

Enerji Depolama Sistemlerinin Kullanımı ile Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Dengesiz Çalışma Etkilerinin Azaltılması

Reduce the Effects of Unbalanced Operation in Electricity Distribution Systems using Energy Storage Systems

Ali Özan¹, Mustafa Bağrıyanık¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
ozana@itu.edu.tr, bagriy@itu.edu.tr

Özet

Elektrik dağıtım sistemlerindeki yük dengesizliği, güç kalitesi sorunlarına, sistem kayıplarında artışa, elektrikli ekipman hasarlarına ve koruma cihazlarının yanlış devreye girmesine neden olabilmektedir. Dağıtık elektrik enerji üretim sistemlerinin artması da sistem işletimini olumsuz etkileyebilmektedir. Enerji depolama sistemlerinin (EDS) şebekede kullanılması bu olumsuz etkileri azaltmak için kullanılabilir çözüm yollarından biridir. Çalışmada batarya temelli EDS sistemlerinin kontrolü ile elektrik dağıtım sistemlerinde dengesizliğin etkilerinin azaltılması konusu incelenmiştir. Göz önüne alınan 13 baralı test sistemi üzerinde farklı senaryolar için benzetim incelemeleri gerçekleştirilerek sonuçlar verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Enerji Dağıtım Sistemleri, Enerji Depolama Sistemleri, Talep Yönetimi, Yük Dengeleme.

Abstract

Load imbalance in electricity distribution systems can cause power quality problems, increase system losses, electrical equipment damage, and improper activation of protection devices. Increasing the number of distributed energy production systems can negatively affect the operation of the network. The use of energy storage systems (EDS) in the network is one of the solutions that can be used to reduce these adverse effects. In this study, the effects of imbalancing in the electricity distribution system are examined with the control of battery based EDS. Simulation studies for the 13 node test system with different scenarios are performed and the results are given.

Keywords: Energy Distribution Systems, Energy Storage Systems, Demand Management, Load Balancing.

1. Giriş

Dünyada nüfusun artması ve sanayi devrimi ile birlikte atmosferdeki sera gazlarının miktarı artmıştır. Sera gazları küresel ısınmaya neden olmakta ve dünyayı

olumsuz etkilemektedir. 20. Yüzyılın başından beri Avrupa'nın iklimi ortalama 0.95 °C'lik hızlı bir ısınma yaşamıştır [1]. Bu ısınma 1000 yılda görülen iklim değişikliklerinin çok üzerindedir. Bu ısınmanın önüne geçmek için 2015 yılında 175 ülkenin imzaladığı İklim Değişikliği Anlaşması yapılmıştır. Bu anlaşmaya göre ülkeler, karbondioksit salınımlarını azaltmaları gerekmektedir. Böylelikle 2100 yılına kadar Dünya'daki ortalama sıcaklık artışının 2 °C'nin altında tutulması amaçlanmaktadır. Anlaşma gereğince ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla önem vermeye başlamışlardır. 2010'da yayınlanan bir makaleye göre, Avrupa'da 2020 yılında yenilenebilir enerji kaynakları, Elektrik Dağıtım sisteminin %20 elektrik ihtiyacını karşılayacağı öngörülmüştür [2].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle rüzgâr ve güneş enerjisinin meteorolojik koşullara bağlı olarak enerji üretmeleri ve meteorolojik koşullardaki değişimin üretim miktarında öngörülemez değişimler yaratması nedeni ile sistem işletimi olumsuz etkilenmektedir. Elektrik dağıtım sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının artması ile sistemde gerilim ve frekans dalgalanmaları artabilir ve sistem işletimi daha karmaşıklaşır. Gerilim dalgalanmalarının yanı sıra özellikle güneş enerjisinin maksimum üretim yaptığı öğlen saatlerinde üretim kaynağının bağlı olduğu hatlarda yükün az olması durumlarında, şebekede ana beslemeye doğru ters güç akışı meydana gelebilir. Son yıllarda bu etkilenmeleri en aza indirmek için araştırmalar artmıştır. Elektrik sisteminde yenilenebilir enerji kaynaklarının artması ile oluşan bu olumsuz etkileri azaltmak için çözüm yollarından biri olarak, enerji depolama sistemlerinin (EDS) yaygın kullanımı üzerine araştırmalar da yapılmaktadır.

