

# Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemlerinde Kullanılan Bazı Elektriksel Eşdeğer Devre Modellerinin Karşılaştırılması

## Comparison of Some Electrical Equivalent Circuit Models Used in Battery-Based Energy Storage Systems

Taner ÇARKIT<sup>1</sup>  
Mustafa ALÇI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye, tanercarkit@klu.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, malci@erciyes.edu.tr

**Özetçe**—Endüstriyel uygulamalarda ve günlük hayatta kullanılan enerji depolama birimlerinin analiz edilerek geliştirilebilmesi için modellenerek benzetim çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Modellemenin maliyet avantajından dolayı kW seviyelerinden MW seviyelerine kadar güç depolayabilen sistemlere uyarlanabilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada; günümüz teknolojik çalışma alanlarında sıklıkla tercih edilen batarya tabanlı enerji depolama sistemleri (BEDS) için geliştirilen elektriksel eşdeğer devre (EED) modelleri araştırılmıştır. “Li-Ion bataryalarda kullanılan bazı EED modelleri” karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** — Enerji depolama, batarya modelleme, elektriksel eşdeğer devre

**Abstract**—In order to analyze and develop energy storage units used in industrial applications and daily life, Simulation studies should be done by modeling. Due to the cost advantage of modeling, it is important that it can be adapted to systems that can store power from kW to MW levels. In this study, the types of electrical equivalent circuits (EEC) models developed for battery-based energy storage systems (BESS), which are frequently preferred in today's technological work areas, have been investigated. "Some EEC models used in Li-Ion batteries" have been analyzed comparatively.

**Keywords** — Energy storage, battery modeling, electrical equivalent circuit

### I. GİRİŞ

Günümüz teknolojik gelişmelerinin ihtiyaç duyduğu enerji miktarı her geçen gün artmaktadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak için, bir yandan yeni teknolojiler üzerinde çalışmalar yapılırken bir yandan da var olan teknolojiler üzerinde geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu teknolojiler arasında enerji depolama birimleri de yer almaktadır. Batarya tabanlı enerji depolama sistemlerinin bulunduğu birçok çalışmada, batarya tabanlı sistemlerin modele dayanan tahmin ve optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Ekonomik yüklerden kaçınmak için batarya sistemlerinin eşdeğer devre modelleri kullanılarak, güç sistemleri içerisindeki enerji depolama ünitelerinin benzetimleri ve analizleri gerçekleştirilmektedir [1]. İç ve dış faktörlere göre şekillenen bataryaların dinamik davranışlarını analiz ederek incelemelerde bulunabilmek için bataryaların modellenerek benzetim çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bataryaların modellenmesi işlemi, ilgili sistemlerin temel yapı taşlarından olan elektrokimyasal pil hücrelerinin içyapılarında ve buldukları ortam şartlarında meydana gelen elektrokimyasal ve fiziksel değişimlerin matematiksel olarak ifade edilmesi olarak tanımlanabilmektedir [2]. Bataryaların EED modelleri; çalışma süreleri, uzun ve kısa dönem geçici durum davranış bilgileri, şarj durumu (SoC) tahmini, deşarj derinliği (DoD) verisi, çevrim sayısı, batarya sağlık durumu (SoH) değeri ve sıcaklık gibi önemli değişimlerin

## Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji Ve Enerji Verimliliği Kongresi - 2020

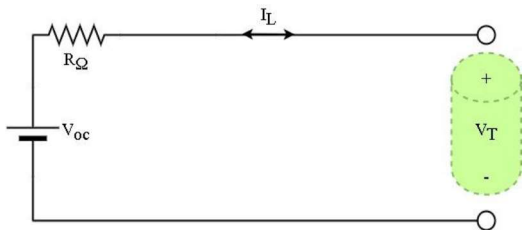
bataryaların performansı üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmaktadır.

