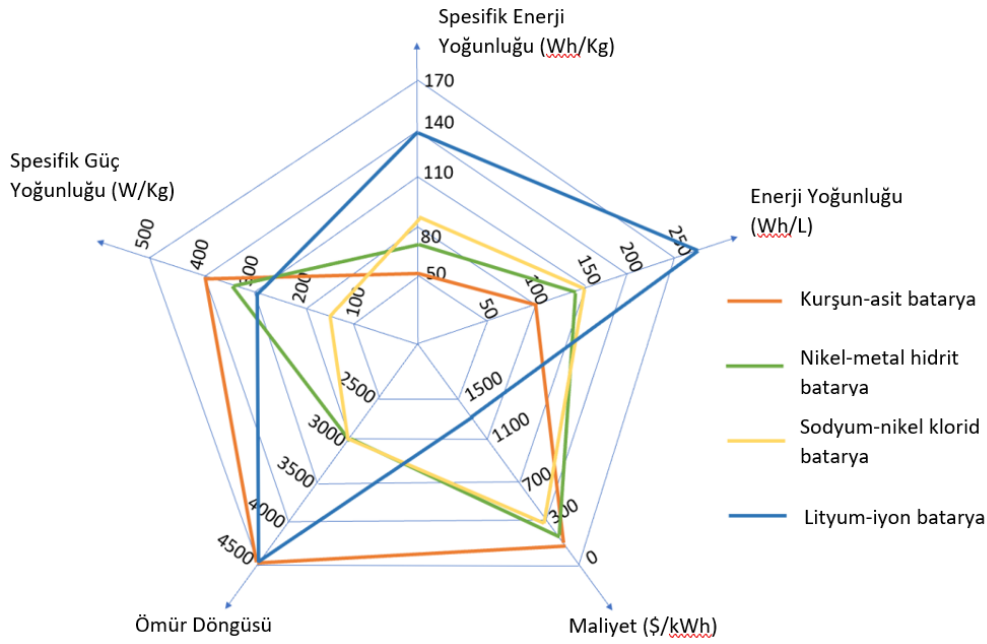
### 5.6. Bataryaların performans karşılaştırması

Pratikte kullanımda olan kurşun-asit, nikel-metal hidrit, sodyum-nikel klorid (ZEBRA) ve lityum-iyon bataryaların spesifik enerji yoğunluğu, spesifik güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu, ömür döngüsü ve maliyet bakımından karşılaştırılmasına ilişkin grafik (Sun ve diğ., 2019), Şekil 11’de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, en iyi ve en kötü performans gösteren seçenekler; spesifik enerji yoğunluğu ile enerji yoğunluğu bakımından lityum iyon ve kurşun-asit bataryalar, spesifik güç yoğunluğu

**Tablo 2.** Kurşun-asit, nikel tabanlı, lityum tabanlı ve ZEBRA bataryalara ait nominal gerilim, kendi kendine deşarj oranı, hafıza etkisi ve işletme sıcaklığı parametreleri.

[Tablo 2, (Yong ve diğ., 2015)'den alınmıştır.]

Batarya Türü	Anma Gerilimi (V)	Kendi Kendine Deşarj Oranı (%)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Kurşun Asit (Pb-acid)	2.0	<5	Yok	-15 ~ +50
Nikel Kadmiyum (NiCd)	1.2	10	Var	-20 ~ +50
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	1.2	20	Nadir	-20 ~ +60
ZEBRA	2.6	<5	Yok	+245 ~ +350
Lityum İyon (Li-ion)	3.6	<5	Yok	-20 ~ +60
Lityum Demir Fosfat (LiFePO <sub>4</sub> )	3.2	<5	Yok	-45 ~ +70

**Şekil 11.** Kurşun-asit, nikel-metal hidrit, sodyum-nikel klorid ve lityum-iyon bataryaların spesifik enerji yoğunluğu, spesifik güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu, ömür döngüsü ve maliyet bakımından karşılaştırılması.

[Şekil 11, (Sun ve diğ., 2019)'den alınmıştır.]

bakımından kurşun-asit ve sodyum-nikel klorid bataryalar, ömür döngüsü bakımından lityum-iyon/kurşun asit ve nikel-metal hidrit/sodyum-nikel klorid bataryalar, maliyet bakımından kurşun-asit ve lityum-iyon bataryalardır.

Tablo 2'de kurşun-asit, nikel tabanlı, lityum tabanlı ve ZEBRA bataryalara ait nominal gerilim, kendi kendine deşarj oranı, hafıza etkisi ve işletme sıcaklığı parametreleri (Yong ve diğ.,

2015) verilmiştir. Bu tablodan, nikel tabanlı bataryaların yüksek seviyede kendi kendine deşarj oranı ve hafıza etkisi dezavantajlarının olduğu, ayrıca hücre çıkış gerilimlerinin diğer bataryalara göre daha düşük olduğu ifade edilebilir. Yine aynı tablo ZEBRA tipi bataryanın diğerlerine kıyasla çok yüksek çalışma sıcaklığı aralığına sahip olduğunu ve en yüksek hücre geriliminin lityum tabanlı bataryalar tarafından sağlandığını göstermektedir.

## 6. Batarya yönetim sistemleri

Güvenilir çalışma, sürüş mesafesinin iyileştirilmesi, araç güç yönetim stratejisinin optimize edilmesi, batarya ömrünün uzatılması ve işletme maliyetinin düşürülmesi için efektif bir Batarya Yönetim Sisteminin (BYS) uygulanması gereklidir. BYS'nin görevleri, batarya içindeki enerjinin güvenilir ve optimal şekilde kullanımı ile araç enerji yönetim sistemi için doğru batarya durum bilgisini sağlamaktır. Ayrıca, bu birim anormal çalışma durumlarında batarya sistemine gerekli müdahaleyi yapacak şekilde tasarlanır (Xiong ve diğ., 2017). Bu amaçlar doğrultusunda BYS'lerde; batarya gerilim-akım-sıcaklık takibi, batarya şarj ve sağlık durumlarının tespiti, ısınma durumu yönetimi, batarya emniyet ve koruma yönetimi ile bataryaların şarj/deşarj dengeleme yönetimi işlemleri yürütülür (Rahimi-Eichi ve diğ., 2013). Bir BYS'nin çalışma prensibini gösteren genel blok diyagramı (Xiong ve diğ., 2017), Şekil 12'de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, bir BYS çok sayıda sensör, aktüatör, kontrolör ve sinyal bağlantı yolu barındırır (Xiong ve diğ., 2017; Lu ve diğ., 2013).

