

T.C.

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİK ÜRETEN YÜKLERE AİT
YAYGIN OLARAK KULLANILAN
MODELLERİN UYGULAMASI**

**Özgür KILIÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

GEBZE

2006

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİK ÜRETEN YÜKLERE AİT
YAYGIN OLARAK KULLANILAN
MODELLERİN UYGULAMASI

Özgür KILIÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. M. HAKAN HOCAOĞLU

GEBZE
2006

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: Harmonik Üreten Yüklere Ait Yaygın Olarak Kullanılan Modellerin Uygulaması

YAZAR ADI : Özgür KILIÇ

Günümüzde, yarı iletken teknolojisi temelli cihazların kullanımındaki artışa bağlı olarak akım ve gerilim dalga formundaki bozulmalar güç sistemlerinin verimli işletilmesi bakımından olumsuz değerlere ulaşmıştır. Bozulmuş akım ve gerilim dalga formunun bulunduğu güç sistemlerinin planlanması ve dizaynında harmonik domen temelli analizler önem kazanmıştır. Harmonik domenindeki analizlerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ise güç sistemi elemanlarının gerçeğe en yakın biçimde modellenmesine bağlıdır.

Bu çalışmada; harmonikler ve güç sistemlerine etkilerine genel bir bakış yapılmış, Sabit Akım Kaynağı ve Norton modelleri incelenmiş, test sistemi tanıtılmış ve bu test sisteminde yapılan ölçümlere göre yük modelleri oluşturulmuştur. Harmonik yük modelleri olan Sabit Akım Kaynağı ve Norton Modelinin geçerliliği ölçümsel analizlerle incelenmiştir.

Sonuç olarak; her iki modelin harmonik analizlerinde küçük yüzdelerde hatalar yaptıkları ölçümsel sonuçlarla teyit edilmiştir. Bununla birlikte bu tip analizlerde Sabit Akım Kaynağı modeli kullanımı daha az ölçümsel bilgi ve hesaplama gerektirdiği için Norton modeline göre daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

SUMMARY

**TITLE OF THE THESIS: An Application of the Models Commonly Used for
Harmonics Producing Loads**

AUTHOR : Özgür KILIÇ

Depending on the increase in using of today's semiconductor based devices; distortions in current and voltage waveforms have reached significant levels. Therefore, for planning and design of power systems that contain distorted current and voltage waveforms, harmonic domain based analysis has gained a great importance. In order to perform harmonic domain analysis successfully, power system components should accurately be modelled for representation of real systems' conditions.

In this thesis, harmonics and their influences on power systems were examined, in general. Furthermore Constant Current Source and Norton models were examined, test system was described and load models were formed according to measurements obtained by means of this test system. Moreover, validity of harmonic load models (Constant Current Source and Norton Models) were examined and compared with measurement analyses.

Finally, both models belonging to harmonic producing loads can easily be used for harmonic analysis. It can clearly be seen from the results that both models have minor percentage errors in comparison to the real conditions. Consequently, because of its simple usage, Constant Current Sources can be preferred than Norton models.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Eğitimim süresince, anlayış ve hoşgörüsü ile yardımlarını benden esirgemeyen hocam sayın Yrd. Doç. Dr. M.Hakan HOCAOĞLU'na, yapmış olduğum bu çalışmada ilgi ve alakasından dolayı sayın Araştırma Görevlisi M.Erhan Balcı'ya, sundukları imkanlarla bu çalışmanın gerçekleşmesine katkıda bulunan Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ő. yöneticilerine ve çalışma arkadaşlarıma, özellikle Erdoğan AYDİLEK ve Resul ONGUN'a, Yüksek Lisans yapmam için beni teşvik eden, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve destekleyen babam Kamber KILIÇ ve annem Latife KILIÇ 'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLOLAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Tezin Sınırları	3
1.3 Tezin İçeriği	4
2. HARMONİKLER ve ETKİLERİ	5
2.1 Giriş	5
2.2 Harmonik Tanımı	5
2.3 Harmonik Üreten Nonlineer Elemanlar ve Harmoniklerin Olumsuz Etkileri	7
2.4 Harmoniklerin Rezonans Etkisi	8
2.5 Sonuç ve Özet	11
3. HARMONİK ÜRETEN YÜK MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	12
3.1 Giriş	12
3.2 Sabit Akım Kaynağı ve Norton Modelleri	12
3.3 Test Sistemi	14
3.4 Test Sisteminde Sabit Akım Kaynağı ve Norton Modeli	18
3.5 Sonuç ve Özet	35
4. SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	41
EKLER	
Ek-1: Tez İçerisindeki İncelenen “Durum 1” için Ölçüm Sonuçları	
Ek-2: Durum 1 Kesicilerden Alınan Ölçüm Sonuçları	
Ek-3: Test Sisteminde Kullanılan Trafo ve Besleme Kablolarının Değerleri	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	Kondansatörün sığası.
f	Frekans
f_c	Rezonans frekansı.
φ	Faz açısı.
φ_n	n.harmonik faz açısı.
I	Akımın etkin değeri.
I_n	Akımın n.harmoniğinin etkin değeri.
$I_{N,h}$	Norton akım kaynağının n.harmonik bileşeni.
$i(t)$	Akımın zamana bağlı ifadesi.
$\hat{I}_h(t)$	Hat akımının zamana bağlı ifadesi.
$i_{dg,h}$	Yük akımının devrenin ikinci durumu için açı değeri.
$i_{dgsuz,h}$	Yük akımının devrenin ilk durumu için açı değeri.
$i_{g,h}$	Yük akımının devrenin ikinci durumu için fazör değeri.
$i_{gsuz,h}$	Yük akımının devrenin ilk durumu için fazör değeri.
L	Endüktans.
R	Ohmik direnç.
THD _X	Akım (yada Gerilimin) toplam harmonik bozulması.
V	Gerilimin etkin değeri.
V_{da}	Gerilimin doğru akım bileşeni.
V_n	Gerilimin n.harmoniğinin etkin değeri.
$v(t)$	Gerilimin zamana bağlı ifadesi.
$V_{dg,h}$	Kaynak geriliminin devrenin ikinci durumu için açı değeri.
$V_{dgsuz,h}$	Kaynak geriliminin devrenin ilk durumu için açı değeri.
$V_{g,h}$	Kaynak geriliminin devrenin ikinci durumu için fazör değeri.
$V_{gsuz,h}$	Kaynak geriliminin devrenin ilk durumu için fazör değeri.
w	Açısal frekans
ω_n	n.harmoniğin açısal frekansı
Y_n	n.harmonik admitansı.
Z	Empedans.
$Z_{N,h}$	h.harmonik Norton eşdeğer empedansı.

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sinüsoidal olmayan dalga şeklinin farklı frekanslardaki sinüsoidal dalga şekillerinin toplamı biçiminde ifadesi	6
2.2. Seri rezonans	8
2.3. Seri rezonans gerilim, akım, empedans	9
2.4. Paralel rezonans	9
2.5. Paralel rezonans sırasında her harmoniğe ait gerilim, akım ve empedans	10
3.1. Sabit akım kaynağı modeli	13
3.2. Norton modelinin eşdeğer devresi	13
3.3. Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş. şalt tesisi	15
3.4. Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Gebze tesisine ait tek hat şeması	17
3.5-a. 3 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken gerilim ve akımın dalga formu	19
3.5-b. 3 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken gerilim ve akımın harmonik spektrumu	20
3.6-a. 3 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken gerilim ve akımın dalga formu	20
3.6-b. 3 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken gerilim ve akımın harmonik spektrumu	21
3.7. Durum 1 akış şeması	22
3.8 –a. 6.3 kV barada hesaplanan ve ölçülen gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması	23
3.8 –b. 6 No'lu kesicide hesaplanan ve ölçülen akım harmoniklerinin karşılaştırılması	24
3.8 –c. 6.3 kV barada hesaplanan ve ölçülen gerilim açısı değerlerinin karşılaştırılması	24
3.8 –d. 6.3 kV barada hesaplanan ve ölçülen akım açısı değerlerinin karşılaştırılması	25
3.9-a. 6.3 kV barada hesaplanan gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması	28
3.9-b. 6.3 kV barada hesaplanan akım harmoniklerinin karşılaştırılması	28
3.9-c. 6.3 kV barada hesaplanan gerilim açısı değeri karşılaştırılması	29

3.9-d. 6.3 kV barada hesaplanan akım açđ değeri karşılaştırılması	29
3.10-a. Dağıtım panosu barasına ait gerilim ve dağıtım panosu başarıyla 2,5MVA transformatör arası baradan akan akımın dalga formu	31
3.10-b. Dağıtım panosu barasına ait gerilim ve dağıtım panosu barasıyla 2,5MVA transformatör arası baradan akan akımın harmonik spektrumu	31
3.11. Tuzla TM-Sarkuysan arası enerji nakil hattının direk tipi	32
3.12. XLPE kablo yapısı	
3.13-a. Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri kullanılarak elde edilen; dağıtım panosu barasının gerilim harmonikleri	33
3.13-b. Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri kullanılarak elde edilen; dağıtım panosu barasıyla 2,5MVA transformatör arası akan akım harmonikleri	33
3.14-a. Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri kullanılarak elde edilen; dağıtım panosu barasının gerilim harmonikleri	34
3.14-b. Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri kullanılarak elde edilen; dağıtım panosu barasıyla 2,5MVA transformatör arası akan akım harmonikleri	35

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. 6 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri	23
3.2. Norton Model (yük tarafı) ile ölçüm sonuçları arasındaki hata miktarı	25
3.3. Norton Model (şebeke tarafı) ile ölçüm sonuçları arasındaki hata miktarı	26
3.4. Sabit akım kaynağı modeli ile ölçüm sonuçları arasındaki hata miktarı	26
3.5. 6 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri	27
3.6. Norton eşdeğer devre modeli ile Sabit akım kaynağı modeli arasındaki hata miktarı	30

1 GİRİŞ

Günümüz güç sistemlerinde, akım ve gerilim dalga formunda bozulmalar artmıştır. Bu sebeple bozulmuş akım ve gerilim dalga formunun bulunduğu güç sistemlerinin planlanması ve dizaynında harmonik domen temelli analizler önem kazanmıştır. Harmonik domenindeki analizlerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ise güç sistemi elemanlarının gerçeğe en yakın biçimde modellenmesine bağlıdır.

Güç sistemlerinin harmonik domeninde analizleri için yaygın şekilde kullanılan modelleme ve çözüm algoritmasına göre değişen birçok metotları bulunmaktadır [1, 2].

Bu analiz metotlarından en önemlilerinden biri ‘‘Frekans Tarama’’ metodudur. Diğer analiz metotlarıyla karşılaştırıldığında daha az veri gerektirmesi; ‘‘Frekans Tarama’’ metodunu kolayca uygulanabilir hale getirmiştir. Bu metodun dezavantajı ise tipik harmonik karakteristiğine sahip yüklere uygulanabilir olmasıdır. ‘‘*Frekans Tarama*’’ metodu harmonik üreten yükün özelliğine göre iki farklı biçimde kullanılmaktadır. Bunlardan biri harmonikli yükün bulunduğu düğüme akım kaynağı bağlanıp sistemdeki harmonik gerilimlerinin

$$[Y_h][V_h]=[I_h] \quad (1.1)$$

ifadesinden hesaplanmasıdır [1, 2]. Denklem (1.1)'de h.harmoniğe ait admittans matrisi $[Y_h]$, düğüm gerilimleri matrisi $[V_h]$ ve akım kaynakları vektörü $[I_h]$ dir. Bu tip analiz ayarlanabilir hız sürücülerinin meydana getirdiği bozulma etkisinin incelenmesi ile alakalı çalışmalarda kullanıma uygundur. ‘‘*Gerilim Transfer Fonksiyonu*’’ olarak isimlendirilen ikinci tip ‘‘*Frekans Tarama*’’ metodunda ise harmonik üreten yükün bulunduğu düğüme gerilim kaynağı bağlanıp Denklem (1.1) her harmonik için çözülür. Bu tip analiz her barada meydana gelen harmonik gerilimlerinin etkilerinin araştırılmasında kullanılır.

Bu analiz metodu harmonik üreten cihazların tam yüklenmediği veya aşırı yüklendiği durumlarda, dengesizlik durumlarında, tipik olmayan harmonik spektrumuna sahip yüklerin bulunduğu güç sistemlerinde yeterli değildir [1, 2]. “*Frekans Tarama*” metodunda bunlarla birlikte harmonik üreten yükün gerilim bağımlılığı özelliği de dikkate alınmamaktadır.

Harmonik üreten yüklerin gerilim bağımlılığı hesap edilmesi gerekliliği “*Harmonik İterasyon*” metodunun oluşturulmasına sebep olmuştur [3,4]. Bu metotta harmonik üreten cihazlar kaynak gerilimine bağımlı akım kaynağı olarak

$$I_h = F(V_1, V_2, \dots, V_h, c) \quad h = 1, \dots, h \quad (1.2)$$

biçiminde c kontrol değişkenine ve gerilim harmoniklerine bağlı olarak modellenmektedir. Bu metotta, tahmin edilen kaynak gerilimi için Denklem (1.2) bir kez çözülür. Daha sonra harmonik akım kaynağının spektrumu kafi doğruluğa ulaşana kadar Denklem (1.1) ve (1.2) iteratif olarak çözülür. “*Harmonik İterasyon*” metodu kullanılırken rezonans durumlarında ıraksama problemi meydana gelebilir.

Diğer bir iteratif metotta ise gerilim bağımlı harmonik üreten cihazlar, Newton tipi algoritma aracılığıyla Denklem (1.1) ve (1.2) eş zamanlı olarak çözümlenerek analiz edilir [5,6]. Birçok harmonik üreten cihaz için türevi alınabilir kapalı form ifadeler gerektirmesi; bu metodun en önemli zorluğudur.

Frekans domeninde yapılan analiz metotlarının yanında; EMTP [7] benzeri zaman domeni analiz yapan programlar aracılığıyla da güç sistemlerinde harmonik analizleri yapmak mümkündür. Zaman domeninde analiz yapan programların doğruluğu, harmonik üreten yüklerin zaman domeninde doğru modellenmesine bağlıdır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda “Norton Model” kullanılarak harmonik analizleri gerçekleştirilmiştir [8, 9]. Bu metotta harmonik üreten yükler Norton akım kaynağı ve bu kaynağa paralel bağlı Norton empedansından oluşan bir eşdeğer devre biçiminde modellenmiştir. Norton model, diğer modellere göre sistemdeki

olası değişimlerde daha doğru sonuçlar elde edebilmek amacıyla harmonik analizlerinde kullanılmıştır.

