

# Dağıtım Transformatörlerinin Bağlantı Gruplarına Göre Harmonik Simülasyonu

Aslan İNAN, Hakan SAĞLAM

## ÖZET

Güç kalitesinin en önemli kısmı olan harmonikler, teknolojinin güç elektroniği ve yarı iletken aygıtların kullanımını gerektirerek ve artırarak gelişmesiyle önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Harmoniklerin etkisinin değerlendirilmesinde önemli bir düşünüş, harmoniklerin güç sistem bileşen ve yükleri üzerine yaptığı etkidir. Transformatörler güç sistemlerinde önemli bir bileşendir. Harmoniklerin transformatörler üzerindeki ana etkileri, ek ısı kayıpları, azalan yalıtım ömrü ve düşük kapasitedir. Bu çalışmada dağıtım transformatörlerinin Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplarının harmonik olayına etkilerinin neler olduğu hedeflenmiş olup, lineer olmayan yük kompozisyonu ile bir OG/AG sistem içerisinde farklı durumlar için MATLAB Simulink ile modellenerek bu etkiler gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Güç kalitesi, harmonikler, dağıtım transformatörleri, sargı bağlantı grubu

## Harmonic Simulation of Distribution Transformers Due to the Connection Groups

### ABSTRACT

Harmonics which is the most important part of the power quality, development of technology with necessity and increasing usage of power electronics and semi conductor devices, is coming to existence an important problem. An important consideration when evaluating the impact of harmonics is their effect on power system component and loads. Transformers are major components in power systems. The major effects of harmonics on the transformers are additional heating losses, shorter insulation lifetime, lower capacity. In this study the effects of Dyn1, Dyn11 and Yyn connection groups of distribution transformers to the harmonic phenomenon are targeted and for different cases in a MV/LV system with nonlinear load composition modeled with MATLAB Simulink, this effects are viewed.

**Key words:** Power quality, harmonics, distribution transformers, winding connection group

### 1. GİRİŞ

Güç kalitesi, gücün üretilmeye başlandığı noktadan en son tüketiciye kadar gerilimi, akımı ve frekansı etkileyen bir kavramdır. İdeal durumda, elektrik güç sistemleri belirli bir frekansta, gerilim ve akımları ise güvenli işletme aralıklarında olmalıdırlar. Günümüzde elektriğin kalitesi, hem elektrik dağıtım şirketleri ve hem de kullanıcılar için önemlidir. Tüketici sabit frekansta tam sinüs gerilim beslemesi talep eder. Bu bakımdan güç kalitesi daha çok müşteri odaklı olarak ortaya çıkan ve dayanak olarak müşterinin esas alındığı bir olaydır.

Tek veya üç fazlı lineer olmayan yükler, değişken frekans sürücü üniteleri, ark fırınları, fotovoltaik sistemler vb birçok etkenler güç kalitesini bozan unsurlardır. Bu etkenler, başta geçici rejimler, gerilim değişimleri (gerilim düşmesi, gerilim yükselmesi), gerilim dalga şekli bozulması (dc bileşen, harmonikler, ara

*Makale 21.12.2010 tarihinde gelmiş 24.02.2011 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.*

*A.İNAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü*

*e-posta: inan@yildiz.edu.tr*

*H. SAĞLAM, Siemens, A.Ş. , Kartal-İstanbul*

*e-posta: hakan.saglam@siemens.com*

*Digital Object Identifier 10.2339/2010.13.4, 263-269*

harmonikler), gerilim dalgalanması ve gerilim dengesizliği şeklinde olumsuz durumlara neden olur. Bir gerilim dalga şekli bozulması olayı olarak ele alınan ve gerilim ve akım dalga şeklinde temel frekansın tam sayı katları olan frekans değerlerindeki bileşenler olarak tanımlanan harmonikler, günümüzde güç sisteminin neredeyse bütününde bulunmaktadır. Sistemden sisteme ve farklı gerilim kademeleri için harmonik bozulma seviyesi değişmektedir.

