

# GERÇEK BİR DAĞITIM ŞEBEKESİNDE HARMONİK ÖLÇÜM VE MODELLENMESİ

Mehmet GÖNEN<sup>1</sup>

M. Hakan HOCAOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Röle-Ölçü-Ayar-Test Başmühendisliği  
Yük Tevzi Müdürlüğü

Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş.

Eski Büyükdere Caddesi, (Novartis İlaç Fabrikası Yanı) No:217/5, 34413, 4.Levent, İstanbul

<sup>2</sup>Elektronik Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 41400, Gebze, Kocaeli

<sup>1</sup>e-posta: mehmetgonen68@mynet.com.tr

<sup>2</sup>e-posta: hocaoglu@gyte.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Güç kalitesi, Harmonik, Modelleme*

## ÖZET

Bu çalışmada; gerçek bir orta gerilim dağıtım fiderinde yapılan harmonik ölçümleri ve bu ölçümlerle ilgili simulasyon çalışmaları sunulmaktadır. Çalışma yapılan fider; İstanbul ili, Güngören ilçesi, Köyiçi mevkiinde konut tipi abonelerin yoğun olarak bulunduğu bir bölgeyi beslemektedir. Bu fider 34,5/10,5 kV indirici transformatör merkezine ait bir çıkış fideri olup, üzerinde iki ayrı 10,5/0,4 kV dağıtım transformatör merkezi bulunmaktadır. Her iki dağıtım transformatörünün alçak gerilim tarafında ve çalışılan fidere ait hat başında harmonik ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Örnek çalışmanın yürütüldüğü fider üzerinde, alçak gerilim tüketici yükleri ve dağıtım sistemi elemanları modellenmiştir. Oluşturulan modelin doğruluğunu denetlemek ve sistem yük karakteristikleri hakkında elde edilen bilgileri arttırmak amacıyla model üzerinde duyarlılık testleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler duyarlılık testlerinde kullanılmış olup sonuçlar bağıl hata hesaplarıyla desteklenmiştir.

## 1. GİRİŞ

Bir iletim ve dağıtım sistemi üzerindeki harmonik içeren gerilim ve akım değerlerini hesaplarken karşılaşılabilecek zorluklardan biri, dağıtım sisteminin ve bu dağıtım sistemindeki her bir baradan radyal olarak beslenen tüketici yüklerinin uygun bir biçimde modellenmesidir. Sisteme ait olan mevcut bütün elemanların etkisini kapsamlı bir şekilde kontrol etmeksizin sistem içerisinde eşdeğerlerinin kullanımı, iletim veya dağıtım sistemindeki harmonik içeren gerilim ve akım değerlerinin hatalı hesaplanmasına yol açabileceği açıktır. Diğer taraftan oluşturulacak modelde, sistemin tüm ayrıntılarını göz önüne almak ve bu elemanları temsil etmek de uygulanabilir bir yaklaşım değildir. Bu nedenle iletim veya dağıtım sistemlerinde bulunan yüklerin ve diğer sistem elemanlarının ayrıntılı olarak analizi ve bu elemanlarla ilgili modeller için basit ve gerçekçi bir yaklaşım sunulmalıdır. Bu yaklaşımda esas olan, alternatif konfigürasyonlar ve modeller kullanılarak, şebekenin baskın karakteristiklerinin temsil edilmesidir [1].

Bu çalışmada kullanılan temel kabuller şunlardır:

- Dağıtım hat ve kabloları eşdeğer bir  $\pi$  devresi ile temsil edilebilir.
- Şebekedeki transformatörler eşdeğer bir eleman ile temsil edilebilir.
- Kompanzasyon kondansatörlerinin empedans eşdeğeri modelleme için yeterlidir.
- İletim hattına ait endüktörler, filtreler ve jeneratörler, gerçek yapılarına göre gösterilmelidir.
- Yapılan modellemelerde yüklerin ve diğer sistem elemanlarının temsili, ilgilenilen noktaların civarında daha ayrıntılı olmalıdır. İletim veya dağıtım sistemlerinde, uzaktaki noktalar için basit eşdeğerler kullanılabilir [1].

