

# Transformatör Bağlantı Gruplarının Elektrik Dağıtım Şebekelerindeki Harmoniklere Etkilerinin İncelenmesi

H. Eroğlu<sup>1</sup>, M. Aydın<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane/Türkiye, hasan.eroглу@gumushane.edu.tr

<sup>2</sup>Selçuk Üniversitesi, Konya/Türkiye, aydin@selcuk.edu.tr

## Effect Analysis of Transformer Connection Types to Electrical Distribution System Harmonics

**Abstract**—In this paper, effects of transformer connection types to harmonics on electrical distribution systems were analyzed according to the simulation results. The simulation was prepared by using Simpowersystems toolbox of Matlab&Simulink according to the measurements. The measurements were taken with the help of energy quality analyzers at different points at the 2nd and 3rd Organized Industrial Areas (KOIA) in Konya for power quality and harmonics analysis. The purpose of the studies is to determine which configurations more effective in eliminating harmonics. With the help of this study, further analyzes can be made in the electrical distribution system for power quality analyzes.

**Anahtar Kelimeler**—Harmonics, transformer, simulation, harmonic distortion.

### I. GİRİŞ

**H**ARMONİKLER, hem elektrik şebekeleri için hem de kullanıcılar için sürekli olarak karşılaşılan ve kaçınılmaz olan bir kavram haline gelmiştir. Bilindiği üzere, endüstride çok geniş bir yelpazede kullanılan doğrusal olmayan yükler harmonikli akım ve gerilim bozulmalarının önemli nedenlerindedir. Lineer olmayan elemanların artışıyla, harmonik kirliliğin önemi her geçen gün daha da büyük bir problem olmakta ve elektrik güç sistemlerindeki güvenilirliğin üzerinde büyük bir problem olmaktadır. Bu nedenle elektrik güç sistemlerinde, analizlerin ve kontrolün yapılabilmesi için harmonik kaynaklarının ölçümü büyük önem taşımaktadır [2].

Harmonik analizleri, elektrik sistemlerinde iyi bir güç kalitesinin sağlanması için en önemli etkidir [3]. Uygulamada, elektrik sistemlerinin oldukça karmaşık yapıya sahip olması, harmonik analizlerinin benzetim ortamında yapılarak daha çok incelenimin yapılabilmesini gerektirmektedir.

Geçmiş yıllarda transformatör bağlantı gruplarının harmonikler üzerindeki etkilerinin incelenmesi için bazı çalışmalar yapılmıştır [4-7]. Fakat büyük bir dağıtım şebekesinden elde edilen veriler doğrultusunda oluşturulan

elektriksel model kullanılarak yapılan bir incelenimin literatürde eksikliği göze çarpmaktadır. Bu çalışma büyük bir dağıtım şebekesinin benzetimi ve transformatör bağlantı gruplarının değişimine göre dağıtım şebekesindeki harmoniklerin değişimi ile ilgili ileride yapılabilecek çalışmalara alt yapı teşkil ederek ışık tutmaktadır.

### II. TRANSFORMATÖR BAĞLANTI GRUPLARININ HARMONİKLER ÜZERİNDE ETKİLERİ

Generatör, hat ve transformatörden meydana gelen bir güç sisteminde harmonik akımlar, generatör reaktansı, transformatörün primer reaktansı ve hattın reaktansı üzerinden geçerek harmonikli gerilim düşümü meydana getirirler. Generatörde sinüs seklinde gerilim üretildiği halde çıkış uçlarındaki gerilimin dalga şekli bozulabilir. Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi:

- Transformatör bağlantı grubuna,
- Primerin yıldız bağlı olması halinde, yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmamasına,
- Transformatördeki magnetik devrenin geometrik yapısına, bağlıdır [8].

Elektrik sisteminin gerekli bir kısmı olarak, transformatörler güç kalitesi açısından önemli rol oynarlar. Transformatör konfigürasyonları, bazı amaçlar için etkin araç olarak kullanılabilir:

- Üç ve üçün katı harmonikleri azaltılması,
- Tek faz gerilim salınımlarının genliğinin azaltılması,
- Gerilim dağıtım izolasyonunun sağlanması.