BYS de yeralan örnekleme devresinin ana görevi; kontrol devresinden gelen tetikleme sinyallerine göre batarya paketinden bara gerilimi, akım, hücre gerilimi ve sıcaklık parametrelerini ölçmektir. Kontrol devresinin görevi ise; batarya performans durumlarını, gerilim, akım ve

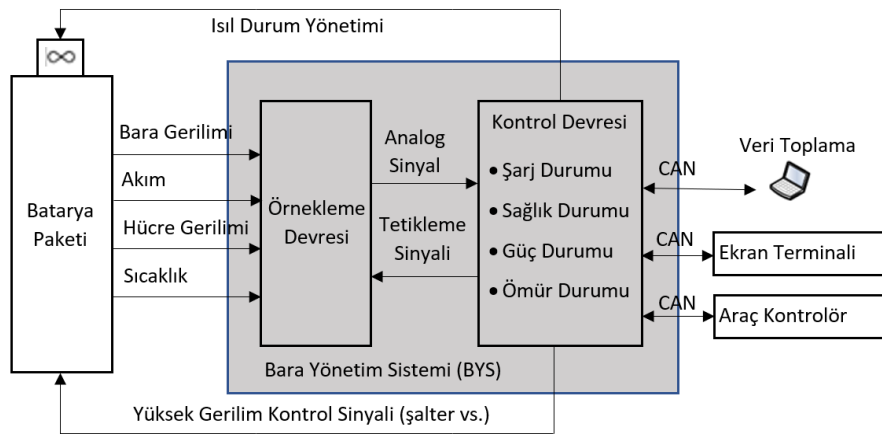
sıcaklık ölçümlerine ilişkin analog sinyallerden, ileri algoritmalar kullanma yoluyla tahmin etmektir. Bu durum tahminleri, araç enerji yönetimi ve güç dağıtımı için kilit karar parametreleri olarak araç kontrolörüne iletilir (Xiong ve diğ., 2017).

### 6.1. Batarya şarj ve sağlık durumu tespit yöntemleri

Literatürde, Batarya Şarj Durumu (BŞD), bataryanın geri kalan şarj değerinin tam dolu durumdaki şarj değerine yüzde oranı olarak ifade edilen indisle ölçülmektedir. Buna göre; BŞD oranı, bataryanın tamamen dolu ve tamamen boş halleri için sırasıyla %100 ve %0'dır (Lu ve diğ., 2013).

BŞD'nin tespitinde kullanılan yöntemler; (i) arama tablosu yöntemleri, (ii) Coulomb sayma veya amper-saat integral yöntemi, (iii) model temelli tahmin yöntemleri ve (iv) veri işleme temelli tahmin yöntemleri olmak üzere dört ana başlık altında incelenebilir (Xiong ve diğ., 2017; Lin ve diğ., 2016).

Arama tablosu yöntemlerinde, hücrenin gerilim veya empedansı ölçülür. BŞD ile bu parametreler arasındaki ilişkiden şarj durumu tespit edilir. Bu yöntemlerin uygulanmalarında, ölçüm almadan önce bataryaların dinlendirilmesi gerektiğinden, bunların araç çalışırken gerçek zamanlı kullanımları mümkün değildir (Xiong ve diğ., 2017; Rahimi-Eichi ve diğ., 2013).



Şekil 12. BYS'nin çalışma prensibini gösteren blok diyagramı.

[Şekil 12, (Xiong ve diğ., 2017)'den alınmıştır.]

Amper-saat integral yöntemi, ölçüm periyodu boyunca batarya terminal akımının integrali alınarak pratik bir şekilde uygulanabilen bir yaklaşımdır. Ancak, aynı yöntem, doğruluğu BŞD'nin başlangıç değerinin hassasiyetinden önemli derecede etkilenmesi ve akım ölçüm hatalarının integral alma işlemiyle katlanarak sonuca etki etmesi sebeplerinden düşük güvenilirliktedir (Xiong ve diğ., 2017).

Model temelli tahmin yöntemlerinde, elektrokimyasal ve elektriksel eşdeğer devre olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılabilir modellerle beraber filtreleme ve kontrol algoritmaları kullanılmıştır. Bu yöntemler, iyi derecede tahmin performansı gösteren ve gerçek zamanlı uygulanabilen yaklaşımlardır (Xiong ve diğ., 2017; Rahimi-Eichi ve diğ., 2013; Lin ve diğ., 2016).

Veri işleme temelli tahmin yöntemleri ise; bataryayı bir kara kutu gibi kabul ederek ölçüm verileri üzerinden makine öğrenme algoritmalarıyla BŞD'yi tahmin eden, dolayısıyla tahmin için bir modele ihtiyaç duymayan yaklaşımlardır. Tahmin hassasiyeti bakımından en iyi performansa sahiplerdir. Fakat öğrenme için büyük miktarda veri gerektirmeleri ve hesaplama karmaşıklıkları dezavantajlarıdır (Lin ve diğ., 2016). Buraya kadar verilen kısa özetten, model temelli tahmin algoritmalarının, tahmin hassasiyeti ve gerçek zamanlı uygulama pratikliği yönleri birlikte değerlendirildiğinde, diğerlerine göre ön plana çıktığı ifade edilebilir.

Batarya Sağlık Durumu (BSD) için literatürde üzerinde fikir birliğine varılmış bir tanım olmakla beraber, bataryanın güncel kapasitesinin anma kapasitesine yüzde oranı şeklinde ifade edilen indis BSD ölçümü için literatürde genellikle kullanılmaktadır. Buna göre; BSD oranı, batarya hiç kullanılmamış durumda iken %100 değerinde kabul edilir. (Lu ve diğ., 2013). BSD ve BŞD tahmini için kullanılan yöntemler aynı temellere dayalıdır (Rezvanizani ve diğ., 2014).

## 6.2. Batarya şarj dengeleme yaklaşımları

Batarya hücrelerinin şarj/deşarj süreçleri sırasında aynı gerilim seviyesinde tutulması manasına gelen batarya dengeleme işleminde kullanılan yöntemler; pasif ve aktif dengeleme yöntemleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir (Andwari ve diğ., 2017; Rahimi-Eichi ve diğ., 2013). Pasif yöntemler; sabit direnç

(Lindemark, 1991) ve ayarlı direnç içeren (Zhang ve diğ., 2011) yöntemler, aktif yöntemler ise; kondansatör (Pascual ve diğ., 1997), bobin (Phung ve diğ., 2014), transformatör (Shin ve diğ., 2010) ve güç elektroniği dönüştürücü (Maharjan ve diğ., 2012) içeren yöntemlerdir.

Pasif yöntemlerde, gerilim seviyesi yüksek olan batarya hücreleri, paralel bağlı bir direnç üzerinden deşarj edilir. Böylece tüm hücrelerin aynı gerilim seviyesi veya şarj durumuna gelmesi sağlanır. Pasif yöntemler, aktif yöntemlere göre uygulama bakımından çok daha pratiktirler. Ancak, dengeleme sırasında, batarya hücresinin sahip olduğu enerji direnç üzerinden harcandığı için bu yöntemlerde sistem verimi düşüktür ve direncin ısınması neticesinde soğutma ihtiyacı ortaya çıkar. Aktif yöntemlerde, gerilim seviyesi yüksek olan batarya hücresinin sahip olduğu fazla enerjinin bir direnç üzerinden deşarj edilmesi yerine, gerilim seviyesi düşük batarya hücrelerine aktarılması sağlanır. Dolayısıyla, enerji kaybı olmadan verimli bir şekilde dengeleme işlemi gerçekleştirilmiş olur (Rahimi-Eichi ve diğ., 2013).

## 7. Şarj teknolojisi

Bu kısımda sırasıyla; enerji aktarma şekline göre şarj tipleri, şarj yaklaşımları, standartlarda tanımlı şarj seviyeleri/modları ve araç üzeri şarj aletlerinde kullanılan devre topolojileri sunulmuştur.

