

## ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRLERDE LİNEER VE NONLİNEER YÜKLERİN KAYIPLARA ETKİSİ

**Mustafa YAĞCI<sup>1\*</sup>**

**Abdullah ÜRKMEZ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu KONYA

<sup>2</sup> Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi KONYA

### Özet

Bu çalışmada bir fazlı transformatörün eşdeğer devresinden faydalanarak devre analizi tekniği ile harmonikli durumdaki transformatör parametrelerinin hesabına yönelik yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Bu çalışma her biri 500VA, 220/110 V, 50 Hz, mantel tipi bir fazlı transformatörlerin yıldız-yıldız bağlanmasıyla oluşturulan 1500VA'lık üç fazlı bir transformatör grubu kullanılmıştır. Deneysel verilerin elde edilmesi için donanımda kullanılmak üzere farklı elektriksel özelliklere sahip iki adet yük seçilmiştir. Transformatörlerin beslenmesi için ise, dalga şekli sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan gerilim kaynakları kullanılmıştır. Bu besleme ve yük tiplerinde transformatörlerin harmoniklerden etkileşimi, primer ve sekondere bağlanan iki harmonik analizör cihazı ile eş zamanlı ölçülmüştür. Microsoft-Excel programında eşdeğer devre elemanları her harmonik bileşen için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ölçülen ve hesaplanan değerlerden üç fazlı transformatörün primer ve sekonder devrelerinin bakır kayıpları, demir kayıpları ile transformatörün verimi harmonikli olarak hesaplanmıştır. Ölçüm ve hesaplamalar besleme gerilim kaynakları ve iki farklı yük durumu için ayrı ayrı yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca her bir durum için gerilim ve akımın toplam harmonik distorsiyon seviyeleri (THD) ve K faktörleri hesaplanmıştır.

---

\* Corrospending Author: Tel: +90-332-2232373, Fax: +90-332-2410185, E-Mail: [myagci@selcuk.edu.tr](mailto:myagci@selcuk.edu.tr)

**Anahtar Kelimeler:** Harmonikler, nonlinear yük, transformatör kayıpları, eşdeğer devre

## **THE EFFECT OF LINEER AND NONLINEER LOADS ON THE LOSSES UPON THREE PHASES TRANSFORMERS**

### **Abstract**

In this study , a new approach to the calculation of parameters in the harmonic state is proved by utilizing transformer equivalent circuit and using the circuit analysis technique. In the experiment equipment , the transformer in question is formed by the Yy0 connection of the transformer with one phase each of which is really 500VA , 220/110V 50Hz mantel type. Two loads with various electrical features in order to use in the equipment for obtaining experimental data. In these load types, the interaction of the transformers from the harmonics are simultaneously measured by two harmonics analysers connected to primary and secondary . In Microsoft – Excel programme, equivalent circuit components are separately calculated for each harmonic component . By means of measured and estimated values , copper losses and iron losses of primary and secondary circuit of the transformer with three phases and efficiencies of the transformer are calculated. All the measurements and calculations for supply voltage sources and two different loads are executed separately and results are compared .In addition, K factors for each the transformes with three phases and voltage and current of Total Harmonic Distortion (THD) are also obtained for each case .

**Keywords :** Harmonics, nonlinear load, transformer losses, equivalent circuit

## **1. Giriş**

Elektrik sistemlerinde kullanılan demir nüveli bobinler, sistemde harmoniklerin üretilmesine yol açarlar. Güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan transformatörler bilinen en eski nonlineer elemanlardandır. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmamasından, yani transformatör nüvesinin magnetik doyuma gitmesinden kaynaklanmaktadır. Doyuma giden transformatör nüvesinin mıknatıslanma karakteristiği lineer olmadığından transformatör primerine uygulanan sinüsoidal uyarma akımına rağmen transformatörün nüvesinde sinüsoidal akı oluşmamaktadır. Bundan dolayı transformatörün sekonder tarafına bağlanan kullanıcının gerilimi de harmonikli olacaktır [1,2,3].

Bir transformatörün yapım gücü, beslediği yüklerin aktif ve reaktif güç ihtiyaçlarına göre belirlenir. Transformatörün nonlineer yüklerle yüklenmesi (harmonikli yük) durumunda sargıların aşırı ısınmasını önlemek için, transformatör ya büyük boyutlandırılmalı veya işletmeye alınmış durumda ise, etiket gücünden daha düşük güçte çalıştırılmalıdır[4]. Transformatör oluşacak harmonikler göz önüne alınmadan anma gücünde yüklenirse, demir nüve ile sargılarda aşırı ısınmalar meydana gelir, bu yüzden transformatörün ömrü kısalmış ve beklenmedik arızalar oluşabilir. Bu arızaların sebebi ısı etkisi sonucu ortaya çıkan ek kayıplardır. Yüksek frekanslı bir harmonik akımı, etkin değeri düşük olsa bile önemli miktarda ek kayıplara sebep olmaktadır [5].