Bununla birlikte, diğer transformatör konfigürasyonları aşağıdaki problemlerle de sonuçlanabilir:

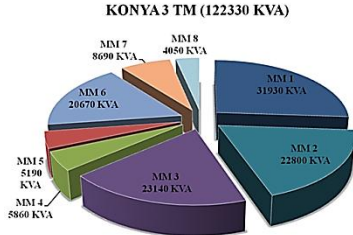
- Tahrip edici geçici aşırı gerilimler için artan potansiyel,
- Gerilim ve akım dengesizliği olasılığındaki büyük artış,
- Oluşan harmonik problemlerin daha da şiddetlenmesi.

Zigzag transformatörlerle ilgili yapılan çalışmalar, bu transformatörlerin üçüncü harmonik akımlarının % 50'sini köprülediğini göstermektedir. Dolayısıyla zigzag transformatörler, sıfır bileşen akımlarından kaynaklanan nötr akımlarını istenen seviyelere düşürebilir.

Zigzag transformatörler, üçüncü harmoniklerin bulunduğu, nötr hattında ısınmaların olduğu ve transformatörlerin yıldız noktalarında problemlerin olduğu yerlerde kullanılmalıdır [9].

### III. YAPILAN ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI

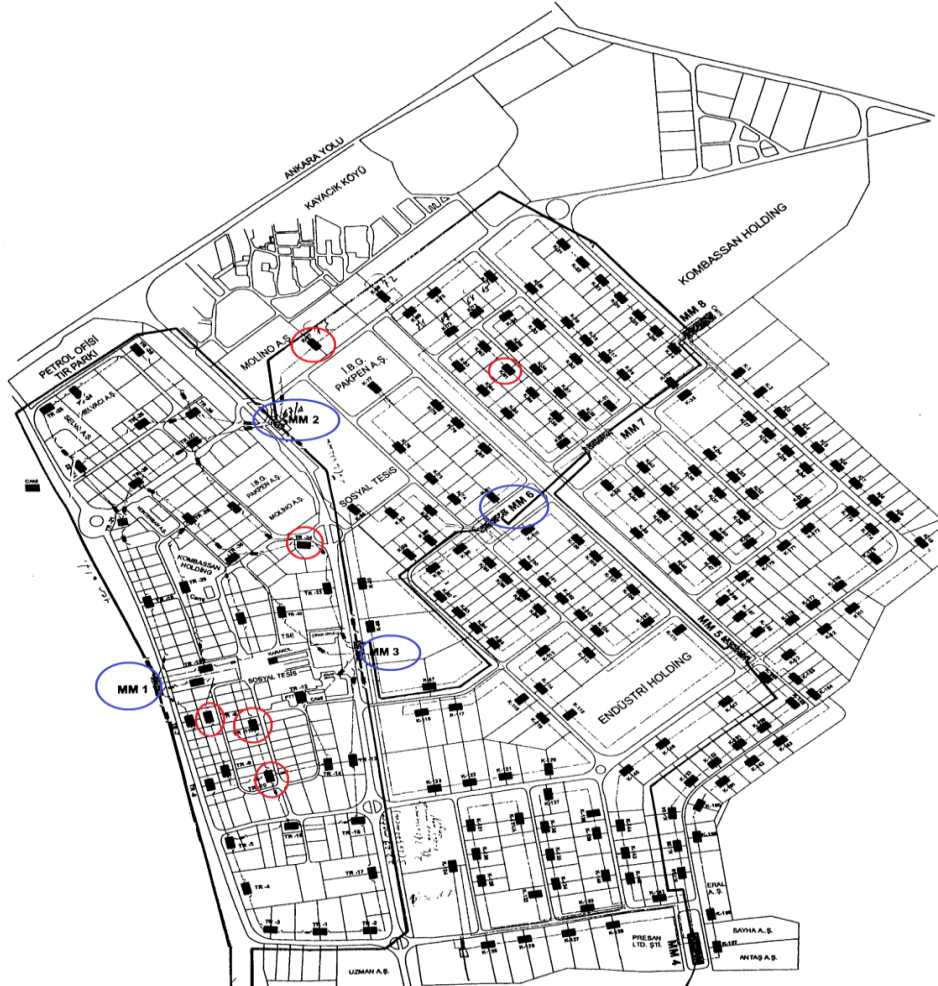
Elektrik dağıtım sistemlerindeki farklı yüklerin ürettikleri harmoniklerin incelenebilmesi için, bir OG-AG dağıtım şebekesinin farklı noktalarında ölçümler yapılmıştır. Dağıtım şebekesi olarak Konya 2. ve 3. Organize Sanayi Bölgesi seçilmiştir. Konya 2. ve 3. Organize Sanayi Bölgesinde TEİAŞ KONYA 3 TM'den beslenen 8 tane manevra merkezi bulunmaktadır. Her bir manevra merkezinin kurulu güçleri Şekil 1'deki gibidir. Ölçümler, farklı ürün üreten fabrika tiplerinin hangi tür harmonikleri ürettiğini ortaya çıkarmak için yapılmış ve bunların, şebeke üzerindeki etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.