Bir güç sisteminin en önemli bileşenlerinden biri de transformatörlerdir. Transformatörlerde harmoniklerin etkisi en başta artan ısı kayıplarından dolayı çalışma ömrünün azalmasıdır. Harmonik içeren yükleri besleyen transformatörün performans analizi, değişik yük profilleri ve harmonik bozulma seviyeleri altında yapılmalıdır (1).

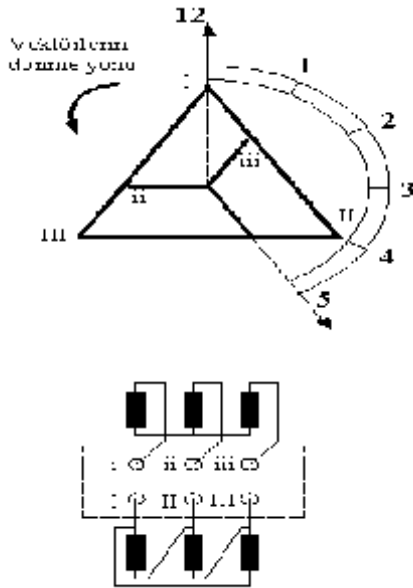
Literatürde, transformatörlerin enerji kalitesi üzerine etkisi (2), güç sistem harmoniklerinin transformatörler üzerindeki etkisi (3-7) incelenmiştir.

Bu çalışmada bir güç sisteminde yer alan ve enerji tedarikinde en önemli bir ekipman olan transformatörlerin harmonikli bir yük beslemesi durumunda transformatör sargılarının bağlantı grubunun etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transfor-

matörleri, harmonik kompozisyonu aynı olan sistem için birbirlerinden farklı yüklenmektedirler.

## 2. TRANSFORMATÖR BAĞLANTI GRUPLARI

Transformatörlerde bağlantı şekilleri, çalışma özelliklerini büyük ölçüde tayin etmektedir. Trafoların bağlantı grubunu, giriş ve çıkış vektörlerinin konumlarına bakarak tespit etmek mümkündür. Genellikle trafoların bağlantı grupları kısaca iki harf bir rakamla gösterilir; örneğin Dyn5 gibi. Bağlantı gruplarının ifadesinde kullanılan harfler Y: yıldız, D: üçgen, Z: zigzag, n: nötr şeklinde sembolize edilmiştir. Birinci harf, trafonun primer sargısının bağlantı şeklini, ikinci harf, trafonun sekonder sargısının bağlantı şeklini gösterir. Rakam ise X primer vektör A fazı saat rakamlarında sıfırda (on iki) olduğu kabul edilirse A fazı vektörünün yine saat rakamlarına göre bulunduğu yeri ifade eder. Rakam değeri 1-12 arasında olabilir her bir rakam 30°'ye karşılık gelir. Buna göre Dyn5 bağlantı grubu, primeri Üçgen, sekonderi Yıldız bağlı, nötr ucu çıkartılmış ve bağlantı açısı  $5 \times 30^\circ = 150^\circ$  olan bir trafoyu temsil eder. Şekil-1'de Dy5 bağlantı grubunun grup açılarının bulunuşu görülmektedir (8).



Şekil-1 Dy5 bağlantı grubunun vektör diyagramı ve bağlantı şekli

Elektrik sisteminin gerekli bir kısmı olarak, transformatörler güç kalitesi açısından önemli rol oynarlar. Bazı transformatör konfigürasyonları, bazı amaçlar için etkin araç olarak kullanılabilir: i. Üç ve üçün katı harmonikleri azaltmak, ii. Tek faz gerilim salınımlarının genliğini azaltmak, iii. Gerilim dağıtım izolasyonu sağlamak.

## 3. DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİNİN BAĞLANTI GRUPLARINA GÖRE HARMONİK SIMULASYONU

Dağıtım transformatörlerinin bağlantı gruplarına göre simülasyonu için Matlab Simulink ortamı kullanılmıştır. Güç sistem elemanları Power System Blockset altında modellenmiştir (9,10).