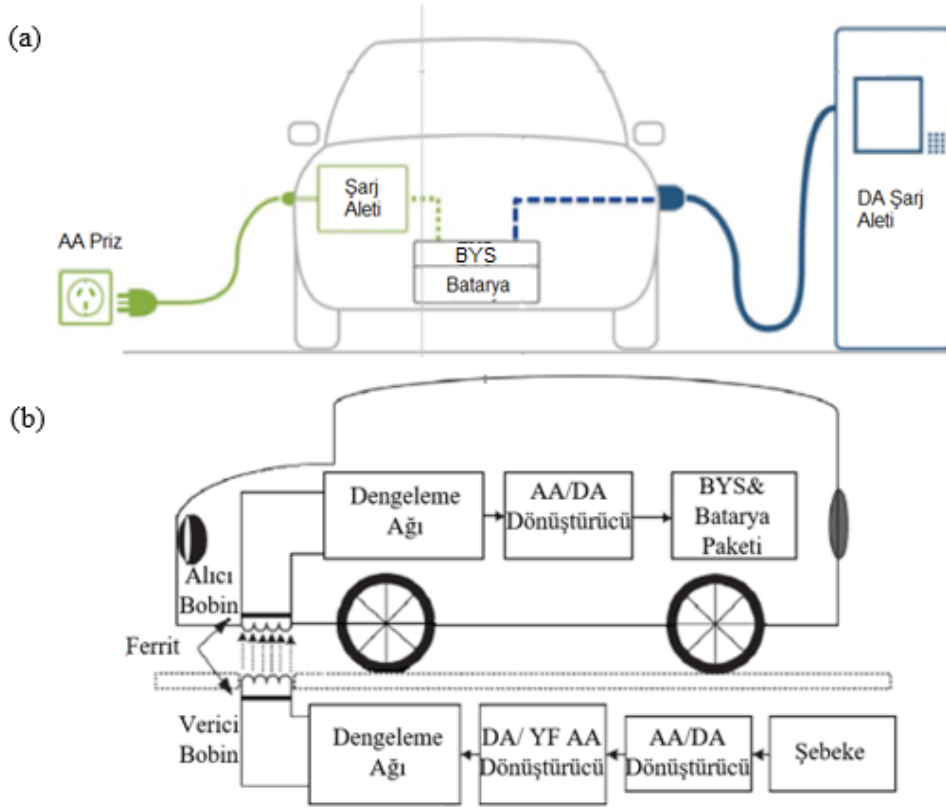
### 7.1. Enerji aktarım şekline göre şarj tipleri

Şarj tipleri; iletim yoluyla ve kablosuz şarj olarak iki ana sınıfa ayrılabilir (Sun ve diğ., 2019). İletim yoluyla ve kablosuz şarj tiplerinin çalışma prensiplerini izah eden şematikler (AC-vsDC, 2018, Panchal ve diğ., 2018), Şekil 13'ten görülmektedir.

#### 7.1.1. İletim yoluyla şarj

İletim yoluyla şarj; kaynaktan bataryaya enerji aktarımının bir iletken üzerinden doğrudan gerçekleştirildiği şarj yöntemidir. İletim yoluyla şarj basit ve verimlidir. Bu tip şarjda, şarj aleti (devresi) araç üzerinde veya araç dışında olabilir. Şarj cihazı araç üzerinde olanlar genellikle yavaş hızda şarja müsaittir. Bunlarda, 1 faz veya 3 faz alternatif akım elektrik enerjisi EA içindeki şarj aletine, bağlantı elemanları üzerinden aktarılır.





Şekil 13. (a) iletim yoluyla şarj ve (b) kablosuz şarj.

[Şekil 13 (a) ve Şekil 13 (b), sırasıyla (ACvsDC, 2018) ve (Panchal ve diğ., 2018)'den alınmıştır.]

EA içindeki şarj aleti, alternatif akımı istenilen değerde doğru akıma çevirerek bataryaya verir. Araç dışı şarj aletleri ise; şarj istasyonlarında bulunabilir ve hızlı şarj yapabilecek yetenekte tasarlanırlar. Bunlarda, genellikle 3 faz alternatif akımdan şarj devresiyle elde edilen doğru akım EA içindeki bataryaya bağlantı elemanları üzerinden verilir (Shareef ve diğ., 2016; Khalid ve diğ., 2019).

### 7.1.2. Kablosuz şarj

Literatürde yaygın olarak bilinen kablosuz şarj tipleri; geleneksel indüktif, kapasitif ve rezonans indüktif şarj olarak ifade edilebilir. Geleneksel ve rezonans indüktif tiplerinde, verici bobini şarj aleti tarafında, alıcı bobini EA üzerinde olan bir yapı kullanılarak, manyetik kuplaj yoluyla enerjinin transferi sağlanır. Bunlarda, şarj aleti ile EA arasında, iletken üzerinden bağlantı yerine manyetik kuplaj yoluyla bağlantı olduğu için her iki taraf elektriksel olarak izoledir. Alıcı ve verici bobinlerin düşük ağırlıkta olması ve küçük hacim kaplaması için Yüksek Frekansta (YF) enerji iletimi gerekli-

dir. Bu sebeple, şarj aleti tarafında şebeke frekansındaki elektrik enerjisi, güç dönüştürücü devresi marifetiyle kHz mertebesinde yüksek frekanslarda elektrik enerjisine dönüştürülerek, verici bobinine aktarılır (Panchal ve diğ., 2018).

Verici bobin tarafında endüklenen yüksek frekanslı elektromanyetik kuvvet ise EA üzerinde yeralan doğrultucu devresiyle doğrultularak bataryaya aktarılır. Bu tip şarj, iletim yoluyla şarja kıyasla yüksek kayıplı ve düşük verimlidir. Bununla birlikte, daha verimli enerji aktarımı için rezonans indüktif tipte alıcı ve verici bobinler aynı frekansta rezonans halinde çalıştırılırlar. Kablosuz şarj yönteminin kapasitif tipinde, indüktif temelli tiplerdeki alıcı ve verici bobinleri yerine alıcı ve verici kapasitörler kullanılır. İndüktif temelli tipler ile karşılaştırıldığında şarj enerjisinin transferi daha yüksek frekans aralıklarında gerçekleştirilir. Ancak, alıcı ve verici arasındaki mesafe indüktif temelli tiplere göre daha kısa olup aktarılabilen güç değeri ve verimi daha düşüktür. Kapasitif tipin avantajları ise daha küçük boyuta ve daha düşük maliyete sahip olmasıdır (Panchal ve diğ.,

2018). Buraya kadar sunulanlara ilaveten, kablosuz şarj sistemlerinin, şarjın EA'nın hareket halinde veya dururken gerçekleşmesine göre; sabit, yarı dinamik ve dinamik şarj sistemleri olmak üzere üçe ayrıldığını belirtmek gerekir (Sun ve diğ., 2019; Khalid ve diğ., 2019; Jang ve diğ., 2016). Sabit sistemler park halinde, yarı-dinamik sistemler trafikte dur-kalk hareketlerinde ve dinamik sistemler yolda hareket halindeyken kablosuz şarja imkan veren sistemlerdir.