## 2.ÖRNEK SİSTEM

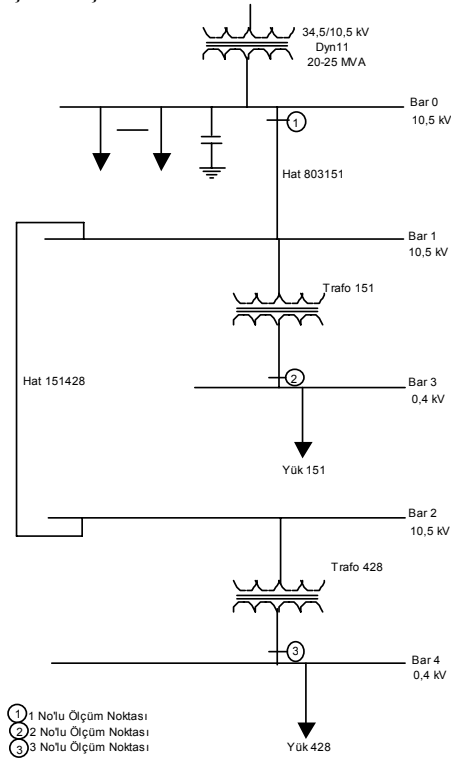
### 2.1. Örnek Sistemin Tanımı Ve Yapılan Ölçüm Çalışmaları

Örnek sistem, konut yükü aboneleri besleyen bir orta gerilim dağıtım fideridir. Şekil 1'de verilen 5 baralı sistemin gerilim seviyeleri; Bar 0-1-2, 10,5 kV, Bar 3-4 0,4 kV'dur. Sistemde sonsuz bar olarak kabul edilen Bar 0, 34,5/10,5 kV 20-25 MVA bir güç transformatörü üzerinden beslenmektedir. Bar 1-2 üzerinde 10,5/0,4 kV 1600 kVA dağıtım transformatörleri bulunmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, Bar 0'a irtibatlı fider çıkış hücrelerinde ve 151, 428 No'lu dağıtım transformatörlerinin alçak gerilim çıkışlarında olmak üzere üç ayrı noktada asenkron ölçümler yapılmıştır. "Burada ifade edilen asenkron ölçüm çalışması, ayrıklı zamanda gerçekleştirilen iki ayrı ölçüm grubunu ifade etmektedir. Birinci grup ölçüm olarak çalışma yapılan fider çıkışı (Şekil-1, 1 No'lu Ölçüm Noktası) ile 151 No'lu dağıtım transformatör merkezinin alçak gerilim çıkışı (Şekil 1, 2 No'lu Ölçüm Noktası) arasında senkron ölçüm yapılmış ve bu ölçüm çalışmaları tamamlanmasından sonra ikinci grup ölçüm olarak yine çalışma yapılan fider çıkışı (Şekil-1, 1 No'lu Ölçüm Noktası) ile 428 No'lu dağıtım transformatör merkezinin alçak gerilim çıkışında

(Şekil-1, 3 No'lu Ölçüm Noktası) senkron ölçüm çalışmaları yapılmıştır.” Her iki ölçüm zaman açısından peş peşe, 2001/Kasım yılında/ayında, hafta içi, 21:00 ile 22:00 saatleri arasında yapılmıştır. (Kasım Ayı Şehir Senkron Puant Saati 19:00 civarındadır.)

