

# Elektrik Güç Sistemlerinde Mikro Şebeke Uygulamaları ve Harmonik Kaynak Yer Tespiti

## Microgrid Applications in Electrical Power Systems and Harmonic Source Location

Yard. Doç. Dr. Oben Dağ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Arel Üniversitesi  
obendag@arel.edu.tr

### Özet

Günümüzdeki ve gelecekteki akıllı şebekelerde, güç kalitesinin devamlılığı önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ve yeni teknoloji cihazlarının kullanımı, akıllı şebekelerde güç kalitesinde azalmaya sebep olacaktır. Güç sistem harmonikleri güç kalitesinde azalmaya neden olan faktörlerden birisi olarak nitelendirilebilir. Bu faktörün etkileri, eğer ortadan kaldırılmazsa, güç sistemlerinin performansında ve güvenilirliğinde azalmaya sebep olarak, ekonomik kayıplara da neden olacaktır. Harmonik bozucuların yerinin tespit edilmesi; bozucunun tam yerinin bulunması ve ortadan kaldırılması için gerekli önlemlerin alınmasını sağlayacağından önemlidir. Bu sebeple, akıllı şebekelerde harmonik kaynak yerini yeterli performansta tespit edecek bir algoritmanın geliştirilmesi önem taşımaktadır. Bu bildiri, empedans devreleri yaklaşımına dayanan bir harmonik kaynak yer tespit algoritması sunulmuştur. Bu algoritmanın, ABD’de doktora sonrası çalışma kapsamında gerçek ölçüm verisi ile test edilmesi ve geliştirilmesi ileriye yönelik bir çalışma olarak hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Akıllı şebeke, Güç Kalitesi, Harmonikler,

### 1. Giriş

Akıllı şebeke (AŞ) kavramı, enerji sektöründeki bir dizi teknolojik yenilikler ile başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları; dağıtık üretim (DÜ), bilgi ve haberleşme teknikleri gibi güç sistemlerine uygulanan yeni teknolojilerin bir sonucudur. Akıllı şebekelerle ilişkili yeni teknolojiler; gelişmiş esneklik, kalite ve güvenilirlik sunmaktadır. Ancak bazı akıllı şebeke unsurlarındaki kademeli artış, güç kalitesi (GK) sorunları ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, AŞ’lerin başarılı ve güvenilir çalışması için GK kontrol altında olmalıdır.

AŞ’lerde, yeni cihazlardan kaynaklanan harmonik emisyon, şebeke unsurlarının tümünü etkileyecektir. Etkin bir şekilde harmonik bozulma kaynağı azaltmak veya ortadan kaldırmak için, ilk olarak harmonik bozucu kaynağı yeri saptanmalıdır.

Başarılı bir yer saptama yaklaşımı, şebekeden elde edilen düzgün ölçümleri gerektirir. AŞ’lerin getirdiği iki yönlü iletişim ve bilgisayar altyapısı gibi çeşitli teknolojik unsurlar, başarılı bir harmonik kaynak yeri saptama yaklaşımı için faydalı olabilecek unsurlardır. AŞ’lerde bulunan gelişmiş ölçü aletlerinden elde edilen veriler, güç kalitesi bilgisi edinmek için kullanılabilir. Bu ölçü aletleri; yenilenebilir enerji kaynakları, elektrikli araç şarj istasyonu, mikro-üreteçler, vb. gibi yeni teknolojik cihazlardan kaynaklanan yüksek frekanslı bozucuları ölçebilmelidir. AŞ’lerdeki geçici ve sürekli bozucular bu ölçü aletleri ile saptanabilir ve bu bilgi ile bozucuların yeri ve tipi saptanabilir. Bozucuların yerinin saptanması, yer belirleme ve sorunu ortadan kaldırma için uygun önlemleri almak açısından önemlidir.

