



Total harmonic power method for harmonic source detection in distribution system

Ferhat Özel^{1*}, Nuran Yörükeren¹, İbrahim Gürsu Tekdemir²

¹Department of Electrical Engineering, Faculty Engineering, Kocaeli University, 41380, Kocaeli, Türkiye

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty Engineering and Natural Sciences, Bursa Technical University, 16310, Bursa, Türkiye

Highlights:

- Application of THP and CI methods for harmonic source detection in a balanced distribution IEEE 13 bus test system
- Harmonic load flow in DIgSILENT
- THP and CI calculation in MATLAB

Keywords:

- Total harmonic power method
- Harmonic load flow
- Harmonic source detection
- Power quality
- Critical impedance method

Article Info:

Research Article

Received: 17.02.2022

Accepted: 26.02.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1074861

Correspondence:

Author: Ferhat Özel

e-mail:

ferhatozel96@gmail.com

phone: +90 537 619 6555

Graphical/Tabular Abstract

In this study, Total Harmonic Power (THP) method is used to determine the bus where harmonic loads are located or the direction harmonics are dominant in, by choosing the point of common coupling (PCC) as reference. Critical Impedance (CI) method is a reactive power based harmonic source detection method and it is applied for comparison purpose in this study. Analysis of the THP and CI methods were made with a balanced distribution IEEE 13 bus test system shown in Figure A. Simulation studies were carried out with DIgSILENT for four different scenarios regarding the distribution of harmonic loads. MATLAB was used to calculate THP and CI values. As a result, both active power values with all harmonics up to 37th degree and CI indexes were found for each scenario. Consequently, THP method is found to be performant and superior to CI method at harmonic source detection when results of four scenarios are considered.

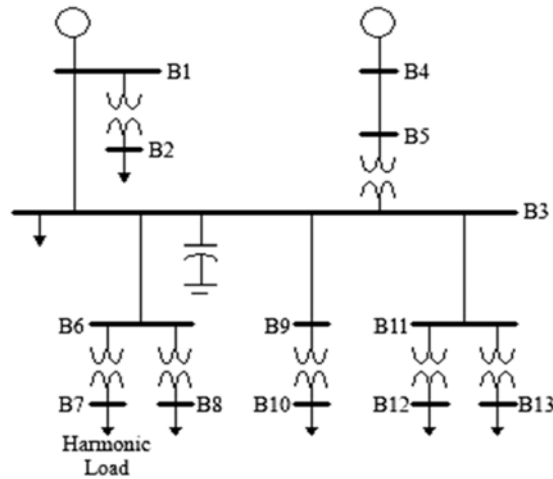


Figure A. IEEE 13 bus balanced distribution test system

Purpose: The aim of the study is to determine the location of harmonic loads. THP method is mainly focused and analyzed for that purpose and CI method is applied for comparison in this study.

Theory and Methods: In this study, it was tried to determine on which side of the node the harmonic load is located by using THP method and its results are compared with the results of CI method. Whether the harmonic load is on the source or load side is tried to be determined by THP and CI methods, eventually.

Results: First of all, the cases with single harmonic load are examined in a balanced distribution IEEE 13 bus test system and the expected results were obtained by THP method. Both THP and CI methods procured successful results in this scenario. Then, the case with two harmonic loads with the same harmonic components connected to different points on the system was examined. It was seen that exact location of harmonic loads was not possible to be determined this time for both methods. When the same case is reexamined by using component harmonic power (CHP) values, similar results are obtained. Finally, the case with two harmonic loads with different harmonic components connected to different points on the system was examined. It was seen that exact location of harmonic loads was possible to be determined by using THP method, but CI method failed.

Conclusion: Different loading scenarios are created in a balanced distribution IEEE 13 bus test system, and performance of THP method has been demonstrated. It procured more successful results with THP method when compared to CI method.



Dağıtım sisteminde harmonik yük tespiti için toplam harmonik aktif güç yöntemi

Ferhat Özel^{1*}, Nuran Yörükeren¹, İbrahim Gürsu Tekdemir²

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli, Türkiye

²Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 16310, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Dengeli bir dağıtım IEEE 13 baralı test sisteminde harmonik yük tespiti için THAG ve KE yöntemlerin uygulanması
- DiGSILENT'te harmonik yük akışı
- MATLAB'de THAG ve KE hesaplaması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.02.2022

Kabul: 26.02.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1074861

Anahtar Kelimeler:

Toplam harmonik aktif güç

yöntemi

harmonik yük akışı

harmonik yük tespiti

güç kalitesi

kritik empedans yöntemi

ÖZ

Güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan nonlineer karakteristiğe sahip yükler, akım ve gerilim harmonik bozulmalarına neden olmaktadır. Güç sistemlerinde harmonikler, enerji verimliliği ve güç kalitesi açısından önem arz etmektedir. Bir güç sisteminin herhangi bir ortak bağlantı noktasındaki (OBN) harmoniklere, genellikle birden fazla harmonikli yükler neden olmaktadır. Harmonikli yüklerin yerinin belirlenmesi, harmonik azaltma yöntemlerinin uygulanması ve uluslararası standartlardaki sınır koşullarının sağlanması açısından çok önemlidir. Bu çalışmada, harmonikli yüklerin yerinin belirlenmesine yönelik analizler yapılmış; bu amaçla, yaygın olarak kullanılan Toplam Harmonik Aktif Güç (THAG) yöntemi incelenmiş, kritik empedans yöntemi ile karşılaştırılmış ve daha doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Yöntemin incelenmesinde, IEEE 13 baralı dengeli dağıtım test sistemi kullanılmıştır. Test sisteminde harmonikli güç akışı analizleri için DiGSILENT Power Factory kullanılmış ve yonteme ilişkin hesaplar, MATLAB'te gerçekleştirilmiştir

Total harmonic power method for harmonic source detection in distribution system

H I G H L I G H T S

- Application of THP and CI methods for harmonic source detection in a balanced distribution IEEE 13 bus test system
- Harmonic load flow in DiGSILENT
- THP and CI calculation in MATLAB

Article Info

Research Article

Received: 17.02.2022

Accepted: 26.02.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1074861

Keywords:

Total harmonic power

method

harmonic load flow

harmonic source detection

power quality

critical impedance method

ABSTRACT

Nonlinear loads are common in power systems and they cause current and voltage harmonic distortions. In power systems, harmonics are important to be considered in terms of energy efficiency and power quality. Harmonics at any point of common coupling (PCC) of a power system are generally induced by several harmonic loads. It is very important to determine the location of harmonic loads, so as to apply harmonic reduction methods to mitigate them afterwards and to let it stay within operational limits specified in international standards. In this study, analyzes were made to determine the location of harmonic loads. For this purpose, widely used Total Harmonic Active Power (THP) method has been examined, compared with the critical impedance method, and shown to give more accurate results. For the analysis, IEEE 13 bus balanced distribution test system is used. DiGSILENT Power Factory is used for harmonic power flow analysis in the test system and calculations related to THP method are performed in MATLAB.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *ferhatozel96@gmail.com, nurcan@kocaeli.edu.tr, ibrahim.tekdemir@btu.edu.tr /
Tel: +90 537 619 6555

1. Giriş (Introduction)

Güç sistemlerinde harmonikler, sistemin güç kayıplarını arttıran, transformatörler ve iletim hatları gibi güç sistemi bileşenlerinin hizmet ömrünü kısaltarak güç sisteminin çalışma verimliliğini azaltan bozucu unsurlardır. Bunun yanı sıra, seri veya paralel rezonansa, elektromanyetik parazite ve koruma cihazlarında hatalı çalışmaya yol açarak güç sisteminin kararlı çalışmasını da engellemektedirler [1]. Örneğin, güç sistemlerinde bulunan harmonikli yükler, sistemin lineer olan akım ve gerilim bileşenlerini bozarak güç kalitesi, güç sisteminin verimliliği, vb. açılardan sistemi olumsuz etkilemektedir. Özellikle güç kalitesi kavramı, gelişen güç elektroniği teknolojisiyle birlikte enerji dağıtımını sağlayan şirketler için ilgilenilmesi gereken bir unsur haline gelmiştir. Elektrik enerjisi dağıtım sistemlerinde birçok lineer ve nonlineer yük, ortak bir bağlantı noktasında (ortak barada), şebeke ya da tüketici tarafından kaynaklanan harmonik güçlerin varlığına neden olmaktadır. Bu noktada, sistemde bulunan harmonikli yüklerden dolayı harmonik güç akışı yönlerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Ayrıca harmonikli yüklerin bir güç sistemi üzerindeki etkisi dikkate alınarak bu yüklerin tespit edilmesi, bir sistemin güç kalitesinin kontrol altında tutulması ve harmonik bozulmaları azaltmaya yönelik uygulamaların gerçekleştirilmesi adına çok önemlidir.