Şekil 1: Manevra merkezlerinin kurulu güçleri [10].

Ölçüm işleminde iki tip güç analizörü kullanılmıştır. Genellikle AG tarafında yapılan ölçümler ANALYST 2060 tek fazlı güç analizörü cihazıyla, OG tarafında yapılan ölçümler ise RUDOLF PAK 5 üç fazlı güç analizörü cihazıyla yapılmıştır.

Yapılan harmonik ölçümlerinin doğruluğundan emin olmak amacıyla, birden fazla fabrikanın beslendiği trafolarla, yalnızca bir fabrikanın çalıştığı saatler dikkate alınarak ölçümler yapılmaya çalışılmıştır. OG şebekesindeki ölçümlerde ise, daha fazla güç çekilen manevra merkezleri tercih edilmiştir. Ölçüm yapılan manevra merkezleri MM1, MM2, MM3 ve MM6'dır. AG'de ise farklı ürün üretimi yapan fabrikalarda ölçümler yapılmıştır (Şekil 2). Ölçümler, tekstil fabrikası, gıda fabrikası, iki adet plastik fabrikası ve beş adet döküm fabrikasında yapılmıştır. Ölçüm noktalarındaki değerler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Ölçüm yapılan Konya 2 ve 3 nolu organize sanayisinin trafo tek hat şeması ve fabrikalarda yapılan ölçüm yerleri.

Tablo 1: Manevra merkezlerinden alınan değerler.

Ölçüm Yapılan Yer	Çekilen Akım (A)	Gerilim THD (%)	Akım THD (%)	Akımdaki Baskın Harmonikler
MM1	220-280	2-2.4	3.5-4.1	5 (%4)-7(%1.8)
MM2	55-70	2.1-2.8	4.8-5.2	3 (%2)- 5(%3.6)- 7 (% 4.1)
MM3	180-225	2-2.5	3.6-4	5 (%3.7)- 7 (% 1.2)
MM6	22-37	2.2-2.8	7-10.1	5 (%7.5)- 7(%2.5)- 11(%1)-21(%5)

Tablo 2: Fabrikalardan alınan ölçüm değerleri.