Bu bildiri, sunulan çalışma ile dağılmış enerji üretim sistemleri ve mikro-şebekeleri yoğun bir şekilde barındıracak gelecekteki akıllı şebekeler için, bir güç sistemi harmonik yer tespit algoritması sunmak amaçlanmıştır. Günümüzde ve gelecekteki dağıtım sistemlerinde; yenilenebilir enerji kaynakları, elektrik enerji depolama, dağılmış enerji üretim sistemleri, esnek enerji sistemleri, elektrikli taşıtların kullanımı ve bu sistemlerdeki güç elektroniği sistemlerinin oluşturduğu harmonik bozulmanın; elektrik güç sistem kalitesinde negatif yönde tesir edeceği düşünülmektedir. Bu olayların etkilerinin güç sistemlerinin performansını ve güvenilirliğini azaltarak ekonomik kayıplara neden olması beklenilebilir. Harmonik bozucuların yerinin tespit edilmesi; bozucunun tam yerinin tespit edilmesi ve ortadan kaldırılması için gerekli önlemlerin alınmasını sağlayacağından önem taşımaktadır. Ayrıca, gelecekteki elektrik dağıtım sistemleri için önem taşıyan akıllı otomasyon sisteminin ilk adımı da sistemdeki güç kalitesini azaltan etkenin saptanmasıdır ki bu çalışmada önerilen yaklaşım bu bağlamda bir dağıtım otomasyonu sisteminin bir parçası haline getirilebilir.

### 2. Problemin Tanımı

Güç elektroniği ve kontrol teorisindeki gelişmeler, elektrik şebekesine çok sayıda Dağılmış Enerji Üretim Sistemi (DEÜS)’nin bağlanmasını sağlayacaktır. Dağılmış enerji kaynaklarından üretilen doğru akım (yakıt pilleri, güneş pilleri ve bataryalar) ile değişken frekanslı alternatif akımın (rüzgar



kestirim tekniği [9] ve daha sonra dinamik durum kestirimi için Kalman Filtre metoduna dayanan yöntemleri önermişlerdir [10]. [11]'de önerilen Farach ve arkadaşları tarafından önerilen sezgisel yaklaşım ise harmonik kaynaklarının bulunması olası yerlerini belirleme yöntemine dayanmaktadır. Bu teknik ayrıca bilinmeyen veya ölçüm yapılmayan baralardaki akım değerlerinin tahmininin yapılarak, baralardaki yük tipinin belirlenmesini de amaçlamaktadır. HDK yöntemi ile harmonik kaynak yeri saptamadaki sorunlardan bir tanesi ortak bağlantı noktasında, harmonik akım çekilmesi sebebiyle bozulan gerilim sinyali sonucunda harmonik kaynağı gibi davranabilen doğrusal yüklerdir. Bununla birlikte, elektrik sistemindeki bir ortak bağlantı noktasında ölçülen akım ya da gerilim harmoniklerinden, bu noktadan beslenen yüklerden hangisinin ne kadar sorumlu olduğunun anlaşılması problemi de önemli ve çözümü zor bir konudur. Bu konularda literatürde çeşitli yaklaşımlar vardır. Bir ortak bağlantı noktasında harmonik katkıların belirlenmesi konusunda literatürde yer alan en basit yöntemlerden birisi harmonik gerilim ile harmonik akım yüzdesini karşılaştırmaktır [12]. Bu yöntemde göre bir ortak bağlantı noktasında yapılan ölçümde eğer akım harmoniğinin temel akım bileşenine yüzdesi, gerilim harmonik bileşenin temel gerilim bileşenine yüzdesinden büyük ise harmonik kaynağı tüketicidir. Tam tersi ise harmonik kaynağı şebeke tarafındadır. Literatürde en sık karşılaşılan analitik yöntemlerden biri de harmonik güç yönü yöntemidir [13]. Bu yöntemin amacı harmonik güç akış yönünü kontrol ederek harmonik güç üreten tarafı bulmaktır. Önerilen başka bir yöntem ise şebeke ve tüketicinin harmonik empedanslarını ölçmek ve bu empedansları kullanarak harmonik kaynaklarını hesaplamaktır [14]. Harmonik kaynağının tespiti ile ilgili diğer çalışmalar [15]'de görülebilir. Örneğin [16] çalışmasında, elektrik sisteminin herhangi bir ortak bağlantı noktasındaki yüklerin ve şebekenin harmonik katkı miktarlarının belirlenmesi için sistemdeki şebeke ve yük empedanslarının hesaplanarak harmonik akım kaynaklarının analitik olarak bulunması temeline dayanan bir yaklaşım verilmiştir. Literatürde çok çeşitli yöntemler önerilmiş olmasına rağmen, her koşulda çalışan ve hangi yükün ne kadar harmonik ürettiğini bulan bir yöntem bulunmamaktadır. Referans [17] gibi birçok çalışmada sunulan bulanık kümeleme yaklaşımı, güç sistemini parçalara ayırmak ve ölçü aletlerini bu parçalara yerleştirmeye dayanır. Bu sistemde yapay sinir ağları daha sonra geriye-yayılım algoritması ile eğitilerek harmonik kaynak yeri bulunmasına çalışılmaktadır. Bu tekniklerin sorunu, eğitim işleminin zaman alıcı olması ve sonucu elde etmenin her zaman garanti olmamasıdır.