Literatürde şimdiye kadar, bir güç sisteminde harmonikli yüklerin buldukları yerleri veya harmonik bozucunun baskın olduğu tarafı belirlemek için OBN'ye bakılarak aktif güç yönü, reaktif güç yönü ve gerilim-akım oranına dayalı yaklaşımlar incelenmiştir [2, 3]. [4]'te gerilim ve akım değerleri vektör taslak yönteminde kullanılarak harmonik yük tahmin edilmiştir. [5]'te Olasılık dağılımı hesaplamalarında kullanılan Bayesian Çıkarımı ile güç sistemlerinde harmonikli durumları tahmin etmişlerdir. [6]'da k-NN ve Naive Bayes makine öğrenme teknikleri ile sadece OBN'den alınan ölçümler kullanılarak harmonikli yük tespiti yapmışlardır. [7]'de OBN'den ölçülen verilerin istatistiksel dağılımının Gauss dağılımına yakın olması sebebiyle ölçüm sonucu elde edilen veriler OBN'de kullanabilmek için Gauss karma modelini kullanmışlar ve şebekenin harmonik empedansının doğru tahmin edilebilmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. [8]'de iki uçlu empedans tabanlı arıza yeri tespit etme yöntemi geliştirilerek harmonikli yük ile ölçüm alınan nokta arasındaki mesafe kullanılarak harmonikli yükün yeri tespit edilmiştir. [9, 10]'da güç sistemlerinde ölçüm alınan noktanın yukarı veya aşağı yönünde baskın harmonik yükün tespitini yapabilmek ve harmonikli yükün yapısını belirleyebilmek için ayrık dalgacık dönüşümü yöntemi kullanılmıştır. [11]'de kısmi en küçük kareler regresyon yöntemi kullanılarak gerilim ve akım verilerinin, faz bilgisi olmadan izlenebilmesi için harmonik parametrelerin tahminine yönelik yeni bir yöntem önerilmiştir. [12]'de kademeli korelasyon ağı ile harmonik yük algılama sistemi ortaya konulmuştur. [13]'te ise dalgacık paket dönüşümü ile geliştirilmiş Kalman filtre algoritması kullanılarak elde edilen algoritma sayesinde harmonik yükü tespit etmişlerdir.

Bunun yanında, literatürde harmonik güç akış yönlerini tespit etmek için hem çok noktalı hem de tek noktalı ölçümlere dayanan farklı yöntemler önerilmiştir [14, 15]. Çok noktalı ölçüm yöntemleri, güç sisteminin harmonik durumları hakkında doğru bilgi vermekle birlikte, uygulanması zordur ve maliyetli bir ölçüm sistemi gerektirmektedir. Tek noktalı ölçüm yöntemleri ise uygulanması kolay olup maliyet açısından da oldukça uygundur. Ancak gerçek uygulamalarda bu yöntemler, baskın harmonikli yükün konumu hakkında yanlış bilgi verebilmektedir. [16]'da önerildiği gibi bir noktadan ölçüme dayalı olan ve Norton eşdeğer devresi ile ifade edilen şebeke ve tüketicinin bulunduğu sistemin her harmonik

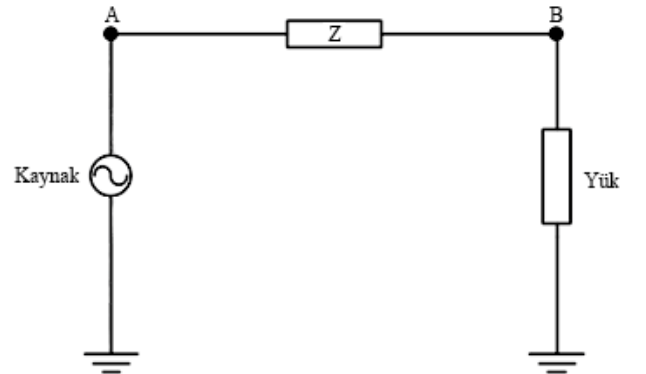
bileşeninin belirlenebilmesi için süperpozisyon yönteminin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca her harmonik bileşen için Norton eşdeğer devresi tekrar tekrar hesaplanmalıdır. Çoklu ölçüme dayalı yöntemler içerisinde, ölçüm noktasının yukarı veya aşağı tarafında harmonikli yükü belirleyebilmek için aktif olmayan güce dayalı yöntemler vardır [17]. Bu yöntemlerden biri olan reaktif güce bağlı olarak hesaplanan kritik empedans yöntemi, harmonikli yüklerin yönünün belirlenmesinde kullanılabilir. Ancak aktif olmayan gücün genel anlamda kabul edilebilirliğinin bulunmaması sebebiyle bu yöntemler, tartışmaya açıktır. Bir devrede bulunan herhangi bir düğümdeki aktif harmonik gücü hesaplayan aktif güç akışına bağlı yöntemler vardır. Hem radyal hem de radyal olmayan sistemlerde harmonikli yüklerin yönlerini belirleyebilmek için THAG yöntemi kullanılabilir.

Bu çalışmada, harmonikli yüklerin yerinin tespit edilebilmesi için THAG yöntemi kullanılmış, harmonikli yükün ilgili düğümün yukarı ya da aşağı yönünde olduğunu belirleyebilmek için düğümüne ait ölçümler kullanılarak hesaplanan THAG değerinin matematiksel işareti incelenmiştir [18, 19]. THAG yönteminin başarımını ortaya koyabilmek amacıyla bu çalışmada ayrıca diğer bir yöntem olarak kritik empedans yöntemi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar THAG yöntemi kullanılarak elde edilenler ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen analizler için IEEE 13 baralı dengeli dağıtım test sistemi kullanılmış, bu sistemde farklı senaryolar üretilerek THAG ve kritik empedans yöntemleri kullanılarak harmonikli yüklerin yönlerinin tespiti gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen veriler, MATLAB programına aktararak gerekli hesaplamalar yapılmış ve böylece incelenen yöntemlerin harmonikli yük ya da yüklerin tespitindeki başarımları karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

2. Harmonik Kaynağı Yerinin Tespit Edilmesi (Detection of Harmonic Source Location)

2.1. Toplam Harmonik Aktif Güç Yöntemi (Total Harmonic Power Method)

Toplam harmonik aktif güç yöntemi, bir harmonikli yükün devredeki belirli bir düğümün (baranın) şebekeye göre yukarı veya aşağı tarafında olduğunu belirlemek için kullanılmaktadır [20]. Bu yöntem, Şekil 1'deki devre ele alınarak açıklanabilir.



Şekil 1. Sinüsoidal bir kaynağa bağlı harmonikli yük oluşturulan basit bir devre (A simple circuit with a harmonic load connected to a sinusoidal source)

Şekildeki devrede sinüsoidal bir gerilim kaynağı, hat empedansı (Z) ve harmonikli bir yük bulunmaktadır. Harmonikli yük, devredeki

“B” düğümünde gerilim bozulmasına neden olmakta ve devrede akan harmonikli akımları üretmektedir. Gerilim bozulması hem harmonik akımlara hem de harmonik frekanslar için sistem empedansı değerine bağlıdır. “B” noktasındaki harmonikli gerilim ve akım, Fourier serisi ile Eş. 1 ve Eş. 2’deki gibi ifade edilebilir.

$$V_B(t) = V_{B_0} + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{B_h} \sin(hw_1t + \theta_{B_{hv}}) \quad (1)$$

$$i_B(t) = I_{B_0} + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{B_h} \sin(hw_1t + \theta_{B_{hi}}) \quad (2)$$

Burada, $V_B(t)$ ve $i_B(t)$, “B” düğümündeki anlık gerilim ve akım değerleridir. V_{B_0} ve I_{B_0} , gerilim ve akımın DC bileşenlerini ifade eder. “h” değeri, harmonik derecesini belirtir. w_1 değeri, kaynağın temel açısal frekansıdır. V_{B_h} ve I_{B_h} , hw_1 frekansında gerilim ve akımın etkin değerleridir. $\theta_{B_{hv}}$ ve $\theta_{B_{hi}}$ ilgili referansa göre “h” dereceli bir harmonik frekansta gerilim ve akımın faz açılarıdır.

Devredeki herhangi bir düğümün anlık güç değeri Eş. 3’teki gibidir.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (3)$$

“B” düğümdeki ortalama güç değeri Eş. 4’teki gibidir.

$$P_B = \frac{1}{T} \int_0^T p_B(t) dt \quad (4)$$

Burada “T”, kaynağın periyodunu belirtir. $p_B(t)$, “B” düğümünün anlık güç değeri olup Eş. 1 ve Eş. 2 çarpılarak elde edilir. Devamında, ortalama güç değeri, Eş. 5’teki gibi de ifade edilebilir.

$$P_B = V_{B_0} I_{B_0} + \sum_{h=1}^{\infty} V_{B_h} I_{B_h} \cos\phi_{B_h} \quad (5)$$

$\phi_{B_h} = \theta_{B_{hv}} - \theta_{B_{hi}}$, gerilim (V_{B_h}) ve akım (I_{B_h}) fazörleri arasındaki faz farkıdır.