Ayrıca transformatör üzerinden şebekeye aktarılan gerilim ve akım harmonikleri şebekede çalışmakta olan diğer alıcıları etkilemektedir. Transformatörlerin yüke ve besleme geriliminin şekline göre akım ve gerilim harmoniklerini şebekeye aktarma özelliklerinin araştırılması bu yönden de önem kazanmaktadır. Demir nüvedeki akımın

değişmesiyle oluşan demir çekirdek kaybı yük akımından bağımsızdır. Demir nüve akı yoğunluğunun maksimum değeri frekansa ve transformatör saçının magnetik özelliklerine bağlıdır. İlave çekirdek kayıpları ile doymaya engel olmak amacıyla transformatörün tasarımında normalden düşük akı yoğunluğu esas alınır. Bu da doğal olarak transformatör boyutlarını ve maliyetini yükseltir[6].

Transformatörlerin yüke göre davranışının doğru olarak bilinmesi transformatör imalatçıları için önem taşır bu yönde yapılan çalışmalar transformatör eşdeğer devrelerinin teorik olarak elde edilmesine zemin hazırlamıştır. Eşdeğer devre modeli ile transformatörün çeşitli çalışma şartlarında çektiği akım, gerilim, primer ve sekonder bakır ve demir kayıpları, verim gibi bütün önemli elektriksel büyüklükler hesaplanabilmektedir [7].

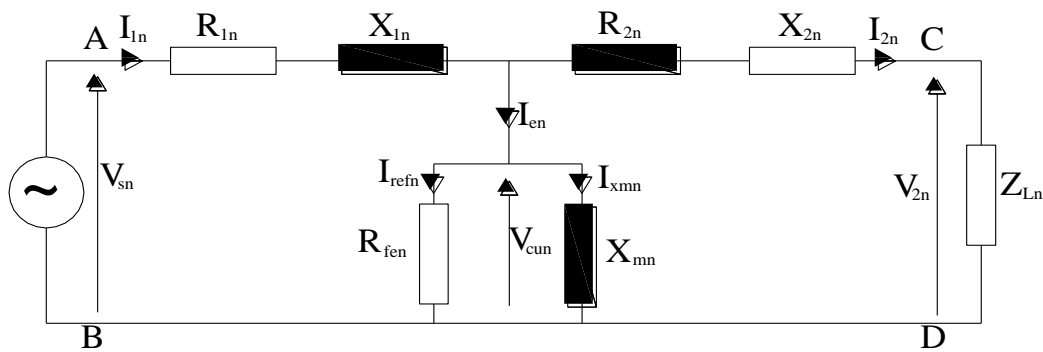
Bu çalışmada transformatörün lineer ve lineer olmayan eşdeğer devre modelleri üzerinde durulmuştur. Transformatörün eşdeğer devresinden faydalanarak devre analizi tekniği ile harmonikli durumdaki parametrelerin hesabına yönelik yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur[8]. Farklı yüklerle yüklenen transformatörün harmoniklerden etkileşimi primer ve sekondere bağlanan iki harmonik analizör cihazı ile eşzamanlı olarak ölçülmüştür. Microsoft-excel programı kullanılarak 15. harmoniğe (15. harmonik dahil) kadar yapılan ölçmeler değerlendirilmiş ve eşdeğer devre elemanları her bir harmonik bileşen için ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu şekilde elde edilen eşdeğer devreler ve ölçüm değerleri yardımıyla transformatörlerin K faktörleri, THD değerleri, bakır ve demir kayıpları ve verimleri elde edilmiştir. Ayrıca akım ve gerilimin harmonik dağılımı çıkartılmış ve böylelikle transformatörlerin çalışmaları üzerine olan etkileri ortaya konmuştur.

## 2. Sistemin Analizi Ve Modellenmesi

Transformatörlerin primer ve sekonder sargı dirençlerinden faydalanarak harmonik frekanslarda çeşitli kaynak ve yük tipleri için doğrusal olmayan parametrelerinin ( $R_{fe}$  ve  $X_m$ ) elde edilmesi mümkündür.

Bir transformatörün primer sekonder ve yük devre sabitlerinin birlikte gösterildiği eşdeğer devre Şekil 1'de görülmektedir. A-B ve C-D noktaları ölçme yapılacak uçları göstermektedir. Primer ve sekonder sargı dirençleri  $R_1$ ,  $R_2$  ile kaçak reaktansları  $X_1$ ,  $X_2$  değerlerini belirlemek için transformatör kısa devre deneyinden faydalanılır.  $R_1$ ,  $R_2$  dirençleri ile  $X_1$ ,  $X_2$  reaktansları harmonik frekanslarla değişim göstermektedir [1,7].

