

Empedans Devreleri Yaklaşımıyla Harmonik Kaynağının Yerinin Saptanması

Locating Harmonic Source Using Impedance Network Approach

Oben Dağ¹, Canbolat Uçak¹, Ömer Usta²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Yeditepe Üniversitesi
obendag@yeditepe.edu.tr, canbolat@yeditepe.edu.tr

²Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
usta@elk.itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada tek bir harmonik kaynağı bulunan elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynağının yerinin tespit edilmesi için “empedans devreleri” yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, harmonik bara empedans matrisinde satırlar arasındaki oranlar temel alınmıştır. Bu oranlar, ilgili baralardan alınan düğüm gerilimleri oranları ile karşılaştırılarak harmonik kaynağının yeri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada ayrıca, harmonik ölçü aletlerinin konulacağı en uygun yerleri saptayan bir yaklaşım da sunulmuştur.

Abstract

In this study, a method based on “impedance network approach” is proposed to locate a single harmonic source in electrical power systems. This approach is based on the harmonic impedance ratios between rows of the harmonic impedance matrix. In order to locate the single harmonic source, these ratios are compared with the measured node voltage ratios. An optimization procedure to select best nodes from where measurements should be taken is also proposed in the study.

1. Giriş

Modern elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulma seviyesinin belirlenmesi, enerji dönüşümünde kullanımı gün geçtikçe artan doğrusal olmayan cihazlar nedeniyle önemli bir araştırma alanıdır. Elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulmaya neden olan etkenlerin yerinin saptanması, harmonik seviyelerinin düşürülmesi çalışmalarının verimliliğinin artırılmasını yönünden önemli bir konudur. Harmonik bozucu kaynağı yerinin tespit edilmesi ile bu noktada harmonik bozulma seviyelerinin düşürülmesi için gerekli (harmonik filtreleme gibi) uygulamalar daha etkin olarak yapılabilir.

Literatür incelendiğinde elektrik güç sistemlerinde harmonik bozucularının yerinin saptanması konusunda yapılan çalışmaların; indeks-tabanlı yaklaşımlar, durum kestirimi yaklaşımı ve yapay zeka tabanlı yaklaşımlar olarak sınıflandırılabilir. Literatürde görülen ikinci bir yaklaşım ise harmonik durum kestirimi yöntemidir. Heydt ve Najjar’ın önerdiği “en küçük kareler tahmin yöntemine” dayalı kestirim metodu ile tek bir harmonik kaynağı bulunan bir elektrik güç sisteminde harmonik kaynağının yerinin tespiti için çok sayıda ölçüm alınması gerektiği ifade edilmiştir [3], [4]. Bu yaklaşımda harmonik ölçü aletlerinin sistemde nasıl yerleştirileceği konusunda bir yöntem verilmemiştir. Grady, Farach ve Arapostathis ise harmonik kaynağının yerinin tahmininde ölçüm yapılacak en uygun yerlerin seçimi için sistematik bir yöntem önermiştir [5]. Bu teknik, bilinmeyen yada ölçüm alınmayan baralardaki akımların değerlerinin tahmini yapılarak buradaki yük tiplerinin bulunması esasına dayanmaktadır. Yöntemin verimliliği sistemdeki yüklerin yapısı (doğrusal, doğrusal olmayan) hakkında ön bilgi mevcut olduğunda artmaktadır. Bu çalışmada yeteri kadar harmonik ölçümü alındığında harmonik kaynaklarının en olası yerlerinin tahmin edilebileceği ifade edilmiştir. Pratikte harmonik ölçü aletlerinin sayısının sınırlı olması sebebiyle az sayıda ölçüm ile birden fazla harmonik kaynağı yeri tespit edilebileceği ifade edilmiştir. Grady, Farach ve Arapostathis tarafından

önerilen yöntem harmonik kaynaklarının varlığı ve olası yerleri hakkında bilgiye ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte incelenen baralara injekte edilen en etkili akım değerlerinin bu baralarda bir harmonik kaynağı bulunup bulunmadığını her zaman garanti etmediği görülmektedir.