Eş. 9’daki “B” düğümündeki ortalama güç değeri; DC gerilim (V_{B_0}) ve akım (I_{B_0}) bileşenlerinden kaynaklanan Eş. 6’daki P_{B_0} , aktif gücün temel bileşeni Eş. 7’deki P_{B_1} ve toplam harmonik aktif güç Eş. 8’deki P_{B_H} olarak ayrıştırılabilir.

$$P_{B_0} = V_{B_0} I_{B_0} \quad (6)$$

$$P_{B_1} = V_{B_1} I_{B_1} \cos\phi_{B_1} \quad (7)$$

$$P_{B_H} = P_{THAG} = \sum_{h=2}^{\infty} V_{B_h} I_{B_h} \cos\phi_{B_h} \quad (8)$$

$$P_B = P_{B_0} + P_{B_1} + P_{B_H} \quad (9)$$

“B” düğümünde bulunan her bir harmonik bileşen için bileşen harmonik aktif güç (BHAG) değeri, Eş. 10 ile hesaplanır.

$$P_{BHAG} = \sum_{h=2}^n V_{B_h} I_{B_h} \cos\phi_{B_h} \quad (10)$$

Eş. 10’da bulunan h, harmonik derecesini ve n ise maksimum harmonik derecesini göstermektedir. Sonuç olarak, Şekil 1’deki devrenin temel güç değeri, sinüsoidal gerilim kaynağı tarafından sağlanmaktadır ve “B” düğümüne bağlı harmonikli yük ise devreye akım harmonikleri aktarır. Böylece harmonikli gücün yönünün, yükten kaynağa doğru olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca harmonikli yükün temel frekanstaki gücünün, temel ve harmonikli frekanstaki güçlere ayrıştığı düşünülebilir [20].

THAG’nin akış yönü, harmonikli yükün bulunduğu tarafı belirler [19]. Bir radyal sistemde belirli bir düğümün THAG değerinin işareti ve radyal olmayan sistemde ise belirli bir baraya ilave edilen harmonik güç değerinin işareti, sistemde bulunan harmonikli yükü belirlemek için kullanılabilir [20]. Radyal ve radyal olmayan sistemlere ait kurallar aşağıda açıklanmaktadır.

2.1.1. Radyal sistemlerde THAG yöntemi (THP method in radial systems)

Radyal bir sistemin herhangi bir düğümünde THAG değeri, pozitif ise harmonikli yük, düğüm referans alındığında kaynak tarafından, THAG değeri, negatif ise harmonikli yük, düğüm referans alındığında yük tarafında kabul edilir [20, 21].

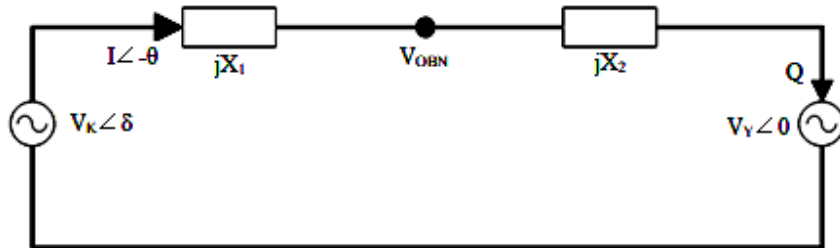
2.1.2. Radyal olmayan sistemlerde THAG yöntemi (THP method in non-radial systems)

Radyal olmayan bir sisteme, radyal sistemlerde kullanılan yöntemin herhangi bir değişiklik yapılmadan uygulanması durumunda bazı belirsizlikler ortaya çıkabilir. Bu sebeple radyal olmayan bir sistemde, incelenen baraya ilave edilen temel aktif gücün işareti baz alınır [20]. İlgili baradan sisteme ilave edilen temel güç değerinin işareti pozitif ise baranın bulunduğu noktadan sisteme harmonik yayıldığı anlaşılır. Eğer ilgili baraya ilave edilen temel güç değerinin işareti negatif ise baranın sistemden harmonik aldığı ve bu baraya ilave edilen yükün, sistem tarafından harmonikler açısından kirletildiği sonucuna ulaşılır [21].

2.2. Kritik Empedans Yöntemi (Critical Impedance Method)

Kritik empedans yöntemi, bir güç sistemindeki yükün ürettiği reaktif gücün empedans boyunca gidebileceği uzaklığı ifade etmektedir [22]. Kritik empedans yöntemi ile kaynak veya yük tarafının baskınlığı belirlenebilmektedir. Bu yöntemde kaynak ve yük empedans aralıklarının çok yüksek olduğu durumlarda dahi doğru sonuçlara ulaşılabilir.

Şekil 2’deki devrede belirtilen parametreler kullanılarak kritik empedans formülü elde edilir. V_{OBN} , OBN’deki gerilim değeridir. Q, yükün çektiği reaktif gücü ifade eder. X_1 , şebeke tarafının



Şekil 2. Kritik empedans yöntemini açıklamak için oluşturulan temsili bir güç sistemi
(A representative power system created for explaining the critical impedance method)

reaktans değeridir. X_2 , yük tarafının reaktans değeridir. $X = X_1 + X_2$, hattın toplam reaktans değeridir. x , en düşük gerilimin bulunduğu reaktans değeridir. Eğer X değeri, yük tarafına ($x > X/2$) daha yakın ise kaynak, reaktif gücü hattın yarısından ilerisine öteleyebildiğinden dolayı kaynağın daha büyük bir değere sahip olduğu düşünülür. Ayrıca $E_Y > E_K$ ise $x > X/2$ olduğu ispatlanmıştır [22, 23]. Böylece kritik empedans yöntemi için Eş. 11'deki indeks oluşturulabilir;

$$KE = 2\frac{Q}{I^2} \quad (11)$$

Eş. 7'de $KE > 0$ ise, reaktif güç çektiğinden dolayı harmonikli yükün, yük tarafında olduğu anlaşılır. $KE < 0$ olduğu durumda ise kaynak tarafı harmoniklidir ve $Z = Z_K + Z_Y = jX = j(X_1 + X_2)$ durumu için kritik empedans yöntemi şu adımlarla uygulanabilir:

- Z_K 'nin bilinmesi durumunda Eş. 12 ile şebeke tarafının gerilim değeri (V_K) hesaplanır;

$$V_K = V_{OBN} - Z_K I_{OBN} \quad (12)$$

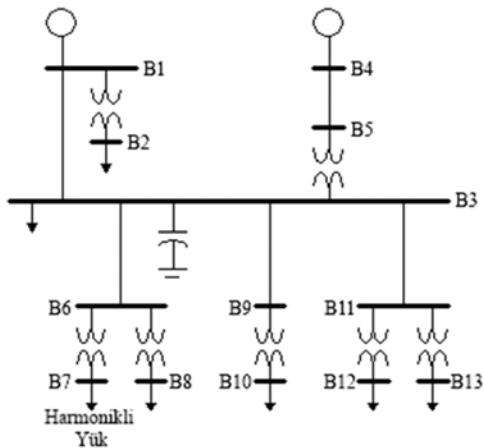
- Reaktif güç çeken kaynak tarafının Q değeri, Eş. 13 ile hesaplanır. θ ise V_K ile I arasındaki faz açısıdır;

$$Q = V_K I \sin \theta \quad (13)$$

- Böylece KE indeksi hesaplanır.
- Eğer $KE > 0$ ise, kaynak tarafı, harmoniği çeker. Yük tarafı, harmonik üreten taraftır.
- Eğer $KE < 0$ ise kaynak tarafı, reaktif güç üretir. Yük tarafı, harmoniği çeker.