Bu özetlenen harmonik analizi metotları, güç sistemindeki bir elemanın sisteme etkilerini görmek ve harmoniklerin güç sistemlerine etkilerinin azaltılmasıyla alakalı analizlerde hali hazırda kullanılmakta olan metotlardır. Bu çalışmada Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin performanslarının analiz edilmesi için Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Gebze fabrikası seçilmiştir. Fabrikada üretilen elektrolitik bakır katodlardan Outokumpu, Southwire ve Contirod gibi sürekli döküm teknolojileriyle çubuk/filmaşın dökülür, sonraki üretim kademelerinde 0.05 mm çapa kadar çıplak tel, kalay ve nikel kaplı tel, değişik ebatlarda yassı tel ve profil çubuk üretilir. Son olarak bakır boru ve profil imalatı da yapılmaktadır. Fabrikada üretimin gerçekleşmesi için harmonik üreten elemanlardan; konvertörler, inverterlerle beslenen DC-AC motorlar ve tavlama işlemleri için trafolar kullanılmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada; harmonik akım ve gerilim ölçümleri kullanılarak gerçek bir dağıtım sistemine ait Norton modelinin nasıl tahmin edilebileceği, değişik işletim koşullarında Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin performanslarının analiz edilmesi ve bunun sonucunda hangi modelin harmonik analizlerinde kullanımının daha verimli olabileceği üzerine çalışılmıştır.

1.2 Tezin Sınırları

Tez içerisinde incelenilen konular ve bu konularla alakalı analizlerde

- Üç fazlı dengeli sistemler incelenecek,
- Harmonik analiz metodlarından sadece Sabit Akım Kaynağı ve Norton modelleri ile ilgilenilecek,

- Sınırlı sayıda, değişik çalışma koşullarında analizler yapılacak,

1.3 Tezin İçeriği

Tezin ikinci bölümünde harmonikler ve harmoniklerin genel olarak güç sistemlerinde meydana getirdikleri etkiler incelenmiştir.

nc bölümde literatürde yer alan yaygın olarak kullanılan harmonik üreten yüklere ait modellerden Sabit Akım Kaynağı ve Norton modelleri incelenmiş, test sistemi tanıtılmış ve bu test sisteminde yapılan ölçümlere göre yk modelleri oluşturulmuştur. Harmonik üreten yüklere ait modellerden Sabit Akım Kaynağı ve Norton eşdeğerinin geçerliliği ölçümsel analizlerle incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ise ilk üç bölümdeki bilgilerin doğrultusuna ulaşılan sonuçlar özetlenmiştir.

2 HARMONİKLER VE ETKİLERİ

2.1 Giriş

Bu bölümde harmonikler hakkında genel bilgiler verilecek, güç sistemi üzerindeki etkileri açıklanacak, harmonik indisler ve hesaplamaların nasıl yapılacağı belirtilecektir.

2.2 Harmonik Tanımı

Güç sisteminde lineer olmayan elemanlardan dolayı akım ve gerilimler sinüzoidal olmayabilir. Bu akım ve gerilimler Fourier serileri yardımı ile temel frekans ve temel frekansın katları frekanslarda sinüzoidal bileşenler biçiminde ifade edilebilir [10]. Fourier serileri kullanılarak sinüzoidal olmayan akım $i(t)$ ve gerilim $v(t)$ dalga formları;

$$i(t) = I_{da} + \sum_1^n \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \text{Sin}(\omega_n \cdot t - \varphi_n) \quad (2.1)$$

$$v(t) = V_{da} + \sum_1^n \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \text{Sin}(\omega_n \cdot t) \quad (2.2)$$

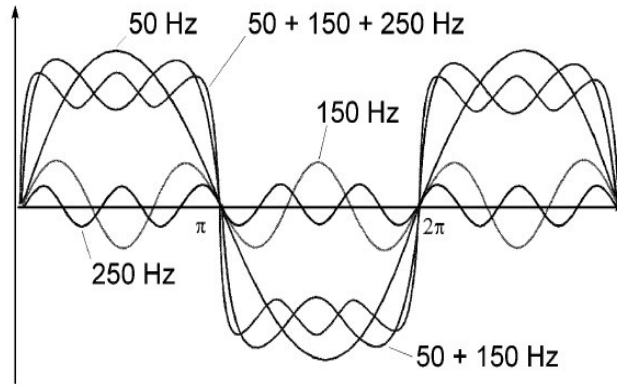
olarak ifade edilebilir. Sinüzoidal olmayan akım ve gerilimlerin etkin değeri ise

$$V = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 + V_{da}^2} \quad (2.3)$$

$$I = \sqrt{\sum_1^n I_n^2 + I_{da}^2} \quad (2.4)$$

eşitlikleri yardımı ile hesaplanabilir [11].

Şekil 2-1’de sinüzoidal olmayan periyodik bir dalgayı oluşturan 1., 3. ve 5. harmonik değerleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Sinüzoidal olmayan dalga şeklinin farklı frekanslardaki sinüzoidal dalga şekillerinin toplamı biçiminde ifadesi

Tez içeriğinde kullanılan, harmoniklerin sistemde meydana getirdiği bozulmayı göstermek açısından önemli bir parametre olan ve harmoniklerin sınırlandırılmasını hedefleyen, standartlarda toplam harmonik bozulması THD olarak tanımlanan indis;

$$THD_x = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} (X_n)^2}}{X_1} \quad (2.5)$$

biçiminde ifade edilmiştir [10]. Bu indis, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını belirlemede kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

2.3 Harmonik Üreten Nonlineer Elemanlar ve Harmoniklerin Olumsuz Etkileri

Harmoniklerin ortaya çıkmasına neden olan başlıca nonlineer elemanlar aşağıda sıralanmıştır.

- Konverterler,
- Generatörler,
- Motorlar,
- Senkron makinaların uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları,
- Elektronik balastlar,
- Statik Var kompanzatörler,
- Ark fırınları [10].

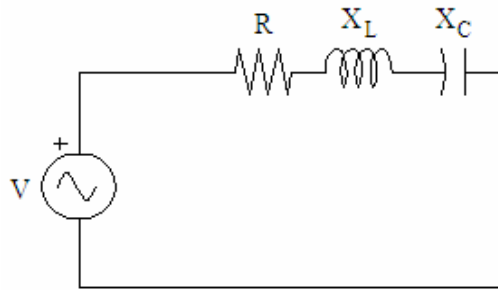
Güç sisteminde harmoniklerin bulunması halinde diğer elemanların çalışmasını ve performansını olumsuz etkileyen başlıca sorunlar;

- Gerilim düşümünün ve kayıpların artması, verimin azalması,
- Kompanzasyon sistemlerinin aşırı yüklenmesi ve hasar görmeleri,
- Koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışmaları,
- Ölçü aletlerinin hatalı çalışması,
- Aydınlatma elemanlarında titreşimlerin meydana gelmesi,
- Transformatörlerdeki demir kayıplarının frekansa bağlı artışları sonucu hasar görmeleri yada ömürlerinin azalması

olarak açıklanabilir [10].

2.4 Harmoniklerin Rezonans Etkisi

Harmonik içeren bir gerilim, eğer endüktif ve kapasitif yükün birlikte bulunduğu bir devreye uygulanmış ise harmonik frekanslarından birinde rezonans meydana gelebilir. Devrenin yapısına bağlı olarak seri rezonans oluşur ise, eşdeğer empedans çok küçük bir değer alır ve sistem o frekansta kısa devre etkisi göstererek aşırı akım çeker. Şekil 2-2’de seri R, L, C devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Seri rezonans

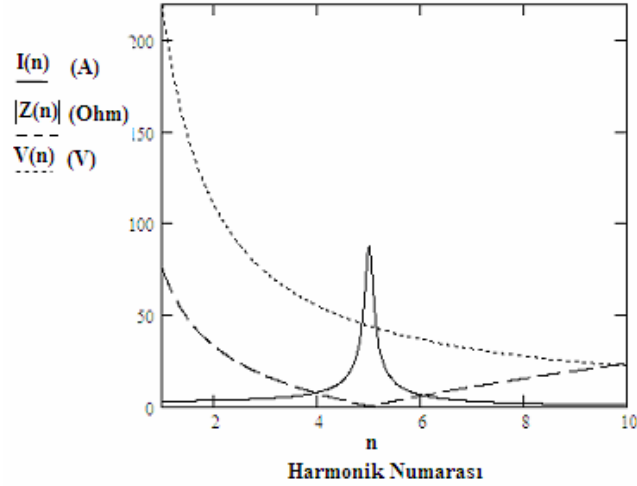
Şekil 2-2’de verilen devrenin eşdeğer empedansı;

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.6)$$

eşitliği ile ifade edilirse, empedansın zahiri kısmının sıfır olduğu frekans;

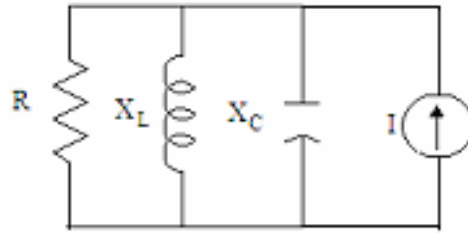
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

rezonans frekansı olarak tanımlanır. Seri rezonans halinde, harmonik numarasına bağlı olarak gerilim, akım ve empedansın değişimi Şekil 2-3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Seri rezonans gerilim, akım, empedans

Paralel rezonans oluşur ise eşdeğer empedans maksimuma ulaşır ve sistemin çektiği akım düşerken ilgili frekans da gerilimin değeri artar. Şekil 2-4’de paralel bağlı R, L, C devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Paralel rezonans

Şekil 2-4’de kaynaktan bakıldığında görülen eşdeğer empedans Z ise

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \quad (2.8)$$

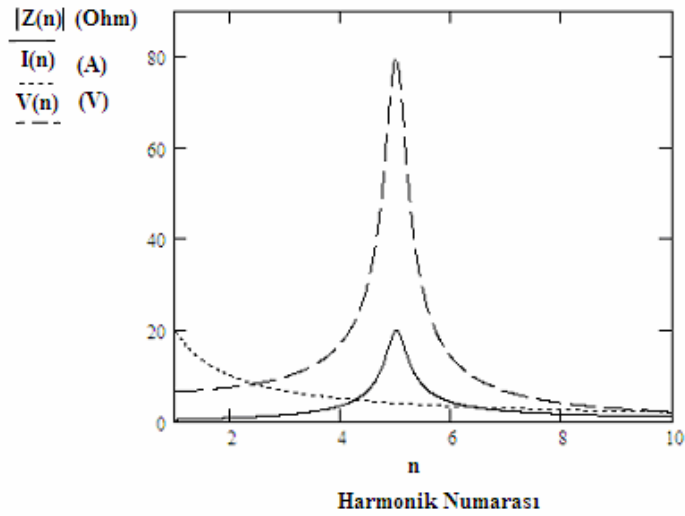
eşitliği geçerlidir. Eğer devrede;

$$\frac{1}{j\omega L} + j\omega C = 0$$

eşitliğini sağlayan;

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

frekansta bir akım harmoniği var ise bu devrede bir paralel rezonanstan bahsedilebilir. Paralel rezonans halinde harmonik numarasına bağlı olarak gerilim, akım ve empedansın değişimi Şekil 2-5'de verilmiştir.



Şekil 2.5. Paralel rezonans sırasında her harmoniğe ait gerilim, akım ve empedans

Paralel rezonans sonucu aşırı gerilimler meydana gelir. Bu durum gerilim dalga şeklinde pikler oluşmasına ve akabinde kondansatör gibi elemanların dielektriklerinin bozulmasına sebep olabilir [12, 13,14].

Harmonik içeren devrelerde rezonansın meydana gelmemesi için;

- Harmonik bileşenlere göre mutlaka rezonans analizi yapılmalı
- Sistemde varolan baskın harmonikler için filtre kullanılmalıdır.

2.5 Sonuç ve Özet

Lineer olmayan yükler (doğrultucular, akım kısıyıcıları, eviriciler, güç regülatörleri, UPS'ler, ark fırınları, manyetik devrelerin doyması, demir çekirdekli aygıtların doyma bölgesinde çalışmaları, DC Motorlar, frekans çeviriciler,...) şebekeden sinüs formunda olmayan akım çekerler. Bu akım ve gerilimler Fourier serileri yardımı ile temel frekans ve temel frekansın katları frekanslarda sinüzoidal bileşenler biçiminde ifade edilebilir. Harmonik akımlarının varlığı, şebeke empedansında yaratacağı gerilim düşümleri sebebi ile şebeke geriliminde de bozulmalara neden olur.

Harmonikler, kondansatörlerde delinmeye ve ömürlerinin azalmasına, kesici ve şalterlerde açmalara, sistemde rezonansın oluşmasına, aşırı ısınmalara diğer taraftan cihazların hatalı çalışmasına neden olabilmektedir.

3 HARMONİK ÜRETEN YÜK MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

3.1 Giriş

Harmonik üreten yüklerle ait geliştirilmiş modellerden, Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin tanıtımı, örnek test sisteminde değişik çalışma koşulları için performans analizi yapılmıştır.

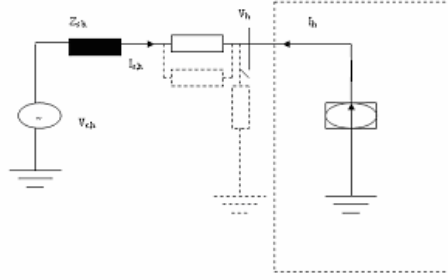
3.2 Sabit Akım Kaynağı ve Norton Eşdeğer Devre Modelleri

Harmonik modellere:

- Harmonik üreten yüklerin lineer yüklerle ve güç sistemlerine etkisini tahmin etmek,
- Rezonans frekansındaki akım ve gerilim değerlerini hesaplamak,
- Güç sistemindeki elemanlara ait harmonik indislerini hesaplamak,
- Güç akışı hesaplamalarında kullanılmak,
- Reaktif güç kompanzasyonu kapasitesi ve harmonik filtrelerinin büyüklüklerinin belirlemek

gibi işlemleri yapmak için ihtiyaç duyulur. Harmonik problemlerinin en aza indirilebilmesi, güç sistemlerinin kesintisiz ve güvenli çalışmalarının devamı için çok önemlidir. Bu sebeple harmonik üreten yüklerin doğru şekilde modellenmesi; güç sistemlerinin analizi açısından büyük önem taşır. Literatürde, gerek veri gerekse algoritmaları yönünden pratik kullanıma uygun geliştirilmiş harmonik üreten yük modelleri vardır. Bu modeller Sabit Akım Kaynağı ve Norton modelleridir.

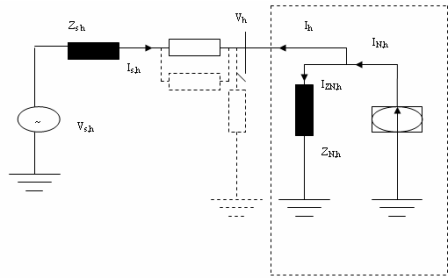
Harmonik üreten yükler, ilk olarak Sabit Akım Kaynağı olarak modellendiler. Sabit Akım Kaynağı modeli Şekil 3-1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sabit Akım Kaynağı modeli.

Sabit Akım Kaynağı modelinde yük akımının h.harmoniği h.harmonikte sabit akım kaynağı olarak ifade edilir. Modelinin h.harmonikte gerilim bileşeni yoktur.

Norton modeli h.harmonikte Norton akım kaynağı ile bu akım kaynağına paralel h.harmonikte Norton eşdeğer empedansına sahiptir. Norton modelinin eşdeğer devresi ise Şekil 3.2’de verilmiştir [8].