Referans [18]'de, harmonik şebeke empedanslarında sapma ya da ölçüm hatası olması durumu için harmonik kaynak yeri bulmayı hedefleyen bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu bildiride, literatürdeki bu yöntemin mikro-şebekelere uygulanma potansiyeline dikkat çekilmek istenmektedir.

## 2.2. Harmonik Yer Tespit Algoritması

Harmonik kaynak yer tespit çalışmaları, bir ters harmonik güç akış analizi problemi olarak nitelendirilebilir. Bu sebeple, çözülmesi zor bir problem olarak tanımlanabilir. Problemin ele alınması sırasında ihtiyaç duyulan veri, sistem harmonik empedansı ile sistemdeki harmonik akım ve gerilim

ölçümleridir. Maalesef, gerçek sistemlerde, hesaplanan harmonik empedansları ile ölçülen harmonik empedansları birtakım hatalar ve sapmalar barındırabilir. Bu sebeple, harmonik kaynaklarının yerlerinin doğru olarak saptanabilmesi için geliştirilecek çalışmaların, bu hataları ve sapmaları da göz önünde bulundurması gerekmektedir. Bu çalışmada, modellerdeki ve ölçümlerdeki hataları mümkün olduğunca telafi eden bir yaklaşımın önerilmesi amaçlanmaktadır. Bu hataların üstesinden gelmek için, “üyeleri arası mesafeleri en uzak olan empedans oranlarına sahip ölçüm çiftleri seçimi” ölçütü kullanılmaktadır. Ölçümler, bu ölçüm çiftlerine ait noktalarda alınarak hataların üstesinden gelinebilmektedir [18].

Bir  $n$  düğümlü elektrik devresinde, sistem gerilimlerini belirli bir harmonik frekansı için tanımlayan denklem takımı aşağıdaki gibi bir matris gösteriminde verilebilir:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_{bus} \mathbf{I} \quad (1)$$

Denklem 1'deki  $\mathbf{V}$  gerilim ve  $\mathbf{I}$  akım vektörlerinin bir  $h$ . harmonik frekanstaki elemanları;  $V_i^{(h)}$  fazör gerilimi ve  $I_i^{(h)}$ , bara  $i$ ,  $i \in [1, n]$  deki net giren akım fazörü olmak üzere yazılabilir. Denklem 1'deki  $\mathbf{Z}_{bus}$ , aynı harmonik derecesinde  $n$ -boyutlu bara empedans kare-matrisini göstermektedir. Bundan sonra gelen metinde kolaylık için harmonik indeksi yazılmayacaktır. Denklem 1'de, akım vektörü  $\mathbf{I}$ , harmonik kaynak yerini bulmak için kullanılabilir: Eğer tüm düğüm gerilimleri ve sistem empedans matrisi biliniyorsa; harmonik kaynağının yeri, harmonik kaynaklarının bulunduğu pozisyonlarda sıfırdan farklı akımlar içeren  $\mathbf{I}$ , kullanılarak saptanabilir.

Ölçümlerin yapıldığı  $k$  ve  $\ell$  isimli iki düğüm göz önüne alınsın.  $(k, \ell)$  ölçüm çifti için,  $k$  düğümündeki gerilim fazörünün  $\ell$  düğümündeki gerilim fazörüne oranı şöyle gösterilebilir:

$$\frac{V_k}{V_\ell} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_{k,j} I_j}{\sum_{j=1}^n Z_{\ell,j} I_j} \quad (2)$$

Denklem 2'de  $j$  bara numarası ve  $j \in [1, n]$  olarak tanımlanmıştır. Denklem 2'de, eşitliğin sol tarafı, düğüm  $k$  ve düğüm  $\ell$ 'de alınan ölçümler nedeniyle bilinen bir büyüklüktür. İlgilenilen harmonik derecesindeki empedansların bilindiği varsayımı ile devrede tek bir harmonik akım kaynağı bulunması halinde,  $i$ . hariç tüm akım değerleri sıfır olacaktır:  $I_i \neq 0$ .  $i$ . düğümde tek bir harmonik kaynağının bulunması halinde Denklem 2, şu ifadeye indirgenebilir:

$$\frac{V_k}{V_\ell} = \frac{Z_{k,i}}{Z_{\ell,i}} \quad (3)$$

Bir harmonik kaynağının yerinin bulunması, verilen harmonik derecesinde ölçülen gerilimlerin oranına eşit olan empedans oranının araştırılması yaklaşımına dayanmaktadır. Denklem 3'deki eşitlik sağlandığında, harmonik kaynak yerinin tespiti gerçekleşir.