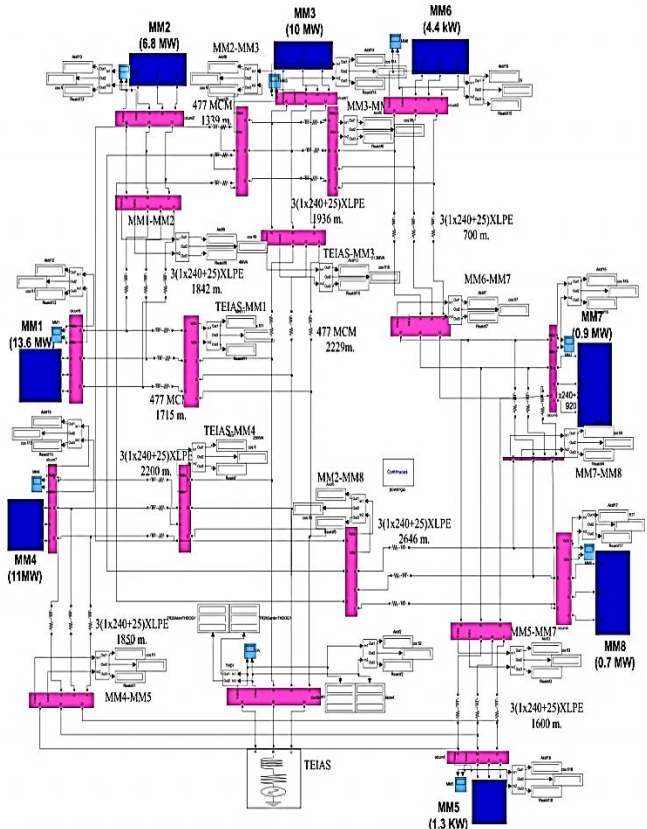
Ölçüm Yapılan Yer	Çekilen Akım (A)	Gerilim THD (%)	Akım THD (%)	Akımdaki Baskın Harmonikler
Döküm Fabrikası 1 (OG)	13.25-14.75	2.5-3	15-20	5 (%16) - 7 (%12) - 11(%3)
Plastik Fabrikası 1	170-290	2-2.5	10-17	3(%2.5) - 5(%10) - 7(%12.5)
Plastik Fabrikası 2	90-170	2-2.2	10-20	5(%11) - 7(%12.5) - 11(%8)
Döküm Fabrikası 2	500-630	3.5-4.3	24.5-28.5	5(%22) - 7(%10) - 11(%8)
Döküm Fabrikası 3	140-300	2.3-2.6	9-22.5	5(%6) - 7(%19)
Gıda Fabrikası	90-170	2.3-2.5	7-22.5	3(%8)-5(%6)-7(%10)-9(%6)-11(%11)
Döküm Fabrikası 4	660-775	5.3-5.6	19-26	5(%219) - 7(%11) - 17(%3)
Tekstil Fabrikası	400-580	4.4-4.1	14.5-18.5	5(%16) - 7(%5) - 11(%5)
Döküm Fabrikası 5	125-230	2.2-2.6	8-32	2 (%28)-3 (%3)-4(%8)-5(%6)

1250 kVA'lık trafolarla kısa devre akımı sekonder taraf için yaklaşık olarak 34 kA'dır. Yük akım değeri 700 A olan bir döküm fabrikasının  $I_{KD}/I_L$  oranı yaklaşık olarak 48 olmaktadır. IEEE 512 standardına göre  $I_{KD}/I_L$  oranının 48 olduğu için, akımdaki harmonik limit değeri %8 olarak kabul edilmektedir [11]. Fakat bu değer trafonun kısa devre oranı ya da diğer sistem parametrelerinin farklılık göstermesi durumunda değişir. Fabrikaların akım distorsiyon değerleri, standart değerlerinin üzerindedir. Ölçüm yapılan noktadaki yüksek harmoniklerin nedeni, ark fırınları, değişken hızlı sürücüler, yumuşak yol vericiler, inverterler ve fabrikalardaki diğer güç elektroniği elemanlarıdır. MM1'den beslenen ve %25 seviyelerinde akım harmoniklerine sahip fabrikaların OG tarafında düşük distorsiyon olmasının nedeni, ölçüm yapılan dağıtım şebekesindeki düşük distorsiyonlu diğer fabrikaların OG tarafındaki harmonik seviyelerini düşürmesi ve AG'den OG'ye geçildikçe OG tarafta, distorsiyonlu gerilim düşümüne neden olan trafo empedanslarının kalkmasıdır. Bunun yanında ortak bağlanma noktalarında (PCC) harmoniklerin açışal olarak birbirlerini sönmülemeleri de söz konusudur.

#### IV. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Günümüzde elektrik sistemlerinde enerji kalitesi araştırmalarının yapılabilmesi için birçok yöntem vardır. Benzetim çalışmaları bunlardan biridir. Sistem parametreleri Benzetime girildikten sonra veriler üzerinde değişiklikler yapılarak sistem hakkında yorum yapılabilmektedir.

