

ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ ve PİL YÖNETİM SİSTEMİ-İNCELEME*

Yusuf Muratoğlu, Alkan Alkaya
Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
muratogluyusuf@gmail.com, alkanalkaya@mersin.edu.tr

Elektrikli araçlar günümüzde içten yanmalı motorlu araçların sebep olduğu sera gazlarının etkilerine bir çözüm haline gelmiştir. Yakıt olarak kullanılan elektrik enerjisiyle daha sessiz, daha çevreci ve daha ekonomik bir ulaşım sağlamaktadır [1].

Elektrikli araçlar üzerine yapılan araştırma ve geliştirmeler her ne kadar petrol rezervlerinin tükenmek üzere olması ve sera gazlarının etkileri üzerine 20.yy'da kendini gösterse de aslında başlangıcı 18.yy'a dayanmaktadır [2,3]. İlk elektrikli araç prototipi (1832-1839) yılları arasında binek araç olarak Robert Anderson tarafından geliştirilmiştir. İlk elektrikli aracın üretimi ise Profesör Stratingh ve asistanı Christopher Becker tarafından 1835 yılında gerçekleşmiştir. 18.yy'ın sonlarına doğru geliştirilen elektrikli araçlar ilk ticari uygulama olarak New York şehir taksilerinde kullanılmıştır [2,3]. Ancak 19.yy'da yolların fiziki durumunun düzelmesiyle daha uzun menzilli araçlara ihtiyaç duyulmuştur. Bunun üzerine üretim maliyeti ve menzil problemi yüzünden elektrikli araçların geliştirilmesi durmuş, daha az maliyetli ve daha uzun menzilli olan içten yanmalı motorlu araçlar tercih edilmiştir. Ancak 1970'te yaşanan petrol krizi ile birçok ülke resmi kaynaklardan destek sağlayarak elektrikli araçların geliştirilmesine tekrar başlamıştır [2,3].

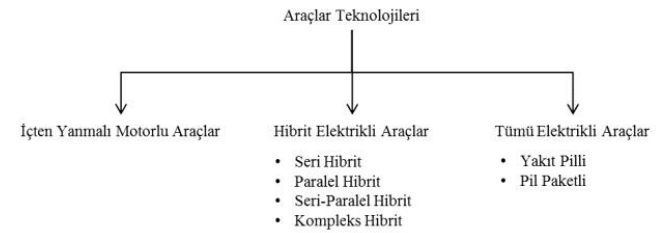
Günümüzde üç çeşit araç teknolojisi bulunmaktadır. Bunlar içten yanmalı motorlu araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve tümü elektrikli araçlardır [4]. İçten yanmalı motorlu araçlarda araç tahriki sadece içten yanmalı motor tarafından gerçekleştirilir. Enerji kaynağı olarak yakıt deposundaki benzin, dizel, LPG ve doğalgaz gibi yakıt çeşitleri kullanılmaktadır [4]. Hibrit elektrikli araçlar içten yanmalı motor ve elektrikli motor tahriklidir. Enerji kaynağı olarak pil, süper kapasitör ve içten yanmalı üretim birimi kullanılmaktadır. Düşük emisyonlu olmasına rağmen ortalama bir menzile sahip olduğundan sınırlı bir pazara sahiptir [4]. Tümü elektrikli araçlar elektrikli motor tahriklidir. Enerji kaynağı olarak pil grupları, süper kapasitör veya yakıt pilleri kullanılmaktadır. Yakıt pilli elektrikli araçlar çok düşük emisyonlu olmasına rağmen yakıt pili ve hidrojen teknolojisi gibi sorunlara sahiptir [4].