Şekil 3.2. Norton modelinin eşdeğer devresi.

Norton modeli Şekil 3-2’deki devrenin hat empedansının ve/veya kompanzasyon kapasitesinin farklı parametrelerine ait akım ve gerilim değerleri kullanılarak;

$$Z_{N,h} = \frac{V_{1,h} - V_{2,h}}{I_{2,h} - I_{1,h}} \quad (3.3)$$

$$I_{1,h} = I_{N,h} + \frac{V_{1,h}}{Z_N} \quad (3.4)$$

$$I_{2,h} = I_{N,h} + \frac{V_{2,h}}{Z_N} \quad (3.5)$$

ifadeleri elde edilir [14]. Burada $V_{1,h}$ ile $I_{1,h}$ sistemde herhangi bir değişiklik olmadan önce alınan gerilim ve akım değerleri, $V_{2,h}$ ile $I_{2,h}$ ise sistem empedansında farklılık olduktan sonra alınan gerilim ve akım değerleridir. Her iki çalışma koşulundan alınan gerilim ve akım değerleri kullanılarak $Z_{N,h}$ Norton empedansı hesaplanır.(Denklem (3.3)) Norton empedansı ve ölçüm değerleri kullanılarak $I_{N,h}$ Norton akımı hesaplanır. .(Denklem (3.4) ve (3.5))

Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin performanslarının bilinmesi harmonik analizleri sırasında hangi modelin tercih edilmesinin daha uygun olacağı sorusuna cevap bulunması yönünden önemlidir. Bu sebeple Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Gebze tesisi örnek sistem olarak seçilmiş; bu sistem üzerinde Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin performansları analiz edilmiştir.

3.3 Test Sistemi

Bu çalışmada Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin performanslarının analiz edilmesi için seçilen Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Gebze tesisine ait şalt resmi Şekil 3-3'de, tek hat şeması ise Şekil 3-4'de verilmiştir.

Şekil 3.4'de verilen test sistemi; Tuzla şalt tesisinden ve Sarkuysan Kojenerasyon tesisinden, ünite indirici trafolarına enerji gelmektedir. Yapılan bu çalışmada Şekil 3.4' deki 1' no'lu noktanın sekonder tarafından ve altı noktanın primer tarafından Circuitör AR5 marka [16] analizör ile ölçümler yapılmıştır.



Şekil 3.3. Sarkuysan A.Ş. Şalt Tesisi

Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin performanslarının karşılaştırılacağı analizde;

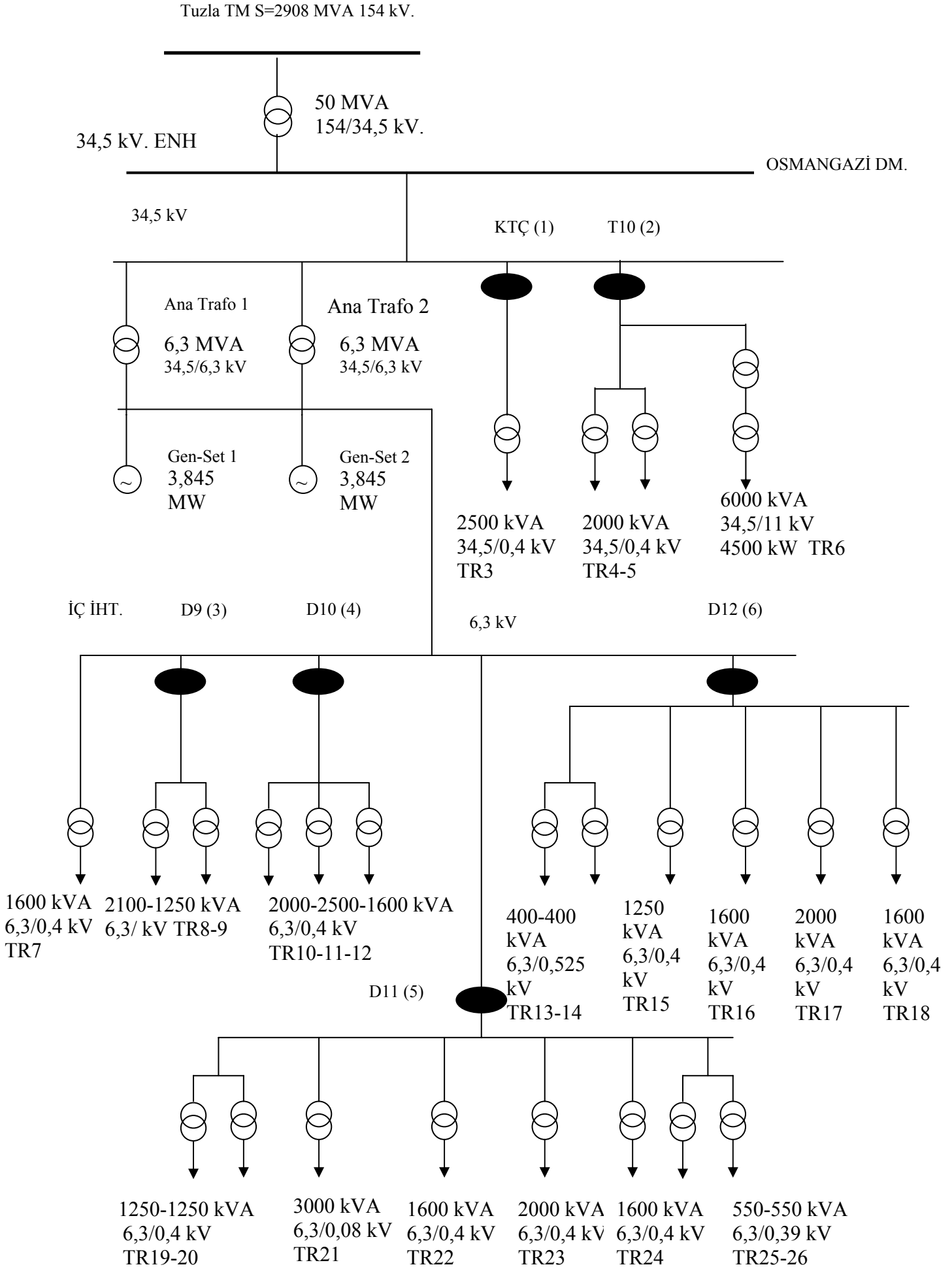
Durum 1’de mevcut test sisteminde Sarkuysan Kojenerasyon tesisindeki eşdeğer özellikteki generatörlerden biri devre dışı iken ve her ikisi devrede iken ölçümler yapılmıştır. Alınan ölçüm sonuçları kullanılarak yük tarafı ve şebeke tarafı için ayrı ayrı Norton eşdeğer devresi oluşturulmuştur. Şebeke beslemesinin olmadığı varsayılarak 6,3 kV baradaki gerilim ve akım değerleri hesaplanmıştır. Şebeke beslemesinin olmadığı, sadece generatörlerden beslendiği anda ölçüm alınan 6,3 kV baradaki 6 no’lu noktanın ölçüm sonuçları ile hesaplanan modellerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Durum 2’de, Durum 1’deki senaryo aynı kalmak koşulu ile ünitelerin yüklenmelerinin yaklaşık % 35 oranında arttığı çalışma koşulunda alınan ölçüm sonuçları kullanılarak Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri karşılaştırılmıştır.

Durum 3'de 1' no'lu noktanın sekonder tarafında yer alan kompanzasyon panosunun devrede ve devre dışı olduğu durumlarda yapılan ölçümler kullanılarak mevcut sistemde varolan Tuzla TM-Sarkuysan arası enerji nakil hattının XLPE 2x3(1x120ş/16 mm²) kablo ile değiştirildiği varsayılmıştır. Bu meydana gelen yeni durum için dağıtım panosu barasının gerilimi ve dağıtım panosu barasıyla 2,5 MVA transformatör arası akan akım hesaplanmıştır.

Durum 4'de, Durum 3'de yapılan ölçümler kullanılarak mevcut sistemde varolan 2,5 MVA gücündeki kalın çekim ünitesi transformatörüne ihtiyaca karşılık 3 MVA gücünde paralel bir transformatörün sisteme eklendiği varsayılmıştır. Yeni çalışma şartları için harmonik üreten yük modelleri kullanılarak; dağıtım panosu barası gerilimi ve dağıtım panosu barasıyla 2,5 MVA kalın çekim ünitesi transformatörü arasında akan akım hesaplanmıştır.

Bu dört durum ile şebekede ya da tesiste, olması muhtemel değişikliklerde harmonik üreten yüklerin lineer yüklere ve güç sistemlerine etkisini belirlemek, harmonik modellerin performanslarını karşılaştırmak amaçlanmıştır.



Şekil 3.4. Sarkuysan Elektrolitik Bakır San. ve Tic. A.Ş. tesisine ait tek hat şeması

3.4 Test Sisteminde Sabit Akım Kaynağı ve Norton Eşdeğer Devre Modeli

Dört farklı durum da Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin performanslarının karşılaştırılacağı analizde; Norton empedansı ve akımının belirlenmesi için; çalışmanın birinci durumu için her bir harmonik değerinde gerilim açısı “ $vdgsuz$ ” referans alınarak, gerilim ve akımın açısı değeri “ $vdgsuz$ ve $idgsuz$ ” bulunmuştur. Buradan gerilim ve akımın fazör değeri $vgsuz$ ve $igsuz$ hesaplanmıştır. Sistemde değişiklik meydana geldikten sonra (çalışmanın ikinci durumu) aynı işlemler tekrarlanır, öncelikle temel harmonik gerilim açısı referans alınarak her bir harmonik değeri için “ vdg ve idg ” gerilim ve akım açısı değerleri bulunur. Açısı değerlerine göre “ vdg ve idg ” gerilim ve akım fazör değerleri hesaplanır.

$$vdgsuz = (vdgsuz_n - vdgsuz_1) \quad (3.6)$$

$$vgsuz = [vgsuz_n (\cos(vdgsuz_n) + j \sin(vdgsuz_n))] \quad (3.7)$$

$$idgsuz = [idgsuz_n - vdgsuz_1] \quad (3.8)$$

$$igsuz = [igsuz_n (\cos(idgsuz_n) + j \sin(idgsuz_n))] \quad (3.9)$$

$$vdg = [vdg_n - vdg_1] \quad (3.10)$$

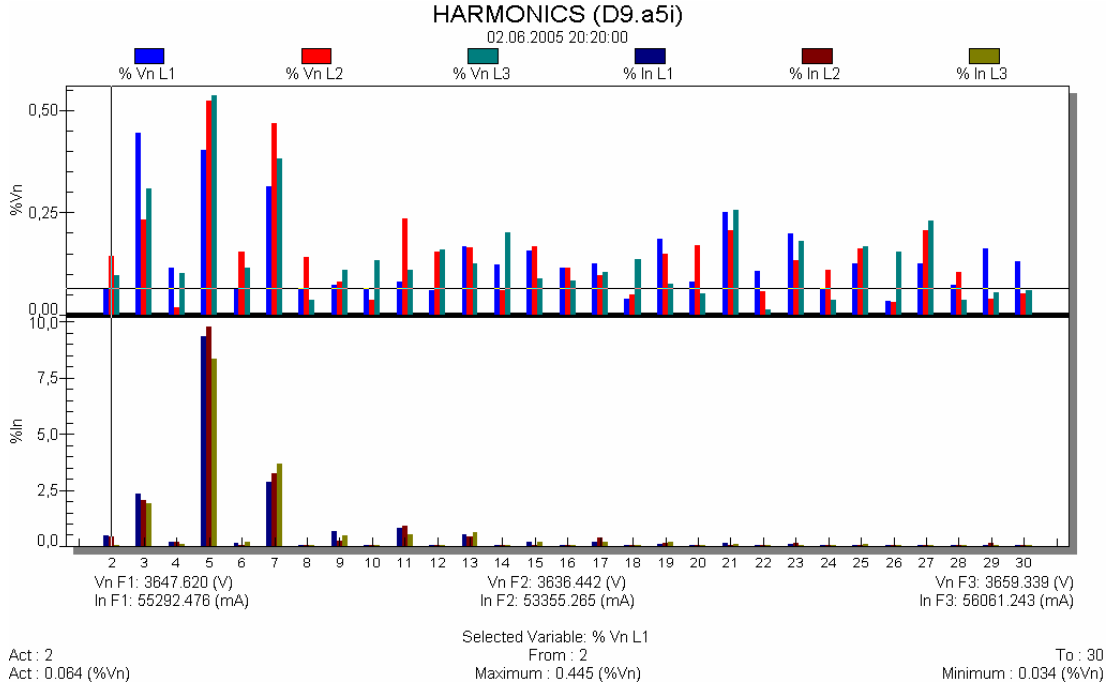
$$vg = [vg_n (\cos(vdg_n) + j \sin(vdg_n))] \quad (3.11)$$

$$idg = [idg_n - vdg_1] \quad (3.12)$$

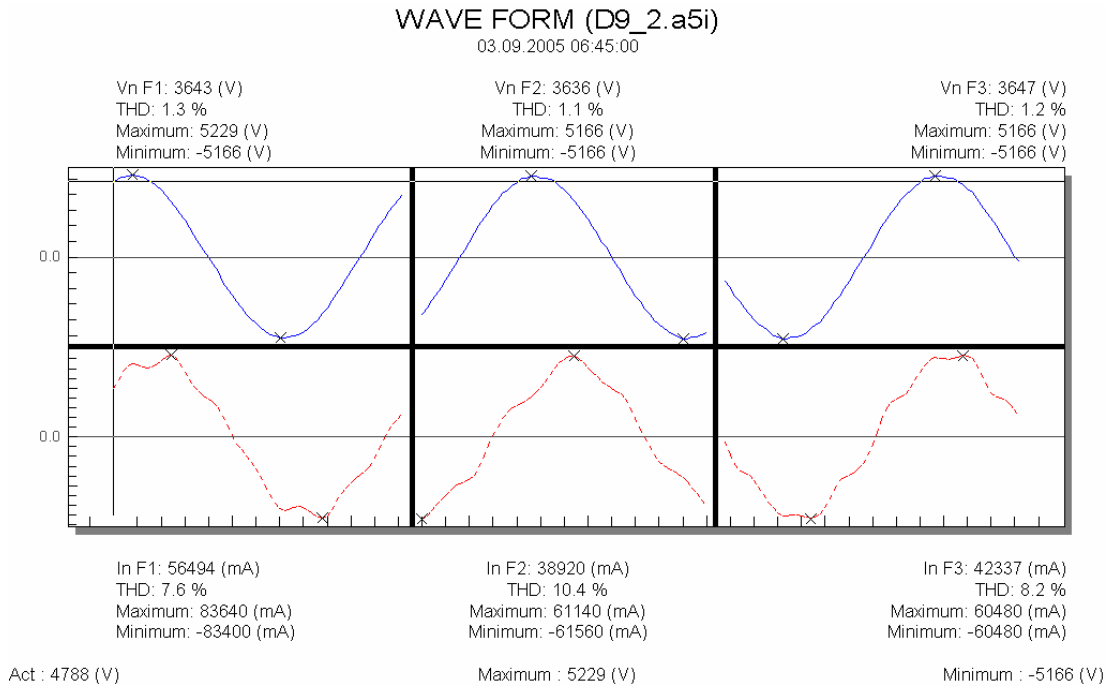
$$ig = [ig_n (\cos(idg_n) + j \sin(idg_n))] \quad (3.13)$$

Denklem 3.3, 3.4 ve 3.5 kullanılarak Norton empedansı ve akımı hesaplanır.