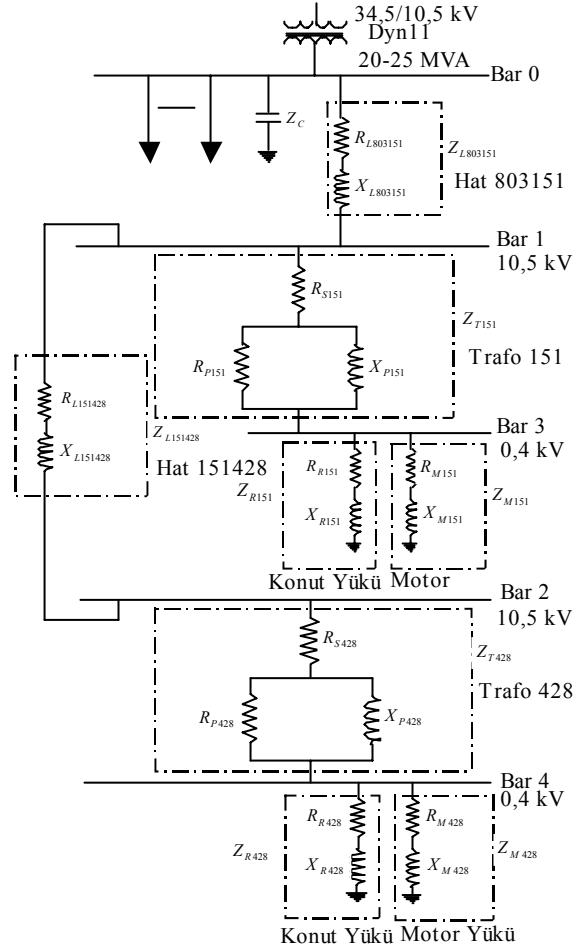
151 ve 428 No'lu dağıtım transformatörlerinin alçak gerilim tarafında ölçülen harmonik bileşenli akım büyüklükleri, harmonik üreten bir akım kaynağı olarak düşünülmüştür. Bu harmonikli akım kaynaklarından sisteme injekte edilen harmonikli akım büyüklükleri kullanılarak sistemdeki baraların ve çıkış fiderinin harmonik bileşenli gerilim değerleri frekans domeyninde hesaplanmıştır. Frekans domeyninde hesaplanan harmonik bileşenli gerilim büyüklükleri ile ölçülen harmonik bileşenli gerilim büyüklükleri her bir harmonik için (çift ve triplen harmonikler hariç) karşılaştırılmıştır.



Şekil-1. Dağıtım Fideri

Yapılan tüm ölçüm çalışmaları 3 faz olarak gerçekleştirilmiştir. Sistem dengesizliği ihmal edilebilecek bir seviyede olması nedeniyle bir faz olarak modellenmiştir. Çalışma yapılan fiderdeki dağıtım transformatörlerinin bağlantı grupları DYn11 tipi olması nedeniyle de triplen harmonikler ve çift harmonikler göz önüne alınmamıştır. Dağıtım fiderine ait harmonik empedans devresi Şekil 2'de görülmektedir.

Modellenen bu sistem daha sonra sahada yapılan tüm ölçümler için duyarlılık testlerinden geçirilmiş ve her test için bağıl hata hesabı yapılmıştır.



Şekil-2. Dağıtım Fideri Harmonik Empedans Devresi

## 2.2. Örnek Sistemin Modellenmesi

Sonsuz Bar : Sistemde, Bar 0 sonsuz bar olarak alınmıştır. Bar 0'da, sıfır empedanslı, harmonik bileşen içermeyen, sinüsoidal bir gerilim kaynağı bulunduğu düşünülmüştür.

151 ve 428 No'lu Dağıtım Transformatörleri: 151 No'lu dağıtım transformatörü Bar 1-3 arasında, 428 No'lu dağıtım transformatörü Bar 2-4 arasında paralel bağlı direnç ve reaktans elemanları kombinasyonundan meydana gelmiştir. Elemanlara ait bu büyüklükler temel frekastaki değerleri olup transformatörün temel frekastaki seri empedansı

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (1)$$

şeklinde ifade edildiğinde, harmonik eşdeğer için seri direnç;

$$R_s = R_T, \quad (2)$$

paralel reaktans;

$$X_p = hX_T, \quad (3)$$

paralel bağlı direnç ise ;

$$R_p = 80X_T \quad (4)$$

şeklinde ifade edildi [1][3]. Bu durumda 428 ve 151 No'lu dağıtım transformatörleri için harmonik bileşenli empedans eşdeğeri;

$$Z_T = R_s + \frac{h^2 X_T^2 R_p}{R_p^2 + h^2 X_T^2} + j \frac{h X_T R_p^2}{R_p^2 + h^2 X_T^2} \quad h > 1 \quad (5)$$

şeklinde ifade edilmiştir [1][3]. (h harmonik indeksini göstermektedir.)