EDS'lerin sisteme bağlanacakları yerler sistem üzerindeki etkilerini de değiştirebilmektedir. Elektrik dağıtım sistemlerinde gerek EDS'ler için en uygun bağlantı yeri ve kapasite belirleme üzerine araştırmalar, gerekse var olan EDS'lerin sistem koşullarına bağlı en uygun işletimlerinin belirlenmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır.

EDS'lerin farklı amaçlar doğrultusunda ideal yerlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda farklı yöntemler kullanılmıştır. [3-8]. Optimizasyon sürecinde kararlılık kriterleri, akım taşıma sınırlamaları, gerilim sınırlamaları gibi kısıtlamalar altında EDS'lerin yerleri belirlenmiştir. [3] numaralı çalışmada EDS'lerin yeri gerilim ayarının maksimum yapılabileceği yere göre belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan elektrik dağıtım sisteminde EDS'lerin yüklere yakın yere tesis edilmesiyle maksimum gerilim ayarı yapılabilmektedir. [4-6] numaralı çalışmalarda EDS'lerin şebekedeki yeri sezgisel stratejiye bağlı olarak bulunup EDS'lerin büyüklüğünün belirlenmesinde optimal yük akışları kullanılmıştır. [7] numaralı çalışmada şebeke maliyetini en aza indiren optimal EDS yerleşimi ve kontrol stratejisi tanımlayabilen bir yazılım planlama aracı önerilmiştir. Genetik algoritma temelli bir yöntem kullanılarak sistemdeki enerji kayıplarını minimize edebilecek enerji depolama sistemlerinin şebekedeki yeri [8] numaralı çalışmada bulunmuştur.

Elektrik dağıtım Sistemlerinde dengesiz çalışmayı önlemek için literatürde birçok çalışmaya rastlanmaktadır. 1989'da ayrırcılar yardımıyla elektrik dağıtım sisteminin yapısı değiştirilerek yük dengeleme yapılması için araştırmalar yapılmıştır [9]. Çok sayıda bina enerji benzetim yeteneği sunan bir benzetim aracı geliştirilerek elektrik dağıtım sistemi için yük dengeleme yapılmıştır [10]. [11] numaralı çalışmada EDS'ler yardımı ile oyun teorisi kullanılarak yük dengeleme yapılmış ve kullanıcılar için enerji maliyeti yaklaşık olarak %4 azaltılmıştır. [12] ve [13] numaralı çalışmalarda yük dengeleme için bulanık mantık yaklaşımı önerilmiştir.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı dağıtık üretim tesislerinin sistem üzerindeki etkilerini azaltmak için kullanılması planlanan EDS'ler kullanılarak sistem işletiminde yüklenme kaynaklı dengesizliklerin azaltılması konusu incelenmiştir. İkinci ve üçüncü bölümlerde sırasıyla EDS'lerin elektrik dağıtım sistemlerinde uygulamaları ve elektrik dağıtım sistemlerinde dengesiz çalışma konusu özetlenmiştir. Sonraki bölümlerde ise EDS'lerin kullanımı ile elektrik dağıtım sistemlerinde dengesiz çalışma etkilerinin azaltılması konusuna ve örnek sistem üzerindeki incelemelere yer verilmiştir.

2. Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Enerji Depolama Sistemi Uygulamaları

EDS'ler genel olarak elektriksel, mekanik ve termal olarak sınıflandırılırlar [14]. Elektrik dağıtım sistemlerinde farklı türde EDS'ler farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Batarya teknolojileri, süper iletken manyetik enerji depolama (SMES), süper kapasitörler, basınçlı hava enerjisi depolama, volan gibi sistemlerin elektrik dağıtım sistemlerinde çeşitli uygulama alanları vardır. Seçilen alanlarla ilgili depolama sistemlerinin performanslarını karşılaştırabilmek için maliyetler, enerji yoğunluğu, dayanıklılık ve enerji verimliliği gibi parametreler kullanılmaktadır [15].

Düşük güçlü yani transdüserlerin ve acil durum terminallerinin beslendiği uygulamalarda önemli olan EDS'lerin kendi kendine boşalması (self deşarj) özelliğidir. Sadece teknik özelliklerine baktığımızda lityum iyon bataryalar düşük güçlü uygulamalar için en uygun enerji depolama sistemlerinden biridir.

Yenilenebilir enerji sistemleriyle beslenen küçük sistemlerde (birkaç kWh kapasiteli) EDS'lerin enerji kapasitesi ile maksimum deşarj gücü arasındaki oran önemlidir.