Şekil 1' deki transformatör eşdeğer devresinde kaynak empedansı  $Z_s$ , kaynak gerilimi  $V_s$ , primer akımı  $I_1$ , sekonder akımı  $I_2$ , yük empedansı  $Z_L$ , sekonder gerilimi  $V_2$ , eşdeğer devre dirençleri  $R_1$  ve birinci tarafa indirgenmiş  $R_2'$ , eşdeğer kaçak reaktanslar  $X_1$  ve  $X_2'$ , paralel kol elemanları nonlineer demir direnci( $R_{fe}$ ) ve nonlineer mıknatıslama reaktansıdır( $X_m$ )



Şekil 1. Bir transformatörün yüklü çalışma eşdeğer devresi

Transformatör kayıpları ile yükten alınan gücün toplamı transformatöre verilen güce eşittir. Buna göre transformatörün temel güç dengesi denklemi yazılırsa;

$$R_{sn}.I_{1n}^2 = R_{1n}.I_{1n}^2 + P_{fen} + \frac{R_{2n}.u_n^2.I_{2n}^2}{u_n^2} + \frac{R_{Ln}.u_n^2.I_{2n}^2}{u_n^2} \quad (1)$$

elde edilir. Gerekli kısaltmalar yapıldığında (1) denklemini,

$$R_{sn}.I_{1n}^2 = R_{1n}.I_{1n}^2 + P_{fen} + R_{2n}.I_{2n}^2 + R_{Ln}.I_{2n}^2 \quad (2)$$

veya

$$P_{fen} = R_{sn}.I_{1n}^2 - R_{1n}.I_{1n}^2 - R_{2n}.I_{2n}^2 - R_{Ln}.I_{2n}^2 \quad (3)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada  $P_{fe}$  ; aktif çekirdek kayıp gücüdür.(3) ifadesinde gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$P_{fen} = (R_{sn} - R_{1n}).I_{1n}^2 - (R_{2n} + R_{Ln}).I_{2n}^2 \quad (4)$$

sonucu elde edilir.

Benzer şekilde;

$$X_{sn}.I_{1n}^2 = X_{1n}.I_{1n}^2 + Q_{xmn} + \frac{X_{2n}.u_n^2.I_{2n}^2}{u_n^2} + \frac{X_{Ln}.u_n^2.I_{2n}^2}{u_n^2} \quad (5)$$

eşitliği geçerlidir. Yine bu durumda da gerekli kısaltmalar yapıldığında denklem;

$$X_{sn}.I_{1n}^2 = X_{1n}.I_{1n}^2 + Q_{xmn} + X_{2n}.I_{2n}^2 + X_{Ln}.I_{2n}^2 \quad (6)$$

veya

$$Q_{xmn} = X_{sn}.I_{1n}^2 - X_{1n}.I_{1n}^2 - X_{2n}.I_{2n}^2 - X_{Ln}.I_{2n}^2 \quad (7)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada  $Q_{xm}$ ; mıknatıslama reaktansı kayıp gücüdür. (7)

ifadesinde gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$Q_{xmn} = (X_{sn} - X_{1n}).I_{1n}^2 - (X_{2n} + X_{Ln}).I_{2n}^2 \quad (8)$$

sonucu elde edilir.

Şimdi (4) ve (8) ifadelerinden;

$$tg\varphi_n = \frac{Q_{xmn}}{P_{fen}} \quad (9)$$

elde edilir ve bu eşitlikten  $\cos\varphi$  ve  $\sin\varphi$  için gerekli ifadeler bulunabilir.

Transformatör çekirdek gerilimi,

$$\bar{V}_{cn} = \bar{V}_{sn} - (R_{1n} + jX_{1n}) \cdot \bar{I}_{1n} \quad (10)$$

ifadesinden elde edilir. (4),(10) ifadelerinden paralel kolda  $R_{fe}$  direncinden geçen akım

$$I_{rfe} = \frac{P_{fen}}{V_{cn} \cdot \cos\varphi_n} \quad (11)$$

şeklinde bulunur ve ayrıca

$$P_{fen} = R_{fen} \cdot I_{rfe}^2 \quad (12)$$

ifadesini kullanarak  $R_{fen}$  demir direnci aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$R_{fen} = \frac{P_{fen}}{I_{rfe}^2} \quad (13)$$

Aynı şekilde;

$$I_{xmn} = \frac{Q_{xmn}}{V_{cn} \cdot \sin\varphi_n} \quad (14)$$

İfadesinden;

$$Q_{xmn} = I_{xmn}^2 \cdot X_{mn} \quad (15)$$

bulunur. Bu ifadeden  $X_m$  mıknatıslama reaktansı

$$X_{mn} = \frac{Q_{xmn}}{I_{xmn}^2} \quad (16)$$

şeklinde elde edilir.

Bulunan bu ifadelerle transformatör değişik kaynaklarla beslenerek farklı yükler bağlandığında eşdeğer devre elemanlarının her birinin harmonikli olarak hesaplanabileceği görülür.