Elektrikli araçlarda yaygın kullanılan başlıca pil teknolojileri; Pb-asit (Kurşun-Asit), NiCd (Nikel Kadmiyum), NiMH (Nikel Metal Hidrat) ve Li-ion (Lityum İyon) pillerdir [5]. Diğer pil teknolojilerine kıyasla lityum iyon piller yüksek anma voltajı, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömrü ve hafıza etkisinin bulunmaması gibi önemli avantajlara sahip olmasından dolayı daha çok tercih edilmektedir [5]. Ancak lityum iyon piller performans açısından henüz istenilen düzeye

ulaşmamıştır. Lityum iyon pillerin güvenliği ve performansı doğrudan pil yönetim sistemine bağlıdır. Pil yönetim sistemi kısaca veri toplama, veri yorumlama ve dengeleme işleminin yapıldığı ünitelerdir. Pil yönetim sisteminin en önemli görevi pil şarj durumunu izleyerek pilin şarj/deşarj işleminin dengeli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktır. Böylece pil yönetim sistemi pilin aşırı şarj/deşarj durumunun önüne geçerek pil performansını arttırmaktadır [6].

1. Araç Teknolojileri

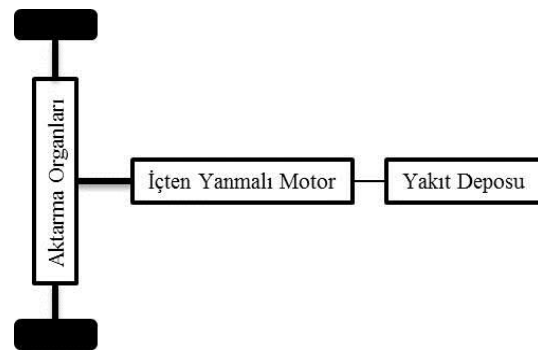
Araç çeşitleri araçlardaki enerji kaynağı ve motor tahrik yöntemine göre üç grup altında sınıflandırılmıştır. Bunlar içten yanmalı motorlu araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve tümü elektrikli araçlardır [7]. Araç çeşitleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Araç Teknolojilerinin Sınıflandırılması

1.1. İçten Yanmalı Motorlu Araçlar

İçten yanmalı motorlu araçlarda motor tahriki sadece yakıt deposundan elde edilen yakıt enerjisiyle sağlanmaktadır. Bu araçlarda yakıt enerjisi olarak benzin, dizel ve henüz araştırma aşamasında olan hidrojen yakıtları kullanılmaktadır [7]. İçten yanmalı araç yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: İçten Yanmalı Motorlu Araç Yapısı

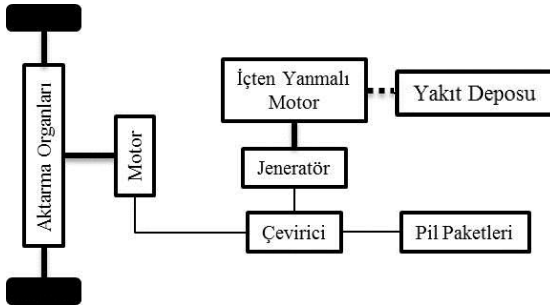
* Bu çalışma, 2015 yılında gerçekleştirilen VIII. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı'nda yayımlanmıştır.

1.2. Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit elektrikli araçlar motor tahrikini hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru ile sağlamaktadır. Karakteristik olarak seri, paralel, seri-paralel ve kompleks olmak üzere dört çeşit hibrit elektrikli araç mevcuttur [8,9].

1.2.1. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar

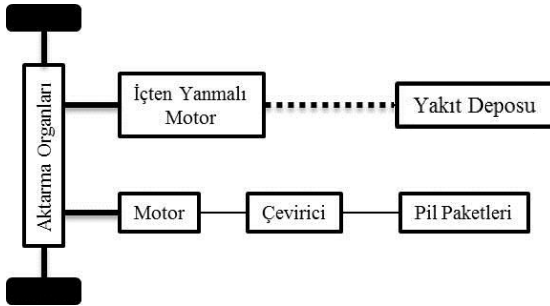
Seri hibrit elektrikli araçlarda içten yanmalı motordan alınan çıkış jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilen elektrik enerjisi elektrik motorunu sürbilmekte ve pil paketlerini şarj edebilmektedir [8,9]. Seri hibrit elektrikli aracın yapısı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Seri Hibrit Elektrikli Araç Yapısı