Bar 0-1, Bar 1-2 Arasındaki İletim Hattı : İletim hatları seri bağlı empedans olarak modellenmiştir.

$$(Z_{Lh} = R_L + jhX_L) \quad (6)$$

Kısa iletim hatlarında hattın empedansının değişmesine neden olan deri etkisi (skin effec) ihmal edilebilir. İletim hattındaki deri etkisi göz önüne alınır ise hattın harmonik empedansına ait direnç kısmı

$$R_{Lh} = R_L \left(1 + \frac{0.646h^2}{192 + 0.518h^2}\right) \quad (7)$$

şeklinde değişim gösterdiği kabul edilebilir [1, 4]. Bu çalışmada

Bar 3-4 Üzerinde Bulunan Radyal Yük : 151 ve 428 No'lu dağıtım transformatörlerinin beslediği bölgede yapılan gözlemlerde, 3 kVA kurulu gücü bulunan konut tipi abonelerden oluşması nedeniyle her iki transformatör merkezinde ölçülen yük değerleri %95 konut yükü, %5 ise endüstriyel yük (motor yükü) olarak model oluşturulmuştur. Endüstriyel yük;

$$Z_{Mh} = R_{Mh} + jX_{Mh}, \quad (8)$$

konut yükü ise;

$$Z_{Rh} = R_{Rh} + jX_{Rh} \quad (9)$$

olarak gösterilmiştir. Endüstriyel yükler (motor yükü) için motorun temel frekanstaki reaktans değeri,

$$X_M = \frac{V^2}{K_1 S_M} \quad (10)$$

direnç değeri ise;

$$R_M = \frac{X_M}{K1} \quad (11)$$

ifade edilir [1, 3].

Eşitliklerde bulunan K1 şiddet faktörü (Motorun kalkış akımının, nominal akıma oranı "şiddet faktörü" olarak tanımlanır.) endüstriyel yükler için 8 civarında, ticari ve mesken yükleri için de 1.5 civarında değerler alır [1, 3]. Bu çalışmada K1 8 olarak kabul edilmiştir.

Kapasitör Bankı : Yapılan ölçümler, Bar 0 üzerinde bulunan 10,5 kV gerilim seviyeli kondansatör banklarının sistem harmonik empedansı üzerinde etkisi olduğuna dair güçlü bir gösterge olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, şebeke modellenmesinde kondansatörler göz önüne alınmıştır.

### 2.3.Hesap Metodu :

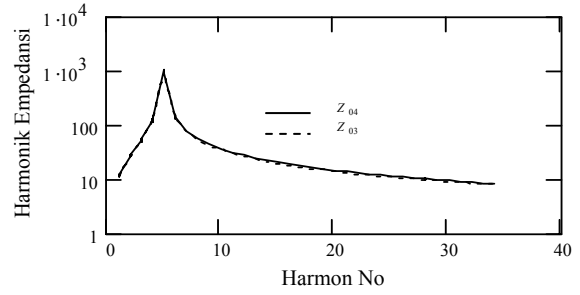
Dağıtım fideri harmonik eşdeğer devresi (Şekil 2) için bilinen devre topolojileri kullanılarak herbir harmonik için admintans matrisi hesaplanır.

$$Y(h) = \begin{bmatrix} 1/Z_{00}(h) & \dots & \dots & 1/Z_{04}(h) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/Z_{40}(h) & \dots & \dots & 1/Z_{44}(h) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Herbir harmonik için;

$$Z(h) = Y^{-1}(h) \quad (13)$$

dönüşümü gerçekleştirilir. Elde edilen empedans matrisinin  $Z_{04}$  ve  $Z_{03}$  elemanlarının frekans domeyninde harmonik empedans değişimleri Şekil 3'de görülmektedir.



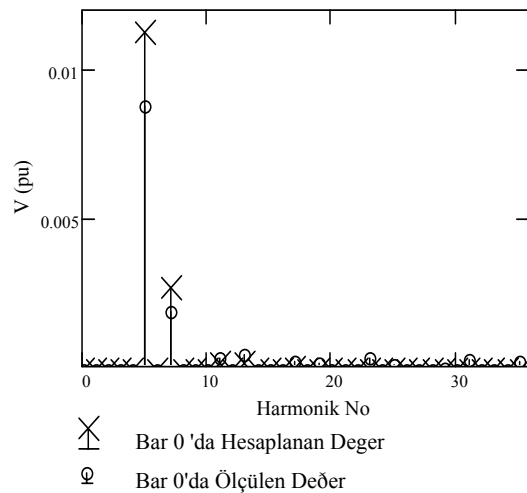
Şekil-3.  $Z_{03}$ ,  $Z_{04}$  Harmonik Empedans Değişimi