3. Analizler (Analyses)

Bu bölümde, IEEE 13 baralı dengeli dağıtım test sistemi kullanılarak, oluşturulan farklı senaryolar ile THAG yöntemi, kritik empedans yöntemiyle karşılaştırılmış ve THAG yönteminin başarımı ortaya konulmuştur. DIGSILENT Power Factory programı, belirlenen her bir senaryonun analizi için gerekli olan anlık gerilim ve akım değerlerinin elde edilmesi amacıyla kullanılır. THAG değerine ulaşmak amacıyla MATLAB'te yazılmış bir programda, anlık gerilim ve akım verileri işlenerek analiz gerçekleştirilir ve bu program, 37. harmonik derecesine kadar olan tüm harmonik aktif güç değerlerini hesaplar. Ayrıca kritik empedans değerlerine ulaşmak için MATLAB'te ayrı bir program hazırlanmış, bu program sayesinde sonuçlar karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. IEEE 13 baralı dengeli dağıtım test sistemi (IEEE 13 bus balanced distribution test system)

Tablo 1. Harmonikli yük verileri (Harmonic load data) [24]

Harmonik Derecesi	Yüzde (%)	Açı (°)
1	100,00	0,00
5	18,24	-55,68
7	11,90	-84,11
11	5,73	-143,56
13	4,01	-175,58
17	1,93	111,39
19	1,39	68,30
23	0,94	-24,61
25	0,86	-67,64
29	0,71	-145,46
31	0,62	176,83
35	0,44	97,40
37	0,38	54,36

IEEE 13 baralı dengeli dağıtım test sisteminin, Şekil 3'te de görülen harmonikli yük verileri, Tablo 1'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Burada verilen yüzde değerlerin hepsi, temel bileşene göre ifade edilmiştir. Üretilen farklı senaryolarda, test sisteminde bulunan harmonikli yüklerin konumları ya da değerleri değiştirilmektedir. Bara isimleri keyfi olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, test sistemine ait tek hat şeması üzerinde bulunan yönler açısından, ilgili tablolarda ise sayısal değerler olarak gösterilmiştir.

3.1. Senaryo 1: Harmonikli Yükün B7 Barasına Bağlı Olduğu Durum

(Harmonic Load is Connected to Bus B7)

Bu senaryoda, harmonikli yük B7 barasına bağlıdır. Bu durumda ölçüm değerleri için B3 barası OBN olarak alınmış, buna göre her harmonik bileşene ait aktif güç değerleri elde edilmiştir. THAG yöntemi kullanılarak sistem üzerinde harmonikli yükün bulunduğu yön, Şekil 4'te gösterilmiştir. THAG yöntemi ile elde edilen değerler, Tablo 2'de ve kritik empedans yöntemi ile elde edilen değerler, Tablo 3'te verilmiştir.

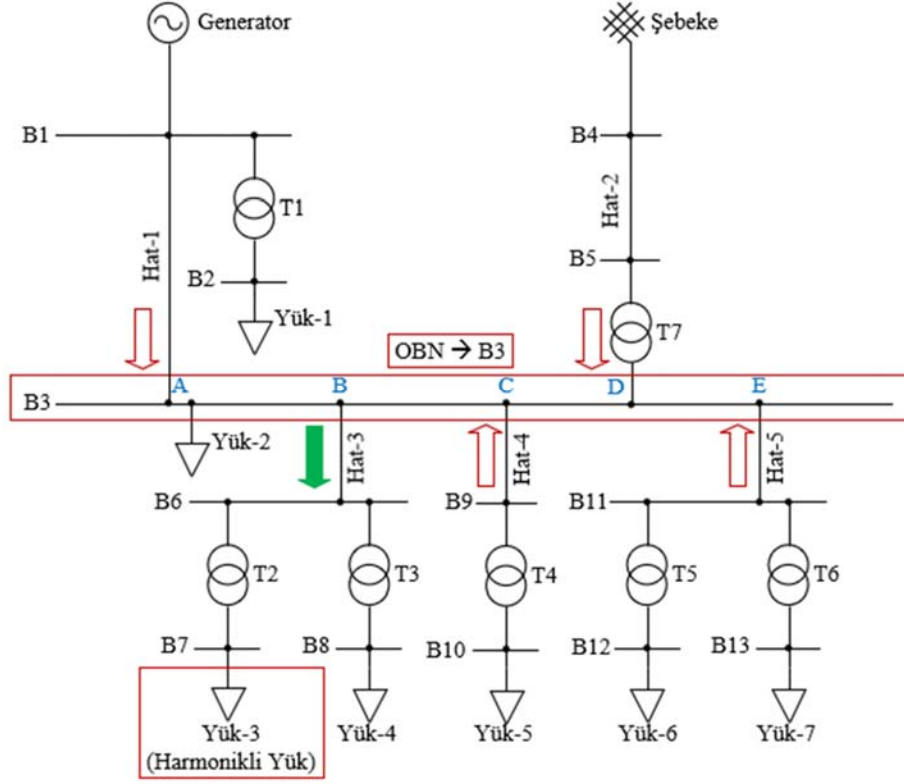
Tablo 2'den anlaşılacağı üzere, sistemdeki ortak bağlantı barasındaki düğümlerden alınan ölçümlere göre THAG değerinin işareti, sadece B düğümünde negatif olup diğer düğümlerde pozitifdir. Böylece, THAG değerlerinin işaretleri, ikinci bölümdekine benzer şekilde yorumlanabilir. Buradan, THAG değerinin işareti negatif olan B düğümündeki harmonikli yükün yönünün, ölçüm alınan referans B3 barasından B düğüme bağlı B6 barasına doğru olduğu sonucuna ulaşılır. Bunun nedeni, B3 barasından yola çıkıldığında harmonikli yükün bulunduğu B7 barasına B6 barası üzerinden varılmasıdır. Benzer şekilde, işareti pozitif olan düğümlerdeki harmonikli yükün yönünün, ilgili düğümlere bağlı baralardan ölçüm alınan referans baraya doğru olduğu ifade edilebilir.

Bunun yanında, Tablo 3'teki KE indeksi değerinin işareti, sadece B düğümünde negatif olup diğer düğümlerde pozitifdir. Yani, sonuçtan da anlaşılacağı üzere harmonik yükün yönü, yalnızca OBN'ye bağlı B düğümünden yüklerle doğrudur. Diğer düğümlerde ise yüklerden düğümlere doğrudur yani buradan OBN'nin bulunduğu yönde bir harmonikli yükün olduğu sonucuna ulaşılır. Bu senaryoda, THAG ve kritik empedans yöntemi kullanılarak elde sonuçlar, birbirini desteklemektedir.

3.2. Senaryo 2: Harmonikli Yükün B13 Barasına Bağlı Olduğu Durum

(Harmonic Load is Connected to Bus B13)

Bir önceki senaryoda B7 barasına bağlı olan harmonikli yük, bu senaryoda B13 barasına taşınmıştır. Böylece, B3 barasından diğer komşu baralara göre her harmonik bileşene ait aktif güç değerleri



Şekil 4. Harmonikli yükün B7 barasına bağlı olduğu durumda THAG yöntemi kullanılarak elde edilen harmonikli yükün yönleri (Harmonic directions obtained by using THP method when harmonic load is connected to bus B7)

Tablo 2. Harmonikli yükün B7 barasına bağlı olduğu senaryo için hesaplanan harmonik aktif güç değerleri (Harmonic power values obtained for the scenario when harmonic load is connected to bus B7)

P [W]	A Düzümü (B3-B1)	B Düzümü (B3-B6)	C Düzümü (B3-B9)	D Düzümü (B3-B5)	E Düzümü (B3-B11)
P1	-801367,0184	1433950,7334	472510,3953	-4241505,943	1843147,1967
P5	0,8724	-19,1646	1,0388	9,5845	4,3722
P7	6,2289	-15,1981	0,5131	4,6520	2,1659
P11	0,0890	-1,9153	0,1049	0,9412	0,4439
P13	2,1169	-3,1296	0,0582	0,5212	0,2464
P17	0,0101	-0,2177	0,0119	0,1067	0,0506
P19	0,4712	-0,5913	0,0069	0,0617	0,0293
P23	0,0024	-0,0517	0,0028	0,0253	0,0120
P25	0,2660	-0,3114	0,0026	0,0233	0,0110
P29	0,0014	-0,0295	0,0016	0,0144	0,0069
P31	0,1792	-0,2025	0,0013	0,0119	0,0057
P35	0,0005	-0,0113	0,0006	0,0055	0,0026
P37	0,0806	-0,0892	0,0005	0,0044	0,0021
P_{THAG}	10,3186	-40,9122	1,7435	15,9521	7,3487

Tablo 3. Harmonikli yükün B7 barasına bağlı olduğu senaryo için hesaplanan kritik empedans indeks değerleri (Critical impedance index values obtained for the scenario when harmonic load is connected to bus B7)