1.2.2. Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar

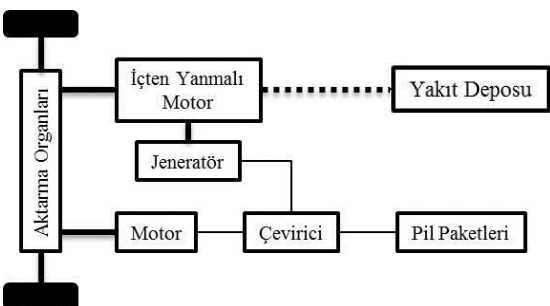
Paralel hibrit elektrikli araçlarda araç hareketi içten yanmalı motor ve elektrik motoru tarafından aktarma organları ile beraber sağlanmaktadır [8,9]. Paralel hibrit elektrikli aracın yapısı Şekil 4'te verilmiştir.



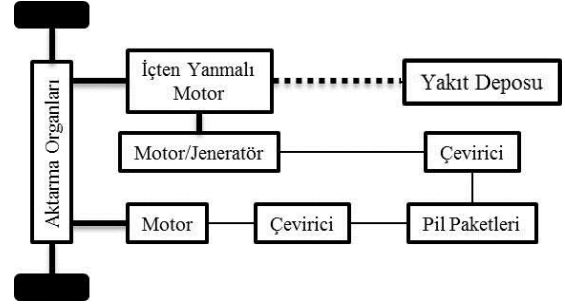
Şekil 4: Paralel Hibrit Elektrikli Araç Yapısı

1.2.3. Seri-Paralel ve Kompleks Hibrit Elektrikli Araçlar

Seri ve paralel hibrit elektrikli araçların yapılarına benzeyen seri-paralel ve kompleks hibrit elektrikli araçlar aracın güç performansını artırırken daha ekonomik yakıt tüketimini de sağlamaktadır [8,9]. Seri-paralel ve kompleks hibrit elektrikli araçların yapıları Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5: Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araç Yapısı



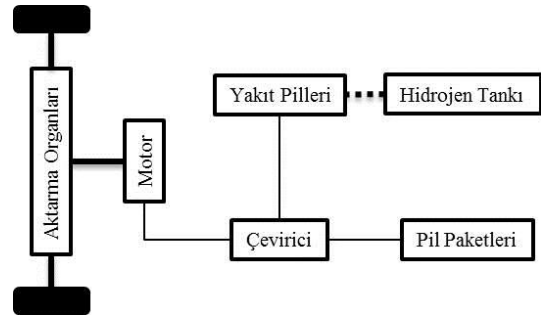
Şekil 6: Kompleks Hibrit Elektrikli Araç Yapısı

1.3. Tümü Elektrikli Araçlar

Tümü elektrikli araçlarda araç hareketi sadece pil paketlerinden sağlanan elektrik enerjisiyle elektrik motorundan sağlanmaktadır.

1.3.1. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar

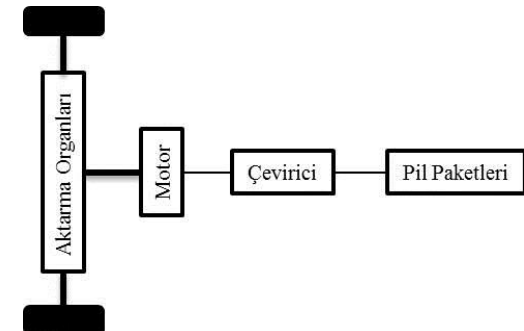
Yakıt pilleri motor tahriki için gerekli olan elektrik enerjisini elektroliz işlemi ile elde etmektedir. Gerçekleşen elektroliz işlemi yakıt pillerinin kimyasal enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür ve işlem sonucunda sadece su ve ısı açığa çıkmaktadır. Yakıt pili elektrikli araçların yapısı seri hibrit elektrikli araçlarınkine benzemektedir. Seri hibrit elektrikli araçlarında bulunan yakıt deposu yerine hidrojen tankı, içten yanmalı motor ve jeneratör yerine de yakıt pilleri bulunmaktadır. Yakıt pillerinden elde edilen elektrik enerjisi motoru çalıştırabilmekte ve pil paketlerini şarj edebilmektedir [10]. Yakıt pili elektrikli aracın yapısı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Yakıt Pili Elektrikli Araç Yapısı