Batarya sistemleri dışındaki EDS'ler maliyet ve verimlilik açısından uygulamaya göre değerlendirilmelidir. Puant yük dengeleme için gerekli olan birkaç MWh'lik EDS'ler için basınçlı hava depolama veya yakıt pilleri maliyet olarak uygun seçimlerden biridir. Güç kalitesini arttırmak için kullanılacak olan EDS'lerde temel kriterler enerji verme kapasitesiyle maksimum şarj-deşarj sayısıdır. Burada volanlar ve süper kapasitörler en iyi çözümler olarak öne çıkmaktadır.

Batarya teknolojilerinin yaygın olmasının nedeni ucuz, kullanışlı ve üretimlerinin kolay olmasıdır. Bu çalışmada, incelemelerde elektrik dağıtım sisteminde uzun süreli depolamaya daha uygun olan ve uzun süre enerji sağlayabilen batarya sistemi göz önüne alınmıştır.

3. Enerji Depolama Sistemlerinin Kullanımı İle Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Dengesiz Çalışma Etkilerinin Azaltılması

Elektrik dağıtım sistemlerinde dengesiz yük, üç fazlı sistemler için her fazın geriliminin veya akımının genliğinin aynı olmamasından veya fazlar arasındaki açının 120°'den farklı olmasından kaynaklanır. Literatürde gerilim dengesizliği veya bir diğer adı ile faz gerilimleri dengesizliği oranı (PVUR) ortalama faz geriliminin maksimum sapmasının ortalama faz gerilimine oranıdır [16]. IEEE standardında [17] asenkron motorların gerilim dengesizliğini oranının limiti %0,5 olarak verilmiştir.

$$\%PVUR = \frac{V_{maksapma}}{V_{ort}} \times 100 \quad (1)$$

Denklem (1)'de verilen V_{ort} üç fazın geriliminin ortalama değeri ve $V_{maksapma}$ ise fazların ortalamaya göre en fazla sapmasıdır.

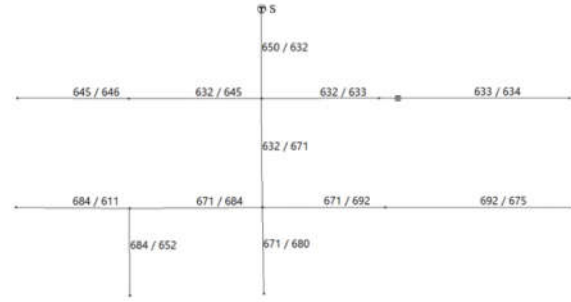
Değişken yükler ve yüklerin düzgün dağılması elektrik dağıtım sisteminde dengesizliklere neden olmaktadır. Elektrik dağıtım sistemlerindeki yük dengesizliği, güç kalitesi sorunlarına, sistem kayıplarında artışa, elektrikli ekipman hasarlarına ve koruma cihazlarının yanlış devreye girmesine neden olabilir [18]. Dengesiz yüklerin olduğu bir sistemin modellenmesi için IEEE'nin standardında da olduğu gibi gerilim ve akım değerlerinin pozitif, negatif ve sıfır (simetrik) bileşenlerinden faydalanılır [19]. Elektrik dağıtım sistemini dengeli yük olarak kabul etmek hesaplamaları kolaylaştırmakla birlikte dengesiz yük modellerine göre hassasiyeti azaltır. Elektrik dağıtım sistemlerinde dengesiz yük durumda nötr iletkeninden akan akım sıfır olmayacağından elektrik dağıtım sisteminde fazladan kayıplar oluşacaktır. Uluslararası Enerji Ajansının (IEA)

verilerine göre Türkiye’de 2017 yılındaki dağıtım ve iletim sistemindeki toplam enerji kaybı 42.248 GWh yani üretilen enerji miktarının %15’i kadardır. Bu enerji kaybının bir kısmı nötrden akan akımlardan kaynaklanmaktadır. Elektrik dağıtım sisteminin dengeli sisteme yaklaşması bu kayıpları azaltacaktır. Akıllı dağıtım sistemlerinin yaygınlaşmasıyla beraber özellikle yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik enerjisi üretimi de yapabilen tüketicilerin (prosumer – üreten tüketici) artması ile EDS’lerin de sistemde kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir. EDS’lerden puant zamanda sistemi desteklemesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretimin yaygınlaşmasını yarattığı ani dalgalanmaları düzeltme etkisinin yanı sıra, dengeli işletimin elde edilmesinde de yararlanılabilir. Bu açıdan 3 fazlı ortak yönetilen EDS yerine ayrı faz temelli yönetilebilir EDS birimlerinin sistemde uygun yerlere bağlanması dengeli çalışma için daha etkili olacaktır.