### 3.1 Dyn1, Dyn11 ve Yyn Bağlantı Grupları İçin Devrenin Modellenmesi Ve Referans Simulasyon

Şekil 2'de Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörleri için sonuçların alındığı simülasyon devresi görülmektedir. Bu simülasyon devresinde kullanılan elemanlarla ilgili olarak; Çizelge 1'de AC gerilim kaynağına ait, Çizelge 2'de de Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörlerine ait değerler verilmiştir. Lineer olmayan yük olarak 6-darbeli konverter modellenmesi için gerekli olan büyük-lükler şu şekilde belirlenmiştir:  $S=500$  kVA,  $\cos\theta=0.85$ ,  $P=500 \times 0.85=425$  kW,  $I=645$  A. Çizelge 3'de 6-darbeli konverterin harmonik akım kaynağı olarak modellenmesi için gerekli olan spektrum değerleri, Çizelge 4'de asenkron motor değerleri, Çizelge 5'de yüklerle ilgili hesaplamaları yapılan güç faktörü düzeltme kapasitörlerinin değerleri, Çizelge 6'da ise simülasyonda kullanılan pasif yükün değerleri belirtilmektedir.

Çizelge 1. AC gerilim kaynak değerleri

Fazlar	Tepe genliği	Faz açısı	Frekans (Hz)
Va	$35000 \times \sqrt{2}$	0	50
Vb	$35000 \times \sqrt{2}$	-120	50
Vc	$35000 \times \sqrt{2}$	120	50

Çizelge 2. Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörlerinin değerleri

Nominal Güç, Frekans Pn[VA], fn[Hz]	[2e6, 50]
Sargı Parametreleri [V1 Ph-Ph(Vrms), R1(pu), L1(pu)]	[35e3*sqrt(2), 0.002, 0.08]
Sargı Parametreleri [V2 Ph-Ph(Vrms), R2(pu), L2(pu)]	[0.4e3*sqrt(2), 0.002, 0.08]

Çizelge 3. 6-darbeli konverterin harmonik spektrum değerleri

h	1	5	7	11	13	17	19	23	25	THD %24,82
%	100	20	11	6.4	4.3	2.3	1.6	0.9	0.7	
I (A)	645	129	71	41	28	15	10	6	5	

Çizelge 4. Asenkron motor değerleri (sincap kafesli)

Mevcut model (2 adet kullanılmıştır)	100 HP [75 kW] 400 V 50 Hz 1484 RPM
Nominal güç, gerilim(faz-faz), frekans [Pn(Va), Vn(Vrms), fn (Hz)]	[7.5+004 400 50]
Güç faktörü	0.85

Çizelge 5. Güç faktörü düzeltme kapasitörlerinin değerleri (PFC1, PFC2, PFC3)

Konfigurasyon	Ygrounded
Nominal faz-faz gerilimi Vn [Vrms]	0.4e3
Nominal frekans fn [Hz]	50
Kapasitif reaktif güç Qc (negatif var) (PFC1) Pasif Yük	420e3
Kapasitif reaktif güç Qc (negatif var) (PFC2) Motor Yüğü	45e3
Kapasitif reaktif güç Qc (negatif var) (PFC3) Konverter Yüğü	125e3

Çizelge 6. Pasif yük değeri

Konfigurasyon	Ygrounded
Nominal faz-faz gerilimi Vn [Vrms]	0.4e3
Nominal frekans fn [Hz]	50
Aktif güç P (W)	1000
Endüktif reaktif güç QL (pozitif var)	750
Kapasitif reaktif güç Qc (negatif var)	0

### 3.2 Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı grupları için devre ölçümleri

Şekil-2'deki simülasyon devresindeki bağlantı grupları değiştirilerek harmonikli sistemlerde farklılıkları belirlenmeye çalışılmıştır. Simülasyon devresinden alınan sonuçlar primer ve sekondere ait akım ve gerilim değerleri ile primer ve sekondere ait akım ve gerilim distorsiyonlarıdır.