### **3. Materyal ve Metot**

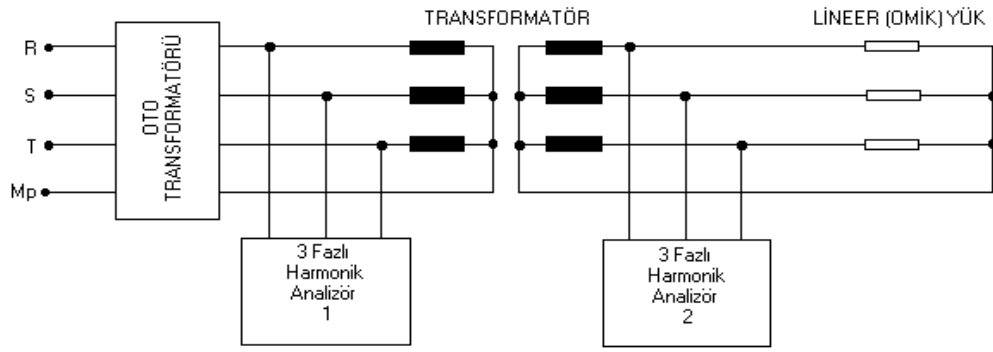
Ölçmeler için, uygulamada sık karşılan her biri 500 VA'lık bir fazlı transformatörlerden oluşan üç fazlı 1500VA'lık Yy0 bağlı bir transformatör grubu kullanılmıştır. Ayrıca transformatörlere bağlanan yüklerin değişik karakterli olmasından dolayı deneylerde iki ayrı yük çeşidi seçilmiştir. Bunlar lineer yük, nonlinear yükür. Transformatörlerin beslendiği kaynaklar ise normal sinüs şekilli şebeke gerilimi veya kesintisiz güç kaynaklarında kullanılan inverterlerin (Omron, 380 V. 5 A) çıkışından alınan sinüsoidal olmayan gerilimdir. Deneylerde bu iki tip gerilim ile üç fazlı transformatör grubu beslenmiştir.

İki harmonik analizör cihazı (ION 7600) transformatörün hem primer hem de sekonder sargı harmonik akım ve gerilimlerini eşzamanlı olarak ölçmek için kullanıldı. Lineer yük durumu için kademeli omik dirençler (4x250 W.)kullanılırken, nonlinear yük durumu için sekonder sargı çıkışlarına birer diyot (25 A,500 V) yükten önce devreye seri bağlanmıştır. Deneylerde ayrıca besleme gerilimini sabit tutmak için üç fazlı bir oto transformatörü (380/0-400 V) kullanılmıştır. Deney yapılacak transformatör, gerçekte her biri 500VA, 220/110 V, 50 Hz, mantel tipi bir fazlı transformatörlerin yıldız-yıldız bağlanmasıyla oluşturulan üç fazlı 1500VA'lık bir transformatör grubudur.

#### **3.1 Transformatörün sinüsoidal beslemede lineer yükle yüklenmesi deney düzeneği**

Sinüsoidal kaynaktan beslenen üç fazlı yıldız-yıldız bağlı transformatör grubunun lineer yükte çalıştırılmasına ait deney bağlantı şeması Şekil 2'de görülmektedir.





Şekil 2. Sinüsoidal Besleme Gerilimi Lineer Yük Deney Bağlantı Şeması

Harmoniklerin elde edilmesi için kurulan deney donanımında lineer sekonder yükü, omik dirençlerin yıldız bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Oto transformatörü ile primer besleme gerilimi sabit tutulmuştur. Ölçüm sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.

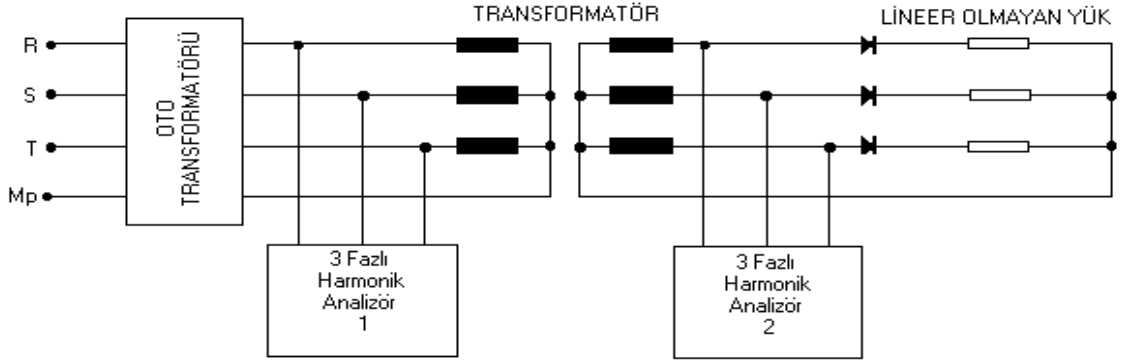
Tablo1. Lineer Yükte Transformatörün Harmonik Bileşenlerine Ait Ölçülen Değerler

h	$V_{1h}$ (V)	$I_{1h}$ (A)	$\Phi_{V1h}$	$\Phi_{I1h}$	$V_{2h}$ (V)	$I_{2h}$ (A)	$\Phi_{2h}$	$P_{2h}$ (W)
1	222	2,2	0	-6,5	107,1	4,19	0	448,8
3	1,6	0,1	75	-62	0,77	0,031	-5	0,0233
5	1,4	0,0242	-160	-89	0,72	0,028	2	0,0197
7	1,1	0,0154	6,9	12,6	0,7	0,025	-2	0,0174
9	1,2	0,0132	-130	-128	0,6	0,022	0	0,0129
13	0,3	0	33		0	0		0

Burada,  $\Phi_{V1h}$ , primer gerilimi harmonik açısı;  $\Phi_{I1h}$ , primer akımı harmonik açısı;  $\Phi_{2h}$ , harmonikli yük açısıdır.