Bar 1-2'de bulunan harmonik bileşenli akım kaynaklarından injekte edilen akım büyüklükleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo-1 Bar 1-2'den İnjekte Edilen Akım Büyüklükleri

Har.No	1428g(pu)	1428a(rad)	1151g(pu)	1151a(rad)
5	$2.35 \times 10^{-4}$	1.169	$3.14 \times 10^{-4}$	1.187
7	$1.04 \times 10^{-4}$	4.608	$1.19 \times 10^{-4}$	4.8
11	$2.19 \times 10^{-5}$	4.346	$8.85 \times 10^{-5}$	3.962
13	$2.23 \times 10^{-5}$	0.663	$1.77 \times 10^{-5}$	0.367
17	$1.15 \times 10^{-5}$	0.646	$1.11 \times 10^{-6}$	0.489
19	$8.46 \times 10^{-5}$	3.054	$8.85 \times 10^{-6}$	1.292
23	$6.92 \times 10^{-6}$	2.269	$1.11 \times 10^{-6}$	0.227
25	$3.08 \times 10^{-6}$	5.829	$3.32 \times 10^{-6}$	2.897
29	$2.69 \times 10^{-6}$	5.061	$1.11 \times 10^{-6}$	2.95
31	$2.69 \times 10^{-6}$	1.833	$3.32 \times 10^{-6}$	4.538
35	$2.69 \times 10^{-6}$	0.89	$1.11 \times 10^{-6}$	3.229

Bar 1-2'de bulunan harmonik bileşenli akım kaynaklarından injekte edilen akım büyüklükleri (Tablo 1) ve  $Z_{04}$ ,  $Z_{03}$  harmonik bileşenli empedans elemanları kullanılarak Bar 0'daki gerilim harmonik bileşenlerinin büyüklüğü hesaplanır [2].



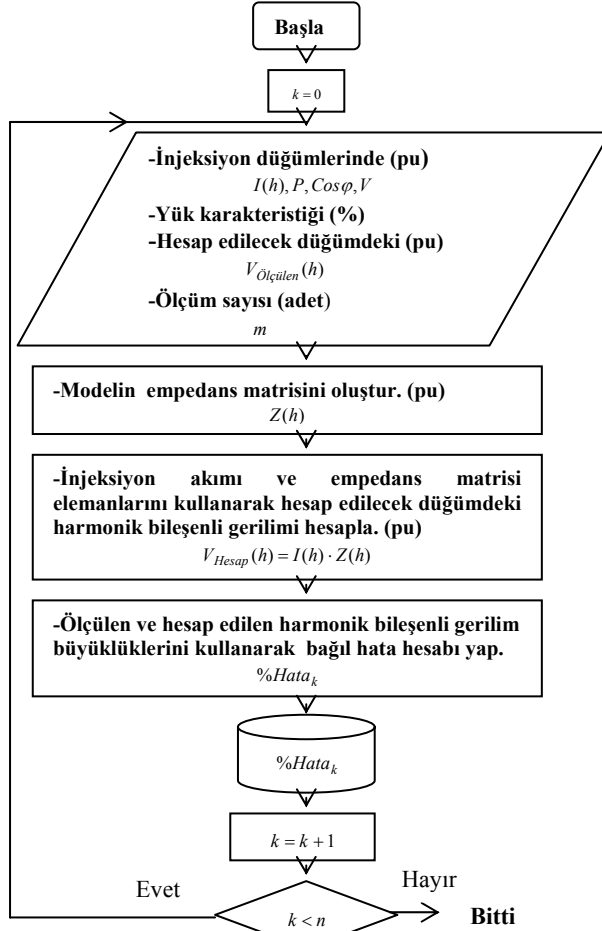
Şekil-4. Bar 0'da Ölçülen ve Hesaplanan Harmonik Bileşenlerin Gerilim Büyüklükleri

Bar 0'da hesaplanan harmonik bileşenli gerilim değeri ile Bar 0'da ölçülen harmonik bileşenli gerilim değeri arasında bu duyarlılık testinde yapılan bağıl hata

%2.6'dır. En büyük genliğine sahip 5. harmonikte yapılan bağıl hata nispeti %6.9 olup diğer harmoniklerdeki hata oranı %5.7 ile %1.7 arasında değişmektedir. Bar 0'da ölçülen ve hesap edilen harmonik bileşenli gerilim büyüklükleri Şekil 4'de verilen grafikte görülmektedir.