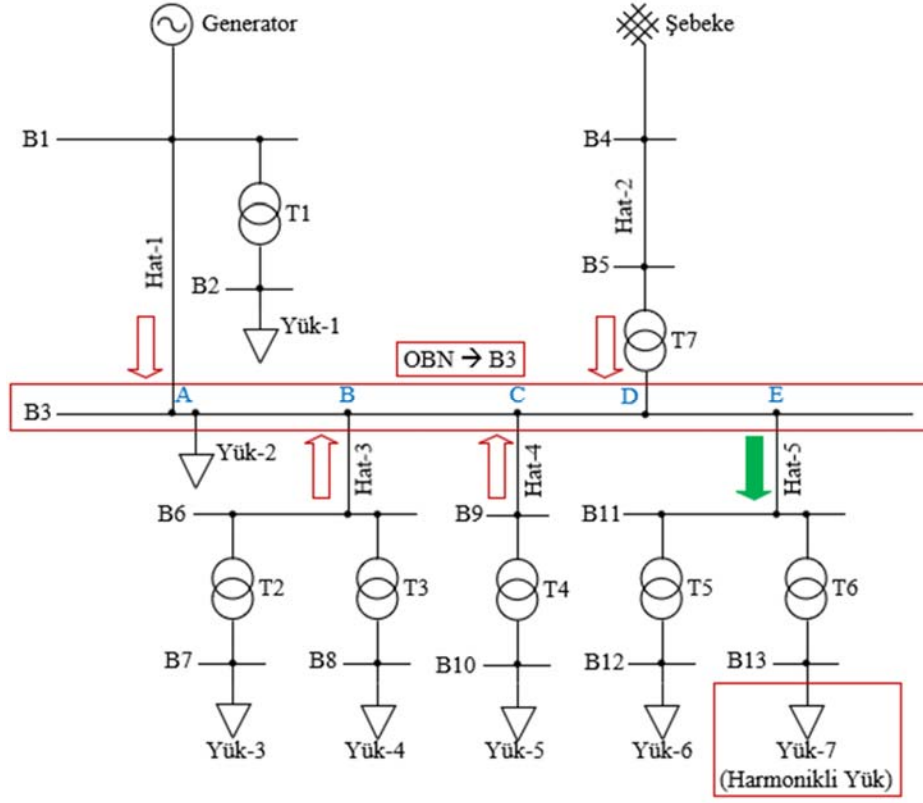
	A Düzümü (B3-B1)	B Düzümü (B3-B6)	C Düzümü (B3-B9)	D Düzümü (B3-B5)	E Düzümü (B3-B11)
KE İndeksi	0,6291	-1,3227	1,0635	0,2457	0,8699

elde edilmiştir. Bu değerlerin işaretleri baz alınarak devre üzerinde harmonikli yükün yönü, Şekil 5'teki gibi belirtilmiştir. THAG yöntemi ile elde edilen değerler, Tablo 4'te ve kritik empedans yöntemi ile elde edilen değerler, Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4'teki veriler ve Şekil 5'teki devre incelendiğinde, sadece E düğümünde THAG değerinin işaretinin negatif olduğu görülür.

Diğer düğümlerde THAG değeri pozitifdir. Buradan anlaşılacağı üzere harmonikli yük, sadece B13 barası tarafındadır. Devrede yalnızca bir adet harmonikli yük bulunduğu durumda THAG yöntemi kullanılarak başarılı sonuçların elde edildiği anlaşılmaktadır.

Senaryo 1'den Senaryo 2'ye geçilirken bara üzerindeki yüklerde herhangi bir değişiklik yoktur. İlk durumda harmonikli yük B7



Şekil 5. Harmonikli yükün B13 barasına bağlı olduğu durumda THAG yöntemi kullanılarak bulunan harmonik yönler (Harmonic directions found by using THP method when harmonic loads are connected to bus B13)

Tablo 4. Harmonikli yükün B13 barasına bağlı olduğu durumda harmonikli yüke göre elde edilen harmonik aktif güç değerleri (Harmonic power values obtained when harmonic loads are connected to bus B13)

P [W]	A Düğümü (B3-B1)	B Düğümü (B3-B6)	C Düğümü (B3-B9)	D Düğümü (B3-B5)	E Düğümü (B3-B11)
P1	-800919,3329	2444641,0224	472511,2790	-4290698,1239	879572,1302
P5	0,8489	5,2733	1,0110	9,3257	-19,6705
P7	6,0609	2,6058	0,4993	4,5266	-15,2886
P11	0,0864	0,5333	0,1022	0,9161	-1,9658
P13	2,0602	0,2959	0,0567	0,5072	-3,1020
P17	0,0098	0,0607	0,0116	0,1039	-0,2236
P19	0,4586	0,0351	0,0067	0,0600	-0,5821
P23	0,0023	0,0144	0,0028	0,0246	-0,0530
P25	0,2589	0,0133	0,0025	0,0226	-0,3055
P29	0,0013	0,0082	0,0016	0,0140	-0,0302
P31	0,1744	0,0068	0,0013	0,0116	-0,1983
P35	0,0005	0,0032	0,0006	0,0054	-0,0116
P37	0,0785	0,0025	0,0005	0,0043	-0,0873
P_{THAG}	10,0409	8,8525	1,6967	15,5220	-41,5188

Tablo 5. Harmonikli yükün B13 barasına bağlı olduğu senaryo için hesaplanan kritik empedans indeks değerleri (Critical impedance index values obtained for the scenario when harmonic load is connected to bus B13)

	A Düğümü (B3-B1)	B Düğümü (B3-B6)	C Düğümü (B3-B9)	D Düğümü (B3-B5)	E Düğümü (B3-B11)
KE İndeksi	-1,3641	1,2055	1,0905	1,1782	1,2410

barasına, ikinci durumda aynı özellikteki harmonikli yük, B13 barasına bağlanmıştır. Bu baralarda yer alan diğer harmoniksiz yükler, yer değiştirmiştir. Fakat güç değerlerinde ufak farklılıkların olmasının nedeni, farklı senaryolarda eklenen harmonikli yüklerin sayısal ve yapısal olarak da bir miktar farklı olmasıdır. Ayrıca harmonikli yüklerin yapısında bir miktar temel bileşen de

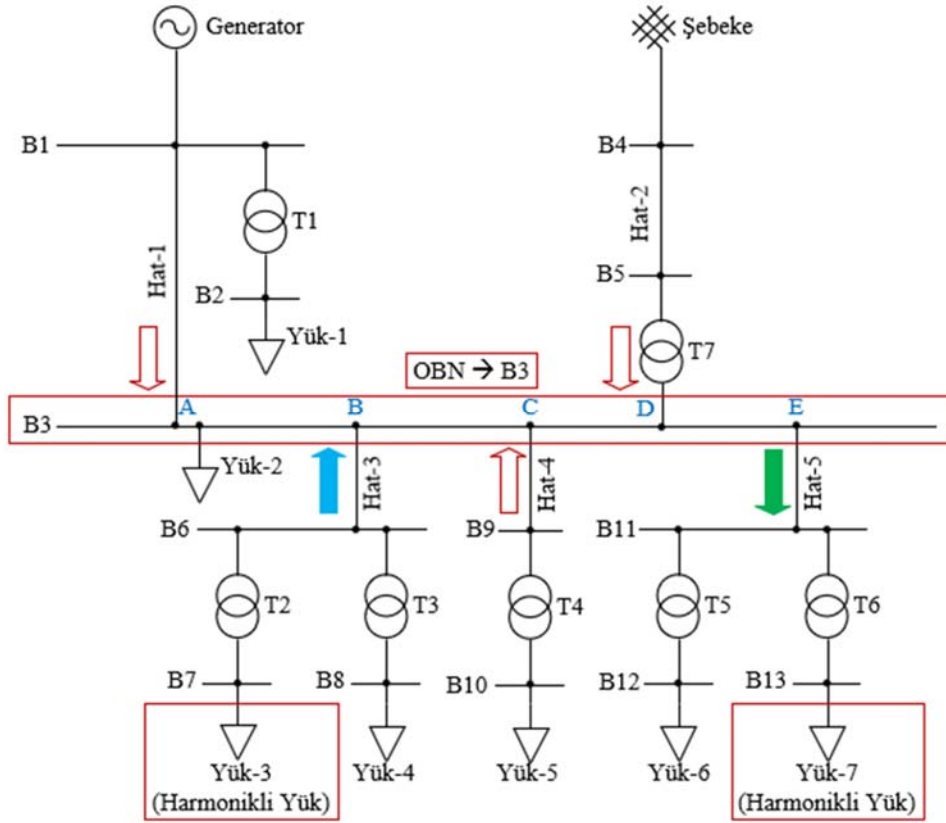
bulunduğu için Tablo 2 ve Tablo 4'te görülen temel bileşen aktif güç değerlerinde (P1 değerlerinde) ufak farklılıklar vardır.