Doğru çalışan bir kaynak yer saptama algoritması, şebekeden alınan doğru ölçümlere gereksinim duyacaktır. Global Yer Bulma Sistemi (GPS) ile elde edilmiş zamanda senkronize fazör ölçümleri kullanılarak doğru harmonik ölçümleri alınabilir. Ölçümlerin bu tür bir yaklaşım ile alındığı varsayılmıştır. Denklem 3 ile verilen ifadede, her  $i = 1, \dots, n$  için,  $i$ . düğümde empedans oranı şu şekilde verilebilir:

$$\alpha_i^{k,\ell} = \frac{Z_{k,i}}{Z_{\ell,i}} \quad (4)$$

$k$  ve  $\ell$  düğümleri için empedans oran kümesi:

$$\mathbf{\alpha}^{k,\ell} = \{\alpha_1^{k,\ell}, \alpha_2^{k,\ell}, \dots, \alpha_n^{k,\ell}\} \quad (5)$$

Harmonik kaynak yerinin mümkün olduğunca en doğru şekilde saptanması için, en iyi ölçüm çiftlerinin seçilmesini sağlayan bir yaklaşım geliştirilmelidir. Seçim yaklaşımı, gerilim ölçüm hataları ve şebeke empedans matrisi değerlerindeki sapmalar nedeniyle harmonik kaynak yerinin yanlış bulunmasının önüne geçmelidir. Bu tür hata ve sapmalar olduğunda, Denklem 5'te gösterilen  $\mathbf{\alpha}^{k,\ell}$  küme elemanları, gerçek değerlerinden saparak harmonik kaynak yerinin yanlış bulunmasına yol açabilir. Bu problemin üstesinden gelmek için önerilen yaklaşım,  $\mathbf{\alpha}^{k,\ell}$  kümeleri elemanları arası sapmanın tolere edilmesi için en yakın üyeleri arası mesafenin en fazla olduğu  $\mathbf{\alpha}^{k,\ell}$  kümelerinin seçilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemin ayrıntılı açıklaması literatürde verilen çalışmada bulunabilir [18]. Bu yöntemle göre seçilen çiftler, ölçüm çifti olarak belirlenmektedir. Bu şekilde, sistemde empedans sapmaları olması durumunda, algoritma etkinliği artmaktadır.

Harmonik Yer Tespiti amacıyla geliştirilen algoritma ile, gerilim oranını harmonik empedans matrisinin ölçüm noktalarına karşılık gelen satır oranları ile karşılaştıran bir katsayı önerilmiştir [18]. Bu katsayı, oranlar en yakın olduğunda harmonik kaynağının bağlı olduğu barayı bulmayı sağlamaktadır. Yaklaşım performansı farklı sapma ve ölçüm hatası durumları için IEEE 30-bara sisteminde Monte Carlo tekniği ile test edilmiştir. Önerilen yaklaşım, harmonik kaynak yeri bulma işleminde başarılıdır [18]. Önerilen yaklaşım, ayrıca, güç sistemini farklı frekanslarda harmonik alt devrelere ayırmayı ve çözmeyi sağlayan *toplamsallık ilkesi* sayesinde, birden fazla harmonik kaynağının yerinin tespit edilmesi için de kullanılabilir. Birden fazla harmonik derecesine sahip tekil harmonik kaynağı için, her bir harmonik frekansta harmonik

kaynak yer bulma algoritması çalıştırılabilir ve tüm durumlar için bulunan yer aynı olmalıdır. Farklı harmonik derecelere sahip birden fazla harmonik kaynağı için, harmonik kaynak yeri benzer mantıkla saptanabilir.

### 3. Sonuçlar

Bu bildiriye sunulan çalışma ile dağılmış enerji üretim sistemleri ve mikro-şebekeleri yoğun bir şekilde barındıracak gelecekteki akıllı şebekeler için, bir güç sistemi harmonik yer tespit algoritması sunmak amaçlanmıştır. En iyi ölçüm çiftlerinin seçilmesini sağlayan bir yaklaşım kullanılarak harmonik kaynak yerinin mümkün olduğunca en doğru şekilde saptanması amaçlanmıştır. 30-baralı IEEE test sistemi ile yapılan Monte Carlo benzetimleri, sunulan HYT algoritmasının (elektrik güç sistemindeki harmonik empedanslarında sapma olması halinde bile) harmonik kaynak yer tespitinde başarılı olduğunu göstermektedir.