Sistemin elektriksel modeli, Matlab&Simulink programının Simpowersystems araç kutusu kullanılarak, ölçümlerden elde edilen verilere dayanarak ve Konya Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğünden (KOSBM) alınan değerler yardımıyla oluşturulmuştur. Gerçek bir sistemde farklı görünür güçlerde yüzlerce transformator bulunur. Benzetim ortamında yüzlerce farklı değerde transformatorün, yükün, harmonik akım kaynaklarının, ölçüm bloklarının ve birçok diğer dağıtım şebekesi elemanlarının modellenmesi oldukça zor olduğundan gerçekleştirilen benzetim çalışmasında 1250 kVA değerinde 60 transformator kullanılmıştır. Her bir manevra merkezinin içinde o manevra merkezinden beslenen fabrikaları temsil eden yükler bulunmaktadır. Manevra merkezlerinin güçleri KOSBM'den alınmıştır. Dağıtım şebekesinde yapılan ölçümlerden elde edilen değerler ilgili trafoların değerleri olarak benzetime girilmiş, dağıtım şebekesinde ölçümü yapılmayan diğer trafoların değerleri ise KOSBM'den alınan değerlere göre "Diğer trafolar" adında benzetime girilmiştir. Transformatorler, lineer ve lineer olmayan yükler, ölçüm blokları ve diğer dağıtım sistemi elemanlarını içeren manevra merkezleri, benzetim ortamında Şekil 3'te gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 3: Sistemin elektriksel modeli.



Tablo 3: TEİAŞ ana besleme kaynağına ait değerler.

Fazlar	Gerilimin RMS değeri (V)	Faz Açısı (Derece)	Frekans (Hz)	Üç Faz Kısa Devre Gücü	X/R Oranı	Kapasite
V <sub>AB</sub>	34500	0	50	680 MVA	323.5	inf.
V <sub>BC</sub>	34500	-120	50			inf.
V <sub>CA</sub>	34500	120	50			inf.

Tablo 4: Dyn1,Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörlerinin değerleri.

Nominal Güç Pn [Va] , Frekans [Hz]	[1250e3, 50]
Primer 1 Sargı Bağlantısı	D1, D11, Y
Primer 2 Sargı parametreleri [V1 Ph-Ph (Vrms), R1(pu), L1(pu)]	[34500 12.85 0.177]
Primer 2 Sargı Bağlantısı	Yn, Yn, Yn
Primer 2 Sargı parametreleri [V2 Ph-Ph (Vrms), R2(pu), L2(pu)]	[400 0.001727 2.832e-005]

Tablo 3'te değerleri verilen besleme kaynağının (Konya 3 TM trafosunun) kısa devre gücü ve X/R oranı benzetimde kullanılmak üzere 680 MVA ve 323.461 olarak hesaplanmıştır.

Manevra merkezleri arasında havai hat ve yer altı kabloları kullanılmaktadır. Yeraltı kablosu olarak 3(1x240+25) XLPE, havai hat iletkeni olarak da 477 MCM (Hawk) iletkenleri kullanılmaktadır. Dağıtım şebekesinden alınan harmonikli akım bileşenlerinin benzetim sisteminde gerçek değerlere yakın gerilim distorsiyonu oluşturabilmesi için hatların mesafelerine göre hat empedanslarının da hesaplanması gerekmektedir. Kullanılan kablo çeşidine ve hatların uzunluklarına göre hat empedansları, Tablo 5'teki kablo parametreleri dikkate alınarak hesaplanmıştır (hat kısa iletim hattı olduğundan kapasitans ihmal edilmiştir). Hesaplanan değerler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5: Manevra merkezleri arasında kullanılan kablolar için direnç ve endüktans değerleri.

	20 °C'de İletken DC direnci (ohm/km)	Çalışma indüktansı (mH/km)
477 MCM (Hawk)	0.12	0.95
240 mm <sup>2</sup> XLPE	0.0754	0.531

Tablo 6: Hat mesafelerine göre omik direnç ve endüktans değerleri.

Hat	Kullanılan Kablo Cinsi	Uzunluğu (metre)	Hat uzunluklarına göre omik direnç (ohm) ve endüktans (mH) değerleri	
TEİAŞ-MM1	477 MCM	1715	0.2058	0.5145
MM1-MM2	3(1x240+25)XLPE	1842	0.1388	0.9781
MM2-MM3	477 MCM	1339	0.1606	0.4017
MM2-MM8	3(1x240+25)XLPE	2646	0.1995	1.407
TEİAŞ-MM4	3(1x240+25)XLPE	2200	0.1658	1.168
MM4-MM5	3(1x240+25)XLPE	1850	0.13949	0.9842
MM5-MM7	3(1x240+25)XLPE	1600	0.1206	0.8512
MM3-MM6	3(1x240+25)XLPE	1936	0.145977	1.029952
MM6-MM7	3(1x240+25)XLPE	700	0.05278	0.3724
TEİAŞ-MM3	477 MCM	2229	0.2676	0.669
MM7-MM8	3(1x240+25)XLPE	920	0.06936	0.489

Yukarıdaki veriler doğrultusunda dağıtım sisteminin benzetimi gerçekleştirilmiş ve Tablo 7'deki veriler elde edilmiştir.