2012 yılında Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü kampüsünde kullanılmaya başlanan OLEV isimli kampüs içi otobüs, dinamik sistemlere örnek olarak verilebilir (Sun ve diğ., 2019; Jang ve diğ., 2016). Şekil 14'den bu otobüsün gittiği yol ve yola gömülü kablosuz şarj vericisine ait fotoğraflar (Jang ve diğ., 2016) görülmektedir.

## 7.2. Şarj yaklaşımları

Şarj yaklaşımları; genel olarak, Sabit Akım (SA), Sabit Gerilim (SG), Sabit Akım-Sabit Gerilim (SA-SG), Sabit Güç (SGü), damlama ve darbe şarj olarak sıralanabilir (Sun ve diğ., 2019).

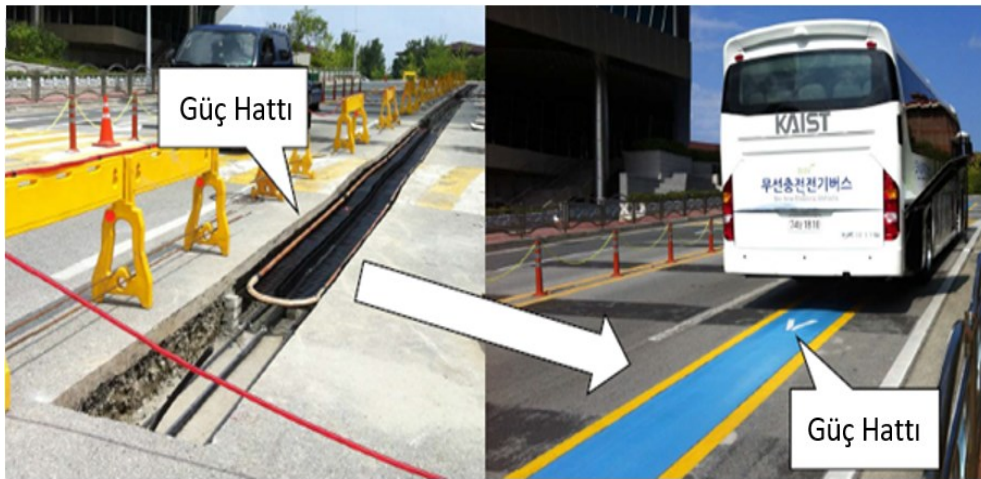
Batarya şarj uygulamalarında genellikle, bataryaya zarar vermeden kısa sürede şarj için şarj aleti ve bataryanın sınır değerlerini aşmadan, azami şarj akımına izin verilir. Buna göre, şarj sürecinde, büyük şarj ve sızıntı şarjı olmak

üzere iki evre gözlemlenebilir. Bataryaya enerji transferinin önemli kısmı, büyük şarj evresinde büyük şarj akımıyla gerçekleştirilir. Daha sonra, sızıntı şarjı evresinde, şarj işlemi küçük akımlarla sonlanır (Masserant ve Stuart, 1997).

SA yaklaşımında, tüm şarj sürecinde şarj akımı sabit tutulur. Bunun için; şarj sırasında bataryaların şarj seviyesi yükseldikçe iç dirençlerinin artması sebebiyle, akım sabit kalacak şekilde şarj aletinin çıkış gerilim seviyesi artırılır (Sun ve diğ., 2019; Shareef ve diğ., 2016).

Bu yaklaşımda, şarj akımının çok yüksek seçilmesi bataryaya zarar verir, çok küçük seçilmesi ise şarj süresini gereksiz şekilde uzatır, dolayısıyla şarj akımının değerinin belirlenmesi çok önemlidir (Hua ve Lin, 2000). Damla şarj yaklaşımı, SA yaklaşımının bir versiyonudur. Bu şarj yaklaşımında, bataryaların kendi kendine deşarj durumu, çok küçük bir şarj akımı verilerek kompanze edilir (Sun ve diğ., 2019).

SG yaklaşımında, başlangıçta batarya şarj seviyesinin düşük olmasına bağlı olarak, düşük batarya iç direncinden dolayı, şarj aletinden batarya yüksek genlikli şarj akımı çekilebilir. Bataryaya zarar verebilecek yüksek genlikli şarj akımına sebep olmamak için şarj gerilimi değerinin seçimi çok önemlidir. Bu yaklaşımda, batarya şarj seviyesi arttıkça iç direnci büyüyeceğinden, şarj işleminin sonuna doğru şarj akımı azalır (Hua ve Lin, 2000).



Şekil 14. OLEV isimli otobüsün gittiği yol ve yola gömülü kablosuz şarj vericisi.

[Şekil 14, (Jang ve diğ., 2016)'dan alınmıştır.]

İki kademeli şarj olarak da literatürde isimlendirilen, SA-SG yaklaşımında, bataryaya öncelikle SA ve devamında SG evrelerini içeren şarj işlemi uygulanır (Sun ve diğ., 2019; Shareef ve diğ., 2016; Hua ve Lin, 2000). SGü yaklaşımında ise; bataryaya şarj sırasında aktarılan güç sabit tutulur (Sun ve diğ., 2019).

Darbe şarj yaklaşımında, bataryaya verilen akım darbeleriyle hızlı şarj yapılması amaçlanır. İki akım darbesi arasında batarya elektrotları etrafındaki gazın dağılması için batarya dinlendirilir. Bu yaklaşımın, elektrot etrafındaki gazı azaltmak için dinlenme aralıklarında çok kısa süreli negatif deşarj akım darbelerinin uygulandığı şekli de literatürde mevcuttur (Sun ve diğ., 2019).

### 7.3. Standartlarda tanımlı şarj seviyeleri/modları

EA'ların şarjı üzerine farklı ülkeler ve organizasyonların çeşitli standartları mevcuttur. Bu standartlardan önde gelenleri olarak; Otomotiv Mühendisleri Derneği'nin Standardı (SAE Standardı, ABD), Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'nun Standardı (IEC Standardı, İsviçre) ve Japon Elektrikli Araç Derneği'nin Standardı (JEV Standardı veya JEVS) sayılabilir (Yong ve diğ., 2015).