1.3.2. Pil Paketli Elektrikli Araçlar

Pil paketli elektrikli araçlarda, diğer araçlarda bulunan yakıt deposu, içten yanmalı motor ve jeneratör bulunmamaktadır. Elektrik motorunu sürmek için gerekli olan elektrik enerjisi sadece pil paketlerinden elde edilmektedir. Pil paketleri boşaldığında tekrar doldurulmaları gereklidir [10]. Pil paketli elektrikli aracın yapısı Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: Pil Paketli Elektrikli Araç Yapısı

2. Elektrikli Araçlarda Pil Teknolojileri

Günümüzde farklı anma voltajı ve enerji yoğunluğuna sahip çeşitli pil teknolojileri bulunmakta ve geliştirilmektedir. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan ve henüz araştırma aşamasında olan pil teknolojileri ve özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [11].

Tablo 1: Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Teknolojileri ve Özellikleri

Pil Çeşitleri	Nominal Voltaj (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü (#)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı
Pb-acid	2	35	1000	Yok	-15, +50
NiCd	1.2	50-80	2000	Var	-20, +50
NiMH	1.2	70-95	<3000	Nadir	-20, +60
Zebra	2.6	90-120	>1200	Yok	+245, +350
Li-ion	3.6	118-250	2000	Yok	-20, +60
LiPo	3.7	130-225	>1200	Yok	-20, +60
LiFePO ₄	3.2	120	>2000	Yok	-45, +70
Zn-air	1.65	460	200	Yok	-10, +55
Li-S	2.5	350-650	300	Yok	-60, +60
Li-air	2.9	1300-2000	100	Yok	-10, +70

2.1. Kurşun-Asit (Pb-acid) Piller

Kurşun-asit piller birçok uygulamada kullanılmakta olan eski ve yaygın bir teknolojidir. Kurşun-asit pillerde negatif yüklü elektrotta kurşun, pozitif yüklü elektrotta kurşun dioksit (PbO₂) ve elektrolit olarak sülfürik asit (H₂SO₄) materyalleri kullanılmaktadır. Yüksek deşarj akımı, düşük özboşalım, hafıza etkisinin bulunmaması ve ucuz olması gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak düşük nominal voltaj ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca kullanılmadıkları zaman pil ömürleri düşmektedir [11].

2.2. Nikel Kadmiyum (NiCd) Piller

Nikel kadmiyum piller güvenli ve ucuz bir teknolojidir. Nikel kadmiyum pillerde negatif yüklü elektrotta kadmiyum/kadmiyum hidroksit (Cd/Cd(OH)₂), pozitif yüklü elektrotta nikel hidroksit/nikel oksihidroksit (Ni(OH)₂/NiOOH) ve elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) materyalleri kullanılmaktadır. Yüksek deşarj akımı sağlayan bu piller kurşun-asit pillere göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak önemli dezavantajlara sahiptir. Bunlar zayıf şarj/deşarj verimi, yüksek özboşalım ve hafıza etkili olmasıdır [11].