### 3.2 Transformatörün sinüsoidal beslemede nonlineer yükle yüklenmesi

Sinüsoidal kaynaktan beslenen üç fazlı yıldız-yıldız bağlı çekirdek tipi transformatörün nonlineer yükte çalıştırılmasına ait deney bağlantı şeması Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Sinüsoidal Gerilimde Nonlinear Yük Deney Bağlantı Şeması

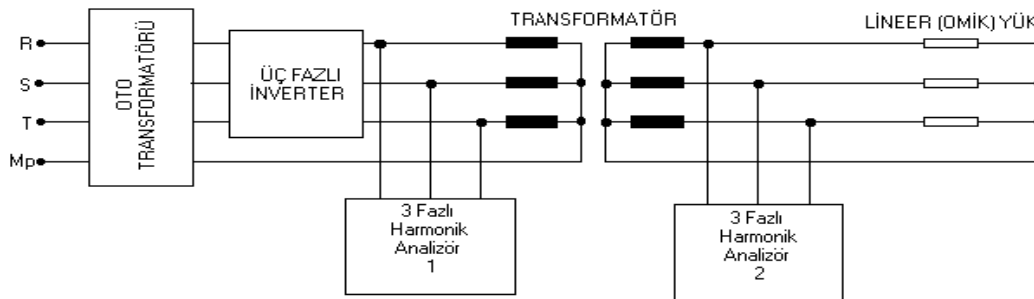
Harmoniklerin elde edilmesi için kurulan deney donanımında lineer olmayan üç fazlı yıldız bağlı sekonder yükü omik dirençlerle uygun diyotların seri bağlanması suretiyle oluşturulmuştur. Lineer yükte kullanılan omik dirençler aynı değerlerde kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Nonlinear yükte transformatörün harmonik bileşenlerine ait ölçülen değerler

h	V <sub>1h</sub> (V)	I <sub>1h</sub> (A)	Φ <sub>V1h</sub>	Φ <sub>I1h</sub>	V <sub>2h</sub> (V)	I <sub>2h</sub> (A)	Φ <sub>2h</sub>	P <sub>2h</sub> (W)
1	222	1,76	0	-46,6	108,7	2,09	1	226,8
2	0,9	1,3	100	-85	2,84	0,868		
3	2,1	0,5	88	-76	1,69	0,038	29	0,055
4	0,3	0,4	113	-75,6	0,79	0,173	-150	0,117
5	1,3	0,1	-146	-71	0	0		0
6	0	0,1		-76	0,22	0,57	-140	0,009
7	1,3	0,0105	7,5	5,2	0,7	0,023	-7	0,015
8	0	0,0105	-98			0		0
9	1,3	0,0123	-119	119	0	0		0
10	0	0,4		-153				
12	0	0,0105		-89	0	0		0
14	0	0,0105		-70				
15	0,4	0	-98					

### 3.3 Transformatörün sinüsoidal olmayan beslemede lineer yükte yüklenmesi

Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen üç fazlı yıldız-yıldız bağlı transformatör grubunun lineer yükte çalıştırılmasına ait deney bağlantı şeması Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Sinüsoidal Olmayan Beslemede Lineer Yük Deney Bağlantı Şeması

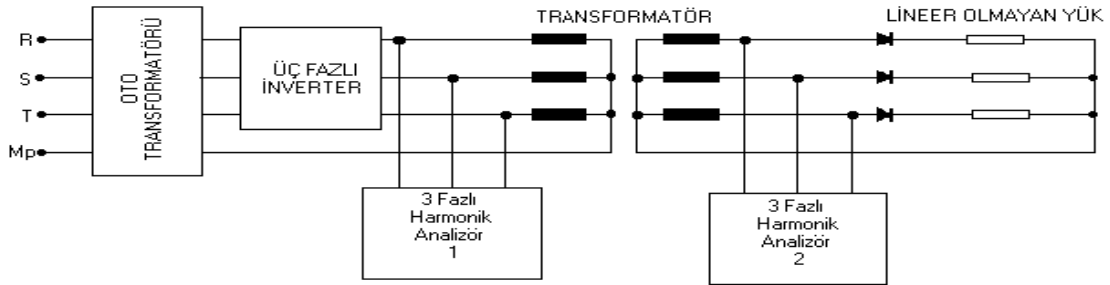
Deney donanımında lineer sekonder yükü omik dirençlerin yıldız bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Sinüsoidal olmayan besleme gerilimi için ise üç fazlı inverter kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Sinüsoidal olmayan besleme, lineer yükte transformatörün harmonik bileşenlerine ait ölçülen değerler