Tablo 7: Benzetimden elde edilen değerlerle ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.

	Ölçüm Değerleri		Benzetim Değerleri	
	Gerilim THD (%)	Akım THD (%)	Gerilim THD (%)	Akım THD (%)
MM1	2-2.4	3.5 -4.1	2.13	3.58
MM2	2.1-2.8	4.8 -5.2	2.18	5.02
MM3	2-2.5	3.6 -4	2.16	3.73
MM6	2.2-2.8	7-10.1	2.2	8.94
Plastik Fabrikası1	2-2.5	10-17	3.37	17.59
Plastik Fabrikası2	2-2.2	10-20	2.61	16.84
Döküm Fabrikası2	3.5-4.3	24.5-28.5	11.24	23.57
Döküm Fabrikası3	2.3-2.6	9-22.5	6.70	26.02
Gıda Fabrikası	2.3-2.5	7-22.5	6.70	33.11
Döküm Fabrikası4	5.3-5.6	19-26	7.69	26.22
Döküm Fabrikası5	2.2-2.6	8-32	11.24	21.21

Yapılan benzetim, transformatörlerin Dyn11 bağlantı grubundan olduğu ve dağıtım şebekesinde ölçümlerin yapıldığı fabrikaların hepsinin devrede olduğu varsayılarak yapılmıştır. Dolayısıyla benzetimdeki fabrikaların bazılarının gerilim distorsiyon değerleri, dağıtım şebekesinden alınan gerçek ölçümlerdeki değerlerden daha yüksek çıkabilmektedir.

#### V. TRANSFORMATÖR BAĞLANTI GRUPLARININ DAĞITIM ŞEBEKESİNDEKİ HARMONİKLERE ETKİLERİNİN İNCELENEBİLMESİ İÇİN YAPILAN BENZETİM ÇALIŞMASI

Transformatörlerin bağlantı grubunun şebeke harmoniklerine etkisinin incelenebilmesi için organize sanayi bölgesinin benzetiminde, transformatörlerin tümü önce Dyn11, daha sonra sırasıyla Dyn1, Yyn ve Yynyn bağlantı gruplarından seçilmiş ve benzetimden alınan değerler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8: Transformatörler bağlantı gruplarının değiştirilmesiyle manevra merkezlerinden elde edilen THD değerleri (V:Gerilim, A:Akım).

Bağlantı gurubu	% THD MM1		% THD MM2		% THD MM3		% THD MM6	
	V	A	V	A	V	A	V	A
Dyn11	2,13	3,58	2,18	5,02	2,16	3,73	2,20	8,94
Dyn1	2,13	3,58	2,18	5,02	2,16	3,74	2,20	8,93
Yyn	1,90	3,22	1,95	4,60	1,93	3,24	1,96	8,33
Yynyn	1,91	3,23	1,96	4,60	1,94	3,34	1,97	8,34

#### VI. SONUÇ

Tablo 8'deki değerlere göre, fabrikaların beslendiği transformatörlerin bağlantı grupları değiştirildiğinde manevra merkezlerindeki akım ve gerilim harmonik distorsiyonlarının değiştiği görülmektedir. Transformatörlerin Dyn11 ve Dyn1 bağlı olması akım ve gerilim THD'sini neredeyse hiç değiştirmedeği görülmektedir. Yyn ve Yynyn bağlantı

gruplarında ise akım ve gerilim distorsiyonlarının referans benzetimdeki değerlere göre (Dyn11 bağlı) yaklaşık % 10 azaldığı görülmektedir.

Bu değerler doğrultusunda, üç ve üçün katı harmoniklerin az bulunduğu çok sayıdaki sanayi yüklerinin beslendiği dağıtım Őebekelerinde, manevra merkezlerindeki harmoniklerin yok edilmesi açısından Yyn ve Yynn bağlantı gruplarının Dyn11 ve Dyn1 bağlantı gruplarına göre daha avantajlı oldukları sonucu çıkarılabilir. Fakat bu değerler üç ve üçün katı harmoniklerinin mevcut olduğu dağıtım Őebekelerinde farklılık gösterebilir.