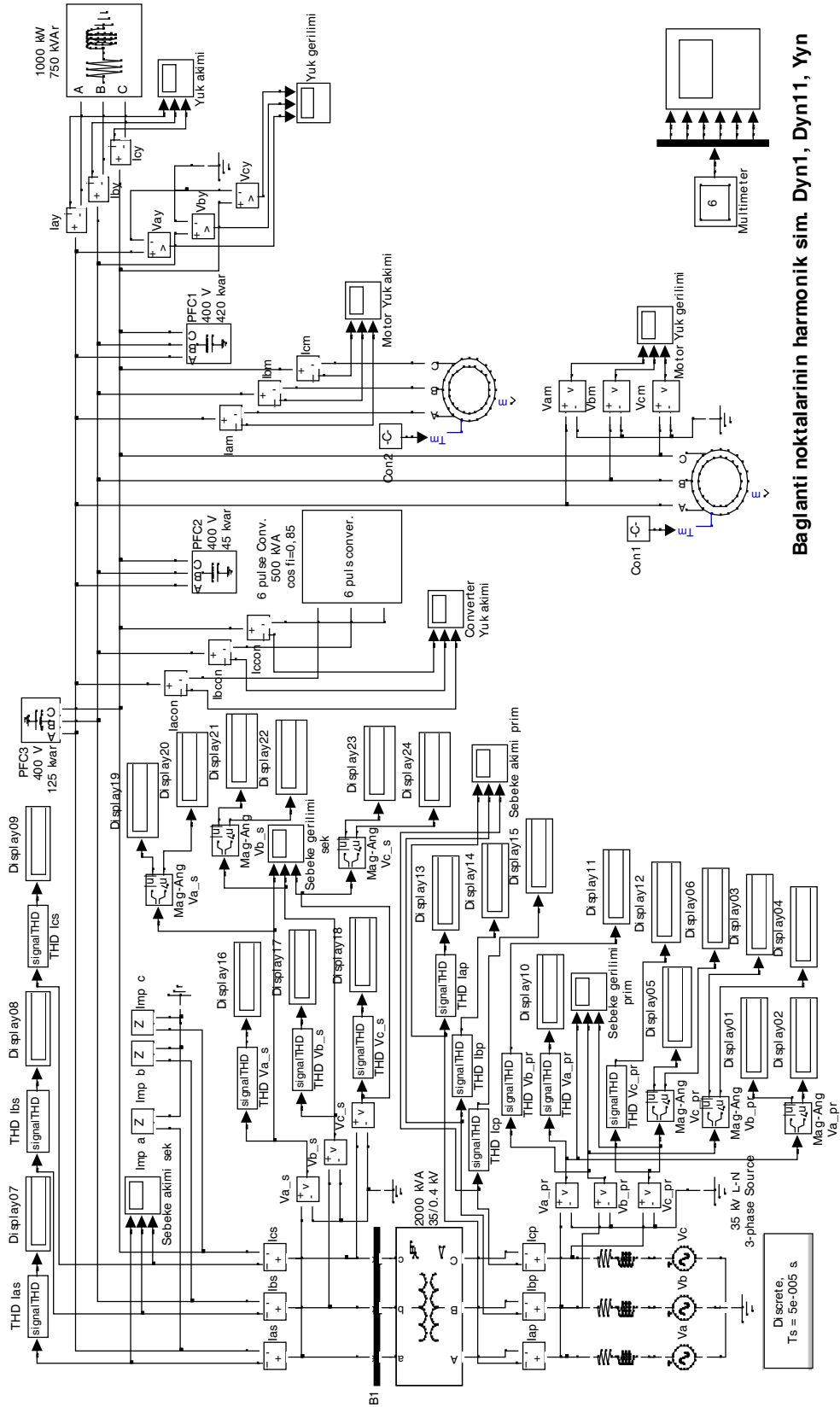
Çizelge 7'de Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörleri için yapılan simülasyon sonuçları toplu olarak görülmektedir. Çizelge 8'de ilgili bağlantı grupları için primer ve sekonderde oluşan toplam harmonik akım ve gerilim distorsiyonları verilmiştir.