### II. BATARYALARIN ELEKTRİKSEL EŞDEĞER DEVRE MODELLERİ

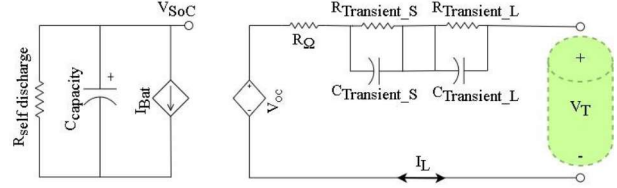
Elektriksel eşdeğer devreler: Bataryaların ve elektrokimyasal pil hücrelerinin özelliklerini ve verimini belirleyen parametrelerin devre modellerindeki bileşenler ile ifade edilip, batarya testlerinin ve benzetim çalışmalarının yapıldığı yöntemlerdir. Bu modeller genellikle kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar vermektedir. Bir batarya elektriksel olarak modellendiğinde, büyük güç gerektiren sistemlerin benzetiminde diğer sistem bileşenleri ile bir arada koordineli olarak çalıştırılabilmektedir. Matematiksel ifadeler ile güçlendirilen EED modellerinden; bataryalar için farklı değişkenlere göre optimizasyon yöntemleri, yükü besleme süresi, şarj ve deşarj durumlarının izlenmesi, SoH ve SoC tahminin yapılması gibi birçok veri elde edilebilmektedir.

EED modelleri, çok sayıda devre bileşenleri ve bunların kombinasyonları sayesinde araştırmacılara uygulamaları için esnek bir yapı tasarlama konusunda yeterli özgürlüğü sağlarken fiyat avantajı sunmaktadır [3]. Araştırmacıların kendi çalışmaları için oluşturdukları farklı konfigürasyonlara sahip birçok EED modeli yer almaktadır. Kullanılan modeller arasında aşağıda verilmekte olan EED modeller öne çıkmaktadır:

- Bataryaların temel EED modeli,
- Bataryaların yönlendirilmiş EED modeli,
- Bataryaların Thevenin EED modeli,
- Bataryaların genişletilmiş Thevenin EED modeli,
- Bataryaların R//C eklenmiş Thevenin EED modeli,
- Bataryaların reaktif EED modeli,
- Bataryaların parazitik etki elemanlı ve ardışık EED modeli,
- Bataryaların dinamik seri EED modeli,
- Bataryaların kapasite kullanımlı/çalışma süreli EED modeli,
- Bataryaların seri RC EED modeli,
- Bataryaların empedans tabanlı EED modeli,
- Bataryaların Randles EED modeli.



Şekil 1. Bataryaların temel EED modeli



Şekil 2. Bataryaların kapasite kullanımlı/çalışma süreli EED modeli

Çalışmalarda tercih edilen bu modeller Şekil. 1'deki bataryanın temel EED modeli ve Şekil. 2'deki bataryanın kapasite kullanımlı/çalışma süreli EED modeli arasında şekillenmektedir. Modellerdeki bu farklılıklar; R//C kollarının sayısına, parazitik elemanın kullanım durumuna ve empedans faktörünün kullanım durumuna göre ortaya çıkmaktadır.

$$R_{\Omega} = \frac{V_{T(0)} - V_{T(1)}}{I_L} \quad (1)$$

Batarya modelleri içerisinde yer alan en temel ve en sade model yapısı Şekil. 1'de görülmektedir. Bu modelde; bataryanın çıkış terminal gerilimi  $V_T$ , kaynak gibi görünen açık devre gerilimi  $V_{oc}$ , şarj/deşarj durumuna göre işaretiyle birlikte yönü de değiştirilebilen akım  $I_L$ , kimyasal yapıya göre farklılık gösteren özgül iç direnç de  $R_{\Omega}$  ile ifade edilmektedir.