2.3. Nikel Metal Hidrat (NiMH) Piller

Nikel metal hidrat pil teknolojisi nikel kadmiyum pillerin dezavantajlarına alternatif olarak geliştirilmiştir. Kadmiyum elektrotu yerine metal hidrat kullanılmıştır. Nominal voltaj değerleri eşit iken nikel metal hidrat piller daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak nikel metal hidrat piller nikel kadmiyum pillerine göre daha yüksek özboşalım oranına ve aşırı şarj durumunda daha düşük güvenilirliğe sahiptir [11].

2.4. Lityum İyon (Li-ion) Piller

Lityum iyon pillerde pozitif elektrot olarak diğer materyallere göre düşük toksit, yüksek kapasite ve ucuz olması avantajı ile lityum metal oksitler kullanılmaktadır. Yaygın kullanılan oksitler: Lityum kobalt oksit – LiCoO₂, Lityum nikel oksit – LiNiO₂, Lityum mangan oksit – LiMn₂O₂. Lityum iyon pil teknolojisi nikel tabanlı pil teknolojilerinden farklı özelliklere sahiptir. Nikel tabanlı pil gruplarına göre daha yüksek nominal voltaj ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir [11].

2.5. Lityum İyon Polimer (LiPo) Piller

Lityum iyon pillerle hemen hemen aynı özelliklere sahiptirler. Aralarındaki tek fark lityum iyon polimer pillerde elektrolit olarak polimer materyalinin kullanılmasıdır. Polimer elektrolit materyalin elektriksel iletkenliği diğer organik sıvı elektrolitlere göre daha yüksektir. Ayrıca bu materyalin kullanımı lityum polimer pillerinin daha kolay, daha hızlı ve farklı şekillerde üretilmelerine olanak sağlamaktadır [11].

2.6. Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄) Piller

Pozitif elektrot malzemesi lityum demir fosfat olan lityum tabanlı pillerdir. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek çevrim oranı ve daha güvenilir kullanım gibi avantajlara sahiptir. Ancak lityum iyon pillerle karşılaştırıldığında daha performanslı daha düşüktür [11].

2.7. Lityum Sülfür (Li-S) Piller

Lityum tabanlı pil gruplarından katot malzemesi olarak sülfür kullanılan pillerdir. Yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek şarj verimine, düşük hücre gerilimi ve ortalama çevrim ömrüne sahip pillerdir [11].

3. Pil Yönetim Sistemi

Pil teknolojileri basit elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kullanım alanları farklı olmasına rağmen performansları ve ömürleri güvenli çalışma alanına bağlıdır. Bu çalışma alanı pillerin aşırı şarj ve deşarj durumlarında meydana gelebilecek tehlikelerin önüne geçerek performanslarını iyileştirmektedir. Pillerin güvenlik ve performans açısından bu güvenli bölgede çalışmalarını sağlayan ünite pil yönetim sistemidir. Pil yönetim sisteminin görüntüleme algoritmasında pil modelleme, pil parametre kestirimleri, pil durum kestirimleri ve pil hücre dengeleme gibi çeşitli görevler vardır.

3.1. Pil Modelleme Metodları

Pil yönetim sisteminde önemli bir yere sahip olan pil durum kestirimleri (pil sağlık durumu - SoH, pil şarj durumu - SoC ve pil fonksiyon durumu - SoF) doğrudan pil üzerinden ölçülememektedir. Bu nedenle ölçülebilen değerler ile doğru bir pil modeline ihtiyaç vardır. Literatürde pil modelleme metodları ile ilgili farklı teknikler mevcuttur. Bu metodlar arasında analitik (deneysel), istatistiksel, elektrokimyasal ve elektriksel devre modelleri vardır [12-16].

3.1.1. Analitik (Deneysel) Devre Modelleri

Analitik devre modelinde sistemin fiziksel modeli fiziksel eşitlikler yardımıyla oluşturulup, modelde yer alan

parametre değerleri yapılan deneysel sonuçlar ile belirlenmektedir. Uygulanması basit bir yöntem olup hızlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak sonuçların doğruluk değerleri düşük olduğundan pek tercih edilen bir yöntem değildir [12].