Çizelge 7. Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı grupları için simülasyon sonuçları

		Dyn1	Dyn11	Yyn
Primer gerilim	Vap	34951.08∠-0.17° V	34916.05∠-0.15° V	34935.13∠-0.15° V
	Vbp	34951.08∠-120.17° V	34916.05∠-120.15° V	34935.13∠-120.15° V
	Vcp	34951.08∠119.83° V	34916.05∠119.85° V	34935.13∠-119.85° V
Sekonder gerilim	Vas	387.91∠23.11° V	371.87∠36.73° V	380.04∠-6.49° V
	Vbs	387.91∠-96.89° V	371.87∠-156.73° V	380.04∠-126.49° V
	Vcs	387.91∠143.11° V	371.87∠83.27° V	380.04∠113.51° V
Primer akım	Iap	21.28∠-16.15° A	23.22∠-33.52° A	21.10∠-25.93° A
	Ibp	21.28∠-106.03° A	23.22∠-153.52° A	21.10∠-145.93° A
	Icp	21.28∠-103.85° A	23.22∠86.48° A	21.10∠94.07° A
Sekonder akım	Ias	1855.93∠13.97° A	2024.89∠-63.47° A	1839.49∠-25.85° A
	Ibs	1855.93∠-106.03° A	2024.89∠176.53° A	1839.49∠-145.93° A
	Ics	1855.93∠133.97° A	2024.89∠56.53° A	1839.49∠94.15° A

Çizelge 8. Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplarının toplam harmonik akım ve gerilim distorsiyonları

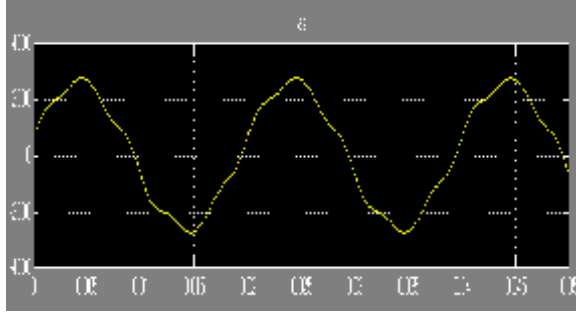
		Dyn1 (%)	Dyn11 (%)	Yyn (%)
Primer gerilim distorsiyon	THDVp	0.13	0.13	0.13
Sekonder gerilim distorsiyon	THDVs	5.21	5.43	5.32
Primer akım distorsiyon	THDIp	8.17	7.46	8.22
Sekonder akım distorsiyon	THDIs	8.20	7.5	8.26



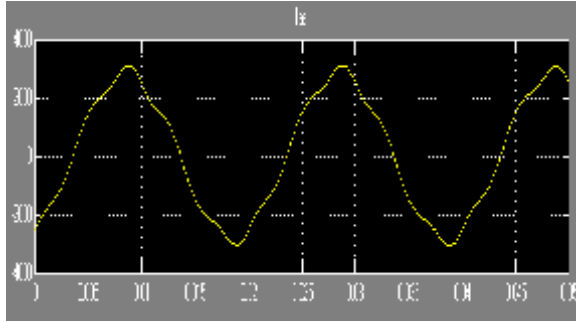
Baglanti noktalarini harmonik sim. Dyn1, Dyn11, Yyn

Şekil 2. Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörleri için referans simülasyon devresi