Literatürde raslanan diğer bir yaklaşım ise yapay zeka tekniklerine dayanmaktadır. Örneğin [6]’da birden fazla harmonik kaynağının yerinin bulunması için bulanık mantık ve yapay sinir ağları tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Bulanık kümeleme yaklaşımı ile elektrik güç sistemi, kümelerin sayısı güç sistemine yerleştirilecek harmonik işaret ölçü aletleri sayısına eşit olacak şekilde, kümelere ayrılmıştır. Daha sonra yapay sinir ağı geriye-yayılım algoritması ile eğitilerek güç sistemindeki her bir harmonik kaynağının yeri bulunmaya çalışılmıştır. Bu yaklaşımla gereken ölçü aleti sayısının [3] ve [4] gibi yaklaşımlarda kullanılması gereken ölçü aleti sayısından daha az olacağı ileri sürülmüştür. Benzer yaklaşımlar [7] ve [8] gibi çalışmalarda da görülmüştür. Bu yöntemlerde yapay sinir ağı yönteminin eğitim süresinin uzun olması, ağ yapısının kurulmasındaki zorluklar, eğitim safhası için sistemdeki yüklerin yapısı hakkında ön bilgi (olası harmonik kaynaklarının yerleri) gerekmesi bu yöntemin zayıf noktalarıdır.

Yukarıda özetlendiği gibi harmonik kaynaklarının yerinin tespit edilmesi konusunda önerilen yaklaşımların kısıtlamaları olduğu görülmektedir. Bu bildiride ise geliştirilen farklı bir yöntem sunulacaktır.

2. Önerilen yöntem

Bir elektrik güç sisteminde bir baraya harmonik akım kaynağı injekte edildiğinde, sistemde ölçülecek akım ve gerilim işaretleri temel frekans sistem davranışı ve harmonik yük, harmonik derecesi ve harmonik kaynağı yeri parametrelerine bağlı bir fonksiyon olarak değişir. Yapılan çalışmada güç sisteminin doğrusal elemanlardan oluştuğu, harmonik kaynaklarının akım kaynağı olarak modellendiği ve farklı harmonik frekans devreleri arasında etkileşim olmadığı varsayılmıştır. Bu durumda elektrik güç sistemi harmonik eşdeğer devresi süperpozisyon prensibi sebebiyle temel frekans ve harmonik frekans eşdeğer devrelerinin toplamı olarak gösterilebilir. Elektrik güç sisteminde bulunan harmonik kaynaklarının yerinin bulunması için güç sistemi her bir harmonik eşdeğer devresi için ayrı ayrı çözülebilir.

Bir elektrik güç sisteminde tek bir harmonik kaynağının tespit edilmesi için sunulan yöntem, “empedans devreleri” yaklaşımına dayanmaktadır. Empedans devreleri yaklaşımı, bara empedans matrisindeki iki satır arasındaki oranı kullanarak ve bunu ilgili baralarda alınan düğüm gerilim ölçüm oranı ile karşılaştırarak harmonik akım kaynağı injekte edilen baranın tespit edilmesi esasına dayanmaktadır.

2.1. Yöntemin özellikleri

Yöntemin çalışması için öncelikle her harmonik derecesindeki bara-empedans matrisinin kurulması gerekmektedir. Bara empedans matrisinin elde edilmesi için literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir [9].

n düğümden oluşan bir devre gözönüne alındığında, her bir harmonik bileşen için bara admittans matrisi $\mathbf{Y}^{(h)}_{bus}$ ve bara admittans matrisinin tersi bara empedans matrisi $\mathbf{Z}^{(h)}_{bus}$