h	V <sub>1h</sub> (V)	I <sub>1h</sub> (A)	Φ <sub>V1h</sub>	Φ <sub>I1h</sub>	V <sub>2h</sub> (V)	I <sub>2h</sub> (A)	Φ <sub>2h</sub>	P <sub>2h</sub> (W)
1	207	2,1	0	-3,6	99,2	3,88	0	385
2	4,1	0,0168	26	152	0,14	0,005		0
3	21	0,2	-159	-153	13,05	0,506	0	6,605
4	8,5	0,0252	9	143	0,2	0,007		
5	8	0,1	-56	-22	0,93	0,035	0	0,0323
6	5,5	0,021	-101	70	0,26	0,01	0	0,00246
7	9,2	0,0315	-68	-111	0,91	0,036	0	0,03239
8	3,9	0,01	-6	14	0,04	0		0
9	11	0,0693	-176	-161	2,98	0,115	0	0,342
10	11	0,025	-144	-160	0,24	0,009	2	0,002
11	5,7	0,0294	-144	-160	1,61	0,063	0	0,1
12	6,8	0,0168	76	77	0,12	0,004		0
13	7	0,0189	116	84	1,29	0,05	-1	0,0636
14	9,3	0,0231	79	23				
15	6,9	0,0168	-95	172	0,97	0,038	-1	0,0361

### 3.4 Transformatörün sinüsoidal olmayan beslemede nonlinear yükle yüklenmesi

Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen üç fazlı yıldız-yıldız bağlı transformatörün lineer olmayan yükte çalıştırılmasına ait deney bağlantı şeması Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 5. Sinüsoidal olmayan besleme gerilimi nonlinear yük deney bağlantı şeması

Harmoniklerin elde edilmesi için kurulan deney donanımında lineer olmayan üç fazlı yıldız bağlı sekonder yükü omik dirençlerle uygun diyotların seri bağlanması suretiyle oluşturulmuştur. Ölçüm sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve nonlinear yüklü transformatörün temel ve harmonik bileşenlerine ait ölçülen değerler

h	V <sub>1h</sub> (V)	I <sub>1h</sub> (A)	Φ <sub>V1h</sub>	Φ <sub>I1h</sub>	V <sub>2h</sub> (V)	I <sub>2h</sub> (A)	Φ <sub>2h</sub>	P <sub>2h</sub> (W)
1	205	1,85	0	-53	102	2,03	2	206,9
2	5,3	1,4	164	-78	3,04	0,475	101	0,262
3	58	0,9	69	-88	27,8	0,529	-4	14,68
4	5,4	0,5	-168	-24	2,09	0,254	155	0,477
5	7,5	0,3	151	-59	0,99	0,044	-1	0,0437
6	5,2	0,1	157	-97	0,68	0,058	-153	0,0345
7	10,7	0,1	63	157	1,43	0,017	6	0,0237
8	12,3	0,1	-73	102	0,83	0,056	93	0,0022
9	8,6	0,1	-174	135	4,59	0,087	-3	0,396
10	6,9	0,1	-39	163	0,14	0,042		0
11	7,3	0,0129	174	17	1,31	0,019	-26	0,0217
12	5,3	0,024	82	-27	0,26	0,026	95	0,00052
13	8,2	0,006	-179	-155	0,38	0,013	23	0,00454
14	11	0,0185	166	-24	0,24	0,019	84	0,000467
15	9,4	0,0351	172	19	1,67	0,028	-8	0,0461

#### 4. DeneY Sonuçlarının Deęerlendirilmesi

##### 4.1 K Faktörü Hesaplamaları

Bir fazlı transformatörlerden oluşan üç fazlı transformatör grubu (1500VA) için K faktör hesaplamaları tablo 5’ de görölmektedir.

Tablo 5. İki ayrı besleme gerilimi için sekonder tarafı “K” faktörleri

<b>Sinüsoidal Besleme gerilimi</b>	
<b>Yük Tipi</b>	<b>K faktörü</b>
Lineer	1
Lineer olmayan	3,577
<b>Sinüsoidal olmayan besleme gerilimi</b>	
Lineer	1,289
Lineer olmayan	2,157

Sinüsoidal besleme lineer olmayan yük tipi için örnek K faktörü hesaplaması:

Tablo 5’den;

$$K = \frac{\sum I_n^2 \cdot n^2}{\sum I_n^2}$$

formülüyle hesaplanarak : K = 3.577 olarak bulunmuştur.

K faktörlü transformatörler kullanılacaksa en yakın üst tamsayı değeri K = 4 değeri transformatör seçilmelidir [9].

Standart transformatör kullanılacaksa transformatörün yüklenebileceği en yüksek akım oranı  $I_{max}$  için  $P_{EC-R}$  değeri gereklidir [9].  $P_{EC-R}$  değeri eddy-akım kayıp katsayısıdır[4].

Bu değer Ek 1’de Tablo 10’da verilmiştir. Buradan  $P_{EC-R} = 0,08$  alınır.

$$I_{max} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \cdot P_{EC-R}}} = \sqrt{\frac{1 + 0,08}{1 + 3,577 \cdot 0,08}} = 0,885 \text{ pu}$$

Buna göre standart transformatör kullanılacaksa transformatör çalışma gücü anma değerinin %88,5’ne düşürülmelidir. Yani 1,5 kVA’lık transformatör en fazla 1,3275 kVA’lık bir yükleme için kullanılabilir.