3.1.2. İstatistiksel Devre Modelleri

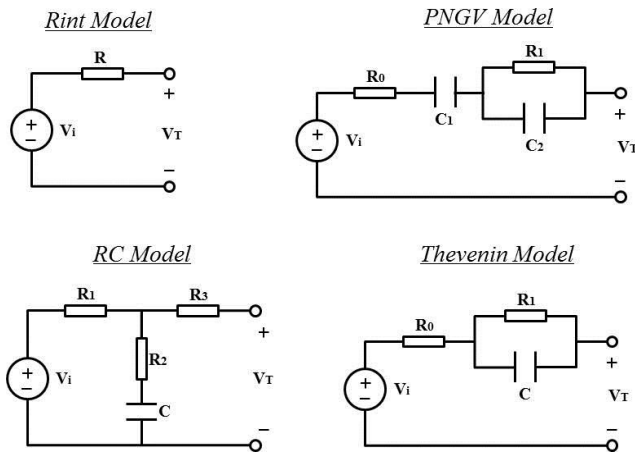
İstatistiksel devre modelinde sistem modelinde yer alan parametre değerleri elde edilen veri örneklerinden anlamlı yapılar oluşturularak elde edilmektedir. Analitik devre modelinde olduğu gibi uygulanması basit ve hızlı bir yöntemdir. Ancak doğruluk performansı yeterli düzeyde olmadığından tercih edilmemektedir [12].

3.1.3. Elektrokimyasal Devre Modelleri

Elektrokimyasal devre modelleri pilin kimyasal yapısının işlemlerini temel alan bir yöntemdir. Bu sayede pil şarj durumu ve sıcaklık gibi batarya durumlarının ilişkilerini doğrudan içermektedir. Ancak bu yapı kompleks işlemler içermektedir. Bu nedenle uygulanması zor ve pek tercih edilmeyen bir yöntemdir [12,13].

3.1.4. Elektriksel Devre Modelleri

Elektriksel devre modelinde sistem modeli eşdeğer devreler üzerinden oluşturulmaktadır. Eşdeğer devreler ile oluşturulan pil modeli matematiksel işlemlere olanak sağlayarak pil modelindeki doğruluk performansını arttırmaktadır. Literatürde kullanılan çeşitli eşdeğer devre modeller bulunmaktadır [14-16]. Elektriksel devre modelinde yaygın olarak kullanılan eşdeğer devre modelleri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Eşdeğer Devre Modelleri

3.2. Pil Empedans Parametre Kestirimleri

Pil empedans parametreleri pil yönetim sisteminde yer alan önemli bir fonksiyondur. Parametre değerleri pilin yaşlanma sürecine bağlı olarak önemli derecede değişmektedir. Bu değişimler pil durumlarının kestirimini dolayısıyla pil yönetim sisteminin performansını etkilemektedir. Pil empedans parametre kestirimi üç grupta incelenmektedir [17].

3.2.1. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi

Empedans spektroskopisi pil empedans parametrelerini laboratuvar ortamında araştıran bir yöntemdir. Aktif empedans spektroskopisi ve pasif empedans spektroskopisi olmak üzere iki alt gruptan oluşmaktadır. Aktif empedans spektroskopisi yönteminde gerekli olan aktif sinyal üretimi için özel devreler gerekmektedir. Fakat bu devrelerin maliyeti oldukça fazladır. Bu maliyetleri düşürmek amacıyla pasif empedans spektroskopisi yöntemi geliştirilmiştir. Pasif empedans spektroskopisi yönteminde gerekli uyarım sinyali aktif sinyal yerine akım yükünün sebep olduğu akım dalgalanmasından sağlanmaktadır. Ancak empedans parametre değerlerinin hesaplanabilmesi için akım dalgalanmasının periyodik ve doğru frekans aralığında olması gereklidir. Ancak bu durumun sağlanması oldukça zordur. Ayrıca bu yöntem doğrusal filtrelerin kullanımından dolayı mevcut bağımlılıktaki pil direncinin hesaplanması için uygun değildir [17].