SAE J1772 standardına göre pratikte, alternatif akım seviye 1, alternatif akım seviye 2, doğru akım seviye 1 ve doğru akım seviye 2 şarj seviyeleri uygulanmaktadır. Alternatif Akım Seviye 1 için alçak gerilim tesislerindeki tek fazlı prizler dikkate alınarak, araç üzerinde bulunan şarj aletine verilecek gerilim-akım seviyeleri 120 V<sub>ac</sub> ve 12-16 A olarak belirlenmiştir. Bu seviyede kaynağa bağlanmaya uygun araç üzeri bir şarj aletiyle, şarj aletinin güç değerine bağlı olmakla birlikte, %20 dolu bir bataryanın tam doluluk oranına ulaşabilmesi için geçen süre, 17 saati bulabilmektedir. Alternatif Akım Seviye 2 için sadece araç şarjına tahsis edilmiş tek veya üç fazlı alternatif akım besleme alt yapıları dikkate alınarak, araç üzerinde bulunan şarj aletine verilecek gerilim seviyesi ve akım üst sınırı 240 V<sub>ac</sub> ve 80 A tanımlanmıştır. Bu seviyede kaynağa bağlanmaya uygun araç üzeri bir şarj aletiyle, şarj aletinin güç değerine bağlı olmakla birlikte, %20 dolu bir bataryanın tam doluluk oranına ulaşması için, 1.2 ile 7 saat arası bir süre gereklidir. Ayrıca, şarj istasyonlarında kurulu araç dışı şarj aletlerinden araç üzerindeki bataryaya verilecek doğru akım elektriğin; gerilim aralığı ve akım üst sınırı olarak; doğru

akım seviye 1 için 200-450 V<sub>dc</sub> ve 80 A, doğru akım seviye 2 için 200-450 V<sub>dc</sub> ve 200 A değerleri tanımlanmıştır. İlk doğru akım seviyesinde, %20 dolu bir bataryanın tam doluluk oranına ulaşması için geçen süre 1.2 saati, ikincisinde ise %20 dolu bir bataryanın %80 doluluk oranına ulaşması için geçen süre 20 dakikayı bulabilmektedir (Yong ve diğ., 2015; Sun ve diğ., 2019).

Burada şu belirtilmelidir ki, literatürde, SAE J1772 standardında tanımlı bu seviyeler; doğru akım seviye 1 ve 2 birleştirilerek, alternatif akım seviye 1, alternatif akım seviye 2 ve doğru akım seviye 3 olarak da anılmaktadır (Falvo ve diğ., 2014).

CHAdEMO ismiyle de bilinen G105 standardı ise sadece doğru akım hızlı şarj üzerine olup bu standartta şarj istasyonlarında kurulu araç dışı şarj aletlerinden, araç üzerindeki bataryaya verilecek doğru akım elektriğin; gerilim seviyesi ve akım üst sınırı olarak 500 V<sub>dc</sub> ve 125 A tanımlanmıştır. Bu standarda göre, optimal doğru akım şarj koşulları olan 500 V<sub>dc</sub> ve 100 A gerilim-akım uygulandığı takdirde, bir batarya %80 doluluk oranına 30 dakika içinde şarj edilebilmektedir (Yong ve diğ., 2015).

IEC 62196 standardı ise dört farklı şarj modu tanımlamıştır. Mod 1, ekstra koruma ve haberleşme bulundurmeyen normal priz-fiş bağlantı elemanları üzerinden, tek faz ve üç faz için sırasıyla 250 V<sub>ac</sub> ve 480 V<sub>ac</sub> gerilim üst sınırları ile 16 A akım üst sınır değeriyle yavaş hızda şarj için tanımlanmıştır. Mod 2'de, Mod 1'deki gerilim sınır değerleri korunmuş, ancak akım üst sınırı 32 A değerine yükseltilmiştir. Mod 2'nin Mod 1'den bir diğer farkı, priz tarafında toprak hattı yoksa enerjiyi kesen bir haberleşme adaptörünün kablo üzerinde bulunmasını şart koşmasıdır. Fakat enerjinin sağlandığı priz tarafında herhangi bir kontrol pini bulunmasına gerek yoktur. Mod 3, üç fazlı 480 V<sub>ac</sub> gerilim üst sınırı ve 250 A akım üst sınır değeriyle şarja imkan verir. Bu modda kablonun hem şarj kaynağı hem de araç tarafında kontrol ve sinyal pinleri vardır. Araç yoksa araca bağlanacak socket cansızdır yani enerji yoktur. Mod 3, ilk iki moda kıyasla daha hızlı ve güvenli şarj sağlar. İlk üç modda, aracın üzerindeki şarj aletinin girişine alternatif akım verilir. Mod 4 hızlı doğru akım şarjı tanımlar. Bu modda, kaynak tarafındaki şarj aletinden araca 200-600 V<sub>dc</sub> gerilim aralığında ve 400 A akım üst sınırına kadar doğru akım elektrik enerjisi verilebilir

(Schwarzer ve Ghorbani, 2015). Ortalama veya tipik bir elektrikli aracın bataryasının tam şarj olmasının, mod 1 ve 2 için yaklaşık olarak 6-8 saat, mod 3 için 1-2 saat ve mod 4 için 5-30 dakika zaman alabildiği literatürde raporlanmıştır (Montoya ve diğ., 2016).

#### 7.4. Şarj aleti devre topolojileri

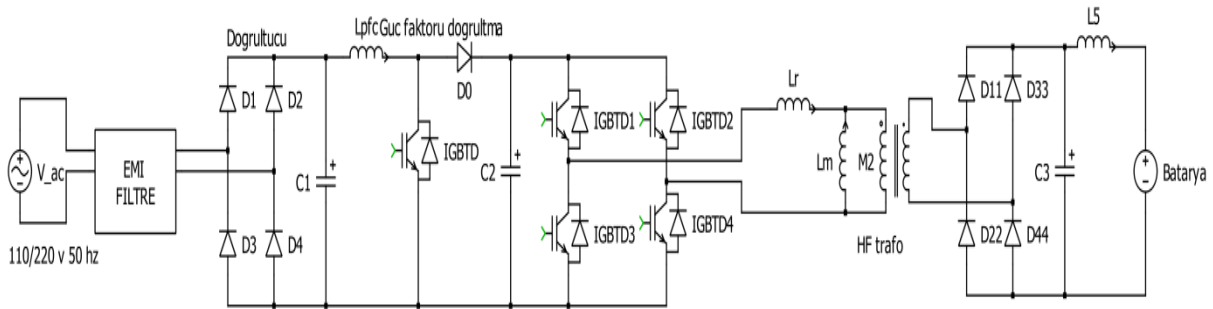
Prize takılan elektrikli araçlarda şarj sistemleri, tek yönlü ve çift yönlü güç akışına izin veren topolojiler olarak ikiye ayrılabilirler (Fasugba ve Krein, 2011; Du ve Lukic, 2011). Çift yönlü şarj devreleri, batarya enerjisinin şebekeye aktarılmasına, dolayısıyla aracın dağıtık üretim birimi olarak kullanımına imkan verirler.

**Tek yönlü şarj devreleri:** Genellikle, güç faktörü düzeltmeli bir AA-DA dönüştürücü ve yüksek frekanslı trafo izolasyonlu bir DA-DA dönüştürücü içeren iki kısımdan oluşurlar. Bu yapı, düşük frekanslı (giriş hattı frekansının iki katı frekansta) dalgalanma enerjisini azaltmak için büyük hacimli elektrolitik kondansatörlü bir ara DA bara gerektirir, böylece batarya tarafında daha düzgün bir DA çıkışı elde edilir (Gautam ve diğ., 2012). Bu tip şarj sistemlerinin bir dezavantajı, maliyeti arttıran büyük boyutlu DA bara kondansatörü içermeleridir (Prasad ve diğ., 2015). Şekil 15’ de tek yönlü rezonans devreli şarj sistemi görülmektedir (Prasad ve diğ., 2015).