Bunun yanında, Tablo 5'teki KE indeks değerinin işareti, sadece A düğümünde negatif olup diğer düğümlerde pozitifdir. Yani, sonuçtan da anlaşılacağı üzere harmonik yükün yönü, yalnızca OBN'ye bağlı

A düğümünden yüklere doğrudur. Diğer düğümlerde ise yüklerden düğümlere doğrudur, yani buradan OBN'nin bulunduğu yönde bir harmonikli yükün olduğu sonucuna ulaşılır. Ancak bu sonuç, sistemde bulunan harmonikli yükün bulunduğu yönün tespiti konusunda yanlış yapıldığını göstermektedir. Kritik empedans yöntemi, bu senaryoda başarısız bir sonuç ortaya koymuştur. İncelenen THAG yöntemi ise aynı senaryoda başarılı sonuç vermiş ve harmonikli yükün yönünü doğru tespit etmiştir, bu durum THAG yöntemi için avantajlı bir sonuca işaret etmektedir.

3.3. Senaryo 3: B7 ve B13 Baralarına Aynı Harmonikli Yüklerin Bağlı Olduğu Durum
(Same Harmonic Loads are Connected to Buses B7 and B13)

Bu senaryoda bu kez hem B7 hem de B13 baralarında harmonikli yükün olduğu durum incelenmektedir. Bu amaçla, B13 barasına, B7 barasındaki harmonikli yükün aynısı bağlanmıştır. Böylece, aynı harmonik bileşene sahip iki yükün, sistemde farklı noktalara bağlanması sonucunda elde edilen çıktılar incelenmiştir.



Şekil 6. Aynı harmonikli yüklerin hem B7 hem de B13 baralarına bağlı olduğu durumda THAG yöntemi kullanılarak görülen harmonik yönler

(Harmonic directions observed by using THP method when same harmonic loads are connected to both buses B7 and B13)

Tablo 6. Aynı harmonikli yükün hem B7 hem de B13 baralarına bağlandığı durumda elde edilen harmonik aktif güç değerleri
(Harmonic power values obtained when the same harmonic loads are connected to both buses B7 and B13)

P [W]	A Düğümü (B3-B1)	B Düğümü (B3-B6)	C Düğümü (B3-B9)	D Düğümü (B3-B5)	E Düğümü (B3-B11)
P1	-803830,4071	1433801,4220	472474,6663	-3275239,4996	879554,9803
P5	3,6227	53,7544	4,3084	39,7990	-115,1567
P7	25,9074	47,0769	2,1314	19,3489	-101,2701
P11	0,3644	35,9730	0,4302	3,8629	-42,0095
P13	8,6643	22,3050	0,2381	2,1330	-34,1041
P17	0,0405	10,0268	0,0479	0,4279	-10,6969
P19	1,8774	5,9199	0,0275	0,2458	-8,1591
P23	0,0093	4,3177	0,0109	0,0981	-4,4714
P25	1,0211	3,9363	0,0100	0,0892	-5,0889
P29	0,0050	3,8269	0,0060	0,0536	-3,9109
P31	0,6556	3,1076	0,0049	0,0436	-3,8274
P35	0,0018	2,0709	0,0022	0,0194	-2,1015
P37	0,2779	1,6231	0,0017	0,0152	-1,9235
P_{THAG}	42,4479	193,9387	7,2193	66,1371	-332,7205

Tablo 7. Aynı harmonikli yükün hem B7 hem de B13 baralarına bağlandığı durumda hesaplanan kritik empedans indeks değerleri (Critical impedance index values obtained when the same harmonic loads are connected to both buses B7 and B13)

	A Düğümü (B3-B1)	B Düğümü (B3-B6)	C Düğümü (B3-B9)	D Düğümü (B3-B5)	E Düğümü (B3-B11)
<i>KE İndeksi</i>	-0,0647	-1,1993	0,0778	-1,0226	1,3224

DiğSILENT Power Factory ve MATLAB programlarında gerçekleştirilen analiz ve hesaplamalar sonucunda elde edilen BHAG değerleri ile THAG değerleri Tablo 6'da kritik empedans yöntemi ile elde edilen değerler ise Tablo 7'de verilmiştir. Ayrıca bu değerlere göre ortaya çıkan harmonikli yüklerin yönleri, Şekil 6'daki tek hat şeması üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 6'daki veriler incelendiği zaman, THAG değerlerinin B7 yönünde pozitif, B13 yönünde ise negatif olduğu görülmektedir. Buna göre, harmonikli yükün B13'te olduğu tespiti yapılmıştır. Fakat hem B7 hem de B13'te harmonikli yük bulunduğu için, bu tespitin eksik kaldığı söylenebilir, elde edilen sonuç yeterli bilgi içermemektedir. Bunun nedeni, birebir aynı harmonik bileşene sahip yüklerin birbirlerini baskılamaları ve sonuçta yüklerden bir tanesinin baskın (dominant) hale gelmesidir. İlgili harmonik bileşen açısından harmonik güç akışı dikkate alındığında B düğümüne bağlı harmonikli yük şebeke (üretici) gibi ve E düğümüne bağlı harmonikli yük ise yük (tüketici) gibi davranmaktadır. B düğümüne ait THAG değerinin işaretinin pozitif ve E düğümüne ait THAG değerinin işaretinin negatif çıkması bu yorumu desteklemektedir.

Senaryo 3 için elde edilen ve Tablo 6'da gösterilen temel bileşen aktif güç (P1) değerinin Senaryo 2 için elde edilen ve Tablo 4'te gösterilen temel bileşen aktif güç (P1) değerinden bir miktar farklı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, eklenen harmonikli yüklerin yapısal olarak temel bileşen de içermesi ve Senaryo 2'de bir, Senaryo 3'te ise iki adet harmonikli yük bulunmasıdır.

Bunun yanında, Tablo 7'teki KE indeks değerinin işareti, A, B ve D düğümlerinde negatif olup diğer düğümlerde pozitifdir. Yani, sonuçtan da anlaşılacağı üzere harmonikli yükün yönü, OBN'ye bağlı A, B ve D düğümlerinden yüklerin bulunduğu yöne doğru elde edilmektedir. Diğer düğümlerde ise yüklerden düğümlere doğru olup OBN'nin bulunduğu yönde bir harmonikli yükün bulunduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Fakat bu senaryoda harmonikli yüklerin, B7 ve B13 baralarına bağlı olması sebebiyle KE indeks sonuçlarında yalnızca B ve E düğümleri için negatif sonuç beklenirken sonuç böyle olmamıştır. Bu da kritik empedans yönteminin bu senaryoda da THAG yönteminin aksine tamamen başarısız bir sonuç ortaya koyduğunu göstermiştir. Bu senaryoda THAG yöntemi ile kısmen de olsa başarılı sonuç alınabilmektedir.

3.4. Senaryo 4: B7 ve B13 Baralarına Farklı Harmonikli Yüklerin Bağlandığı Durum (Different Harmonic Loads are Connected to Buses B7 and B13)

Bu son senaryoda, bir önceki senaryoda olduğu gibi sistemde iki farklı noktaya harmonikli yükler yerleştirilmiş, fakat bu kez farklı olarak B7 ve B13 baralarına bağlanan yükler tamamen farklı yapıda seçilmiştir. Bu farklılığın daha belirgin olabilmesi ve sonuçların bu bağlamda daha iyi yorumlanabilmesi için, harmonik bileşenler tanımlanırken bileşen değerlerinin aynı olmamasına dikkat edilmiştir. B7 ve B13 baralarına bağlanan harmonikli yüklerin bileşen değerleri Tablo 8'de gösterilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda yine BHAG ve THAG değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin işaretleri baz alınarak devre üzerinde harmonikli yükün yönü, Şekil 7'deki tek hat şeması üzerinde gösterilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 9'da gösterilmiştir. Ayrıca