$$\mathbf{Z}^{(h)}_{bus} = \left(\mathbf{Y}^{(h)}_{bus} \right)^{-1} \quad (1)$$

şeklinde ifade edildiğinde oluşan bara empedans matrisi,

$$\mathbf{Z}^{(h)}_{bus} = \begin{bmatrix} Z_{1,1}^{(h)} & \dots & Z_{1,i}^{(h)} & \dots & Z_{1,j}^{(h)} & \dots & Z_{1,n}^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{k,1}^{(h)} & \dots & Z_{k,i}^{(h)} & \dots & Z_{k,j}^{(h)} & \dots & Z_{k,n}^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{l,1}^{(h)} & \dots & Z_{l,i}^{(h)} & \dots & Z_{l,j}^{(h)} & \dots & Z_{l,n}^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n,1}^{(h)} & \dots & Z_{n,i}^{(h)} & \dots & Z_{n,j}^{(h)} & \dots & Z_{n,n}^{(h)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$(k, l, i, j) \in \{1, 2, \dots, n\}$ ve h harmonik derece indisi olmak üzere yazılabilir. Burada (k, l) satır numaralarına ve ölçüm alınan düğümlere; (i, j) ise sütun numaralarına ve akım kaynağının bağlı olabileceği düğümlere karşılık gelmektedir.

Denklem 2 ile gösterilen matris her bir harmonik derecesi için kurulabilir. Denklemlerin basitleştirilmesi amacıyla bundan sonraki bölümlerde h indisi gözönüne alınmamıştır.

n düğümlü bir devreyi belirli bir harmonik frekansı için tanımlayan denklem kümesi;

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{bus} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

ve sistemde gerilim ölçümü alınan düğümler k ve l olmak üzere bu düğümler (k, l) çifti olarak gösterilsin. k düğümünde ölçülen gerilim işareti:

$$V_k = \sum_{j=1}^n Z_{k,j} I_j \quad (4)$$

Denklem 4’deki I_j akımı, $j \in (1, 2, \dots, n)$ olmak üzere j düğümlerine injekte edilen harmonik akım kaynağıdır. k düğümünde alınan gerilim ölçümü ile l düğümünde alınan gerilim ölçümü arasındaki oran

$$\frac{V_k}{V_l} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_{k,j} I_j}{\sum_{j=1}^n Z_{l,j} I_j} \quad (5)$$

Denklem 5’in sol tarafı bilinen bir büyüklük, sağ taraftaki oranda empedans büyüklükleri bilinen ve harmonik kaynağına ait akım büyüklükleri ise bilinmeyenlerdir. Tek harmonik kaynağı bulunduğu durumda i düğümündeki hariç diğer tüm düğüm akımları sıfır olacağından Denklem 5 aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{V_k}{V_l} = \frac{Z_{k,i}}{Z_{l,i}} \quad (6)$$

Tek harmonik kaynağının yerinin bulunması, “ölçüm sonucu elde edilen belirli harmonik frekansındaki gerilim oranı ile bu orana eşit olan empedans oranının aranması” yaklaşımına dayanmaktadır. Denklem 6’daki eşitlik sağlandığında harmonik akım kaynağının yeri (düğüm i) saptanmış olacaktır.

Ölçüm alınan düğümler (k,l) olmak üzere,

$$\alpha_i^{k,l} = \frac{Z_{k,i}}{Z_{l,i}} \quad (7)$$

$$\forall (i, j, k, l) \in \{1, 2, \dots, n\} \wedge (k \neq l), (i \neq j)$$

şeklinde gösterilen bir empedans oranı tanımlanabilir. (k,l) düğümlerine karşılık gelen ve elemanları Denklem 7 ile gösterilen empedans oran kümesi;

$$\alpha^{k,l} = \{\alpha_1^{k,l}, \alpha_2^{k,l}, \dots, \alpha_n^{k,l}\} \quad (8)$$

olarak gösterilebilir. Denklem 8 ile gösterilen küme elemanları i - tek olan, ii - tek olmayan şeklinde tanımlanabilir. Eğer küme elemanları tek ise,