**Çift yönlü şarj devreleri:** Çift yönlü şarj sistemleri, şebekeden araca, ayrıca araçtan eve,

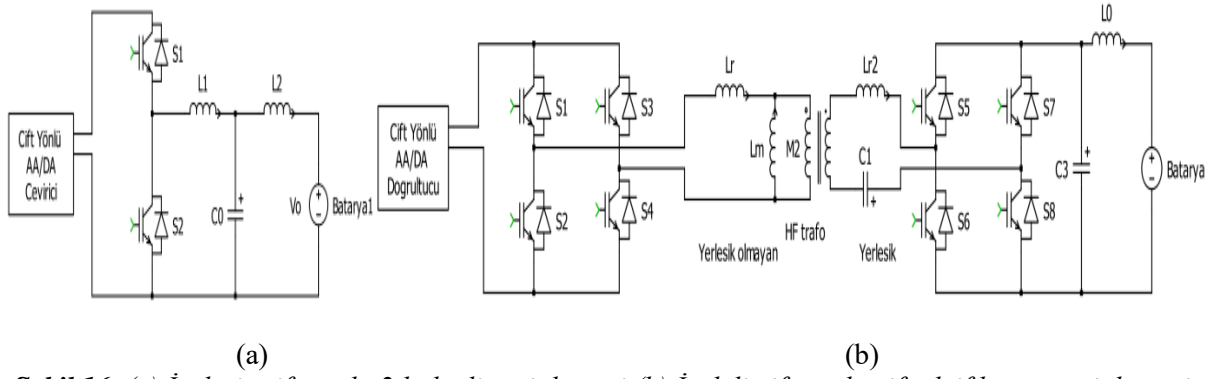
harici yüke veya en yaygın olarak şebekeye giden güç akışı kontrolünü sağlar (Khaligh ve D’Antonio, 2019). Şebekeyle araç arasında güç akışını kontrol eden aktif çift yönlü AA-DA çevirici ile batarya akımını kontrol eden çift yönlü DA-DA çevirici olmak üzere iki devre parçasından oluşurlar. Koruma bakımından, izoleli ve izolesiz olmak üzere iki tipi vardır. Sistem, şarj modunda çalışırken aktif ve reaktif gücü kontrol etmek için istenilen faz açısında sinüsoidal akımla sürülürler. Deşarj modunda benzer olarak sinüzoidal şekilde akımı ters yönde akıtır (Yılmaz ve Krein, 2013). Şekil 16’da çift yönlü şarj devresi örnekleri görülmektedir (Khaligh ve D’Antonio, 2019).

**Entegre batarya şarj sistemleri:** Literatürde, araç şarj sistemlerinin ağırlığını, hacmini ve maliyetini azaltmak için motor sürücüler ile entegre edilmiş araç üzeri şarj sistemleri geliştirilmiştir (Mande ve diğ., 2020; Chen ve Ge, 2018; Yılmaz ve Krein, 2013; Yılmaz ve Krein, 2012; Subotic ve Levi, 2015). Bu sistemlere ilişkin devre şematiği Şekil 17’de sunulmuştur (Mande ve diğ., 2020). Bu sistemlerde, motor sargıları, filtre ve izolasyon transformatörü gibi kullanılırken, motor sürücü devresi çift yönlü AA-DA çevirici görevi görür. Ağırlık, hacim ve maliyet azaltmalarına karşın, kontrol karmaşıklıkları en büyük dezavantajlarıdır.

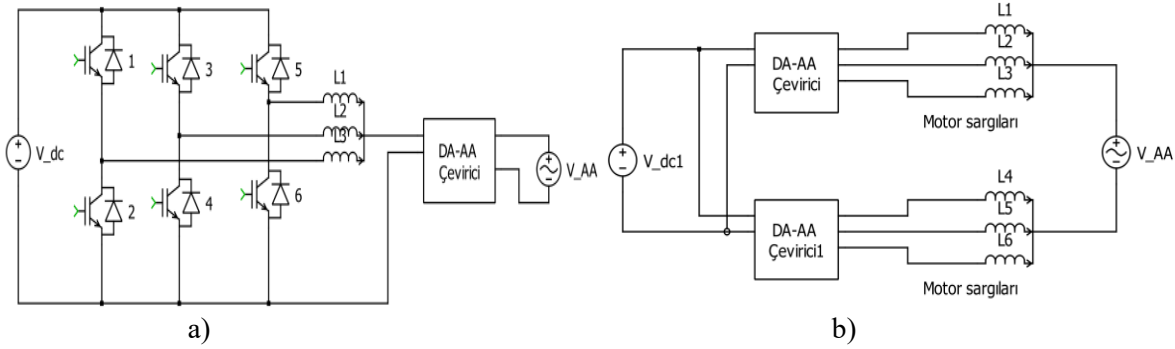


Şekil 15. Yerleşik Tek yönlü tam köprü şarj devresi.





Şekil 16. (a) İzolesiz çift yönlü 2 bölgeli şarj devresi (b) İzoleli çift yönlü çift aktif köprü şarj devresi.



Şekil 17. Entegre evirici/doğrultucu topolojileri a) Eviricinin DA/DA Çevirici olarak kullanılması b) Evirici AA/DA çevirici olarak kullanılması.

## 8. Sonuç ve tartışma

Bu makalede, elektrikli araçlar üzerine kapsamlı bir literatür taraması sonucunda ulaşılan, aktarma yapısı, elektrik motor, motor sürücü devresi, batarya, batarya yönetim sistemi ve şarj sistemi teknolojileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bu inceleme neticesinde;

- Mekanik güç aktarım sistemlerinin, gelişim sürecinde, tahrik gücünün iletiminde meydana gelen kayıpların azaltılması amacıyla daha kompakt hale geldiği, ancak bu değişimin, elektrik motorlarının daha yüksek tork değerlerine sahip olmasını gerektirdiği,
- Düşük ağırlık ve hacimde yüksek güç üretebilme, yüksek verim, kompakt yapı ve düşük soğutma ihtiyacı nitelikleriyle kalıcı mıknatıslı motorların güncel elektrikli araç uygulamalarında ön plana çıktığı, diğer taraftan anahtarlamalı relüktans motorların elektrikli araç uygulamalarıyla örtüşen geniş sabit güç aralığı ve tork-hız karakteristiği, arızaları yüksek derecede tolere etme kapasitesi, düşük

rotor eylemsizliği ve sağlamlık nitelikleriyle gün geçtikçe popülerliğini arttırmakta olduğu,

- Motor sürücü sistemlerinde, genellikle gerilim kaynaklı evirici topolojisinin tercih edildiği, ancak entegre evirici/doğrultucu topolojisinin motor çalışma ve yerleşik batarya şarjını olanaklı hale getirdiği, bu yapı sayesinde, araç üzeri batarya şarj sistemlerinin boyutlarının ve ağırlıklarının önemli derecede azaldığı,
- Ticarileşmiş batarya teknolojileri arasında, lityum temelli olanların enerji yoğunluğu, hücre gerilimi ve ömür bakımından diğerlerine kıyasla önemli derecede üstün olması sebebiyle elektrikli araç uygulamalarında genellikle tercih edildiği, ancak bu batarya tipinin maliyetinin yüksek olduğu, dolayısıyla maliyeti düşük ve performansı yüksek lityum-sülfür, çinko-hava ve lityum-hava gibi batarya tipleri üzerine laboratuvar aşamasında çalışmaların var olduğu,
- Enerji aktarım şekline göre şarj tekniklerinin iletim yoluyla ve kablosuz şarj ol-

mak üzere iki ana sınıfa ayrıldığı, kablosuz şarj sistemlerinin hareket halinde dinamik şarja imkan vermesi bakımından elektrikli toplu taşıma araçları için önemli bir seçenek haline geldiği, iletim yoluyla şarjda ise araç dışı seçenek olarak DA hızlı şarj sistemleri üzerine bir eğilimin olduğu, araç üzeri seçeneklerde motor sürücü devreleriyle entegre şarj devrelerinin maliyet, ağırlık ve hacim bakımından ön plana çıktığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

## Kaynaklar

**ACvsDC**, AC vs. DC charging, (2018). <<https://charge.net.nz/faq/what-is-the-difference-between-ac-and-dc-charging/acvsdc/>>, erişim tarihi: 15.11.2020.