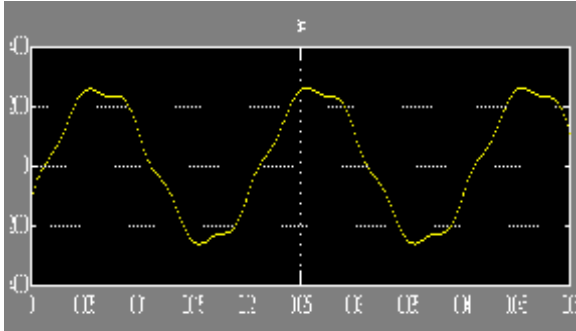
Simülasyon sonuçlarının alınması esnasında sistemin tamamı dengeli bir görünüm göstermektedir. Dolayısı ile dengeli olan üç faz içerisinde örneğin A fazı osiloskop sonuçlarının belirtilmesi yeterli olacaktır. Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı grupları için sekonder faz akımlarının değişimleri Şekil 3’de gösterilmiştir.



(a)



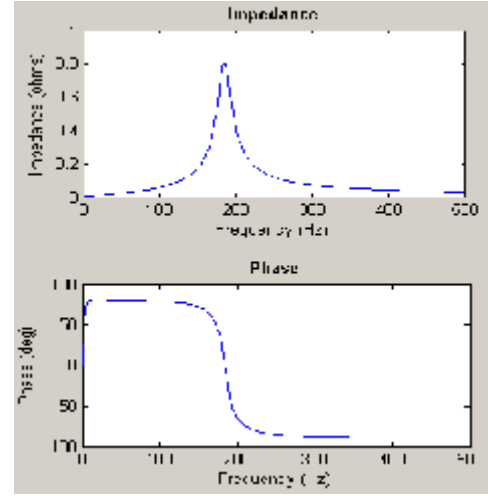
(b)



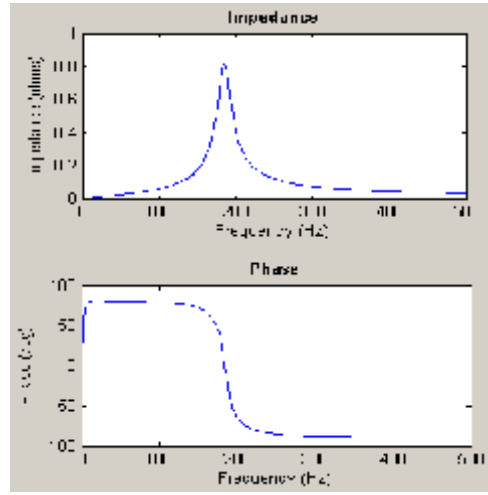
(c)

Şekil 3. Dyn1 (a), Dyn11 (b) ve Yyn (c) bağlantı gruplu transformatör için sekonder faz akımının değişimi

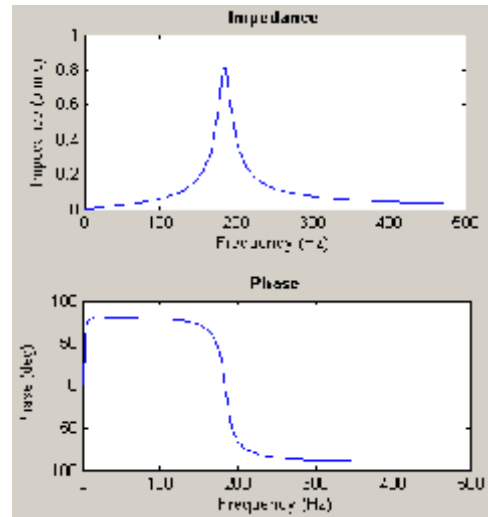
Devre empedansı ve faz açısının frekansla değişimi grafikleri 0-500 Hz frekans aralığında gözlemlenmiştir (Şekil-4). Bu grafikleri esasen faz açısının pozitif ve negatif olduğu iki bölümdeki değişimlerine göre incelemek gerekir. Faz açısının pozitif olduğu kısımda sistem endüktif bir davranış sergiler ve empedans değerinin referans simülasyon için artan nitelikte olduğu görülür. Faz açısının sıfır olması durumunda sistem tamamen rezistif kalacak ve rezonansa girme durumu oluşacaktır. Faz açısı sıfırdan negatife geçtiği andan itibaren sistem kapasitif davranır ve devre empedansı frekans artışıyla beraber azalmaktadır.