Bu bildiriye sunulan çalışmanın devamı niteliğinde ABD, Kansas Eyalet Üniversitesi (KEÜ)'nde doktora sonrası araştırma çerçevesinde uygulama projesi yürütülmesi planlanmaktadır. KEÜ'nde bulunan mikro-şebeke- dağıtık enerji sistemi ve akıllı şebeke altyapılarından oluşan test ortamında, bu bildiriye sunulan harmonik yer tespit algoritmasının uyarlanması hedeflenmektedir. Algoritmanın gerçek veri ile test edilmesi ve gerekli halde geliştirilmesi de hedeflenmektedir. Sonuç olarak, yapılması planlanan çalışma ile elde edilecek bilgi birikiminin, yenilenebilir enerjiler ve dağıtık üretim sistemlerini de içerecek şekilde sistem/yük modelleme konularında bilgi birikimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu yönüyle elde edilecek modelleme alt yapısı başka çalışmaların yürütülmesi açısından da önemli görülmektedir.

### 4. Kaynaklar

- [1] Tuncay, N., "Enerji ve Çevre Teknolojileri Stratejisi" *Vizyon 2003 TUBİTAK Raporu*, 2003.
- [2] Özdemir, E., "Dağılmış Enerji Üretim Sistemleri ve Yardımcı Hizmetler", *12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi*, 14-18 Kasım 2007, Eskişehir, 2007.
- [3] Lasseter, R.H, Paigi, P., "Microgrid: a Conceptual solution", *Power Electronics Specialist Conference*, June 20-25, Aachen, Germany, 2004.
- [4] Dugan, R.C., Mc Granaghan MF, Santoso S, Beaty HW, *Electrical Power Systems Quality*, Second Edition, mcgraw-Hill, (2002).
- [5] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, USA.
- [6] Cristaldi, L., Ferrero A., Salicone S., "A Distributed System for Electric Power Quality Measurement". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51, 4, Aug, 776-81, (2002).
- [7] Cataliotti, A., Cosentino V., Nuccio S., "Comparison of Nonactive Powers for the Detection of Dominant Harmonic Sources in Power Systems". *IEEE Trans. Instrum. Meas*, 57, 8, Aug, 1554-61, (2008).

- [8] Heydy, GT., "Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4, 1. Jan, 569-76, (1989).
- [9] Najjar, M., Heydt GT., "A Hybrid Nonlinear-Least Squares Estimation of Harmonic Signal Levels in Power Systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6, 1, Jan, 282-8, (1991).
- [10] Beides, HM., Heydt GT., "Dynamic state estimation of power system harmonics using Kalman filtering methodology". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6, 4. Oct, 1663-9, (1991).
- [11] Farach, Je., Grady WM., Arapostathis A., "An Optimal Procedure for Placing Sensors and Estimating the Locations of Harmonic Sources in Power Systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8, 3, July, 1303-10, (1993).
- [12] Arbiter, Sys, "Direction of Harmonics and Flicker, Application Notes" (1133a) (2007).
- [13] Cristaldi, L., "Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality", *IEEE Trans. Inst. Meas.*, 44, 683-685, (1995).
- [14] Oliveira, A., Oliveira J.C., Resende J.W., et. Al., "Approaches for AC system harmonic impedance measurements", *IEEE Trans. Pow. Del.*, 6, 1721-26, (1991).
- [15] Li, C., XU W., Tayjasant T.A., "A Critical Impedance Based Method for Identifying Harmonic Sources", *IEEE Trans. Power Del.*, 19 (2), 671-678, (2004).
- [16] Ünsar, Ö., Durna Ö., Çadırcı I., Ermiş M., "Determination of harmonic current contributions at point of common coupling of the electrical system based on field measurements". *IEEE Signal Processing and Communication Applications Conference*, (2012)
- [17] Hong, YY., Chen YC., "Application of algorithms and artificial-intelligence approach for locating multiple harmonics in distribution systems". *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, 146, 3, May, 325-9, (1999).
- [18] Dağ, O., Uçak C., Usta Ö., "Harmonic source location and meter placement optimization by impedance network approach". *Electrical Engineering*, Springer, March, 94 (1), 1-10, (2012).