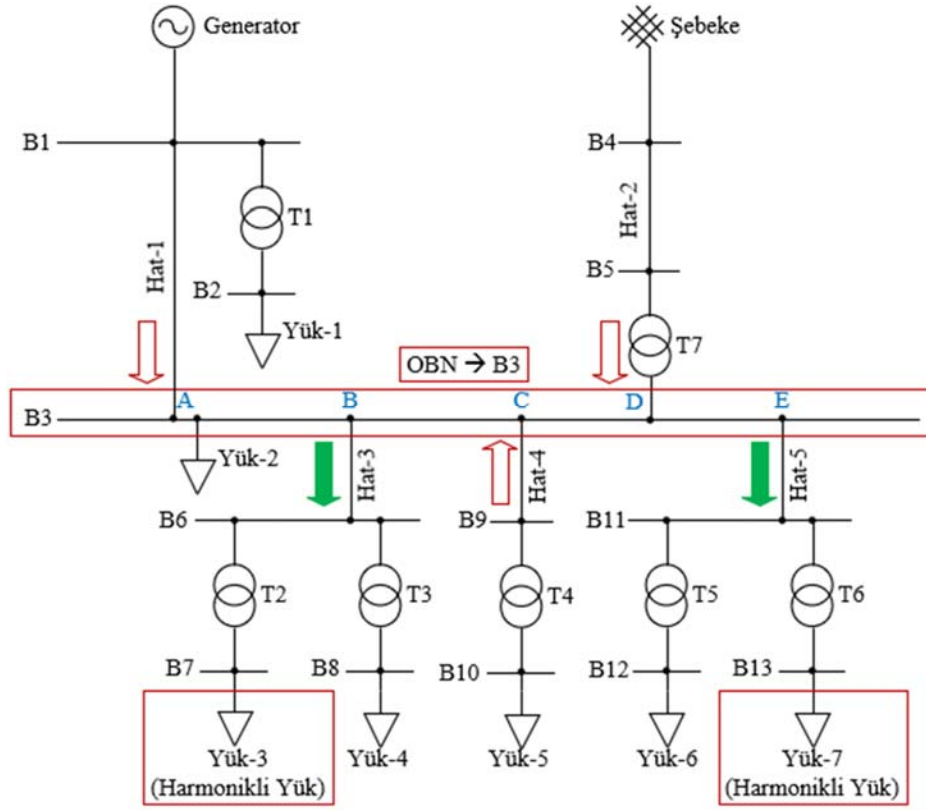
THAG yöntemi ile elde edilen değerler, Tablo 9'da ve kritik empedans yöntemi ile elde edilen değerler, Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 8. B7 ve B13 baralarında bulunan farklı harmonikli yüklerin harmonik bileşen değerleri (Harmonic component values of the different harmonic loads connected to buses B7 and B13)

Harmonik Bileşenler	B7 Barası		B13 Barası	
	Yüzde	Açı	Yüzde	Açı
1	100,00	0,00	100,00	0,00
5	18,24	-55,68	0,00	0,00
7	0,00	0,00	11,90	-84,11
11	5,73	-143,56	0,00	0,00
13	0,00	0,00	4,01	-175,58
17	0,00	0,00	1,93	111,39
19	1,39	68,30	0,00	0,00
23	0,94	-24,61	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,86	-67,64
29	0,71	-145,46	0,00	0,00
31	0,00	0,00	0,62	176,83
35	0,44	97,40	0,00	0,00
37	0,00	0,00	0,31	17,83

Şekil 7'deki harmonikli yük yönleri, THAG yöntemi kullanılarak bu kez her iki harmonikli yükün de tespit edilebildiğini göstermektedir. Birbirinden farklı harmonik bileşenlere sahip yüklerin birbirini baskılamadığı ve yöntemin sonuçlarında bu kez tek bir baskın (dominant) yükün ortaya çıkmadığı görülmüştür. Tablo 9'daki değerlere göre hem BHAG hem de THAG değerleri, ayrı ayrı harmonikli yükler için yön tespitini doğru bir şekilde yapmıştır. THAG değerleri hem B7 hem de B13 için negatif çıkmaktadır. Bu, harmonikli yükün bulunduğu yönün tespiti açısından istenen bir sonuçtur.

Bileşen değerlerine bakıldığı zaman, B7 yükünün sahip olduğu 5, 11, 19, 23, 29 ve 35. bileşenlerde gerçekten B7 yönünde negatif, B13 yönünde ise pozitif değerlerin elde edildiği görülmektedir. Bu değerlerle uyumlu olarak, B13 yükünün sahip olduğu 7, 13, 17, 25, 31 ve 37. bileşenlerde ise B13 yönünde negatif, B7 yönünde de pozitif değerler vardır. Bu sonuçlar, her iki harmonikli yükün buldukları yönlerin tespit edilmesinde, BHAG değerlerinin de THAG değerleri gibi yüksek başarılı olduğuna işaret etmektedir. THAG yöntemi ile harmonik yükün bulunduğu yönün tespit edilmesinde bu senaryoda iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanında, sistemde farklı noktalarda farklı harmonik bileşenlere sahip harmonik yüklerin olduğu bu durumda da Tablo 10'daki KE indeks değerinin işareti, A, B ve D düğümlerinde negatif olup diğer düğümlerde pozitifdir. Yani, sonuçtan da anlaşılacağı üzere harmonikli yükün yönü, OBN'ye bağlı A, B ve D düğümlerinden yüklerle doğrudur. Diğer düğümlerde ise yüklerden düğümlere doğru olup OBN'nin bulunduğu yönde bir harmonikli yükün bulunduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Fakat bu senaryoda harmonikli yüklerin, B7 ve B13 baralarına bağlı olması sebebiyle KE indeks sonuçlarında yalnızca B ve E düğümleri için negatif sonuç beklenirken sonuç böyle olmamıştır. Bu da kritik empedans yönteminin bu senaryoda da THAG yönteminin aksine başarısız bir sonuç verdiğini ortaya koymaktadır. THAG yöntemi ise bu senaryoda tamamen istenen sonucu vermeyi başarmıştır.



Şekil 7. B7 ve B13 baralarında bulunan farklı harmonikli yüklerin olması durumunda THAG yöntemi kullanılarak bulunan harmonik yönler
(Harmonic directions found by using THP method when there are harmonic loads which are composed of different components and connected to buses B7 and B13)

Tablo 9. B7 ve B13 baralarında bulunan farklı harmonikli yüklere göre elde edilen harmonik aktif güç değerleri
(Harmonic power values obtained according to the different harmonic loads are connected to buses B7 and B13)

P [W]	A Dügümü (B3-B1)	B Dügümü (B3-B6)	C Dügümü (B3-B9)	D Dügümü (B3-B5)	E Dügümü (B3-B11)
P1	-803830,4071	1433801,4220	472474,6663	-3275239,4996	879554,9803
P5	3,6227	-16,1603	1,0944	10,1096	0,5630
P7	25,9074	0,9484	0,5297	4,8089	-14,4172
P11	0,3644	-1,6111	0,1107	0,9942	0,0574
P13	8,6643	0,1080	0,0601	0,5389	-3,0892
P17	0,0405	0,0220	0,0123	0,1099	-0,1942
P19	1,8774	-0,5996	0,0073	0,0654	0,0038
P23	0,0093	-0,0434	0,0029	0,0267	0,0015
P25	1,0211	0,0048	0,0027	0,0240	-0,3151
P29	0,0050	-0,0247	0,0017	0,0152	0,0009
P31	0,6556	0,0025	0,0014	0,0123	-0,2057
P35	0,0018	-0,0095	0,0006	0,0058	0,0003
P37	0,2779	0,0006	0,0003	0,0030	-0,0604
P_{THAG}	42,4479	-17,3624	1,8244	16,7143	-17,6549

Tablo 10. B7 ve B13 baralarında bulunan farklı harmonikli yüklere göre elde edilen durumda hesaplanan kritik empedans indeks değerleri

(Critical impedance index values values obtained according to the different harmonic loads are connected to buses B7 and B13)

	A Dügümü (B3-B1)	B Dügümü (B3-B6)	C Dügümü (B3-B9)	D Dügümü (B3-B5)	E Dügümü (B3-B11)
KE İndeksi	-0,0647	-1,1993	0,8997	-1,0226	1,3224

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, bir sistemde harmonikli yüklerin yerlerinin tespit edilmesi amacıyla THAG yöntemi ele alınmış, bu yöntem

kullanılarak farklı harmonikli yük senaryolarında harmonik kaynağı yeri tespiti yapılmış ve sonrasında kritik empedans yöntemi kullanılarak aynı senaryolar için analizler tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar THAG yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar ile

Tablo 11. Üretilen tüm senaryolarda elde edilen THAG ve KE indeks değerleri (THP and CI index values obtained in all scenarios produced)

Senaryolar		A Düğümü (B3-B1)	B Düğümü (B3-B6)	C Düğümü (B3-B9)	D Düğümü (B3-B5)	E Düğümü (B3-B11)
Senaryo 1	P _{THAG}	10,3186	-40,9122	1,7435	15,9521	7,3487
	KE İndeksi	0,6291	-1,3227	1,0635	0,2457	0,8699
Senaryo 2	P _{THAG}	10,0409	0,0043	8,8584	1,6969	-41,5188
	KE İndeksi	-1,3641	1,2055	1,0905	1,1782	1,2410
Senaryo 3	P _{THAG}	42,4479	193,9387	7,2193	66,1371	-332,7205
	KE İndeksi	-0,0647	-1,1993	0,0778	-1,0226	1,3224
Senaryo 4	P _{THAG}	42,4479	-17,3624	1,8244	16,7143	-17,6549
	KE İndeksi	-0,0647	-1,1993	0,8997	-1,0226	1,3224

karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, DigSILENT Power Factory programında IEEE 13 baralı dengeli bir dağıtım test sistemi modeli oluşturulmuş ve bu sisteme ilişkin modelde harmonikli yüklerin yerlerini tespit etmek amacıyla THAG yöntemi ve kritik empedans yöntemi, farklı senaryolar için analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, yönler açısından tek hat şeması üzerinde ve sayısal değerler olarak tabloda verilmiştir. DigSILENT Power Factory programı ile elde edilen veriler, MATLAB programında THAG yöntemi ile kritik empedans yönteminin hesaplamaları için kullanılmıştır. Üretilen dört farklı senaryo için her iki yöneme ilişkin olarak elde edilen parametreler toplu olarak Tablo 11’de gösterilmiştir.