(a)



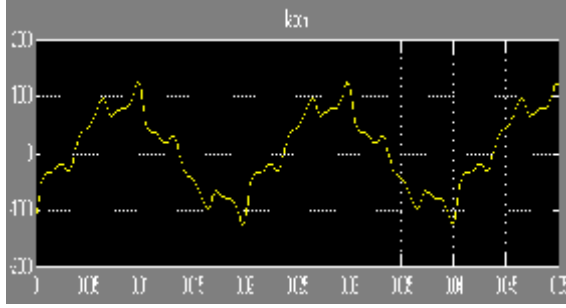
(b)



(c)

Şekil 4. Dyn1 (a), Dyn11 (b) ve Yyn (c) bağlantı gruplu transformatör için devre empedansı ve faz açısının frekansla değişimi

Simülasyonda modellenen harmonikli ana yük olan konvertörün faz akımı, Şekil-5’de gösterilmiştir.



Şekil 5. Konverter yükü faz akımının değişimi

#### 4. SONUÇLAR

Elektrik enerjisi geçen zamanla birlikte sürekli artan bir talep miktarıyla ortaya çıkmaktadır. Bu özelliği nedeniyle gelişim içerisinde olan bir piyasa olarak güç mühendislerinin çalışma alanında önemli bir yer oluşturmaktadır. Teknik ve ekonomik açıdan bakıldığında elektrik enerjisinin kullanım etkinliğinin ve kontrolünün artırılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Harmonikler güç sistemlerinin her kademesinde bulunabilmektedir. Böylece güç sisteminin her tarafına yayılarak bağlı ekipmanlarda önemli derecede tahribat riski oluşturmakta, kayıplarla beraber performans düşüklüğüne neden olmaktadır. Güç sistem harmoniklerinin yarattığı olumsuz etkilerden biri de dağıtım transformatörlerinde meydana gelmektedir.

Bu çalışmada oluşturulan güç sisteminin bileşenleri, harmonik üreten kaynaklardan seçilerek sistemde önemli bir harmonik kompozisyonu teşkil edilmiştir. Çalışmada referans simülasyon ile dağıtım transformatörlerinin Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörleri için bütün bileşenleri aynı kabul edilmiş ve simülasyonlar yapılarak sonuçlar alınmıştır. Belirtilen bu bağlantı grupları için dağıtım transformatörlerinin harmoniklere olan yaklaşımları görülmüştür.

Yapılan bu simülasyonlara göre ortaya çıkan sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür:

i. Sisteme harmonikli bir akış sağlayacak kısım sekonderde tasarlandığından sayısal değişimleri sekonder kısım için değerlendirmek daha gerçekçi olacaktır. Harmonikli yük akışının primere olan etkisinin transformasyon ile mümkün olduğu gözükse de bunun sekonder kadar etkin olduğunu söylemek mümkün değildir.

ii. Aynı harmonikli yük kompozisyonunda yapılan simülasyonlar sonucunda, harmonikli akımlardan dolayı Dyn11 bağlantılı dağıtım transformatörünün primer ve sekonder tarafında oluşan gerilim düşümleri, Dyn1 ve Yyn bağlantı gruplu transformatörlere göre daha fazla olmuştur. Dyn1 bağlantı grubunun sekonder tarafındaki gerilim 387 V iken, Dyn11 için bu 371 V ve Yyn için 380 V olmuştur. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere harmonikli akımların en fazla gerilim düşümüne neden olduğu grup Dyn11 bağlantı grubudur. Dyn11, bu

bağlantı grupları içerisinde harmonikli yük akışından gerilim düşümü olarak en fazla etkilenen grup olmuştur.