$$\alpha_i^{k,l} \neq \alpha_j^{k,l} \quad (9)$$

eşitsizliği yazılabilir. Burada (i,j) akım kaynağının bağlı olabileceği düğümlere ve Denklem 2’de sütunlara karşılık gelmektedir. Denklem 9’daki eşitsizliği sağlayan $\alpha^{k,l}$ kümesi “tek küme” olarak adlandırılabilir. Bunun anlamı küme içindeki elemanların tekrar etmemesidir. Denklem 8’de $\alpha_i^{k,l} = V_k / V_l$ veren i elemanı harmonik kaynağının bağlı olduğu düğümü göstermektedir. Harmonik kaynağı yeri, (k,l) ölçüm alınan düğümlere bağlı olarak bulunabilir. Bir elektrik devresindeki “tek küme” sayısı devre topolojisi ve ilgili harmonik frekanstaki empedans değerlerine bağlıdır. Bazı durumlarda örneğin simetrik devrelerde, tek kümeler bulunmayabilir ve ek ölçümler sonucu elde edilen kümelerin kullanılması gerekebilir.

Eğer küme elemanları tek değilse,

$$\alpha_i^{k,l} = \alpha_j^{k,l} \quad (10)$$

eşitliği yazılabilir. Bu durumda $\alpha^{k,l}$ içinde en az bir üye birden fazla sayıda tekrar etmektedir. Eğer Denklem 8 kümesi içinde Denklem 10’u sağlayan en az iki üye varsa, (V_k / V_l) değeri Denklem 8’de tekrar edecektir: harmonik kaynağı tekrar eden üyelerin bulunduğu sütunda bulunuyorsa yeri ayırtedilemez, bu sütunlar dışında sütunlarda bulunuyorsa yeri saptanabilir. Bu durumda ek ölçüm alınması gerekir.

Empedans devreleri yaklaşımı ile tek harmonik kaynağı yeri tespit edilmesi yönteminin avantajı sistemde harmonik akım ölçümü yapmaya gerek olmamasıdır. Ancak bara harmonik gerilim genliklerinin yeterli değerde olmadığı durumlarda bu yöntem bir dezavantaj olabilir.

2.2. Ölçüm çiftlerinin belirlenmesi

Harmonik kaynağının yerinin belirlenmesi için öncelikle ölçüm alınacak düğümlerin saptanması gerekir. (V_k / V_l) oranını elde etmek amacıyla kullanılacak (k,l) düğümleri bir “ölçüm çifti” oluşturur. Denklem 9’u sağlayan kümeler, (k,l) ölçüm çiftinin birçok değeri için sağlanabilir. Harmonik kaynağının yerinin bulunması için en iyi ölçüm çiftinin seçilmesi gerekmektedir. Bunun için “en yakın üyeleri arası mesafenin en büyük olduğu kümelerin seçilmesi” şeklinde bir yaklaşım uygulanmıştır. Bu yaklaşım ile, gerilim ölçme hataları olması durumunda ve sistem harmonik empedans değerlerinde sapma olması halinde harmonik kaynağının yerinin hatalı bulunması engellenebilir. Denklem 9’u sağlayan tüm (k,l) çiftleri harmonik kaynağının yerinin bulunması için kullanılabilir. Fakat ölçüm hataları olması halinde, $\alpha^{k,l}$ kümesi elemanları gerçek değerlerinden sapma gösterebilir. En yakın üyeleri arası mesafe en büyük olan küme seçilirse, küme elemanlarının değerlerindeki sapma tolere edilebilir.

Ölçüm çiftlerinin sayısı bara-empedans matrisi boyutuna bağlıdır. Eğer matris boyutu $n \times n$ ile verilirse tüm (k,l) ölçüm çiftlerinin sayısı P permutasyon olmak üzere $m = P(n, 2)$ ile gösterilebilir. M vektörü, olası tüm ölçüm çiftlerinin listesini belirtmek için kullanılacaktır. $\alpha^{k,l}$ kümesi üyeleri Denklem 10’da belirtildiği gibi tekrar edebilir. Bu kümedeki tekrar sayısı, N tekrar sayısını gösteren fonksiyon olmak üzere, $N(\alpha^{k,l})$ olarak gösterilebilir. $N(\alpha^{k,l})$, (k,l) ölçüm çiftleri için $\alpha^{k,l}$ kümesindeki tekrar sayısını belirtmektedir. Harmonik kaynağının yeri, eğer bir kümedeki tekrar sayısı “1” ise ya da o $\alpha^{k,l}$ kümesindeki empedans oranı “tek” ise saptanabilir. Birtakım simetrik devre topolojilerinde ve / veya bazı empedans değerleri için $N(\alpha^{k,l})$ değeri “1” olmayabilir. Ek olarak, aynı tekrar sayısını veren birçok farklı $\alpha^{k,l}$ kümeleri bulunabilir. Tüm ölçüm çiftleri arasından en uygun (k,l) seçimi, çözülmesi gereken bir optimizasyon problemidir.