4. Örnek Sistem İncelemeleri

Çalışmada 13 baralı örnek test sistemi göz önüne alınmıştır. Test sistemi literatürde yer alan IEEE-13 baralı test sistemindeki 1 ve 2 fazlı bağlantı hatlarının ve yüklerin, 3 fazlı olanlarla değiştirilmesi ile şekil 1’deki gibi oluşturulmuştur. Göz önüne alınan test sistemi, 13 bara, 12 adet hat, 8 adet baraya bağlı yük ve 1 adet yayılı yükten oluşmaktadır. Ayrıca IEEE’nin test sisteminde kullanılan regülatör ve kapasitörler DNV-GL Synergi Electric programı ile gerçekleştirilen benzetim incelemelerinde göz önüne alınmamıştır. İncelemelerde farklı yük dengesizlikleri yaratılarak, yük akışı analizlerine dayalı olarak EDS’lerin deşarj ve şarj çalışma modlarının sistem dengelemesi açısından etkileri incelenmiştir. Göz önüne alınan inceleme durumları aşağıda verilmiştir;

- Durum 1 (D1): EDS’lerin yer almadığı yüklerin ve hatların 3 faza dönüştürüldüğü temel çalışma durumu
- Durum 2 (D2): 611 numaralı düğümde A ve B fazında 180kW ve 90kVAr, C fazında ise 240kW ve 120kVAr’lık yük olması durumu;
- Durum 3 (D3): D2’deki yük dengesizliğini gidermek için C fazına deşarj modunda çalışan, 671 ve 684 numaralı baralar arasındaki hat üzerine yerleştirilmiş 80kW’lık EDS olması durumu;
- Durum 4 (D4): 611 numaralı düğümde A fazında 120kW ve 60kvar, B fazında 180kW ve 90kVAr, C fazında ise 240kW ve 120kVAr’lık yük olması durumu;
- Durum 5 (D5): D4’deki yük dengesizliğini gidermek için A fazında şarj ve C fazına deşarj özelliğiyle çalışan, 671 ve 684 numaralı baralar arasına yerleştirilmiş 80kW’lık EDS olması durumu;



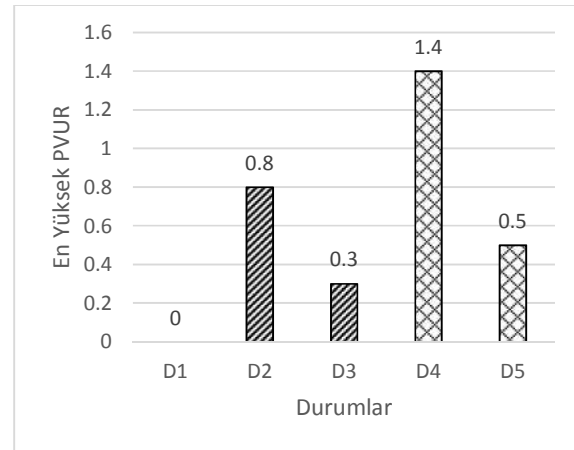
Şekil 1. Örnek sistem tek hat şeması

Bu çalışmada sadece gerilim genlikleri açısından dengesizlik dikkate alınmıştır. Göz önüne alınan durumlar içinde D1 temel durum, D2 ve D4 yük dengesizliği durumları, D3 ve D5 ise EDS’lerin yer aldığı sistem durumlarıdır. Sonuçların verildiği Tablo 1’de, temel durum olan D1 için faz nötr gerilim genlikleri, birim değerdir.

Tablo 1. Farklı durumlar için PVUR değerleri

	D1	D2	D3	D4	D5
Bara	V	PVUR	PVUR	PVUR	PVUR
650	1,000	0	0	0	0
632	0,94	0,3	0,1	0,5	0,1
633	0,937	0,3	0,1	0,5	0,1
634	0,917	0,3	0,1	0,5	0,1
645	0,929	0,3	0,1	0,5	0,1
646	0,926	0,3	0,1	0,5	0,1
671	0,902	0,6	0,2	1	0,3
692	0,902	0,6	0,2	1	0,3
675	0,897	0,6	0,2	1	0,3
680	0,902	0,6	0,2	1	0,3
684	0,897	0,7	0,2	1	0,3
611	0,894	0,8	0,3	1,4	0,5
652	0,892	0,7	0,2	1,2	0,4

Her bir durum için hesaplanan en büyük PVUR değerleri ise Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi PVUR açısından belirgin bir iyileşme sağlanabilmektedir.