Bataryaların temel EED modelinde,  $R_{\Omega}$  değerinin hesaplayabilmek için Denk. 1'deki ifadeden yararlanılmaktadır. Bu eşitlikte, yük devreye girmeden önce başlangıçtaki  $t_0$  anında ölçülen terminal gerilimi  $V_{T(0)}$ , yükün devreye girdiği  $t_1$  anında ölçülen terminal gerilimi ise  $V_{T(1)}$  ile gösterilmektedir. Bu ifadeden de anlaşıldığı üzere; deşarj işleminin başlangıcında yük devreye girer girmez terminal geriliminde oluşan ani gerilim düşümü  $R_{\Omega}$ 'den kaynaklanmaktadır. Bu model en temel yapı olduğu için yük akımındaki adımla ilişkili kısa ve uzun dönem geçici durum etkilerini [4], SoC hesabını, batarya çalışma süresi tahminini dikkate almamaktadır. Ayrıca, şarj ve deşarj durumunda değişiklik gösteren  $R_{\Omega}$  değerini sabit kabul etmektedir. Bataryanın kimyasal üretim işlemleri ve birleştirilme yöntemlerinde yer alan batarya hücrelerinin iç yapısındaki katmanlar arasındaki maddelerin yayılımı, bataryanın özgül iç değişkenleri ve elektrolit yoğunluğu gibi özellikleri de bu model tarafından dikkate alınmamaktadır [5]. Diğer modeller tasarımı farklılık göstermesine rağmen şemalarında açık devre gerilimi, seri iç direnç ve Walburg empedansı olarak isimlendirilen paralel R//C kolları barındırmaktadır [6].

$$Q_{\text{loss}} = R_{\Omega} \cdot I_L^2 + \frac{V_s^2}{R_s} + \frac{V_L^2}{R_L} \quad (2)$$

## Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji Ve Enerji Verimliliği Kongresi - 2020

Şekil. 2’de verilmekte olan bataryanın kapasite kullanımlı EED modelinde birbiri ile irtibatlı olan iki ayrı devre bulunmaktadır. Sol taraftaki bağımlı akım kaynağının değeri, batarya akımı ile değişmektedir. Yine sol tarafta verilmekte olan devre de bulunan  $C_{capacity}$  değerini bataryanın Ah cinsinden kapasite değeri belirlemektedir.  $V_{SoC}$  gerilim değeri, bataryanın doluluk oranını ifade etmektedir.  $R_{self\ discharge}$  direnci bataryanın iç tüketimini ifade eden iç tüketim direncidir. Batarya modelinin sağ tarafından bulunan ikinci devredeki  $V_{oc}$  gerilimi bataryanın açık devre gerilimi olup, değeri  $V_{SoC}$  değerine bağlı olarak değişmektedir.  $R_{\Omega}$  direnci bataryanın kimyasal yapısına göre değişiklik gösteren iç dirençtir.  $C_{Transient\_S}$  ve  $C_{Transient\_L}$  kapasiteleriyle birlikte  $R_{Transient\_S}$  ve  $R_{Transient\_L}$  dirençleri, geçici durum etkisinin kısa ve uzun süreli zaman sabitlerini bulmak için kullanılmaktadır. Bu modeldeki parametre değerleri, ilgili testlerden elde edilen verilere göre belirlenebilmektedir [7]. Uzun ve kısa dönemdeki geçici durum analizinde deşarj işlemi bitip yük devreden çıktığı andan, bataryanın dengeye ulaştığı ana gelene kadar geçen sürede zaman sabiti  $T_{constant}$ ’yi bulmak için kısa ve uzun süreli geçici durum davranışlarını temsil eden direnç ve kapasitörlerin çarpılması gerekmektedir. Uzun ve kısa dönem geçici durum direnç değerleri; deşarj işlemi bitip yük devreden çıktığı andan itibaren kurtarma etkisi başlamadan önceki ölçülen terminal gerilimi ile deşarj işlemi sonrasındaki kurtarma etkisi bittikten sonra