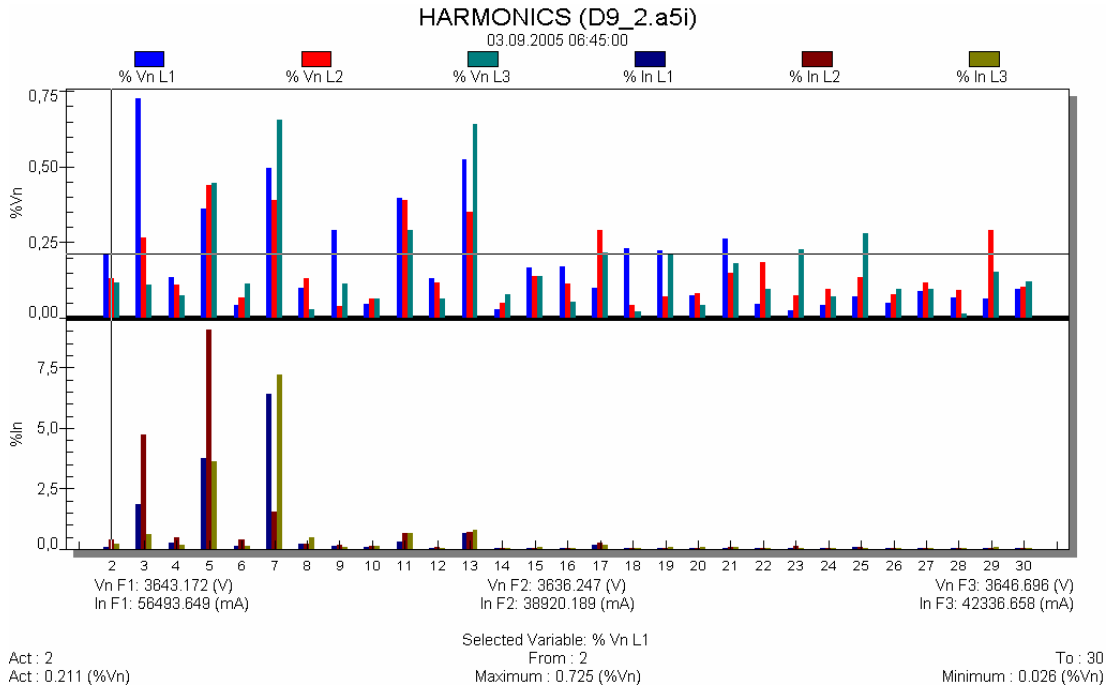
$$Z_N = \frac{[(vg_n - vgsuz_n)]}{[(igsuz_n - ig_n)]} \quad IN = [(ig_n + \frac{vg_n}{Z_N_n})] \quad (3.14)$$



Şekil 3.5-b: 3 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken gerilim ve akımın harmonik spektrumu.



Şekil 3.6-a: 3 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken gerilim ve akımın dalga formu.

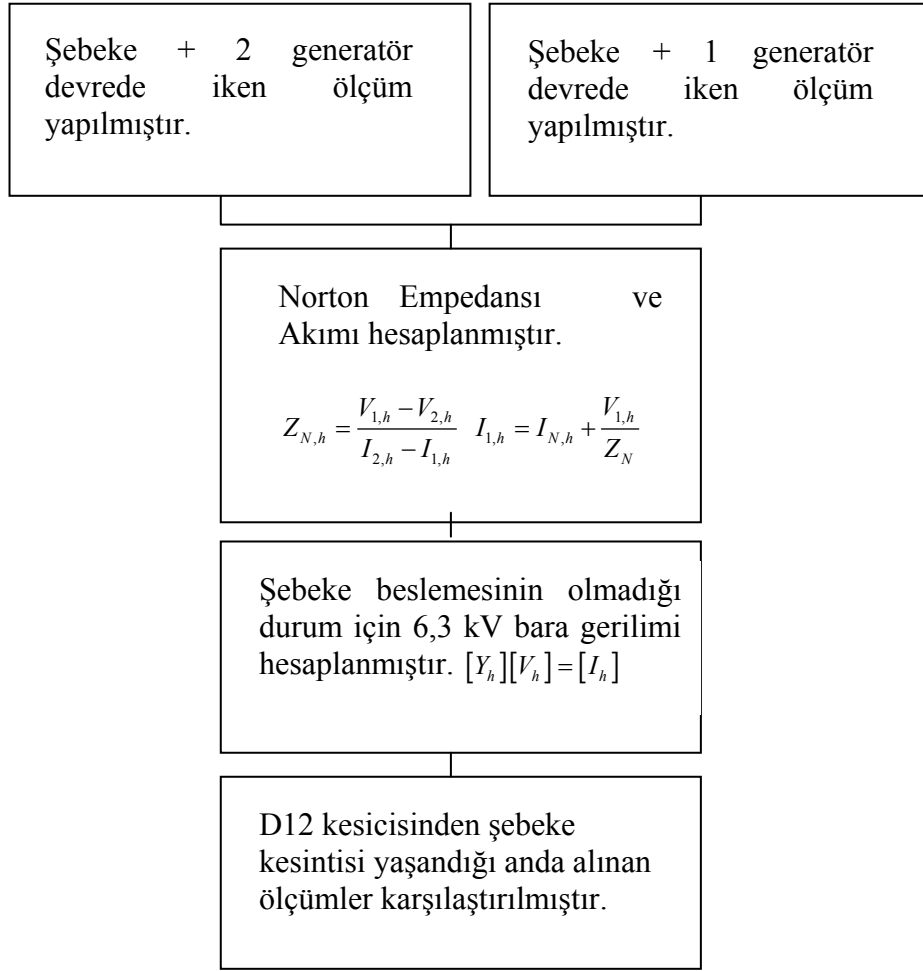


Şekil 3.6-b: 3 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken gerilim ve akımın harmonik spektrumu.

Diğer noktalara ait sonuçlar ekler kısmında yer almaktadır. Söz konusu ünitelerdeki harmonik üreten yükler inverterlerle beslenen D.A motorlarından oluşmaktadır.

Her iki durum için harmonik üreten yük grubunun 3., 5. ve 7. harmonik bileşeninin baskın olduğu, birinci ve ikinci durumda yapılan ölçümler için THD_V değerlerinin generatörlerden biri devre dışı ve her ikisi devrede iken %0,9 ile %1,3 arasında, THD_I bozulmalarının ise generatör devre dışı iken %9,3 ile %10,5 generatörler devrede iken ise %7,6 ile %10,4 arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 3.7'de Durum 1'de yapılan hesapların adımları akış şeması olarak verilmektedir. Generatörlerin devrede ve devre dışı oldukları farklı çalışma koşulları için ölçümler alınmıştır. Alınan ölçüm sonuçları kullanılarak yük tarafı ve şebeke tarafı için ayrı ayrı Norton eşdeğer devresi oluşturulmuştur. Norton akımı ve empedansı hesaplanmıştır. 6,3 kV barada ölçülen değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.7. Durum 1 akış şeması

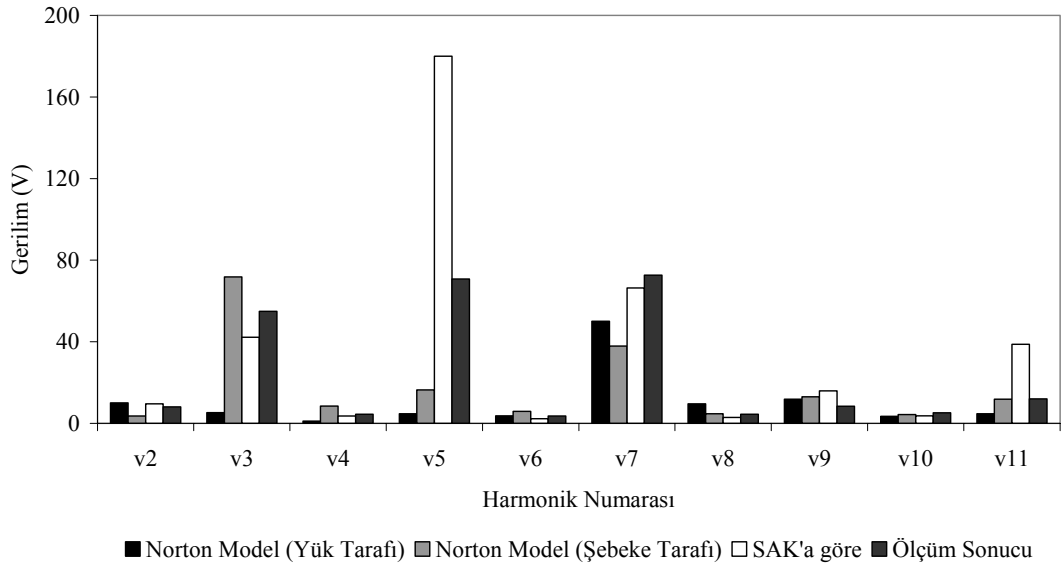
(3-6, 3-7.3-14) denklemleri kullanılarak , Şekil 3.4 deki ölçümü yapılan 6 no'lu noktaya ait, hesaplanan Norton Empedans ve Akım değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Diğer kesicilerden alınan ölçümlere göre yapılan hesapların sonuçları ekler kısmında yer almaktadır.

Tablo 3.1. 6 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri

Harmonik Numarası	Z_N (pu)	Açı (derece)	Harmonik Numarası	I_N (A)	Açı (derece)
1	4.158	-80.29	1	2248	76.24
2	5.641	-7.68	2	0.922	146.05
3	32.474	160.18	3	3.216	168.72
4	21.61	37.94	4	0.571	16.40
5	8.985	51.45	5	2.661	237.06
6	43.171	113.42	6	0.2	45.81
7	29.664	89.52	7	1.859	136.00
8	31.271	-72.56	8	0.219	115.15
9	19.664	171.97	9	0.967	29.48
10	27.178	49.67	10	0.232	230.25
11	33.373	211.67	11	0.517	239.01

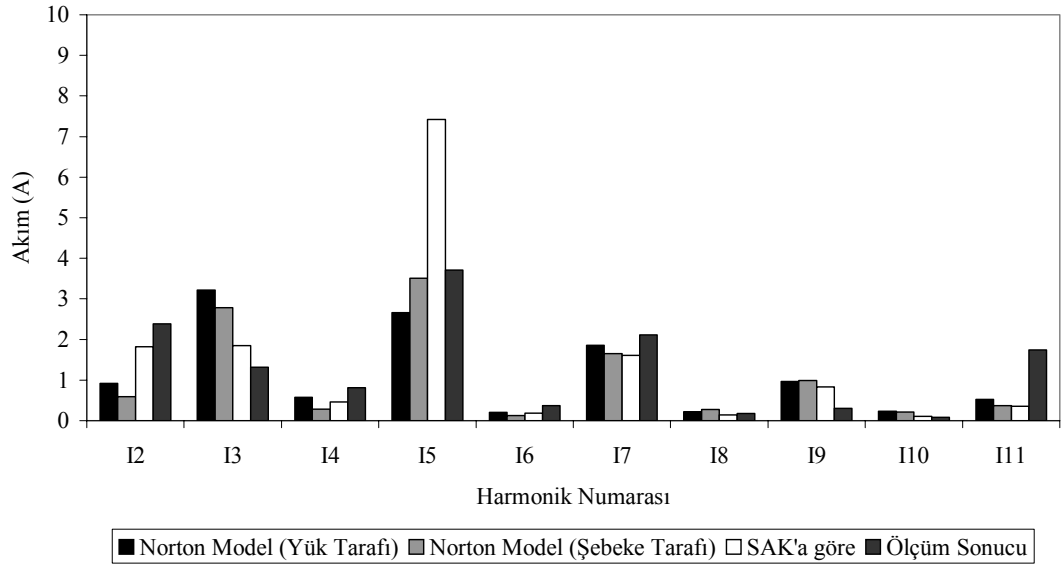
Düğüm denklemlerinden 6.3 kV baradaki gerilimler hesaplanmıştır. Her iki modelle yapılan analizlerde elde edilen 6.3 kV bara gerilimi ve akımına ait harmonikler Şekil 3.8' de verilmiştir.

6.3 kV Bara Gerilimi



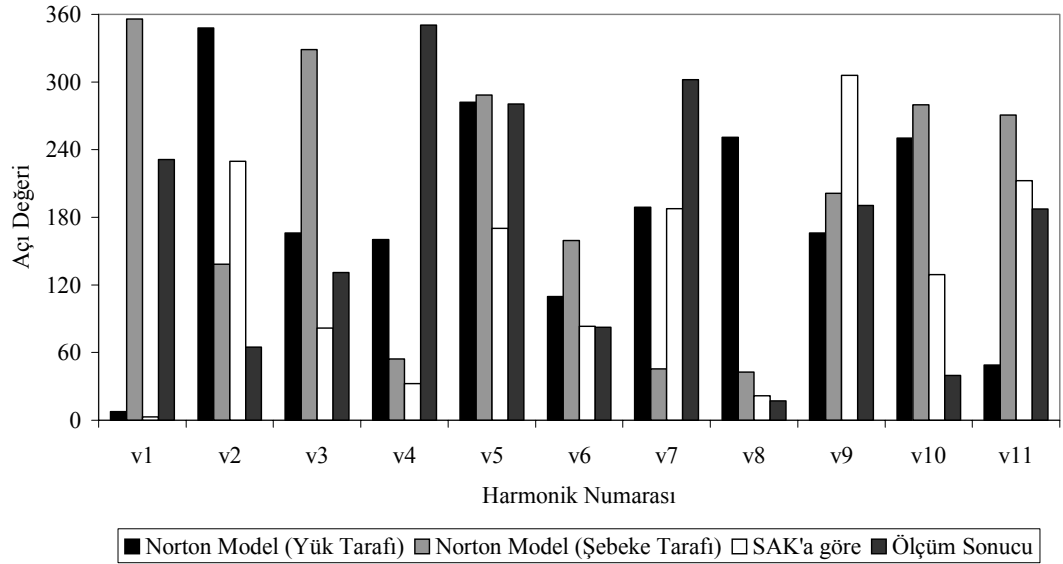
Şekil 3.8-a: 6.3 kV barada hesaplanan ve ölçülen gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması

6 No'lu Kesici Akım Değeri



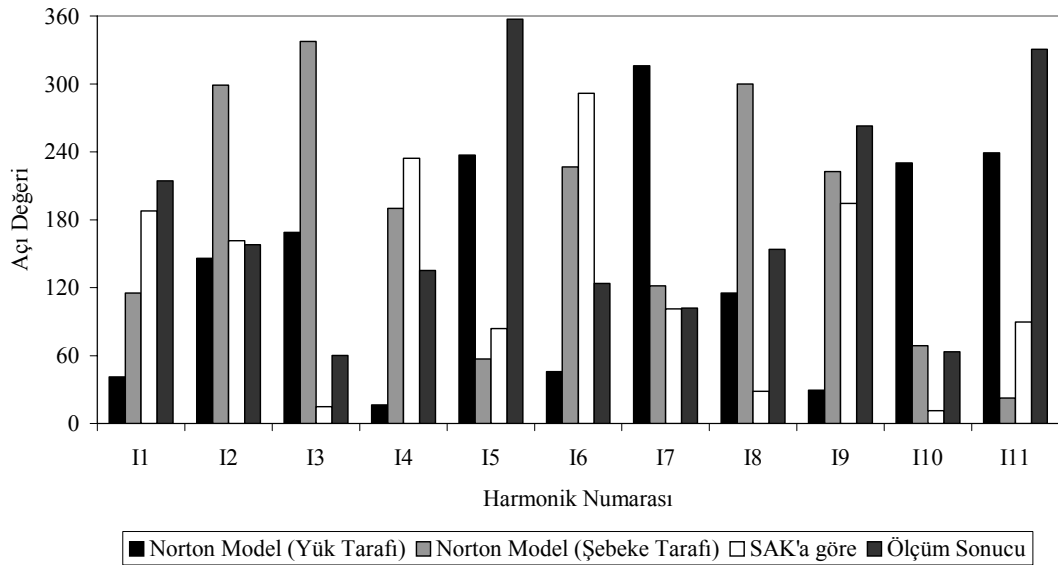
Şekil 3.8-b: 6 No'lu kesicide hesaplanan ve ölçülen akım harmoniklerinin karşılaştırılması

6.3 kV Bara Gerilim Açı Değeri



Şekil 3.8-c: 6.3 kV barada hesaplanan ve ölçülen gerilim açısı değerlerinin karşılaştırılması

6 No'lu Kesici Akım Açı Değeri



Şekil 3.8-d: 6 No'lu kesicide hesaplanan ve ölçülen akım açı değerlerinin karşılaştırılması

Durum 1'de elde edilen sonuçlar, ölçüm sonuçları referans alınarak incelendiğinde;

- Norton Modele (yük tarafı) göre yapılan hesaplamalarda, 6,3 kV baranın gerilim değerindeki değişimin, ölçüm sonuçlarına göre farkı 0,05 ile 66,007 V., akımın değerindeki farklılık ise; 0,038 ile 1,896 A. arasında değişmektedir. Her bir harmonik için hata miktarı Tablo 3-2'de verilmektedir.

•

Tablo 3.2: Norton Model (Yük Tarafı) ile Ölçüm Sonuçları arasındaki hata miktarı

Harmonik Numarası	Norton Modeli Gerilim	Ölçüm Sonucu Gerilim	Fark Gerilim	Norton Modeli Akım	Ölçüm Sonucu Akım	Fark Akım
2	10,080	8,101	-1,979	0,922	2,387	1,465
3	5,290	54,971	49,681	3,216	1,320	-1,896
4	1,130	4,501	3,371	0,570	0,809	0,239
5	4,780	70,787	66,007	2,662	3,707	1,045
6	3,650	3,600	-0,050	0,199	0,367	0,168
7	50,070	72,652	22,582	1,859	2,112	0,253
8	9,540	4,436	-5,104	0,219	0,181	-0,038
9	11,890	8,422	-3,468	0,967	0,296	-0,671
10	3,530	5,208	1,678	0,231	0,081	-0,150
11	4,730	12,023	7,293	0,517	1,739	1,222
V_{rms}/I_{rms}	54,23	116,92	%53	4,83	5,43	%11

- Norton Modele (şebeke tarafı) göre yapılan hesaplamalarda 6,3 kV baranın gerilim değerindeki değişimin, ölçüm sonuçlarına göre farkı 0,173 ile 54,347 V., akımın değerindeki farklılık ise; 0,091 ile 1,796 A. arasında değişmektedir. Her bir harmonik için hata miktarı Tablo 3-3’de verilmektedir.

6 No’lu kesicide hesaplanan ve ölçülen akım harmoniklerinin karşılaştırılması

Tablo 3.3. Norton Model (Şebeke Tarafı) ile Ölçüm Sonuçları arasındaki hata miktarı

Harmonik Numarası	Norton Modeli Gerilim	Ölçüm Sonucu Gerilim	Fark Gerilim	Norton Modeli Akım	Ölçüm Sonucu Akım	Fark Akım
2	3,570	8,101	4,531	0,591	2,387	1,796
3	71,810	54,971	-16,839	2,780	1,320	-1,460
4	8,470	4,501	-3,969	0,279	0,809	0,530
5	16,440	70,787	54,347	3,510	3,707	0,197
6	5,920	3,600	-2,320	0,121	0,367	0,246
7	37,910	72,652	34,742	1,650	2,112	0,462
8	4,700	4,436	-0,264	0,272	0,181	-0,091
9	13,070	8,422	-4,648	0,985	0,296	-0,689
10	4,320	5,208	0,888	0,211	0,081	-0,130
11	11,850	12,023	0,173	0,372	1,739	1,367
V_{rms}/I_{rms}	61,54	116,92	%52	2,05	5,43	%37

- Sabit Akım Kaynağı modeline göre yapılan hesaplamalarda 6,3 kV baranın gerilim değerindeki değişimin, ölçüm sonuçlarına göre farkı 0,911 ile 109,183 V. akımın değerindeki farklılık ise; 0,021 ile 3,713 A. arasında değişmektedir. Her bir harmonik için hata miktarı Tablo 3-3’de verilmektedir.

Tablo 3.4. Sabit Akım Kaynağı Modeli ile Ölçüm Sonuçları arasındaki hata miktarı

Harmonik Numarası	SAK Modeli Gerilim	Ölçüm Sonucu Gerilim	Fark Gerilim	SAK Modeli Akım	Ölçüm Sonucu Akım	Fark Akım
2	9,540	8,101	-1,439	1,818	2,387	0,569
3	42,170	54,971	12,801	1,842	1,320	-0,522
4	3,590	4,501	0,911	0,456	0,809	0,353
5	179,970	70,787	-109,183	7,420	3,707	-3,713
6	2,320	3,600	1,280	0,188	0,367	0,179
7	66,400	72,652	6,252	1,611	2,112	0,501
8	2,930	4,436	1,506	0,145	0,181	0,036
9	15,950	8,422	-7,528	0,832	0,296	-0,536
10	3,690	5,208	1,518	0,102	0,081	-0,021
11	38,790	12,023	-26,767	0,355	1,739	1,384
V_{rms}/I_{rms}	201,16	116,92	%72	8,08	5,43	%49

Bu durum analizi sonucunda; 6,3 kV bara gerilimi için yük tarafının modellenmesi ile elde edilen eşdeğer devre 9. harmonik değerinde, şebeke tarafının modellenmesi ile elde edilen eşdeğer devre 5., ve 11. harmonik değerlerinde, Sabit Akım Kaynağı modelinin ise 3. ve 7. harmonik değerlerinde ölçüm sonuçlarına göre karşılaştırıldığında yakın sonuç verdiği, 6,3 kV barasından akan akımın harmoniklerine ait etkin değeri için verdikleri sonuçlar incelendiğinde ise yük tarafının modellenmesi ile elde edilen eşdeğer devre 7., ve 11. harmonik değerlerinde, şebeke tarafının modellenmesi ile elde edilen eşdeğer devre 5. harmonik değerinde, Sabit Akım Kaynağı modelinin ise 3. ve 9. harmonik değerlerinde ölçüm sonuçlarına daha fazla yaklaştığı görülmüştür.

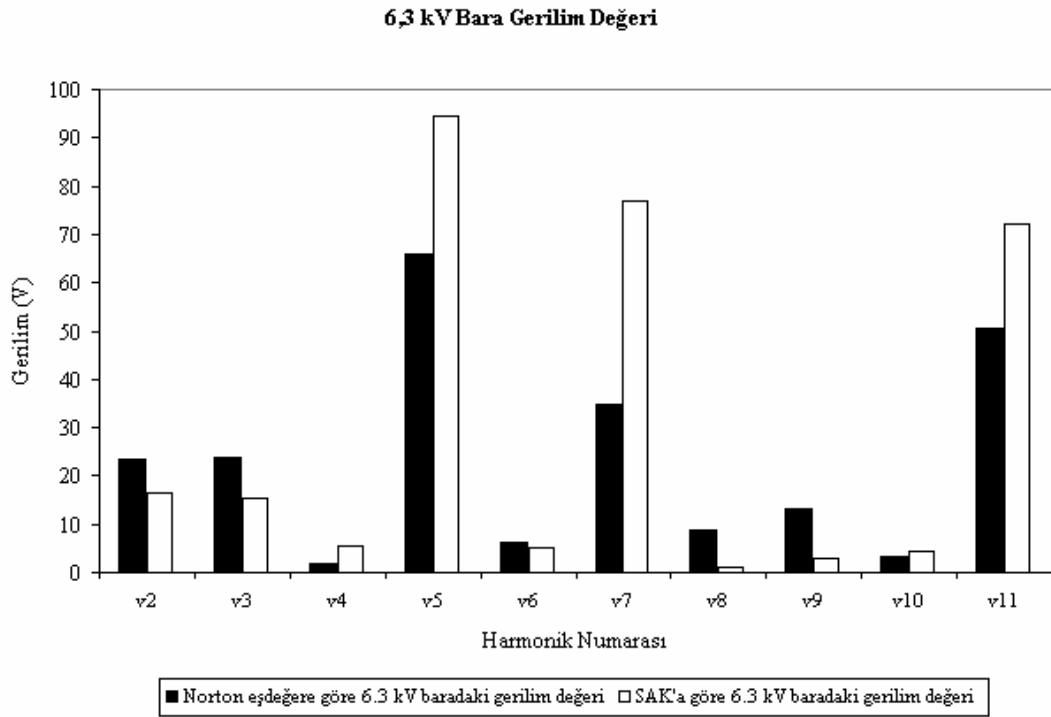
DURUM 2: Durum 1'deki senaryo aynı kalmak koşulu ile ünitelerin yüklenmelerinin yaklaşık % 35 oranında arttığı çalışma koşulunda alınan ölçüm sonuçları kullanılarak Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri karşılaştırılmıştır.

(3-6, 3-7..3-14) denklemleri kullanılarak, Şekil 3-4 deki ölçüm yapılan 6 no'lu noktanın, hesaplanan Norton Empedans ve Akım değerleri aşağıda tablo olarak verilmiştir. Diğer kesicilerden alınan ölçümlere göre yapılan hesapların sonuçları ekler kısmında yer almaktadır.

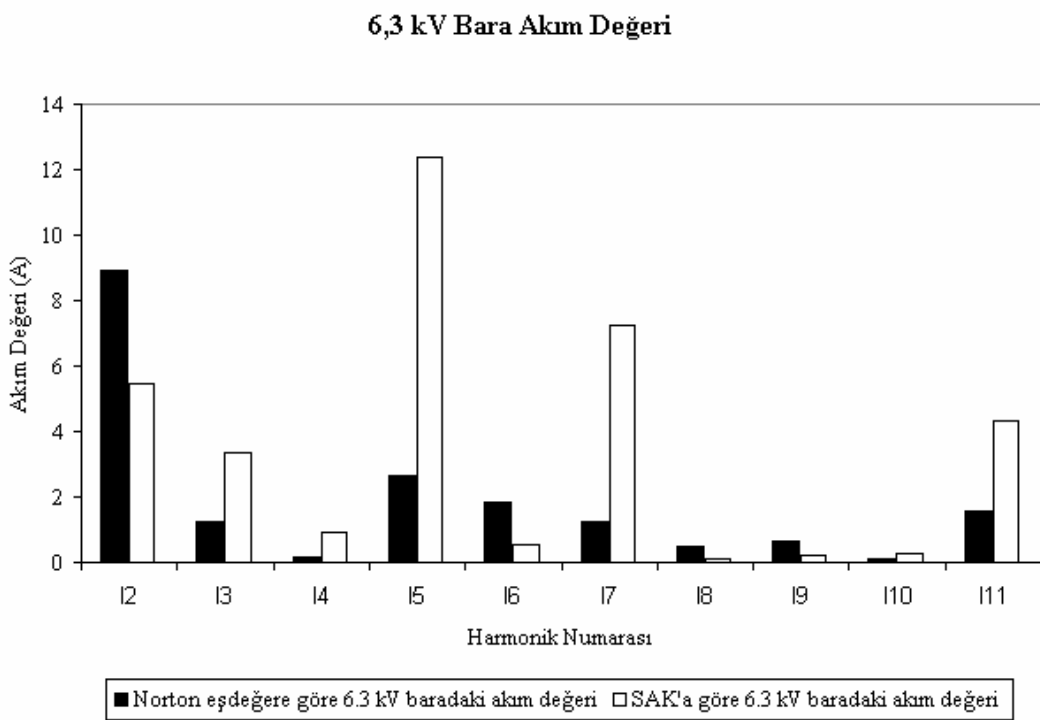
Tablo 3.5. 6 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri

Harmonik Numarası	Z_N (pu)	Açı (derece)	Harmonik Numarası	I_N (A)	Açı (derece)
1	0,24	-82,28	1	38920	81,77
2	13,29	178,03	2	1,880	225,02
3	85,18	154,37	3	4,350	-60,67
4	13,36	79,26	4	0,850	152,20
5	29,40	200,41	5	3,980	17,31
6	12,15	-68,72	6	0,896	-78,34
7	18,90	228,80	7	2,720	130,14
8	62,50	230,05	8	0,243	93,48
9	33,69	125,35	9	0,924	183,66
10	38,71	194,99	10	0,312	-42,39
11	50,60	161,30	11	1,350	67,95

Düğüm denklemlerinden 6.3 kV baradaki gerilimler ve akımlar hesaplanmıştır. Her iki modelle yapılan analizlerde elde edilen 6.3 kV bara gerilimine ve akımına ait harmonikler Şekil 3-9' da verilmiştir.