3.2.2. Elektriksel Devre Modeli

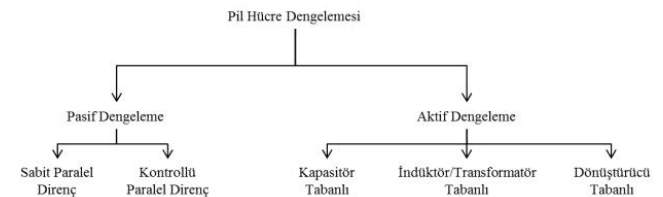
Elektriksel devre modeli pil durumlarının kestiriminde kullanıldığı gibi empedans parametrelerinin kestiriminde de kullanılmaktadır. Empedans parametrelerinin belirlenmesinde kalman tabanlı kestiriciler, en küçük kareler tabanlı tekrarlanan kestiriciler, tekrarlanmayan kestiriciler, adaptif parametre yaklaşımları gibi yöntemler kullanılmaktadır [17].

3.2.3. Elektrokimyasal Model

Elektrokimyasal modeller çeşitli yöntemlerle (adaptif filtreler, gözleyiciler, vd.) kombine edilerek pil durum kestiriminde ve empedans parametre kestiriminde kullanılmaktadır. Ancak elektrokimyasal modellemedeki kompleks işlemlerin zorluğu yöntemin önemli bir dezavantajıdır [17].

3.3. Pil Hücre Dengeleme

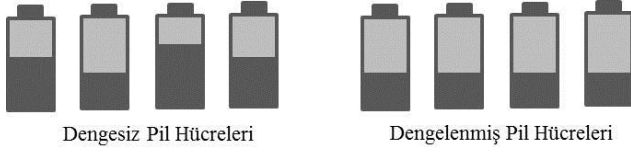
Pil hücrelerinin dengelenmesi pil yönetim sisteminin ana görevlerinden biridir. Dengeleme işleminde amaç şarj/deşarj işleminde tüm pil hücrelerinin aynı pil şarj durumunda dengeli bir şekilde gerçekleşmesidir. Dengeleme işlemi aktif ve pasif dengeleme olmak üzere iki çeşittir [18]. Pil hücrelerinin dengeleme topolojisi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: Hücre Dengeleme Topolojisi

3.3.1. Pasif Dengeleme

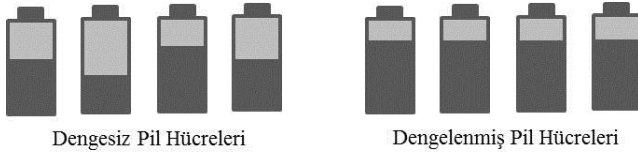
Pil hücrelerinin dengelenmesinde pasif dengeleme yöntemi basit ve uygulanması kolay bir yöntemdir. Pasif dengeleme devresi pil hücrelerinin en düşük voltaj seviyesini tespit eder ve diğer pil hücrelerinin voltaj seviyelerini paralel dirençler üzerinden harcayarak referans aldığı bu voltaj seviyesine düşürür [18]. Pasif dengelemede pil voltaj seviyelerindeki değişim Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11: Pasif Dengeleme

3.3.2. Aktif Dengeleme

Pil hücrelerinin dengelenmesinde kullanılan diğer bir yöntem aktif dengeleme yöntemidir. Aktif dengeleme devresi hesapladığı pil hücrelerinin voltaj seviyelerini yöntemine göre voltaj transferi yaparak ortalama bir seviyede dengeler. Böylece pasif dengelemede harcanan enerji, aktif dengelemede diğer pil hücrelerine aktarılarak daha verimli bir dengeleme yapılmış olur [18]. Aktif dengelemede pil voltaj seviyelerindeki değişim Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12: Aktif Dengeleme