sistemin dengeye ulaştığı andaki açık devre geriliminin farkının deşarj akımına oranı olarak elde edilmektedir. Bu modelde  $Q_{loss}$  ile temsil edilen iç kayıpları bulabilmek için Denk. 2’deki ifadeden yararlanılmaktadır. R//C bağlantı sayısının miktarının artırılması bir yandan modeldeki doğruluk yüzdesini artırırken, diğer taraftan modeldeki karmaşıklık seviyesini ve hata olasılığını da artırmaktadır. Bu yüzden, tek bir R//C bloğuna sahip EED yapıları benzetim performansından ödün vermeden tatmin edici sonuçlar verdiği için tercih edilmektedir. Ayrıca, bu tür modellerde difüzyon işleminin ve elektrotlarla elektrolit arasındaki yük transferinin etkisinin de modelde benzetimi yapılabilmektedir.

Bataryaların EED modellerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Yapılması planlanan çalışmalarda en uygun EED modelinin seçilmesi aşamasında Tablo. 1’de verilmekte olan karşılaştırma tablosundan yararlanılmaktadır. Bu tabloda EED modellerinin sağlayabildiği özellikler “+” işaretiyle gösterilirken sağlanamayan özellikler “-“ işaretiyle gösterilmektedir. Ayrıca, özelliğin kısmen sağlanabilmesi durumunda ise “⊥” işareti kullanılmaktadır. Seçilen model üzerinde yapılan çalışmaların kolaylıkla uygulanabilirlik ve güvenilirlik özelliklerine bakılabilmesi için model sonuç verilerinin doğruluğu ve matematiksel ifadelerin karmaşıklığının incelenmesi gerekmektedir.

| Model İsmi  | Kimyasal Yapı  | Omik gerilim düşümü | Uzun dönem geçici durum | Kısa dönem geçici durum | SoC’nin etkisi | $R_{\Omega}$ değişimi | Şarj transfer polarizasyonu | Konsantrasyon polarizasyonu | Çalışma süresi tahmini | Parazitik etki | Doğruluk | Karmaşıklık |
|---|--|---------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------|----------|-------------|
| Bataryanın temel EED modeli [6]                               | Ni-Cd, Kurşun asit, Li-Po, Li-Ion, Ni-MH, Zn-Br, Na-S                  | +                   | -                       | -                       | -              | -                     | -                           | -                           | -                      | -              | D        | D           |
| Bataryanın yönlendirilmiş EED modeli [1]                      | Na-S   | +                   | -                       | -                       | +              | +                     | -                           | -                           | -                      | -              | D        | D           |
| Bataryanın Thevenin EED Modeli [8]                            | Li-Ion, Li-NMC, Li-FePO <sub>4</sub>                                   | +                   | +                       | +                       | +              | +                     | +                           | -                           | -                      | -              | Y        | O           |
| Bataryanın genişletilmiş Thevenin EED modeli [9]              | Li-Ion, Ni-Cd, Ni-MH, Zn-Hava, Ni-H <sub>2</sub> , Ni-Zn, Li-Hava      | +                   | +                       | +                       | +              | +                     | +                           | +                           | -                      | -              | Y        | ÇY          |
| Bataryanın R//C eklenmiş Thevenin EED modeli [7]              | Li-Ion, Li-Po, Kurşun asit   | +                   | +                       | +                       | +              | +                     | +                           | +                           | -                      | -              | Y        | Y           |
| Bataryanın reaktif EED modeli [5]                             | Kurşun asit, Li-Ion  | +                   | -                       | -                       | +              | +                     | ⊥                           | -                           | -                      | -              | O        | O           |
| Bataryanın parazitik etki elemanlı ve ardışık EED modeli [10] | Li-Ion, Zn-Br, Kurşun asit, Na-S, Li-NMC, Li-FePO <sub>4</sub> , Ni-MH | +                   | +                       | +                       | +              | +                     | +                           | +                           | -                      | +              | ÇY       | ÇY          |
| Bataryanın dinamik seri EED modeli [11]                       | Li-NMC, Li-FePO <sub>4</sub> , Li-Ti, Li-NCA                           | +                   | +                       | +                       | +              | +                     | +                           | +                           | -                      | -              | Y        | Y           |
| Bataryanın kapasite kullanımlı/çalışma süresi EED modeli [7]  | Li-Po, Li-Ion, Kurşun asit   | +                   | +                       | +                       | +              | +                     | +                           | +                           | +                      | -              | Y        | ÇY          |
| Bataryanın RC EED modeli [12]                                 | Li-Ion, Kurşun asit, Li-FePO <sub>4</sub>                              | +                   | +                       | +                       | +              | +                     | ⊥                           | ⊥                           | -                      | -              | O        | O           |
| Bataryanın empedans tabanlı EED modeli [13]                   | Li-Ion, Li-Po, Kurşun asit, Ni-MH                                      | +                   | ⊥                       | ⊥                       | ⊥              | ⊥                     | -                           | -                           | ⊥                      | -              | O        | ÇY          |
| Bataryanın Randles EED modeli [14]                            | Reaktif Metal-Ion, Li-Ion, Ni-MH, Kurşun asit                          | +                   | +                       | +                       | +              | +                     | +                           | -                           | -                      | -              | D        | O           |