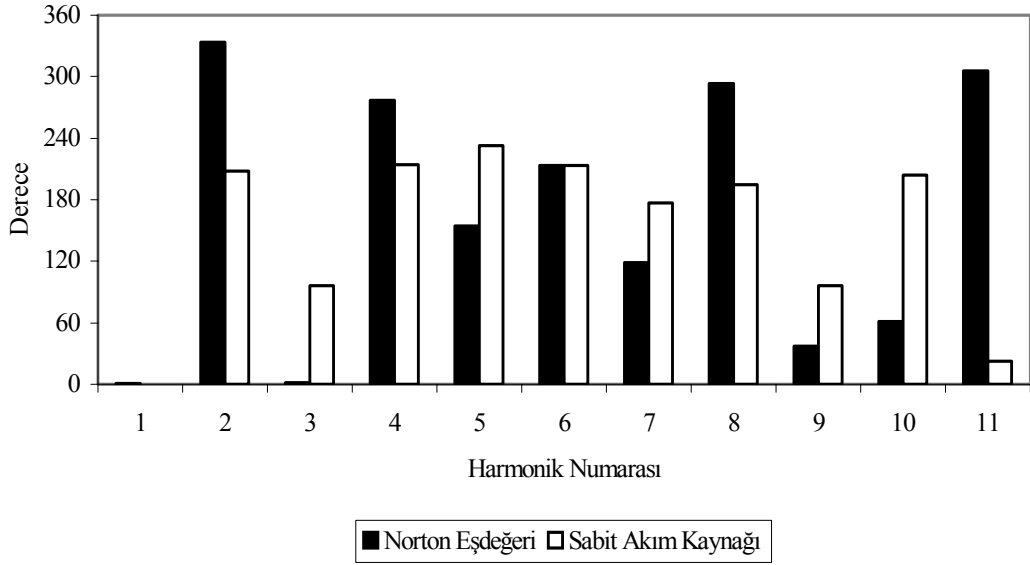


Şekil 3.9-a: 6.3 kV barada hesaplanan gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması



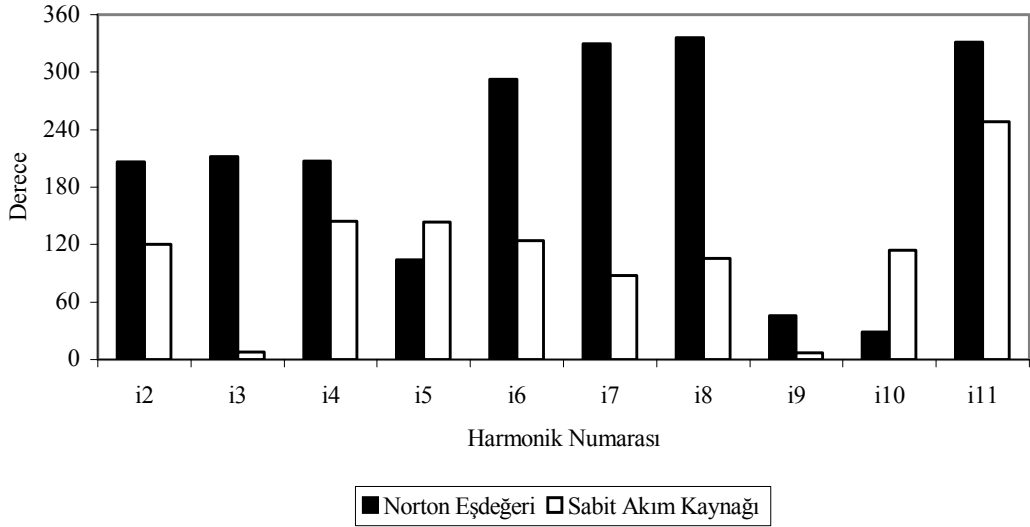
Şekil 3.9-b: 6.3 kV barada hesaplanan akım harmoniklerinin karşılaştırılması

6,3 kV Bara Gerilim Açı Değeri



Şekil 3.9-c: 6.3 kV barada hesaplanan gerilim açısı karşılaştırılması

6,3 kV Bara Akım Açı Değeri



Şekil 3.9-d: 6.3 kV barada hesaplanan akım açısı karşılaştırılması

Durum 2’de elde edilen sonuçlar incelendiğinde;

- Norton eşdeğere ve Sabit Akım Kaynağı modeli arasında 6,3 kV baranın gerilim değerindeki değişimin farkı 1,18 ile 42,34 V., akım değerindeki değişimin farkı ise 0,199 ile 9,721 A. arasında değişmektedir. Her bir harmonik için hata miktarı Tablo 3-5’de verilmektedir.

Tablo 3.6. Norton Eşdeğer Devre Modeli ile Sabit Akım Kaynağı Modeli arasındaki hata miktarı

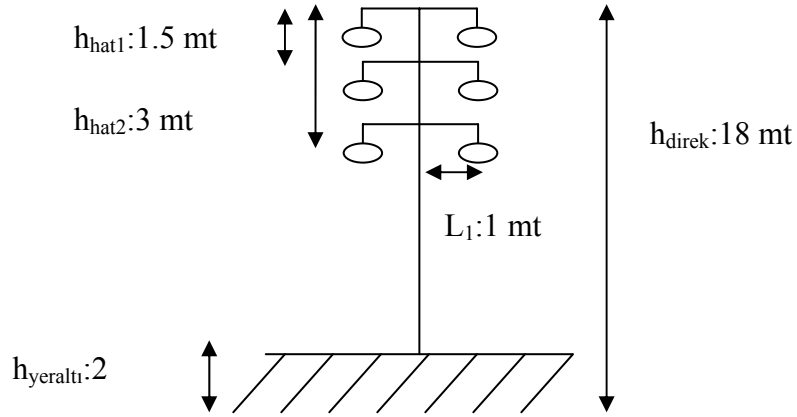
Harmonik Numarası	Norton Modeli Gerilim	SAK Modeli Gerilim	Fark Gerilim	Norton Modeli Akım	SAK Modeli Akım	Fark Akım
2	23,62	16,610	7,010	8,925	5,441	-3,484
3	23,90	15,380	8,520	1,267	3,362	2,095
4	1,82	5,530	-3,710	0,176	0,906	0,730
5	66,02	94,470	-28,450	2,665	12,386	9,721
6	6,34	5,000	1,340	1,848	0,546	-1,302
7	34,74	77,080	-42,340	1,260	7,219	5,959
8	8,75	1,100	7,650	0,466	0,090	-0,376
9	13,31	2,940	10,370	0,624	0,214	-0,410
10	3,12	4,300	-1,180	0,083	0,282	0,199
11	50,72	72,130	-21,410	1,560	4,298	2,738
V_{rms}/I_{rms}	97,84	143,75	%31,9	9,82	16,31	%39,8

Bu durum için yapılan karşılaştırma sonucunda Norton eşdeğer ve Sabit Akım Kaynağı modellerinin 6,3 kV barası gerilim ve akım harmoniklerine ait etkin değeri için verdikleri sonuçların birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

Durum 3 de; Şekil 3-4 de verilen 1 no’lu kesicinin beslediği 2,5MVA-34,5/0,4kV transformatör 3m uzunluktaki Cu 2x(120//10)mm² barayla harmonik üreten yük grubu ve kondansatör grubunun bulunduğu dağıtım panosu barasına bağlanmıştır. Harmonik üreten yük gurubu inverterle beslenen D.A. motorlarından oluşmaktadır. Dağıtım panosu barasına ait gerilim ve dağıtım panosu barasıyla 2,5MVA transformatör arası baradan akan akımın dalga formları ve harmonik spektrumları Şekil 3.10’da verilmiştir.

Şekil 3-10'da verilen gerilim ve akım dalga formu ve harmonik spektrumlarından, harmonik üreten yük grubunun 3., 5., 7. ve 11. harmonik bileşenlerinin baskın oldukları görülmektedir.

Mevcut sistemde varolan ve direk tipi Şekil 3-11'de verilen; çift devreli (3x477 MCM) kesitinde AL-St iletkenli Tuzla trafo merkezi-Sarkuysan arası enerji nakil hattının



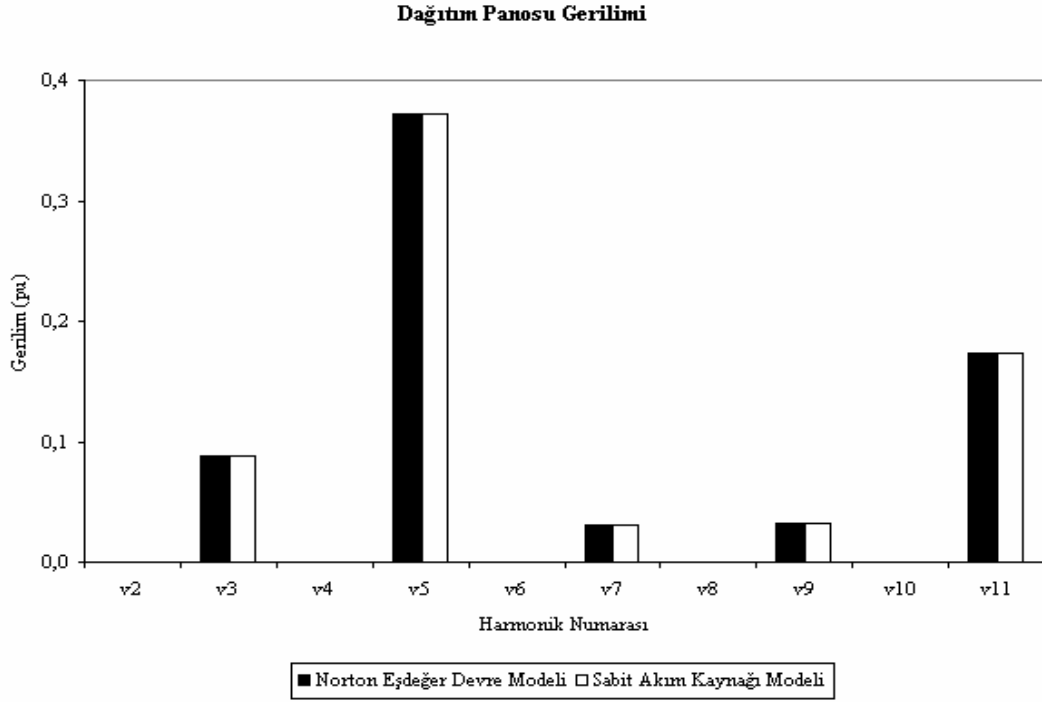
Şekil 3.11. Tuzla TM-Sarkuysan arası enerji nakil hattının direk tipi.

Şekil 3.12'de verilen XLPE 2x3(1x120ş/16 mm²) kablo ile değiştirildiği varsayılmıştır.

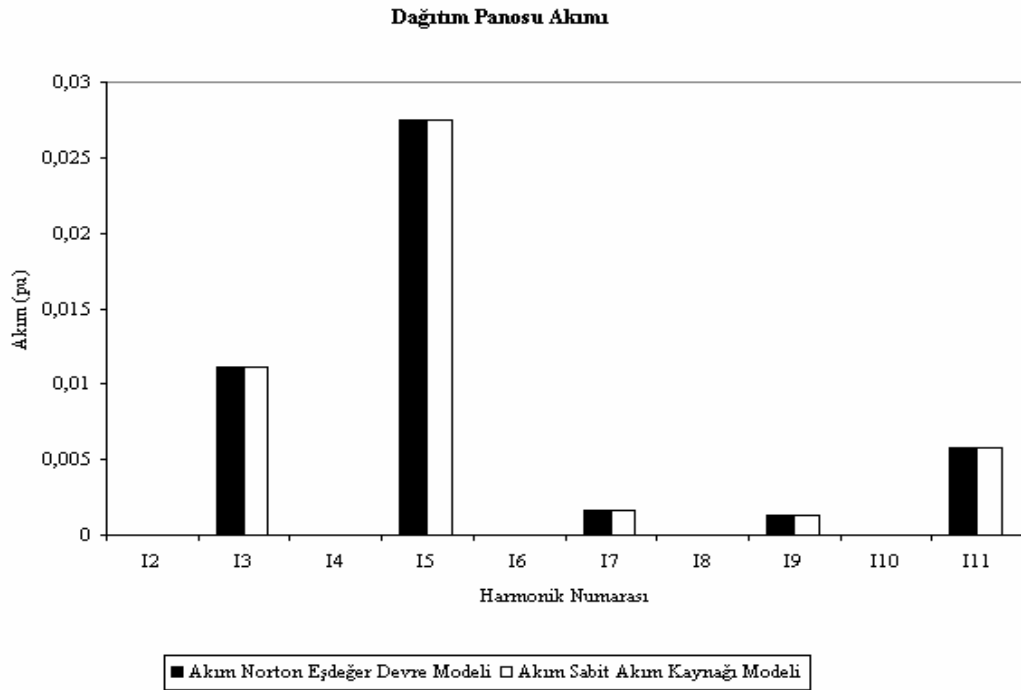


Şekil 3.12. XLPE kablo yapısı.

Yeni çalışma şartları için Sabit Akım Kaynağı ve Norton Modelleri kullanılarak; dağıtım panosu barasının gerilimi ve dağıtım panosu barasıyla 2,5MVA transformatör arası akan akım hesaplanmıştır. Her iki modeli verdiği sonuçlar Şekil 3.13'de verilmiştir [17].



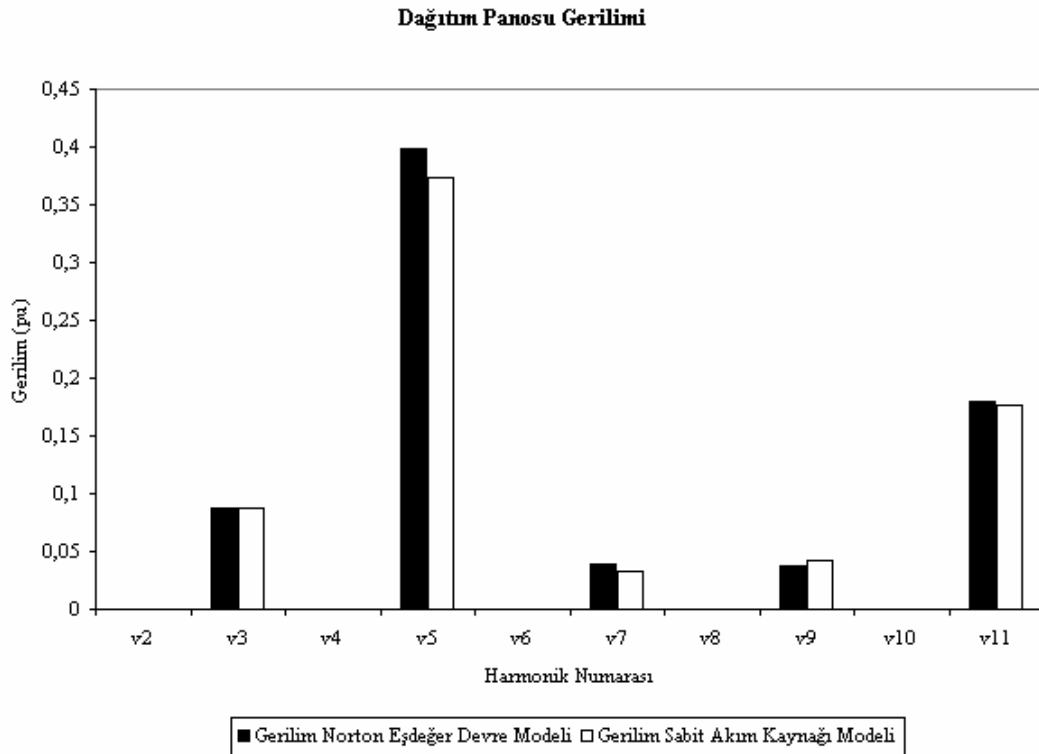
Şekil 3.13-a : Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri kullanılarak elde edilen; dağıtım panosu barasının gerilim harmonikleri.