Yapılan ölçümlerde, dağıtım Şebekesinin bir sanayi bölgesi olması nedeniyle üç ve üçün katı harmonikleri içermemektedir. Çünkü üç fazlı yükler yoğun bir Őekilde bu dağıtım Őebekelerinde yer almaktadır. Teorik olarak, primeri üçgen bağlı transformatörlerde, sekonder tarafta görülen üç ve üçün katı harmonikler (triplen harmonikler), sirkülasyon akımlarından dolayı Şebeke tarafına geçememektedir [12-15]. Bu özellikten dolayı primeri üçgen bağlı transformatörler primeri yıldız bağlı transformatörlere göre daha avantajlıdır.

#### KAYNAKLAR

- [1] M. Bao, J. Xia, X. Yin, M. Dong, H. He ve J. He, "Harmonic Measurements and Analysis in a Modern Steel Manufacturing Facility", *Power and Energy Society General Meeting*, 2010 IEEE, s. 1-6.  
web:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5589983>
- [2] Q. Tang, Y. Wang ve S. Guo, "Design of Power System Harmonic Measurement System Based on LabVIEW", *Fourth International Conference on Natural Computation*, vol. 5, pp. 489 – 493, Ekim, 2008.
- [3] G.W. Chang ve C. Cheng-I, "Measurement Techniques for Stationary and Time-Varying Harmonics", *Power and Energy Society General Meeting*, 2010 IEEE, s.1-5.  
Web:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5589611>
- [4] H. Sağlam, "Dağıtım Transformatrlerinin Bağlantı Gruplarına Gre Harmonik Simlasyonu", Yksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstits, Yıldız Teknik niv., İstanbul, 2003.
- [5] Q. Song, Z. Yin, J. Xue ve L. Zhou, "Zero-Sequence Harmonics Current Minimization Using Zero-Blocking Reactor and Zig-Zag Transformer", *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, s. 1758–1764, Nisan 2008.
- [6] R. Omar, A. Ahmad ve M. Sulaiman, "Harmonics Comparisons On Various Transformer Configurations", *International Conference on Energy and Environment 2006*, Ağustos 2006.  
Web:<http://dspace.uniten.edu.my/jspui/bitstream/123456789/574/1/Harmonics%20comparisons%20on%20various%20tranformer%20configurations.pdf>
- [7] H. E. Mazin, W. Xu, "Harmonic Cancellation Characteristics of Specially Connected Transformers", *Electric Power Systems Research*, Volume 79, Issue 12, s. 1689-1697, Aralık 2009.
- [8] C. Kocatepe, M. Uzunoğlu, R. Yumurtacı, A. KarakaŐ ve O. Arıkan, "Elektrik Tesislerinde Harmonikler", İstanbul, Birsen Yayınevi, 2003.
- [9] R.C. Dugan, F.M. McGranaghan, H.W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 1996.
- [10] H. Eroğlu, M. Aydın, "Konya 2-3. Organize Sanayi Bölgesi Elektrik Dağıtım Şebekesindeki Harmonik Seviyelerinin İncelenmesi", *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mhendisliği 13. Ulusal Kongresi*, s. 85-91, 23-26 Aralık 2009, Ankara, Türkiye.
- [11] IEEE P519A/D5, "Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems", Harmonics Working Group (IEEE PES T&D Committee) and SCC22, New York, 1996.
- [12] W. Jewell ve D. J. Ward, "Single Phase Harmonic Limits", *PSERC EMI, Power Quality and Safety Workshop*, Nisan 2002.
- [13] IEEE Std 141-1993 (Revision of IEEE Std 141-1986), "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants", Power Systems Engineering Committee of the Industrial and Commercial Power Systems Department of the IEEE Industry Applications Society, USA, Aralık 1993.

- [14] Schonek J., "The Singularities Of The Third Harmonic", Schneider Electric , Cahier Technique no202, 2001.
- [15] N. Chiesa ve H. K. Hidalen, "Analytical Algorithm for the Calculation of Magnetization and Loss Curves of Delta-Connected Transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, Temmuz 2010.