**Aksoy, H. & Soytaş, S.H.** (2019). Enerji ve ulaşım sektörleri dönüşümünde batarya teknolojilerinin rolü: eğilimler, fırsatlar ve yenilikçi uygulamalar. *Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi*.

**Andwari, A. M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R. & Esfahanian, V.** (2017). A review of battery electric vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 414-430.

**Benajes, J., García, A., Monsalve-Serrano, J. & Martínez-Boggio, S.** (2019). Optimization of the parallel and mild hybrid vehicle platforms operating under conventional and advanced combustion modes. *Energy Conversion and Management*, 190, 73-90.

**Bubeck, S., Tomaschek, J. & Fahl, U.** (2016). Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany. *Transport Policy*, 50, 63-77.

**Chau, K. T. & Wong, Y. S.** (2002). Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 43(15), 1953-1968.

**Chen, L. & Ge, B.** (2018, June). High power traction inverter design and comparison for electric vehicles. *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Long Beach, CA, USA.

**Cho, J., Jeong, S. & Kim, Y.** (2015). Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 48, 84-101.

**Choudhury, A., Pillay, P., & Williamson, S. S.,** (2014). Comparative analysis between two-level and three-level dc/ac electric vehicle traction inverters using a novel dc-link voltage balancing algorithm, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), 529-540.

**Dabala, K. & Kazmierkowski, M. P.** (2019) Converter-fed electric vehicle (car) drives -A critical review, *Przeglad Elektrotechniczny*, 95(9):1-12.

**David, L. & Thomas, B. R.** (2001). Handbook of batteries 3rd Edition. New York: McGraw-Hill.

**Dearien, A.** (2019). HEV/EV traction inverter design guide using isolated IGBT and SiC gate drivers. *Texas Instruments Application Report*.

**Demir, A.** (2020). Türkiye'nin otomobilinin GZFT analizi. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 1(1), 24-46.

**Drobnik, J. & Jain, P.** (2013). Electric and hybrid vehicle power electronics efficiency, testing and reliability. *World Electric Vehicle Journal*, 6(3), 719-730.

**Du, Y., Lukic, S., Jacobson, B. & Huang, A.** (2011, September). Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, USA.

**Falvo, M. C., Sbordone, D., Bayram, I. S. & Devetsikiotis, M.** (2014, June). EV charging stations and modes: International standards. *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, Italy.

**Fasugba, M. A. & Krein, P. T.** (2011, September). Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, IL, USA.

**Gan, C., Wu, J., Sun, Q., Kong, W., Li, H. & Hu, Y.** (2018). A review on machine topologies and control techniques for low-noise switched reluctance motors in electric vehicle applications. *IEEE Access*, 6, 31430-31443.

**Gautam, D. S., Musavi, F., Edington, M., Eberle, W. & Dunford, W. G.** (2012). An automotive onboard 3.3-kW battery charger for

PHEV application. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8), 3466-3474.

**Gupta, U., Yadav D. K. & Panchauli D.** (2019, October). Field oriented control of PMSM during regenerative braking, *2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, Bangaluru, India, India.

**Hannan, M. A., Hoque, M. M., Hussain, A., Yusof, Y. & Ker, P. J.** (2018). State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *IEEE Access*, 6, 19362-19378.

**Hashemnia, N. & Asaei, B.** (2008, September). Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal.

**Hua, C. C. & Lin, M. Y.** (2000, December). A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles. *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cholula, Puebla, Mexico.

**Jang, Y. J., Jeong, S. & Lee, M. S.** (2016). Initial energy logistics cost analysis for stationary, quasi-dynamic, and dynamic wireless charging public transportation systems. *Energies*, 9(7), 483.

**Khalid, M. R., Alam, M. S., Sarwar, A. & Asghar, M. J.** (2019). A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid. *Etransportation*, 1, 100006.

**Khaligh, A. & D'Antonio, M.** (2019). Global trends in high-power on-board chargers for electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3306-3324.

**Khan, M. & Kar, N. C.** (2009). Hybrid electric vehicles for sustainable transportation: A Canadian perspective. *World Electric Vehicle Journal*, 3(3), 551-562.

**Kim, H., Chen, H., Zhu, J., Maksimović, D. & Erickson, R.** (2016, November). Impact of 1.2 kV SiC-MOSFET EV traction inverter on urban driving. *2016 IEEE 4th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, Fayetteville, AR, USA.

**Krishna, R. A. & Suresh, L. P.** (2016, March). A brief review on multi level inverter topologies. *2016 International Conference on Circuit,*

*Power and Computing Technologies (IC-CPCT)*, Nagercoil, India.

**Kumar, L. & Jain, S.** (2014). Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 924-940.

**Li, C., Negnevitsky, M., Wang, X., Yue, W. L. & Zou, X.** (2019). Multi-criteria analysis of policies for implementing clean energy vehicles in China. *Energy Policy*, 129, 826-840.

**Li, Z., Khajepour, A. & Song, J.** (2019). A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles. *Energy*, 182, 824-839.

**Lin, C., Mu, H., Xiong, R. & Shen, W.** (2016). A novel multi-model probability battery state of charge estimation approach for electric vehicles using H-infinity algorithm. *Applied Energy*, 166, 76-83.

**Lindemark, B.** (1991, November). Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance. *Thirteenth International Telecommunications Energy Conference-INT-TELEC 91*, Kyoto, Japan, Japan.

**Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J. & Ouyang, M.** (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272-288.

**Maharjan, L., Yamagishi, T. & Akagi, H.** (2010). Active-power control of individual converter cells for a battery energy storage system based on a multilevel cascade PWM converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(3), 1099-1107.

**Mande, D., Trovão, J. P. & Ta, M. C.** (2020). Comprehensive review on main topologies of impedance source inverter used in electric vehicle applications. *World Electric Vehicle Journal*, 11(2), 37.

**Masserant, B. J. & Stuart, T. A.** (1997). A maximum power transfer battery charger for electric vehicles. *IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems*, 33(3), 930-938.

**Misra, S. S., Noveske, T. M. & Williamson, A. J.** (1994, November). Maintenance and reliability of standby battery systems: flooded vs. valve regulated lead acid battery. *Proceedings of Intelec 94*, Vancouver, BC, Canada.

**Mitsubishi Electric**, Features of mitsubishi electric automotive power devices,

<<http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/application/automobile/index.html>> erişim tarihi: 28.05.2020.