2.3. Optimizasyon problemi

Problem çözümü için tanımlanan indis;

$$\beta = \max_{k,l} \left(\min_{i,j} |\alpha_i^{k,l} - \alpha_j^{k,l}| \right) \quad (11)$$

farklı (k,l) ölçüm çiftleri arasından en uygun (V_k, V_l) seçilmesini sağlamaktadır. Seçim algoritması iki aşamalı tanımlanmıştır.

2.3.1. Adım 1

Miktar $m = P(n, 2)$ ile hesaplanan olası tüm (k,l) çiftleri için hesaplanan $N(\alpha^{k,l})$ değerleri bir $N(\alpha^{k,l})$ vektörüne yazıldığında en iyi (k,l) çiftleri bu vektörde en az sayıda tekrar veren ölçüm çiftleridir. Bu vektör için en az tekrar sayısının değeri

$$s = \min(N(\alpha^{k,l})) \quad (12)$$

ve Denklem 12 ile gösterilen sayıda tekrar veren tüm (k,l) çiftlerini içeren küme S olmak üzere S kümesi içinde en az

tekrar sayısını veren tek ölçüm çifti bulunursa bu çift için ölçüm alınarak harmonik kaynağı yeri aranabilir. Ancak, eğer S kümesi içinde birden fazla sayıda ölçüm çiftleri bulunursa, “Adım 2” de verilen optimizasyon işlemi kullanılır.

2.3.2. Adım 2

En iyi ölçüm çiftleri şu şekilde bulunabilir:

i) Adım 1’de bulunan ve aynı sayıda tekrar veren (k,l) çiftleri için, Denklem 9’daki $\alpha^{k,l}$ üyeleri arası en küçük mesafe hesaplanır:

$$D^{k,l} = \min_{i,j} |\alpha_i^{k,l} - \alpha_j^{k,l}| \quad (13)$$

ii) En küçük tekrar sayısını sağlayan birçok (k,l) çifti bulunabilir. Bu sebeple, en iyi ölçüm çifti, çiftler arasında en az mesafeyi verenler arasından en büyük olanı bulunur:

$$\beta = \max_{k,l} (D^{k,l}) \quad (14)$$

iii) Denklem 14’yi sağlayan ölçüm çifti en iyi ölçüm çifti olarak seçilir. Birden fazla (k,l) çifti olması durumunda, Denklem 13’den “ikinci” en küçük mesafe seçilir ve bunu sağlayan tüm (k,l) çiftleri arasından en büyük değeri verenler en iyi ölçüm çifti olarak seçilir. Eğer birden fazla en iyi (k,l) çiftleri bulunmaya devam ederse bu işlem benzer şekilde devam ettirilir. Eğer en son durumda hala birden fazla en iyi (k,l) çifti mevcut ise ek ölçüm alınması gerekir.

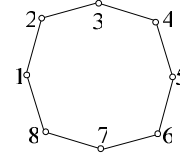
iv) Bu durumda bu çiftler arasından bir tanesi seçilir ve buna ait $\alpha^{k,l}$ kümesi içinde tekrar eden elemanlar saptanır. Tüm $\alpha^{k,l}$ değerleri arasından bu elemanları farklı olanlar seçilir. Bunlar arasından Denklem 11 ile en iyi (k,l) çifti bulunur. Elde edilen ek ölçüm çiftleri ve ilk alınan ölçüm çifti için oluşturulan $\alpha^{k,l}$ kümeleri birlikte değerlendirilerek harmonik kaynağının yeri saptanır.