**Tablo 1.** Bataryaların EED modellerinin karşılaştırılması ( $R_{\Omega}$ : İç direnç, D: Düşük, O: Orta, Y: Yüksek, ÇY: Çok Yüksek)

## Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji Ve Enerji Verimliliği Kongresi - 2020

Tablo 1.'den yararlanılarak en uygun EED modelinin seçimi; BEDS'lerin verimli bir şekilde çalışabileceği doğru operasyonel stratejiyi bulmak, optimizasyon ve kontrol tabanlı benzetim çalışmalarını yapmak için rehber rolü üstlenmektedir [15].

### III. SONUÇ

Batarya sistemleriyle elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri, portatif elektronik cihazların güç birimi, günlük kullanımdaki elektronik cihazlar gibi birçok yerde karşılaşılmaktadır. Bu tür alanlarda yapılan çalışmalar, benzetim tabanlı ön tasarımlara uyarlanabildiği için ekonomik açıdan avantaj ortaya koymaktadır. Maliyeti her geçen gün azalmasına rağmen, Li-Ion batarya sistemlerinin üretim ve tasarım giderleri çalışmalara yük oluşturabilmektedir. Bundan dolayı, yapılan çalışmalar öncelikle eşdeğer devre modelleri üzerinde yoğunlaştırılmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar farklı türde batarya modellerini kapsamaktadır. Bu modeller arasındaki EED modellerinin hata oranı yaklaşık olarak %1 - %5 seviyelerindedir. EED modelleri gerilim kaynaklarının, dirençlerin ve kapasitörlerin kombinasyonunu içeren tasarımlardır. EED modelleri özellikle devre benzetimlerinde ve uygulamalı devre çalışmalarında kullanıldıklarında daha sezgiseldirler ve daha kullanışlıdır. Bu tip modeller üzerinde matematiksel denklemler ile işlemler yapılabilme imkanı olduğu için çalışmalarda sıklıkla tercih edilmekte ve başarılı sonuçlar vermektedir.