**Mitsubishi**, Mitsubishi outlander PHEV takes a big step towards petrol-free driving, (2017). <[www.stuff.co.nz/motoring/lifestyle-vehicles/91569905/mitsubishi-outlander-phev-takes-a-big-step-towards-petrol-free-driving](http://www.stuff.co.nz/motoring/lifestyle-vehicles/91569905/mitsubishi-outlander-phev-takes-a-big-step-towards-petrol-free-driving)>, erişim tarihi: 06.05.2020.

**Montoya, F. G., Torres-Moreno, J. M. L. J. & Barón, F. M. A. V.** (2016, May). Analysis of charging stations for electric vehicles in Spain. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16)*, Madrid, Spain.

**Palmer, K., Tate, J. E., Wadud, Z. & Nellthorp, J.** (2018). Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan. *Applied Energy*, 209, 108-119.

**Panchal, C., Stegen, S. & Lu, J.** (2018). Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 21(5), 922-937.

**Park, G., Lee, S., Jin, S. & Kwak, S.** (2014). Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains. *Expert Systems with Applications*, 41(5), 2595-2607.

**Pascual, C. & Krein, P. T.** (1997, February). Switched capacitor system for automatic series battery equalization. *Proceedings of APEC 97- Applied Power Electronics Conference*, Atlanta, GA, USA.

**Patil, M. S. & Dhamal, S. S.** (2019, December). A detailed motor selection for electric vehicle traction system. *2019 Third International conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)*, Palladam, India.

**Patil, S. R. & Kalkhambkar, V. N.** (2017, February). Hybrid space vector pulse width modulation voltage source inverter-a review. *2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI)*, Pune, India.

**Phung, T. H., Collet, A. & Crebier, J. C.** (2014). An optimized topology for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(9), 4603-4613.

**Prasad, R., Namuduri, C. & Kollmeyer, P.** (2015, September). Onboard unidirectional automotive G2V battery charger using sine charging and its effect on li-ion batteries. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada.

**Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., He, X. & Hao, H.** (2019). Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle. *Energy*, 177, 222-233.

**Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F. & Chow, M. Y.** (2013). Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2), 4-16.

**Rezvanianiani, S. M., Liu, Z., Chen, Y. & Lee, J.** (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of Power Sources*, 256, 110-124.

**Riba, J. R., López-Torres, C., Romeral, L. & Garcia, A.** (2016). Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 367-379.

**Rind, S. J., Ren, Y., Hu, Y., Wang, J. & Jiang, L.** (2017). Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 3(3), 1-17.

**Sabri, M. F. M., Danapalasingam, K. A. & Rahmat, M. F.** (2016). A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1433-1442.

**Schwarzer, V. & Ghorbani, R.** (2015, February). Current state-of-the-art of EV chargers. EVTC Electric Vehicle Transportation Centre, Report, Hawaii Natural Energy Institute. <<https://www.hnei.hawaii.edu/wp-content/uploads/Current-State-of-the-Art-EV-Chargers.pdf>> erişim tarihi:10.11.2020.

**Shajarati, O., Olesen, K., Apfel, N. & Beck, M.** (2018). DCM™1000 Designed to meet the future demand of electric vehicle drive train. *Bodo's Power Systems*, 3-35.



- Shareef, H., Islam, M. M. & Mohamed, A.** (2016). A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 403-420.
- Shen, C., Shan, P. & Gao, T.** (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicles. *International Journal of Vehicular Technology*, 2011, 1-7.
- Shin, J. W., Seo, G. S., Chun, C. Y. & Cho, B. H.** (2010, June). Selective flyback balancing circuit with improved balancing speed for series connected lithium-ion batteries. *The 2010 International Power Electronics Conference*, Sapporo, Japan.
- Shukla, A. K., Venugopalan, S. & Hariprakash, B.** (2001). Nickel-based rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 100(1-2), 125-148.
- Singh, K. V., Bansal, H. O. & Singh, D.** (2019). A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components. *Journal of Modern Transportation*, 27(2), 77-107.
- Subotic, I. & Levi, E.** (2015, March). A review of single-phase on-board integrated battery charging topologies for electric vehicles. *2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Torino, Italy.
- Sun, X., Li, Z., Wang, X. & Li, C.** (2019). Technology development of electric vehicles: A review. *Energies*, 13(1), 90.
- Tanaka, N.** (2008). Energy technology perspectives 2008–scenarios and strategies to 2050. *International Energy Agency (IEA)*, Paris, 10.
- Tie, S. F. & Tan, C. W.** (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82-102.
- TOGG**, TOGG açılımı ne oluyor? Yerli otomobil fiyatı - özellikleri - adı nedir? Yerli otomobil ne zaman satışa sunulacak, (2019). <www.milliyet.com.tr/gundem/togg-acilimi-nedir-yerli-otomobil-fiyati-ozellikleri-adi-nedir-yerli-otomobil-ne-zaman-satisa-sunulacak-6110495>, erişim tarihi: 06.05.2020.
- Un-Noor, F., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., Mollah, M. N. & Hossain, E.** (2017). A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development. *Energies*, 10(8), 1217.
- Verma, K. & Gupta, A.** (2016, November). A review on switching function of multi level inverter and applications. *2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Patiala, India.
- Volkswagen Academy**, Basics of electric vehicles design and function [https://vwcamper-site.files.wordpress.com/2015/01/ssp\\_820233-electric-drives\\_2013.pdf](https://vwcamper-site.files.wordpress.com/2015/01/ssp_820233-electric-drives_2013.pdf), erişim tarihi: 06.05.2020.
- Wiechmann, E. P., Aqueveque, P., Burgos, R. & Rodriguez, J.** (2008). On the efficiency of voltage source and current source inverters for high-power drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(4), 1771-1782.
- Wu, Z. & Su, G. J.** (2008, November). High-performance permanent magnet machine drive for electric vehicle applications using a current source inverter. *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Orlando, FL, USA.
- Xiong, R., Cao, J., Yu, Q., He, H. & Sun, F.** (2017). Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles. *IEEE Access*, 6, 1832-1843.
- Xue, X. D., Cheng, K. W. E. & Cheung, N. C.** (2008, December). Selection of electric motor drives for electric vehicles. *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, Sydney, NSW, Australia.
- Ye, H., Yang, Y. & Emadi, A.** (2012, June). Traction inverters in hybrid electric vehicles. *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA.
- Yilmaz, M. & Krein, P.** (2012, March). Review of charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles and commentary on unidirectional charging. *IEEE International Electrical Vehicle Conference*, South Carolina, USA.
- Yilmaz, M. & Krein, P. T.** (2013). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151-2169.

**Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M. & Mithulananthan, N.** (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385.

**Zhang, L., Yuan, X., Wu, X., Shi, C., Zhang, J. & Zhang, Y.** (2018). Performance evaluation of high-power SiC MOSFET modules in comparison to Si IGBT modules. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1181-1196.

**Zhang, X., Liu, P. & Wang, D.** (2011). The design and implementation of smart battery management system balance technology. *Journal of Convergence Information Technology*, 6(5), 108-116.

**Zhu, M., Yu, K. & Luo, F. L.** (2010). Switched inductor Z-source inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(8), 2150-2158.