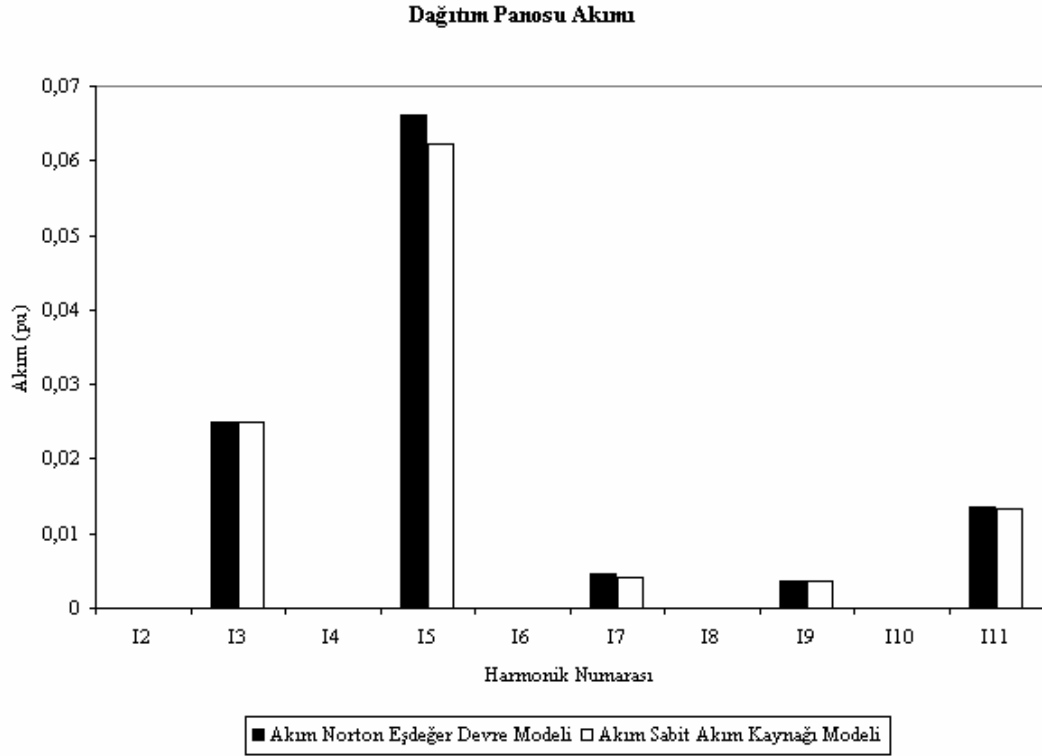
Şekil 3.13-b : Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri kullanılarak elde edilen; dağıtım panosu barasıyla 2,5MVA transformatör arası akan akım harmonikleri.

Bu durum analizi sonucunda Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin; dağıtım panosu barasının gerilim harmoniklerine ait etkin değerlerinin 0,0305 pu (v_7) ile 0,3722 pu (v_5) arasında, dağıtım panosu barasıyla 2,5 MVA transformatör arası akan akımın harmoniklerine ait etkin değerlerinin ise 0,0013 pu (i_9) ile 0,0275 pu (i_5) arasında değiştiği, verdikleri sonuçların birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür [17].

Durum 4'de; Mevcut sistemde varolan 2.5 MVA gücündeki kalın çekim ünitesi transformatörüne ihtiyaca karşılık 3 MVA gücünde paralel bir transformatörün sisteme eklendiği varsayılmıştır. Yeni çalışma şartları için Sabit Akım Kaynağı ve Norton Modelleri kullanılarak; dağıtım panosu barasının gerilimi ve dağıtım panosu barasıyla 2,5 MVA transformatör arası akan akım hesaplanmıştır. Her iki modeli verdiği sonuçlar Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14-a : Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri kullanılarak elde edilen; dağıtım panosu barasının gerilim harmonikleri.



Şekil 3.14-b : Norton ve Sabit Akım Kaynağı modelleri kullanılarak elde edilen; dağıtım panosu barasıyla 2,5MVA transformatör arası akan akım harmonikleri.

Bu durum analizi sonucunda Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin; dağıtım panosu barası geriliminin 5.harmoniğine ait etkin değeri için verdikleri sonuçlar arasında 0,005 pu fark olduğu, dağıtım panosu barasıyla 2,5MVA transformatör arası akan akımın 5.harmoniğine ait etkin değeri için verdikleri sonuçlar arasında 0,004 pu fark olduğu, gerilim değerlerinin 0,033 pu (v_7) ile 0,3978 pu (v_5) arasında, akım değerlerinin ise 0,00365 pu (i_9) ile 0,06219 pu (i_5) arasında değiştiği görülmüştür [17].

3.5 Sonuç ve Özet

Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Gebze fabrikasında, üretimin gerçekleşmesi için harmonik üreten elemanlardan; konvertörler, inverterlerle beslenen DC-AC motorlar ve tavlama işlemi için trafolar oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden Sabit Akım Kaynağı ve Norton modelleri

kullanılarak; şebekede ya da tesiste, olması muhtemel değişiklerde harmonik üreten yüklerin lineer yüklere ve güç sistemlerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin; akım ve bara geriliminin harmoniklerine ait etkin değerler için verdikleri sonuçların birbirine yakın değerlerde olduğu görölmüşür. Sabit Akım Kaynağı modeli fazla ölçüm ve hesaplama gerektirmediği için bu çalışma koşullarında tercih edilebilir.

4 SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Gebze tesisi örnek sistem olarak seçilmiştir. Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin performansları; örnek sistemde mevcut olan elemanlarda yapılan değişimlerde verdikleri sonuçlar kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Durum 1 ve Durum 2' de şebeke beslemesinin olmadığı ve ünitelerin farklı yüklenmelerine göre sistemin sadece kojenerasyon tesisinden beslendiği varsayılmıştır. Trafo ve trafo merkezlerinin primer tarafından ölçümler yapılmıştır. Durum 1'de elde edilen modellerin sonuçları gerçek ölçüm sonuçları ile Durum 2'de ise modeller kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler, ölçüm sonuçlarına göre karşılaştırıldığında Norton Eşdeğer Devre modelinin 5., 9. ve 11., Sabit Akım Kaynağı modelinin ise 3. ve 7. harmoniklerde daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Sabit Akım Kaynağı modeli fazla ölçüm ve hesaplama gerektirmediği için bu çalışma koşullarında tercih edilebilir.

Durum 3'de mevcut sistemde varolan Tuzla TM-Sarkuysan arası enerji nakil hattının XLPE 2x3(1x120ş/16 mm²) kablo ile değiştirildiği varsayılmıştır. Bu meydana gelen yeni durum için daha önceki durumda yapılan ölçümlerle oluşturulmuş harmonik üreten yük modelleri kullanılarak dağıtım panosu barasının gerilimi ve dağıtım panosu barasıyla 2,5 MVA transformatör arası akan akım hesaplanmıştır. Bu durum analizi sonucunda Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin; hat akımının ve bara geriliminin harmoniklerine ait etkin değerler için verdikleri sonuçların birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

Durum 4'de mevcut sistemde varolan 2.5 MVA gücündeki kalın çekim ünitesi transformatörüne ihtiyaca karşılık 3 MVA gücünde paralel bir transformatörün sisteme eklendiği varsayılmıştır. Yeni çalışma şartları için harmonik üreten yük modelleri kullanılarak; dağıtım panosu barası gerilimi ve dağıtım panosu barasıyla 2,5 MVA kalın çekim ünitesi transformatörü arasında akan akım hesaplanmıştır. Bu durum analizi sonucunda da Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin; hat

akımının ve bara geriliminin harmoniklerine ait etkin değerler için verdikleri sonuçların birbirine çok yakın değerlerde olduğu görölmüştür.

İleri ki çalışmalarda, Durum 1 ve Durum 2 için, akım ve gerilim ölçümlerini trafoların sekonder tarafında, farklı çalışma koşulları için tekrar yaparak, elde edilen sonuçların bu çalışma ile karşılaştırılmasının yapılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Task Force Harmonic Modelling and Simulation, “Modelling and Simulation of the Propagation of Harmonics in electric Power Networks”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.11, No.1, pp. 452-465, January, 1996
- [2] Arrilaga, J., Bradley, D.A., Bodger, P.S.; “Power System Harmonics”, John Wiley and Sons, New York, 1985.
- [3] Yacamini, R. and De Oliveira, J.C.; “Harmonics in Multiple Converter Systems : A Generalized Approach”, IEE Proc. Part B, Vol.127, No.2, March 1980.
- [4] Xu, W., Jose, J.R. and Dommel, H.W.; “A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PS-6, February 1991, pp.174-182.
- [5] Xia, D. and Heydt, G.T.; “Harmonic Power Flow Studies, Part I-Formulation and solution, Part II –Implementation and Practical Application”, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, June 1982, pp.1257-1270.
- [6] Song, W., Heydt, G.T. and Grady, W.M.; “ The Integration of HVDC Subsystems into Harmonic Power Flow Algorithm”, IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS-103, August 1984, pp. 1953-1961.
- [7] Dommel, H.W.; “Electromagnetic Transients Programme Reference Manuel (EMTP Theory Book), Prepared for Bonneville Power Administration, Dept. Of Electrical Engineering, University of British Columbia, August 1986.
- [8] Thunberg, E. and Söder, L., “A Norton Approach to Distribution Network Modelling”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.14, No.1, pp. 72-277, January, 1999
- [9] Thunberg, E.; “On the Benefit of Harmonic Measurements in Power Systems”, Doctoral Dissertation Dept. of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology Stockholm, September 2001.
- [10] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.; “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi, Kasım 2003.
- [11] IEEE Std 1459; “Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [12] Kocatepe, C., Karakaş, A.; “Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri”, 1.Bölüm, 3e Electrotech Dergisi, Sayı 86, Temmuz, s.80-83, 2001.

- [13] Kocatepe, C., Karakaş, A.; “Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri”, 2.Bölüm, 3e Electrotech Dergisi, Sayı 87, Ağustos, s.90-92, 2001.
- [14] Bayram, M.; “Kompanzasyon Tesislerinde Rezonans Olayları ve Bunların Önlenmesi”, Elektroteknik Mecmuası, Sayı 7, 1985.
- [15] Sharon, D.; “Power Factor Definitions and Power Transfer Quality in Nonsinusoidal Situations”, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.45, No.3, pp. 728-733, June 1996.
- [16] Circutor AR5 Manuel Book, 2000.
- [17] Balcı, E., Kılıç, Ö., Hocaoğlu, H.; “Harmonik Üreten Yüklere ait Yaygın Olarak Kullanılan Modellerin Gerçek Bir Sisteme Uygulaması”, EVK 2005, s.172-174

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İstanbul-Kartal'da doğdu. Lise öğrenimini Hayrullah Kefoğlu Lisesi'nde tamamladı. 1997 yılında girmeye hak kazandığı Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden Temmuz 2001'de mezun oldu. Şubat 2002'de Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Şubat 2002'de Sarkuysan A.Ş.de Elektrik Mühendisi olarak çalışmaya başladı.

EKLER

EK-1: Tez içerisindeki incelenen “Durum 1” için ölçüm sonuçları;

Tablo 1: 3 No’ lu kesiciye ait 1 No’ lu generatör devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3648			AKIM (AMPER) :55.292		
AÇI (DERECE) :263.9			AÇI (DERECE) :227		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.064	91.5	2	0.496	140.6
3	0.445	145.3	3	2.357	267.1
4	0.115	284.2	4	0.182	240.3
5	0.402	292	5	9.340	329.3
6	0.063	160.8	6	0.142	245.2
7	0.313	324.3	7	2.875	333.8
8	0.066	264.4	8	0.020	264.1
9	0.074	244.4	9	0.654	186.3
10	0.066	269.6	10	0.014	350.2
11	0.082	321.9	11	0.809	242.7

Tablo 2: 3 No’ lu kesiciye ait generatörler devrede iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3643			AKIM (AMPER) :56.494		
AÇI (DERECE) :67.9			AÇI (DERECE) :38.1		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.211	298.9	2	0.079	100.2
3	0.725	155.3	3	1.836	289
4	0.137	149.7	4	0.280	327.2
5	0.363	263.3	5	3.733	243.6
6	0.043	244.0	6	0.122	96.3
7	0.496	237.8	7	6.387	59.8
8	0.100	18.9	8	0.241	252.1
9	0.292	191.3	9	0.133	226.9
10	0.046	24.5	10	0.085	248.8
11	0.396	242.2	11	0.306	98.3

Tablo 3: 4 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3613			AKIM (AMPER) :170.76		
AÇI (DERECE) :112.1			AÇI (DERECE) :90.5		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.175	75.4	2	0.359	56.8
3	0.583	146	3	2.303	183.3
4	0.169	111.1	4	0.366	52.7
5	0.114	237.9	5	8.912	52.7
6	0.045	182.4	6	0.126	199.7
7	0.241	261.5	7	2.248	136.1
8	0.157	342.7	8	0.188	331.9
9	0.151	166.4	9	0.083	37.9
10	0.098	235.9	10	0.053	222.9
11	0.193	315.5	11	0.312	206.7

Tablo 4: 4 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3493			AKIM (AMPER) :171.65		
AÇI (DERECE) :50.7			AÇI (DERECE) :41.4		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.051	9.7	2	1.444	136.5
3	0.322	151	3	0.479	77.7
4	0.034	56	4	0.081	253.9
5	0.459	274.9	5	7.122	34.9
6	0.060	133.6	6	0.145	9
7	0.165	256.2	7	2.312	68.9
8	0.043	247	8	0.063	138.6
9	0.026	55.5	9	0.192	217.5
10	0.152	174.4	10	0.052	19.7
11	0.299	197	11	0.817	58

Tablo 5: 5 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3657			AKIM (AMPER) :233.75		
AÇI (DERECE) :138.4			AÇI (DERECE) :117.1		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.070	328.8	2	1.156	2.2
3	0.371	217.1	3	1.986	12.8
4	0.110	138.6	4	0.244	303.2
5	0.587	284	5	4.305	146.7
6	0.067	25.9	6	0.252	19.2
7	0.581	316.2	7	1.322	256.2
8	0.038	333	8	0.136	197.6
9	0.249	216.7	9	0.075	40.9
10	0.091	355.3	10	0.135	308.2
11	0.223	212.9	11	0.951	275.1

Tablo 6: 5 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3631			AKIM (AMPER) :239		
AÇI (DERECE) :215.2			AÇI (DERECE) :199.4		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.357	316.5	2	0.477	339.6
3	0.344	155.1	3	2.925	348.6
4	0.048	159.1	4	0.212	11.2
5	0.772	295.2	5	5.212	119.7
6	0.122	233.2	6	0.029	144
7	0.383	266.4	7	1.834	210.7
8	0.136	49.4	8	0.104	290.6
9	0.249	180.1	9	0.122	308.7
10	0.105	93.8	10	0.063	82.4
11	0.094	175.7	11	0.831	173.4