THAG ile kritik empedans yöntemlerinin harmonik yük ya da yüklerin yerinin tespit edilmesindeki başarımını incelemek amacıyla ilk olarak Senaryo 1 oluşturularak sistemde tek bir harmonikli yükün bağlı olduğu durum incelenmiştir. Yalnızca B7 barasında bulunan harmonikli yük durumu için THAG ve kritik empedans yöntemleri ile elde edilen Tablo 11’deki Senaryo 1 verileri incelendiğinde B düğümünden yüklere doğru harmonikli yük olduğu, her iki yöntemin sonuçları kullanılarak bulunabilmektedir. Senaryo 2’de, bir öncesine benzer olarak bu kez farklı bir baraya bağlanan harmonikli yük için aynı analizler tekrarlanmıştır. Senaryo 2 için Tablo 11’deki sonuçlar incelendiğinde THAG yöntemi kullanılarak harmonikli yükün E düğümünden yüklere doğru görüldüğü sonucuna varılmaktadır. Ancak, kritik empedans yöntemi ile B13 barasında bulunan harmonikli yükün tespiti için başarılı sonuçlara ulaşılamamıştır. Senaryo 3’te ise sistem üzerinde aynı harmonik bileşenlere sahip iki harmonikli yükün farklı noktalara bağlı olduğu durum yani, B7 ve B13 baralarına bağlanan aynı bileşenlere sahip harmonikli yükler için analizler tekrarlanmıştır. Senaryo 3 için Tablo 11’deki sonuçlar incelendiğinde harmonikli yüklerin B7 ve B13 baralarına bağlı olmasına rağmen, THAG yöntemi kullanılarak yalnızca E düğümünden yüklere doğru harmonikli yük yönü görüldüğü anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, B7 barasına bağlı harmonikli yükün şebeke (üretici), B13 düğümüne bağlı harmonikli yükünse yük (tüketici) gibi davranmış olmasıdır. B düğümünden görülen THAG değeri işaretinin pozitif ve E düğümünden görülen THAG değeri işaretinin ise negatif çıkması bu duruma işaret etmektedir. Bu senaryoda THAG yöntemi ile harmonikli yüklerin yerinin tam olarak tespitinin yapılamadığı görülmüştür, fakat kritik empedans yönteminin aynı senaryoda harmonikli yüklerin tespiti konusunda daha başarısız sonuçlar verdiği ortaya çıkmaktadır. THAG yöntemi kullanılarak yetersiz tespit yapılmış fakat kritik empedans yöntemi ile yanlış çıkarımlar ortaya çıkmaktadır. Son olarak Senaryo 4’te, farklı harmonik bileşenlere sahip iki farklı harmonikli yükün sistem üzerinde farklı noktalara bağlı olduğu durum incelenerek B7 ve B13 baralarına bağlanan farklı harmonikli yükler için analizler gerçekleştirilmiştir. Senaryo 4 için Tablo 11’deki sonuçlar incelendiğinde THAG yöntemi ile hem B hem de E düğümünden yüklere doğru harmonikli yükün olduğu sonucu elde edilmiştir. Böylece THAG yöntemi ile bu senaryoda harmonikli yüklerin

buldukları yerlerin doğru bir şekilde belirlendiği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak kritik empedans yöntemi ile bu senaryoda da harmonikli yüklerin tespiti konusunda başarılı sonuçlara ulaşılamamıştır.

Sonuç olarak, THAG yöntemi, kritik empedans yöntemine göre daha doğru sonuçlar vermiş olup THAG yönteminin harmonikli yükün yerinin belirlenmesinde etkili bir yöntem olduğu görülmüştür. Fakat harmonikli yüklerin bileşenler açısından birbirine çok benzemesi veya aynı olması durumunda THAG yönteminin başarımı ciddi şekilde etkilenmektedir. Bunun sebebi ise ilgili harmonik bileşen açısından harmonik güç akışı dikkate alındığında iki farklı düğümün birine bağlı olan harmonikli yükün şebeke (üretici) gibi davranmasıdır. Buna benzer durumlar için yetersiz çıkarımları önlemek için THAG yöntemi farklı yaklaşımlar ile desteklenebilir. Reaktif güç tabanlı kritik empedans yöntemi ise THAG yöntemi ile karşılaştırıldığında harmonikli yüklerin bulunduğu yönlerin tespiti konusunda oldukça yetersiz görülmektedir.

Kaynaklar (References)

- Xu F., Pu W., Zhao J., Ma Z., Lv W., Study on the verification of the calculated harmonic impedance, IEEE Access, 8, 75409-75418, 2020.
- Safargholi F., Malekian K., Schufft W., On the dominant harmonic source identification—part II: application and interpretation of methods, IEEE Transactions on Power Delivery, 33 (3), 1278-1287, 2018.
- Abo-Al-Ez K.M., Kahn M.T., Harmonic source detection methods: A systematic literature review, IEEE Access, 7, 74283-74299, 2019.
- Abdullah A.R., Peng G.Z., Ghani S.A., Jopri M.H., A new vector draft method for harmonic source detection at point of common coupling, 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 110-114, Malaysia, 24-25 March, 2014.
- Ye G., Xiang Y., Cuk V., Cobben J.F.G., Harmonic disturbance location by applying Bayesian inference, Electric Power Systems Research, 140, 886-894, 2016.
- Jopri M.H., Ghani, M.R.A., Abdullah A.R., Manap M., Sutikno T., Too J., K-nearest neighbor and naïve Bayes based diagnostic analytic of harmonic source identification, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 9 (6), 2650-2657, 2020.
- Tang Z., Shu Q., Xu F., Jiang Y., Novelty method for the utility harmonic impedance estimation based on Gaussian mixed model, IET Generation, Transmission & Distribution, 14 (13), 2573-2580, 2020.
- Dağ O., Usta Ö., Uçak C., Elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynaklarının yerinin saptanması, İTÜ Dergisi, 10 (1), 111-122, 2011.
- Nath S., Sinha P., Goswami S.K., A wavelet based novel method for the detection of harmonic sources in power systems, Electric Power Systems Research, 40 (1), 54-61, 2012.
- Sinha P., Goswami S.K., Nath S., Wavelet-based technique for identification of harmonic source in distribution system, International

- Transactions on Electrical Energy Systems, 26 (12), 2552-2572, 2016.
11. Zhou F., Liu F., Yang R., Liu H., Method for estimating harmonic parameters based on measurement data without phase angle, *Energies*, 13 (4), 879-899, 2020.
 12. Lin W., Lin C., Tu K., Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (3), 2166-2173, 2005.
 13. Sui T., Zhang M., Liu X., Ma W., Research on harmonic detection based on improved Kalman filter and wavelet packet transform, 2021 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT), 362-367, China, 2-4 July, 2021.
 14. Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S., Comparison of nonactive Powers for the detection of dominant harmonic sources in power systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57 (8), 1554-1561, 2008.
 15. Lin R., Xu L., Zheng X., A method for harmonic sources detection based on harmonic distortion power rate, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 322 (7), 072038, 2018.
 16. Thunberg E., Söder L., A norton approach to distribution network modeling for harmonic studies, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14 (1), 272-277, 1999.
 17. Barbaro P.V., Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S., A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22 (3), 1782-1789, 2007.
 18. Tanaka T., Akagi H., A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10 (4), 1737-1742, 1995.
 19. Davis E.J., Emanuel A.E., Pileggi D.J., Evaluation of single-point measurements method for harmonic pollution cost allocation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15 (1), 14-18, 2000.
 20. Omran W.A., El-Goharey H.S.K., Kazerani M., Salama M.M.A., Identification and measurement of harmonic pollution for radial and nonradial systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24 (3), 1642-1650, 2009.
 21. Jain P., Tiwari A.K., Jain S.K., ESPRIT-THP method for harmonic source identification in distribution system, 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), 2654-2659, India, 1-2 August, 2017.
 22. Vaid K., Srikanth P., Sood Y.R., Critical impedance based automatic identification of harmonic sources in deregulated power industry, 2011 International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN), 653-658, India, 21-22 July, 2011.
 23. Li C., Xu W., Tayjasant T., A "critical impedance" based method for identifying harmonic sources, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19 (2), 671-678, 2004.
 24. Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14 (2), 579-587, 1999.