4. Sonuçlar

Elektrikli araçlara duyulan ilginin artmasıyla EA’ların performanslarının iyileştirilmesi konusunda birçok çalışma yapılmaktadır. Pil teknolojileri ve pillerle birlikte kullanılan pil yönetim sistemleri yapılan çalışmalarda önem verilen başlıca çalışma alanları içindedir. Pil teknolojilerindeki gelişmeler EA’ların performanslarını doğrudan etkilerken, mevcut pil teknolojilerinde pil yönetim sisteminde yapılan geliştirmeler de dolaylı olarak etki etmektedir. Yapılan çalışmada EA’ların çeşitleri ve yapıları, araçlarda kullanılan pil teknolojileri, pil yönetim sistemi ve pillerin performansını arttırmaya yönelik çalışmalarda kullanılan modelleme, parametre kestirimi ve dengeleme teknikleri sunulmuştur.

5. Kaynakça

- [1] Richardson, David B. “Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19 (2013): 247-254.
- [2] Hatzell, Kelsey B., Ashok Sharma, and Hosam K. Fathy. “A survey of long-term health modeling, estimation, and control of lithium-ion batteries: Challenges and opportunities.” *American Control Conference (ACC)*, 2012. IEEE, 2012.
- [3] Chan, C. C. “The Rise & Fall Of Electric Vehicles In 1828–1930: Lessons Learned.” *Proceedings of the IEEE* 1.101 (2013): 206-212.
- [4] Frieske, Benjamin, Matthias Kloetzke, and Florian Mauser. “Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles.” *Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 2013 World. IEEE, 2013.

[5] Khaligh, Alireza, and Zhihao Li. “Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art.” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 59.6 (2010): 2806-2814.

[6] Bowkett, Mark, et al. “Design and implementation of an optimal battery management system for hybrid electric vehicles.” *Automation and Computing (ICAC)*, 2013 19th International Conference on. IEEE, 2013.

[7] Tie, Siang Fui, and Chee Wei Tan. “A review of energy sources and energy management system in electric vehicles.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013): 82-102.

[8] Agarwal, Vivek, and Mayank Dev. “Introduction to hybrid electric vehicles: State of art.” *Engineering and Systems (SCES)*, 2013 Students Conference on. IEEE, 2013.

[9] Li, Xin, and Sheldon S. Williamson. “Assessment of efficiency improvement techniques for future power electronics intensive hybrid electric vehicle drive trains.” *Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada. IEEE, 2007.*

[10] Chan, By CC. “The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles.” *Proceedings of the IEEE* 95.4 (2007): 704-718.

[11] Yong, Jia Ying, et al. “A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (2015): 365-385.

[12] Rao, Ravishankar, Sarma Vrudhula, and Daler N. Rakhmatov. “Battery modeling for energy aware system design.” *Computer* 36.12 (2003): 77-87.

[13] Zhang, Cheng, et al. “Battery modelling methods for electric vehicles-A review.” *Control Conference (ECC)*, 2014 European. IEEE, 2014.

[14] Singh, Pritpal, and Adithya Nallanchakravarthula. “Fuzzy logic modeling of unmanned surface vehicle (USV) hybrid power system.” *Intelligent Systems Application to Power Systems, 2005. Proceedings of the 13th International Conference on. IEEE, 2005.*

[15] Chen, Min, and Gabriel Rincón-Mora. “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance.” *Energy conversion, IEEE transactions on* 21.2 (2006): 504-511.

[16] He, Hongwen, Rui Xiong, and Jinxin Fan. “Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach.” *Energies* 4.4 (2011): 582-598.

[17] Fleischer, Christian, et al. “On-line adaptive battery impedance parameter and state estimation considering physical principles in reduced order equivalent circuit battery models: Part 1. Requirements, critical review of methods and modeling.” *Journal of Power Sources* 260 (2014): 276-291.

[18] Rahimi-Eichi, Habiballah, et al. “Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles.” *Industrial Electronics Magazine, IEEE* 7.2 (2013): 4-16. ■