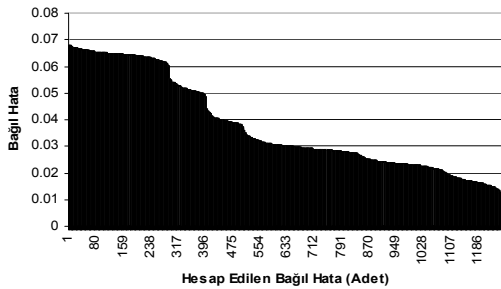
## 2.4. Model Üzerinde Yapılan Duyarlılık Testleri ve Hata Hesabı

Dağıtım fideri üzerinde üç ayrı noktadaki 1260 ayrı asenkron ölçüm, Şekil 6'da görünen akış diyagramı dahilinde oluşturulan modele tatbik edilmiştir.

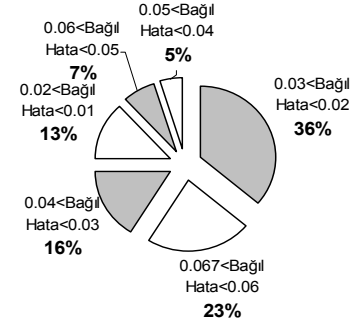


Şekil-6.Hata Hesabı Akış Diyagramı

Bu çalışmada çift ve triplen harmonikler hariç 5,7,11, 13,17,19,23,25,29,31,35 No'lu harmonikler duyarlılık ve hata hesabı çalışmalarında göz önüne alınmıştır.



Şekil-7. Ölçüm Sayısına Göre Yapılan Bağıl Hata  
Şekil 7'de ölçüm sayısına göre yapılan bağıl hata, Şekil 8'da ise her yüz ölçümde yapılan bağıl hata dağılımı görülmektedir.



Şekil-8.Yapılan Bağıl Hata Dağılımı

Yapılan bu çalışmada;

- İki ayrı zamanda gerçekleştirilen asenkron ölçümlerde zaman senkronizasyonunun tam olarak sağlanamaması,
- Bar 0'daki ölçümler 10,5 kV gerilim seviyesinde gerçekleştirilmesi nedeniyle enerji analizörüne hata oranı %1'den büyük olan ölçü transformatörlerinden örnekleme alınması,
- Ölçüm anında şebekenin yük karakteristiğinin tam olarak bilinmemesi,
- Diğer fiderlerin etkisinin ihmal edilmesi, nedenleriyle ölçüm ve hesap metodu arasındaki bağıl hata oranının büyüdüğü düşünülmektedir.

## 3. SONUÇ

Bu çalışmada; bir orta gerilim şebekesinde bilinmeyen bir düğüm noktasındaki harmonikler; bu düğüm noktası civarında yapılan asenkron ölçümler kullanılarak, kabul edilebilir hata limitleri dahilinde hesaplanabildiği gösterilmiştir. Bu hesap metoduyla bilinen düğüm noktalarındaki harmonik büyüklükleri kullanılarak, çalışma yapılan bölgede şebeke modeline göre bilinmeyen düğümlerdeki harmonikler bulunabilir. Yapılan çalışmalarda ölçümlerin doğru bir biçimde yapılması kadar, sistem elemanları ile bu bölgedeki yüklerin modellenmeside çok önemli olduğu görülmüştür. Yük modellenmesi ve harmonikler nedeniyle sistem elemanlarında oluşan kayıplara ait çalışmalar ayrıca değerlendirilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1]RIBERIO P.F. 'Harmonics Modelling and Simulation, Distribution System and Other Linear Elements Modelling' Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation, Chapter 3, IEEE PES Harmonics Working Group, 1998, pp 15-27
- [2]http://www.ee.ualberta.ca/pwrsys/IEEE Power Engineering Society, Harmonics Working Group; General Systems Subcommittee, Erişim Tarihi:13.Ocak.2002
- [3]CIGRE Working Group, 36-05, 'Harmonics Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Networks', (Electra, No.7, July 1981). pp.35-5
- [4]ACHA E. and MADRIGAL M., 'Power Systems Harmonics: Computer Modelling and Analysis' (John WILEY&Sons Inc., New York, 1988). pp. 53-224