Batarya modelleri ile elde edilen veriler, batarya yönetim sistemi (BMS) tarafından işlenmektedir. Bundan dolayı, uygun bir EED modelin oluşturulması gerçek zamanlı optimizasyon ve kontrol çalışmalarının yapılabilmesi için önem arz etmektedir. Seçilen modele göre, BMS içerisindeki iş akış algoritması değişiklik göstermektedir. Çeşitli modellerden elde edilen denklemsel ifadeler, değiştirilerek farklı modellere de uygulanabilmektedir. Modelin optimum sonuçlar verebilmesi için eşdeğer devre şemalarının detaylandırılması gerekmektedir. Detaylandırılan şemalarda etkili parametre sayısıyla birlikte bilinmeyen sayısı da arttığı için modelin karmaşıklık seviyesi artmaktadır. Bu sebeple, yapılması planlanan çalışmalarda ilk adımın; "doğru batarya modelinin seçimi" olduğu düşünülmektedir. Bataryaların modellenmesi aşamasında farklı tasarımların oluşmasında göz önüne alınan veya göz ardı edilen etkenler bulunduğu için, bataryaların modellenmesinde kararlılık seviyesi ve doğruluk oranı model seçimini etkilemektedir. Diğer taraftan, farklı tür kimyaya sahip bataryaların da benzetimleri aynı model üzerinde yapılabilir.

Bundan sonraki çalışmalar, batarya tabanlı enerji depolama sistemlerinde depolama verimliliğinin artırılması için model tabanlı optimizasyon uygulamalarının yapılması yönünde planlanmaktadır.

### KAYNAKÇA

- [1] Sparacio, A. R., Reed, F. G., Kerestes, J. R., Grainger, M. B., Smith, T. Z., "Survey of Battery Energy Storage Systems and Modeling Techniques", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012.
- [2] Kaypmaz, T. C., "Li-İyon Polimer Pil Karakteristiklerinin Analizi ve Arıza Tanısı", İTÜ Doktora Tezi, 2009.
- [3] Andreev, A. A., Vozmilov, A. G., Kalmakov, V. A., "Simulation of Lithium Battery Operation Under Severe Temperature Conditions", International Conference on Industrial Engineering, Procedia Engineering Vol. 129, pp: 201-206, 2015.
- [4] Ahmed, M., "Modeling Lithium-Ion Battery Chargers in PLECS", Plexim Inc., pp: 1-9, 2016.
- [5] Chiasson J., Vairamohan, B., "Estimating the State of Charge of a Battery", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 13, Issue 3, pp: 465-470, 2005.
- [6] Tremblay, O., Dessaint, L., A., Dekkiche, A. I., "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp: 284-289, 2007.
- [7] Chen, M., Mora, G., "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, pp: 504-511, 2006.
- [8] Lei, Y., Zhang, C., Gao, Y., Li, T., "Charging Optimization of Lithium Ion Batteries Based on Capacity Degradation Speed and Energy Loss", Applied Energy Symposium and Form, pp: 544-549, 2018.
- [9] Linden, D., Reddy, T. B., "Linden's Handbook of Batteries", Fourth Edition, Published by The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [10] Jackey, R., Saginaw, M., Sanghvi, P., Gazzarri, J., Huria, T., Ceraolo, M., "Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell", MathWorks, 2013.
- [11] Madani, S. S., Schaltz, E., Kaer, S. K., "An Electrical Equivalent Circuit Model of a Lithium Titanate Oxide Battery", MDPI, Batteries, Vol. 5, No. 31, pp: 1-14, 2019.
- [12] Bhangu, B., S., Bently, P., Stone, D., A., Bingham, C., M., "Nonlinear Observers for Predicting State of Charge and State of Health of Lead Acid Batteries for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, Issue, 3, pp: 783-794, 2005.
- [13] Li, S. E., Wang, B., Peng, H., Hu, X., "An Electrochemistry Based Impedance Model for Lithium-Ion Batteries", Journal of Power Sources, Vol. 258, pp: 9-18, 2014.
- [14] Kularatna, N., "Dynamics and Modeling of Rechargeable Batteries", IEEE Power Electronic Magazine, pp: 23-33, 2014.
- [15] Carkit, T., Alci, M., "Investigation of the Positive Effects of Battery Energy Storage Systems on Solar Energy Combined Interconnected National Grid", International Natural Science Engineering and Materials Technology Conference, pp: 93-103, 2019.