Denklem 14’de kullanılan operatör, elektrik devresinde ölçme hataları bulunduğunda birbirinden bağımsız elemanlar içeren (k,l) çifti seçilerek yer bulma algoritmasının etkinliğini arttırmaktadır.

3. Uygulama

Bu çalışmadaki uygulama örneklerinde kullanılan devre yapıları simetrik devre özellikleri taşıyacak şekilde seçilmiştir. Bunun nedeni, simetrik devre özelliği taşıyan devrelerde tek olmayan çözümler olması ve çözümün daha problemli olmasıdır.

Devre topolojisi simetrik olan ve Şekil 1 ile gösterilen 8 düğümlü bir devrede her düğüm arasında ve düğüm-toprak arasında $Z = 0.01 + j0.1$ değerinde bir empedans bağlanmıştır.



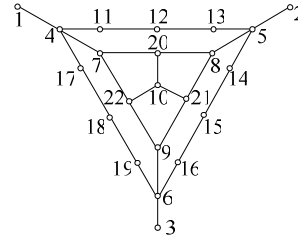
Şekil 1: 8 düğümlü bir devre örneği

Bölüm 2’de ızah edilen ve Denklem 11 ile gösterilen algoritma uygulandığında Denklem 8 için Denklem 9’u sağlayan yani hiç tekrar vermeyen en iyi (k,l) ölçüm çiftleri;

$$\{\{1, 4\}, \{1, 6\}, \{2, 5\}, \{2, 7\}, \{3, 6\}, \{3, 8\}, \{4, 1\}, \{4, 7\}, \{5, 2\}, \{5, 8\}, \{6, 1\}, \{6, 3\}, \{7, 2\}, \{7, 4\}, \{8, 3\}, \{8, 5\}\}$$

olarak bulunmuştur. Ölçü aletlerinin hangi düğüm çiftlerine yerleştirilebileceğini gösteren bu listede bu ölçüm çiftleri için yazılan $\alpha^{k,l}$ küme elemanlarının “tek küme” özelliği taşıdığı görülmüştür, yani elde edilen her bir (k,l) ölçüm çiftine karşılık gelen (V_k/V_l) oranı için $\alpha_i^{k,l} = V_k/V_l$ ’nın tek olduğu görülür ve harmonik kaynağının bağlı olduğu i düğümü tespit edilebilir. Örneğin $I = 1.0 + j2.0$ değerinde bir harmonik kaynağı düğüm 8’e bağlandığında, algoritmanın verdiği ölçüm çiftlerinden biri için yapılan ölçüm için elde edilen (V_k/V_l) oranının $(Z_{k,8}/Z_{l,8})$ oranına eşit olduğu görülmüştür ve kaynak yeri doğru olarak bulunmuştur. Kaynak diğer düğümlere yerleştirildiğinde de doğru sonuçlar elde edilmiştir. Devredeki empedansların değerleri birbirinden farklı seçildiğinde ise en iyi (k,l) ölçüm çiftleri sayısının azaldığı ama “tek küme” oluşturduğu görülmüştür. Sonuç olarak böyle bir devrede iki adet ölçüm ile kaynağın yerinin doğru olarak bulunabileceği görülmüş, ayrıca ölçü aletlerinin yerleştirilebileceği en uygun düğümler de tespit edilmiştir.

Devre topolojisi Şekil 2’de gösterilen 22 düğümlü bir devrede her düğüm arasında ve düğüm-toprak arasında $Z = 0.01 + j0.1$ değerinde bir empedans bağlanmıştır.