iii. Bu bağlantı gruplarını sekonder akımlar açısından değerlendirmek gerekirse, ki bu akıma yüklenme akımı demek doğru olur, en az yüklenen bağlantı grubu olarak Yyn görülmektedir. Yüklenme akımlarına bakıldığında Dyn1 için 1855 A, Dyn11 için 2024 A ve Yyn için 1839 A olmaktadır. Buradan görüldüğü üzere Dyn11 bağlantı grubu sistemdeki harmonikli akıştan dolayı en fazla yüklenen transformatör grubu olmaktadır. Böylece fazla yüklenmeden dolayı arızaya ve transformatör ömrünün kısılmasına en yakın bağlantı grubu olarak Dyn11 bağlantı grubu görülmektedir. Ayrıca bu durum primer tarafındaki akımlar için de geçerlidir.

iv. Simülasyonu distorsiyonlar açısından değerlendirmek gerekirse yoruma açık bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Bu durum yüklenen akımlarına bakıldığında sekonderde en fazla yüklenen Dyn11 bağlantı grubunda oluşan akım distorsiyonunun 7.5 en az olması, en az yüklenen Yyn bağlantı grubu için 8.26 en fazla olmasıdır. Bir yorum getirmek gerekirse, fazla yüklenme sistemde dolaşan harmonikli akımlar kadar transformatör grubunun sisteme akım vererek bunları karşılaması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla harmonik akım distorsiyonunun bu yüzden azaldığını söylemek uygun olabilir.

v. Faz açısının frekansla değişimi dikkate alındığında, Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu transformatörlerin tümünün  $f=184$  Hz’de rezonansa girebileceği gözükmektedir. Bu durum harmonikli yük kompozisyonu için Dyn1, Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplarının 3. ve 4. harmoniklere duyarlı olduğunu göstermektedir.

vi. Asenkron motorun kaynaktan çektiği akımlar Dyn1 bağlantı grubunda 80 A, Dyn11 bağlantı grubunda 76.69 A ve Yyn bağlantı grubunda 78.37 A olmaktadır. Burada yüklenmenin en fazla olduğu Dyn11 bağlantı grubunda motor yüklerinin harmonikli akıştan en fazla etkilendiklerini ve çalışma akımlarının azaldıklarını söylemek mümkündür.

#### 5. KAYNAKLAR

- 1) Driesen J., Belmans R. ve Hameyer K., The Computation of the Effects of Harmonic Currents on Transformers using a Coupled Electromagnetic-Thermal FEM Approach, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2, 720-725, 2000.
- 2) Santjer, F., Klosse, R., Influence of Transformers on Harmonics, Proc. EWEC, Spain, 2003.
- 3) Jayasinghe N.R., Lucas J.R., Perera, K.B.I.M., Power System Harmonic Effects on Distribution Transformers and New Design Considerations for K Factor Transformers, IEE Sri Lanka Annual Sessions, 2003.
- 4) Gumilang, S. H., A., Susililo, Effect of Power System Harmonic on Degradation Process of Transformer Insulation System, IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 261-264, 2009.
- 5) Makram, E. B., Thompson, R. L., Girgis, A.A., Effects of Transformer Models on The Voltage Variation of an Unbalanced Distribution System in the Presence of

- Harmonic Distortion, Electric Power Systems Research, 17, 199-207, 1989.
- 6) Hooman, E.M., Xu, W., Harmonic Cancellation Characteristics of Specially Connected Transformers, Electric Power Systems Research, 79, 1689-1697, 2009.
- 7) Masoum, M.A.S. Moses, P.S. Deilami, S., Load Management in Smart Grids Considering Harmonic Distortion and Transformer Derating, IEEE PES: Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 1-7, 2010.
- 8) Peşint M.A., Ürkmez A., Elektrik Makinaları II, MEB, İstanbul, 1987.
- 9) Sağlam, H., Dağıtım Transformatör- lerinin Bağlantı Gruplarına Göre Harmonik Simulasyonu, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2005.
- 10) Matlab/Simulink, Mathworks Inc., 2009.