#### 4.2 Akım ve gerilimin THD değerleri

Üç Fazlı transformatör (1500 VA) grubuna ait gerilim ve akımın THD değerleri

Tablo 6. İki ayrı besleme gerilimi için sekonder THD değerleri

<b>Sinüsoidal besleme gerilimi</b>		
<b>Yük Tipi</b>	<b>Gerilim THD %</b>	<b>Akım THD %</b>
Lineer	13	1,2
Lineer olmayan	3,19	50
<b>Sinüsoidal olmayan besleme gerilimi</b>		
Lineer	13,7	13,6
Lineer olmayan	28	37,8

Tablo 7.İki ayrı besleme gerilimi için primer THD değerleri

<b>Sinüsoidal besleme gerilimi</b>		
<b>Yük Tipi</b>	<b>Gerilim THD %</b>	<b>Akım THD %</b>
Lineer	1,2	4,4
Lineer olmayan	1,5	84
<b>Sinüsoidal olmayan besleme gerilimi</b>		
Lineer	39,3	26,2
Lineer olmayan	45	81

Tablo 6 ve 7’de görüldüğü gibi hem primer tarafta hem de sekonder tarafta akım THD değerleri lineer olmayan (nonlinear) yük şartlarında en yüksektir. Gerilimin THD değerleri de yine nonlinear yük işletmesinde daha yüksektir.

Tablo 8. Sinüsoidal besleme geriliminde primer ve sekonder için ölçülen ve

hesaplanan değerler

Yük Tipi	V <sub>1</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	V <sub>2</sub> (V)	I <sub>2</sub> (A)	P <sub>cutp</sub> (W)	P <sub>fe</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	Verim
Lineer	222,01	2,20	107,10	4,19	25,49	11,26	448,87	0,925
Nonlineer	222,023	2,31	108,75	2,34	12,32	32,28	226,99	0,836

Tablo 9. Sinüsoidal olmayan besleme geriliminde primer ve sekonder için bulunan değerler

Yük Tipi	V <sub>1</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	V <sub>2</sub> (V)	I <sub>2</sub> (A)	P <sub>cutp</sub> (W)	P <sub>fe</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	Verim
Lineer	209,94	2,114	100,13	3,91	23,74	30	392,21	0,879
Nonlineer	215,18	2,56	105,92	2,17	15,60	84,53	222,90	0,69

Üç fazlı transformatör grubunun boş çalışma ve kısa devre koşullarında hem sinüsoidal ve hem de sinüsoidal olmayan kaynaklarla beslenerek 16. harmoniğe kadar olan ölçümleri yapılmıştır. Sinüsoidal beslemeler için doğrudan şebeke geriliminden faydalanılırken; sinüsoidal olmayan besleme gerilimleri için ölçme donanımında bir ve üç fazlı inverterler kullanılmıştır. Bu deney sonuçlarının değerlendirilmesinde üç fazlı transformatör grubunda demir nüvelerin birbirinden bağımsız olmalarından dolayı her bir fazın ölçüm değerleri eşit olduğu görülmüştür.

Üç fazlı 1500 VA'lık transformatör grubunda, anma gücünde toplam bakır kayıpları sinüsoidal besleme gerilimi ve lineer yük durumunda 25,49 W. olarak en büyük değerdedir(Tablo 8). Bakır kayıplarının yine yük dirençleri sinüsoidal besleme gerilimindeki değerlerinde tutularak yapılan sinüsoidal besleme gerilimi ve nonlineer yük deneyinde 12,32W olarak en düşük değerde olduğu Tablo 8'den görülmektedir.

Bakır kayıpları transformatörün primer ve sekonder sargılarından geçen akımın karesiyle orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca akım harmoniklerinin etkisiyle sargılarda oluşan omik direnç artışı bilhassa harmonikleri fazla olan sinüsoidal olmayan besleme

ve nonlinear yükte toplam bakır kayıplarını arttırmaktadır. Ancak bakır kayıplarının bu artışı ölçümü yapılan transformatörlerin bakır sargı iletkenlerinin kesitleri küçük olduğundan ve harmoniklerin mertebesi yükseldikçe akım harmoniklerinin değerleri de azaldığından düşük düzeyde kalmıştır.

Üç fazlı 1500 VA'lık transformatör grubunun K faktör değerleri ise sinüsoidal besleme gerilimi ve lineer olmayan yükte  $K=3,577$  olarak, sinüsoidal olmayan besleme geriliminde ve lineer olmayan yükte  $K=2,157$  (Tablo 5) olarak bulunmuştur.  $K=3,577$  çalışma durumu için bu transformatör grubunun çalışma gücü anma gücünün % 88,5 değerine düşürülmelidir. 1,5 kVA'lık grup en fazla 1,3275 kVA ile yüklenmelidir.

Tablo 8 ve 9'dan görüldüğü gibi en büyük demir kayıpları sinüsoidal olmayan besleme gerilimi ve nonlinear yükte ortaya çıkmaktadır (84,53 W). Nonlinear yükte şebeke akımında çift sayılı harmonikler oluşur. Bu ise primer ve sekonder sargı gerilimlerinde oluşan harmoniklerin derecelerinin ve genliklerinin büyük değerlere ulaşması anlamına gelir. Zira demir kayıplarını oluşturan bileşenlerden biri olan Fuko kayıpları  $P_e=k.f^2.B^2$  frekansın (harmonik derecesinin) karesiyle artarken diğer ikinci bileşen olan Histerezis kayıpları da  $P_h=\xi.f.B^{1.6}$  frekansla doğru orantılı olarak artmaktadır. Örneğin; transformatör anma geriliminde ve nonlinear yükte sinüsoidal besleme ile sinüsoidal olmayan beslemeler arasında yaklaşık 2,6 kat artış gözükmektedir.