Şekil 2: 22 düğümlü bir devre örneği

Bölüm 2’de ızah edilen ve Denklem 11 ile gösterilen algoritma uygulandığında Denklem 8 için Denklem 10’u sağlayan ve Denklem 8’deki elemanlarının en az 6 tekrar verdiği durumları içeren en iyi (k,l) ölçüm çiftleri;

$$\{\{20, 1\}, \{20, 2\}, \{21, 2\}, \{21, 3\}, \{22, 1\}, \{22, 3\}\}$$

olarak elde edilmiştir. Bu ölçüm çiftlerinin herbiri için Denklem 8’deki küme elemanları 6 noktada aynı değer vermektedir. Dolayısıyla kaynak bu noktalardan birinde bulunursa yeri saptanamaz. Bu sebeple elde edilen ölçüm

çiftlerinden biri, örneğin $\{20,1\}$ seçilip buna ait $\alpha^{20,1}$ kümesi içinde tekrar eden elemanlar saptanmıştır. Tüm $\alpha^{k,l}$ değerleri arasından bu elemanları farklı olanlar seçilip bunlara Denklem 11 ile gösterilen algoritma uygulandığında Denklem 8'deki elemanlarının en az 6 tekrar verdiği durumları içeren en iyi (k,l) ölçüm çiftleri; $\{\{2,3\}, \{3,2\}\}$ olarak bulunmuştur. Bu ölçüm çiftlerinden birisi seçildiğinde elde edilen $\alpha^{2,3}$ ile daha önce elde edilen $\alpha^{20,1}$ değerleri birlikte değerlendirilerek elde edilen ortak listenin tüm elemanlarının her düğüm için "tek olduğu" görülmüştür. $I = 1.0 + j2.0$ değerinde bir harmonik kaynağının tüm düğümlere ayrı ayrı konulması durumunda $\{\{2,3\}, \{20,1\}\}$ ölçüm çiftleri ile kaynağın yerinin doğru olarak bulunduğu görülmüştür.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada tek bir harmonik kaynağı bulunan elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynağının yerinin tespit edilmesi için "empedans devreleri" yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde harmonik bara-empedans matrisi gereklidir. Yöntem, harmonik kaynağının şebekeye verdiği akımdan bağımsız olarak kullanılabilir. Hataların en aza indirgenebilmesi için harmonik ölçü aletlerinin konulması gereken en uygun yerleri saptayan bir yaklaşım da bu çalışmada sunulmuştur. Örnek sistemler üzerinde yapılan ilk çalışmalar yöntemin doğru bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Yöntemin gerçek sistemlerde ve birden fazla harmonik kaynağı olması durumunda uygulanışı üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Ayrıca harmonik gerilimlerin zayıf veya güçlü olması durumunda, harmonik akımları da kapsayacak yöntemler ileride göz önüne alınacaktır.

5. Kaynaklar

- [1] Cristaldi, L. ve Ferrero, A., " A Digital Method for the Identification of the Source of Distortion in Electric Power Systems ", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 44, No. 1., 14-18, Şubat 1994
- [2] Cristaldi, L., Salicone, S. ve Ferrero, A., " A Distributed System for Electric Power Quality Measurement ", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No. 4, 776-781, Ağustos 2002
- [3] Heydt, G.T., " Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, 569-576, Ocak 1989
- [4] Najjar, M., Heydt, G.T., " A Hybrid Nonlinear-Least Squares Estimation of Harmonic Signal Levels in Power Systems ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, 282-288, Ocak 1991
- [5] Farach, J.E., Grady, W.M. ve Arapostathis, A., " An Optimal Procedure for Placing Sensors and Estimating the Locations of Harmonic Sources in Power Systems ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, 1303-1310, Şubat 1993
- [6] Hong, Y.Y., Chen, Y.C., " Application of algorithms and artificial-intelligence approach for locating multiple harmonics in distribution systems ", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No.3, 325-329, Mayıs 1999

- [7] Cronje, W., Rens, A., " Investigating the Validity of Applying Artificial Neural Networks to Localise Harmonic Distortion Sources ", IEEE AFRICON 2004., Vol. 146, No.3, 645-650, 2004
- [8] Hartana, R.K., Richards, G. G., " Harmonic Source Monitoring and Identification Using Neural Networks ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No.4, 1098-1104, Kasım 1990
- [9] Grainger, J.J., Stevenson, W.D.Jr., Power System Analysis, McGraw-Hill, 1994.