Şekil 2. Farklı durumlar için en büyük PVUR değerleri

5. Sonuçlar

Elektrik dağıtım sistemlerindeki yük dengesizliği, güç kalitesi sorunlarına, sistem kayıplarında artışa, elektrikli ekipman hasarlarına ve koruma cihazlarının yanlış devreye girmesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada batarya temelli EDS sistemlerinin kontrolü ile elektrik dağıtım sistemlerinde dengesizliğin etkilerinin azaltılması konusu incelenmiştir. Örnek sistem üzerindeki sonuçlar, EDS'lerin uygun modda kullanımının, sistemdeki dengesizliklerin azaltılmasında olumlu etkileri olabileceğini göstermektedir.

EDS'lerin kullanımının yararlarını arttırmak için planlama aşamasında EDS'lerin kapasitelerinin ve yerlerinin en uygun şekilde belirlenmesi, işletim aşamasında ise en uygun çalışma modlarının belirlenmesi önemlidir.

6. Kaynaklar

- [1] Demir A. "Küresel iklim değişikliğinin biyolojik çeşitlilik ve ekosistem kaynakları üzerine etkisi". *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1(2), 37-54, 2009.
- [2] F. Geth, J. Tant, E. Haesen, J. Driesen and R. Belmans, "Integration of energy storage in distribution grids," *IEEE PES General Meeting*, Providence, RI, 2010, pp. 1-6.
- [3] A. K. Barnes, J. C. Balda, A. Escobar-Mejía and S. O. Geurin, "Placement of energy storage coordinated with smart PV inverters," *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Washington, DC, 2012, pp. 1-7.
- [4] Jiajia Song, T. K. A. Brekken, E. Cotilla-Sanchez, A. von Jouanne and J. D. Davidson, "Optimal placement of energy storage and demand response in the Pacific Northwest," *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Vancouver, BC, 2013, pp. 1-5.
- [5] A. Giannitrapani, S. Paoletti, A. Vicino and D. Zarrilli, "Optimal Allocation of Energy Storage Systems for Voltage Control in LV Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2859-2870, Nov. 2017.
- [6] D. Bhaumik, D. Crommelin and B. Zwart, "A computational method for optimizing storage placement to maximize power network reliability," *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, Washington, DC, 2016, pp. 883-894.
- [7] G. Celli, S. Mocchi, F. Pilo and M. Loddo, "Optimal integration of energy storage in distribution networks," *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, 2009, pp. 1-7.
- [8] M. Farrokhifar, S. Grillo and E. Tironi, "Loss minimization in medium voltage distribution grids by optimal management of energy storage devices," *2013 IEEE Grenoble Conference*, Grenoble, 2013, pp. 1-5.
- [9] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [10] S. Duerr, C. Ababei and D. M. Ionel, "Load balancing with energy storage systems based on co-simulation of multiple smart buildings and distribution networks," *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, San Diego, CA, 2017, pp. 175-180.
- [11] J. Rajasekharan and V. Koivunen, "Cooperative game-theoretic approach to load balancing in smart grids with community energy storage," *2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Nice, 2015, pp. 1955-1959.
- [12] B. Naga Raj and K. S. Prakasa Rao, "A new fuzzy reasoning approach for load balancing in distribution system," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1426-1432, Aug. 1995.
- [13] M. W. Siti, A. A. Jimoh and D. V. Nicolae, "Phase load balancing in the secondary distribution network using fuzzy logic," *AFRICON 2007*, Windhoek, 2007, pp. 1-7.
- [14] H. Akbari, M. C. Browne, A. Ortega, M. J. Huang, N. J. Hewitt, B. Norton, S. J. McCormack, "Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems," *Solar Energy*, 2018.
- [15] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, "Energy storage systems—Characteristics and comparisons," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, 2008, pp. 1221-1250.
- [16] Bollen M.H.J., "Definitions of Voltage Unbalance," *IEEE Power Eng. Rev. Mag.*, vol. 22, Issue 11, pp. 49-50, Nov 2002.
- [17] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112, 1991.
- [18] W. Wang and N. Yu, "Phase Balancing in Power Distribution Network with Data Center," *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 45, issue 2, pp. 64-69, September 2017.
- [19] IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions," in IEEE Std 1459-2000, vol., no., pp. i-44, 2000.