Transformatörün verimi sinüsoidal olmayan besleme gerilimi ve nonlinear yük durumunda en düşük değerdedir (% 69). Bu da nonlinear yükte kayıpların arttığını bunun sonucu olarak verimin düştüğünü göstermektedir. En yüksek verim ise sinüsoidal besleme, lineer yük durumunda meydana gelmektedir (%92.5).



## **5. Sonuçlar**

Günümüzde teknolojinin gelişimine uygun olarak güç tüketimini en düşük düzeye indirmek ve verimi yükseltmek için hemen hemen tüm motor ve güç kontrol sistemlerinde güç elektroniği ile çalışan kontrol cihazları kullanılmaktadır. Bu cihazların çalışma prensibi gereği ürettikleri akım ve gerilim harmoniklerinin etkileri diğer elektronik cihazları çalışamayacakları seviyeye kadar zorlamaktadır. Harmoniklerin filtrelerle önlenmesinin yanında harmoniklere sebep olan devre elemanlarının da özenle belirlenmesi ve incelenmesi gerekmektedir.

Harmonik gerilim ve akımlar üç fazlı bir transformatörün kendi normal çalışmasını da etkilemektedir. Harmonik mertebesine ve distorsiyon seviyesine göre özellikle demir ve bakır kayıpları arttığından transformatör anma gücüyle yüklenemez, dolayısıyla verimi kayda değer şekilde düşer. Anma gücünün altında çalıştırılan transformatörün verimi de düşeceğinden işletme giderleri artacaktır. Bu ise ekonomik yönden de istenmeyen bir durumdur.

Üç fazlı transformatörün besleme geriliminin dalga şekline ve sekonderine bağlanan yükün cinsine göre şebekeye olan etkisi de değişik olmaktadır. Sinüsoidal şebeke gerilimi ile yapılan besleme ve lineer yükte gerilimin ve akımın THD oranı % 5 sınır değerinden küçük olduğu halde, aynı besleme geriliminde lineer olmayan yüklerle yüklendiğinde gerilim harmoniğinin sınır değerinin içinde kaldığı ancak akımın THD değerlerinin hem sekonder hem de primer için % 5'in çok üzerinde olduğu görülmektedir. Şebeke için bunun zararlı etkisi mutlaka giderilmelidir.

## **Kaynaklar**

- [1] Hwang M.S, Grady W.M, Sanders HW. Distribution transformer winding losses due to non-sinusoidal currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1987; 2:140–146
- [2] Yacamini,R., “Harmonic caused by the various types of transformer saturation. *Int.Jou. Elect.Enging.Educ.*,1982,Vol.19,157-167
- [3] H. W. Dommel, A. Yan, Shi Wei, "Harmonics from Transformer Saturation", *IEEE Trans. Power Delivery*, Apr 1986, Vol.1, No.2, , pp.209~215
- [4] E.F.Fuchs, D.Yildirim and W.M.Grady, “Measurement of eddy-current loss coefficient PEC-R, derating of single-phase transformers, and comparison with K-factor approach,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Jan 2000, vol. 15, pp:148 – 154,
- [5] D.Yildirim and E.F Fuchs, “Measured transformer derating and comparison with harmonic loss factor (FHL) approach,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Jan. 2000, vol. 15, pp:186 – 191,
- [6] T. D. Stensland, E. F. Fuchs,W. M. Grady, M. T. Doyle, Modeling of magnetizing and core-loss currents in single-phase transformers with voltage harmonics for use in power flow,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Apr. 1997.vol. 12, no. 2, pp. 768–774,
- [7] Taci, M.S, Ölçme ve analitik yaklaşımın bir arada kullanılmasıyla bir transformatörün parametrelerinin nonlinear biçimde elde edilmesi, Doktora tezi,Yıldız Teknik Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999
- [8] Yağcı M., Güç transformatör kayıplarına harmoniklerin etkisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [9] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O., *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.

#### **EK-1**

Bu konuda yapılan araştırmalar sonucunda çeşitli değerler elde edilmiş olup Tablo

10' da  $P_{EC-R}$  'nin değeri çeşitli tip ve güçteki transformatörler için verilmiştir.

Tablo 10. Transformatörün anma değerinin düşürülmesi için kullanılan  $P_{EC-R}$  için tipik değerler

Tip	kVA	Gerilim	% $P_{EC-R}$
Kuru tip(Dry)	$\leq 1000$	480-V	% 3-8
	$\geq 1500$	5-kV	% 12-20
Yağlı(oil-filled)	$\geq 1500$	15-kV	% 9-15
	$\leq 1000$	480V	% 1
	2500-5000	tanımlanmamıştır	% 1-5
	>5000	tanımlanmamıştır	% 9-15