Tablo 7: 6 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3644			AKIM (AMPER) :162.63		
AÇI (DERECE) :334.7			AÇI (DERECE) :337.3		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.093	333.7	2	1.410	146.2
3	0.558	165.8	3	2.774	157
4	0.157	323.8	4	0.413	55.4
5	0.329	252.4	5	0.553	347.2
6	0.024	192.9	6	0.110	6.4
7	0.405	336.2	7	0.796	333
8	0.080	83.6	8	0.153	29.9
9	0.212	164.5	9	0.123	94.9
10	0.075	176.6	10	0.188	259.1
11	0.289	5.5	11	0.429	294

Tablo 8: 6 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3746			AKIM (AMPER) :161.2		
AÇI (DERECE) :207.2			AÇI (DERECE) :187.8		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.163	337.7	2	1.128	161.4
3	0.473	177.6	3	1.143	14.8
4	0.034	226.9	4	0.283	234.2
5	0.453	315.3	5	4.603	84
6	0.059	300.5	6	0.117	291.7
7	0.564	305	7	0.999	101.4
8	0.069	210.1	8	0.090	28.5
9	0.138	106.5	9	0.516	194.3
10	0.061	153.1	10	0.063	11.4
11	0.058	290.3	11	0.220	89.7

Tez içerisindeki incelenen “Durum 2” için ölçüm sonuçları ise;

Tablo 9: 3 No’ lu kesiciye ait 1 No’ lu generatör devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3648			AKIM (AMPER) :55.292		
AÇI (DERECE) :263.9			AÇI (DERECE) :227		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.064	91.5	2	0.496	140.6
3	0.445	145.3	3	2.357	267.1
4	0.115	284.2	4	0.182	240.3
5	0.402	292	5	9.340	329.3
6	0.063	160.8	6	0.142	245.2
7	0.313	324.3	7	2.875	333.8
8	0.066	264.4	8	0.020	264.1
9	0.074	244.4	9	0.654	186.3
10	0.066	269.6	10	0.014	350.2
11	0.082	321.9	11	0.809	242.7

Tablo 10: 3 No’ lu kesiciye ait generatörler devrede iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3643			AKIM (AMPER) :56.494		
AÇI (DERECE) :67.9			AÇI (DERECE) :38.1		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.211	298.9	2	0.079	100.2
3	0.725	155.3	3	1.836	289
4	0.137	149.7	4	0.280	327.2
5	0.363	263.3	5	3.733	243.6
6	0.043	244.0	6	0.122	96.3
7	0.496	237.8	7	6.387	59.8
8	0.100	18.9	8	0.241	252.1
9	0.292	191.3	9	0.133	226.9
10	0.046	24.5	10	0.085	248.8
11	0.396	242.2	11	0.306	98.3

Tablo 11: 4 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3594			AKIM (AMPER) :212.485		
AÇI (DERECE) :354.7			AÇI (DERECE) :342		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.207	274.6	2	0.186	251.8
3	0.342	175.10	3	0.421	99.10
4	0.060	96.80	4	0.110	62.70
5	0.562	320.00	5	6.369	81.50
6	0.077	349.70	6	0.064	169.30
7	0.400	309.80	7	2.670	128.00
8	0.131	334.90	8	0.149	197.80
9	0.088	158.40	9	0.071	234.60
10	0.074	349.60	10	0.103	232.40
11	0.302	312.50	11	0.794	161.10

Tablo 12: 4 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3438			AKIM (AMPER) :230.346		
AÇI (DERECE) :185.9			AÇI (DERECE) :169.4		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.049	145.7	2	1.626	109.5
3	0.351	146.40	3	0.986	77.30
4	0.091	133.40	4	0.138	182.60
5	0.564	288.50	5	1.534	104.20
6	0.121	10.60	6	0.065	320.40
7	0.265	277.30	7	1.725	117.50
8	0.099	257.80	8	0.108	244.90
9	0.168	0.40	9	0.090	341.70
10	0.110	328.00	10	0.008	169.30
11	0.259	221.20	11	0.713	247.70

Tablo 13: 5 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3542			AKIM (AMPER) :319.456		
AÇI (DERECE) :127.4			AÇI (DERECE) :112.3		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.063	159.9	2	0.681	104.1
3	0.414	133.40	3	1.647	336.80
4	0.037	319.20	4	0.199	303.60
5	0.428	324.90	5	3.883	138.80
6	0.120	87.80	6	0.075	103.10
7	0.199	301.70	7	0.631	228.40
8	0.056	330.50	8	0.170	195.20
9	0.166	157.10	9	0.134	75.40
10	0.034	262.70	10	0.111	15.30
11	0.129	64.90	11	0.752	244.60

Tablo 14: 5 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3637			AKIM (AMPER) :315.930		
AÇI (DERECE) :96			AÇI (DERECE) :74.5		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.211	286.2	2	0.390	73.5
3	0.271	105.50	3	1.731	26.80
4	0.110	142.20	4	0.069	160.50
5	0.564	264.60	5	3.579	134.50
6	0.053	84.30	6	0.084	127.90
7	0.586	289.60	7	0.355	249.90
8	0.107	27.50	8	0.121	59.90
9	0.107	67.10	9	0.232	327.00
10	0.050	107.10	10	0.112	77.00
11	0.489	251.20	11	1.026	227.40

Tablo 15: 6 No' lu kesiciye ait 1 No' lu generatör devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3726			AKIM (AMPER) :252.234		
AÇI (DERECE) :225.5			AÇI (DERECE) :226.2		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.083	309.9	2	0.626	76.3
3	0.453	172.00	3	1.589	168.70
4	0.086	140.90	4	0.167	282.50
5	0.507	297.40	5	1.044	263.00
6	0.055	29.80	6	0.159	199.70
7	0.702	309.10	7	2.342	319.80
8	0.080	302.80	8	0.119	297.40
9	0.148	178.90	9	0.123	43.40
10	0.065	343.10	10	0.036	276.00
11	0.271	351.20	11	0.544	314.30

Tablo 16: 6 No' lu kesiciye ait generatörler devrede iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):3732			AKIM (AMPER) :250.649		
AÇI (DERECE) :300.4			AÇI (DERECE) :286.9		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.079	275.3	2	0.733	181.8
3	0.549	171.40	3	1.614	233.90
4	0.055	7.10	4	0.310	100.10
5	0.557	254.60	5	0.884	264.70
6	0.082	188.80	6	0.147	133.30
7	0.677	301.20	7	0.703	67.00
8	0.173	233.80	8	0.052	121.40
9	0.055	145.20	9	0.308	135.20
10	0.064	165.90	10	0.067	196.00
11	0.230	262.20	11	0.502	348.50

Tez içerisindeki incelenen “Durum 3 ve 4” için ölçüm sonuçları;

Tablo 17: 1 no’lu Kesici kondansatör gruplarından 15 grupta iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):227			AKIM (AMPER) :1842.35		
AÇI (DERECE) :15,4			AÇI (DERECE) :356.4		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.412	189.6	2	2.063	63.6
3	0.761	132.7	3	3.471	277.7
4	0.339	142.0	4	1.712	359.1
5	2.398	220.4	5	8.568	17.5
6	0.158	106.0	6	0.744	19.2
7	0.321	89.3	7	0.549	353.3
8	0.172	70.7	8	0.338	18.2
9	0.095	82.0	9	0.451	73.4
10	0.144	50.8	10	0.204	52.1
11	1.202	178.1	11	1.861	60.1

Tablo 18: 1 no’lu Kesici kondansatör grupları devre dışı iken ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):221			AKIM (AMPER) :2485.56		
AÇI (DERECE) :2,3			AÇI (DERECE) :318.1		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.115	216.4	2	0.445	185.3
3	0.353	141.0	3	2.408	343.8
4	0.134	116.0	4	1.156	344.2
5	3.008	237.1	5	6.941	154.6
6	0.024	263.9	6	0.316	46.4
7	1.039	135.3	7	2.066	131.5
8	0.108	68.7	8	0.358	137.3
9	0.089	9.6	9	0.153	202.7
10	0.119	209.9	10	0.307	242.2
11	2.436	185.9	11	1.875	344.9

Tablo 19: 1 no'lu Kesici kondansatör grupları ölçüm sonuçları

GERİLİM (VOLT):230			AKIM (AMPER) :1262,75		
AÇI (DERECE) :179,3			AÇI (DERECE) :91,0		
HARMONİ K	%	AÇI	HARMONİ K	%	AÇI
2	0.334	3.0	2	0.309	72.7
3	0.760	140.1	3	3.921	315.6
4	0.048	319.3	4	1.134	139.5
5	2.476	224.3	5	18.806	43.6
6	0.060	40.1	6	0.289	151.6
7	0.430	119.4	7	1.007	83.3
8	0.054	53.2	8	0.066	209.6
9	0.104	321.6	9	0.273	159.3
10	0.170	358.3	10	0.068	186.8
11	1.604	170.1	11	2.331	163.8

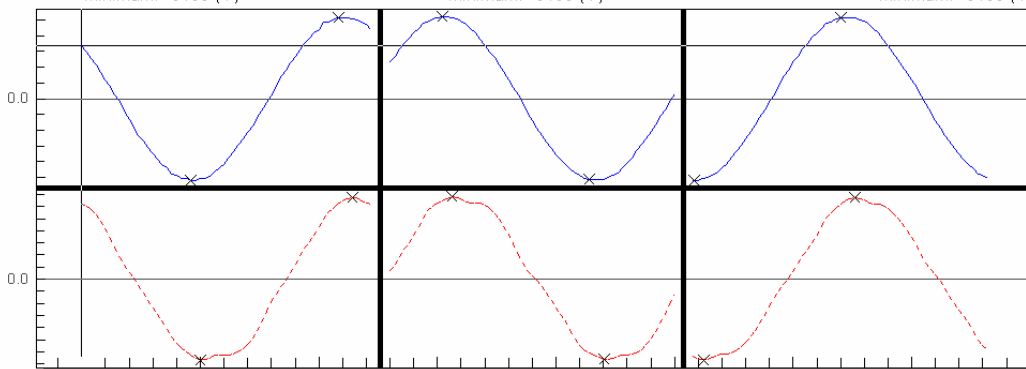
WAVE FORM (D11.a5i)

18.05.2005 12:00:00

Vn F1: 3657 (V)
THD: 1.3 %
Maximum: 5166 (V)
Minimum: -5166 (V)

Vn F2: 3645 (V)
THD: 1.2 %
Maximum: 5166 (V)
Minimum: -5103 (V)

Vn F3: 3663 (V)
THD: 1.1 %
Maximum: 5166 (V)
Minimum: -5166 (V)



In F1: 233751 (mA)
THD: 5.2 %
Maximum: 327200 (mA)
Minimum: -323040 (mA)

In F2: 221033 (mA)
THD: 5.3 %
Maximum: 316000 (mA)
Minimum: -306880 (mA)

In F3: 234887 (mA)
THD: 3.9 %
Maximum: 337760 (mA)
Minimum: -332160 (mA)

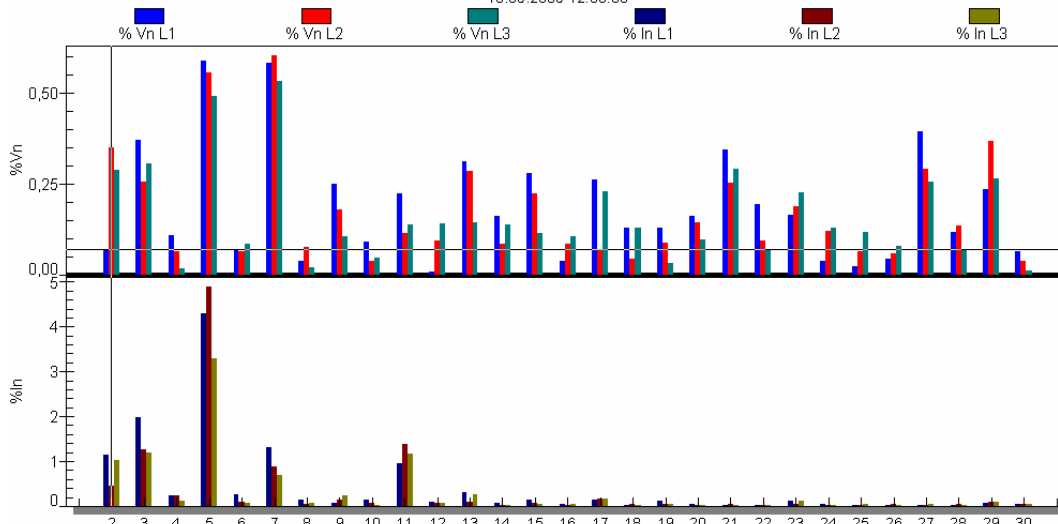
Act : 3339 (V)

Maximum : 5166 (V)

Minimum : -5166 (V)

HARMONICS (D11.a5i)

18.05.2005 12:00:00



Vn F1: 3656.889 (V)
In F1: 233750.794 (mA)

Vn F2: 3645.204 (V)
In F2: 221033.456 (mA)

Vn F3: 3662.653 (V)
In F3: 234887.087 (mA)

Act : 2
Act : 0.070 (%Vn)

Selected Variable: % Vn L1
From : 2
Maximum : 0.587 (%Vn)

To : 30
Minimum : 0.011 (%Vn)

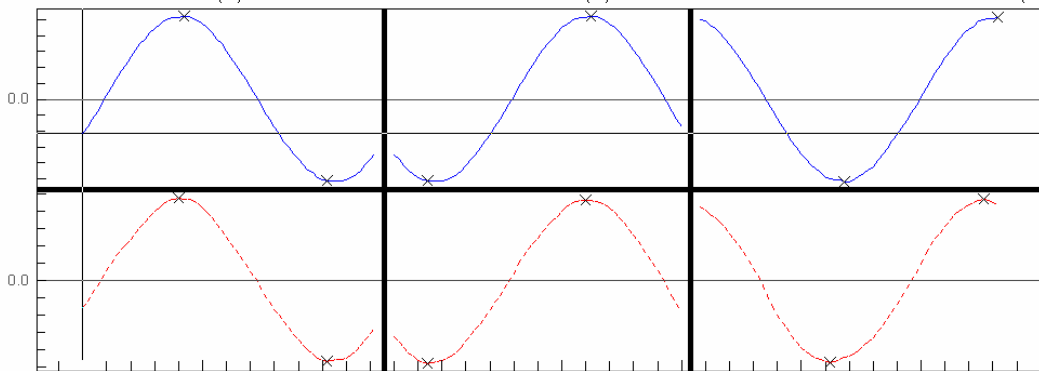
WAVE FORM (D12.a5i)

11.06.2005 18:30:00

Vn F1: 3644 (V)
THD: 1.1 %
Maximum: 5166 (V)
Minimum: -5103 (V)

Vn F2: 3658 (V)
THD: 1.0 %
Maximum: 5166 (V)
Minimum: -5103 (V)

Vn F3: 3647 (V)
THD: 0.9 %
Maximum: 5166 (V)
Minimum: -5166 (V)



In F1: 162634 (mA)
THD: 3.4 %
Maximum: 236040 (mA)
Minimum: -235080 (mA)

In F2: 145201 (mA)
THD: 2.5 %
Maximum: 204120 (mA)
Minimum: -211560 (mA)

In F3: 155800 (mA)
THD: 4.0 %
Maximum: 217080 (mA)
Minimum: -221160 (mA)

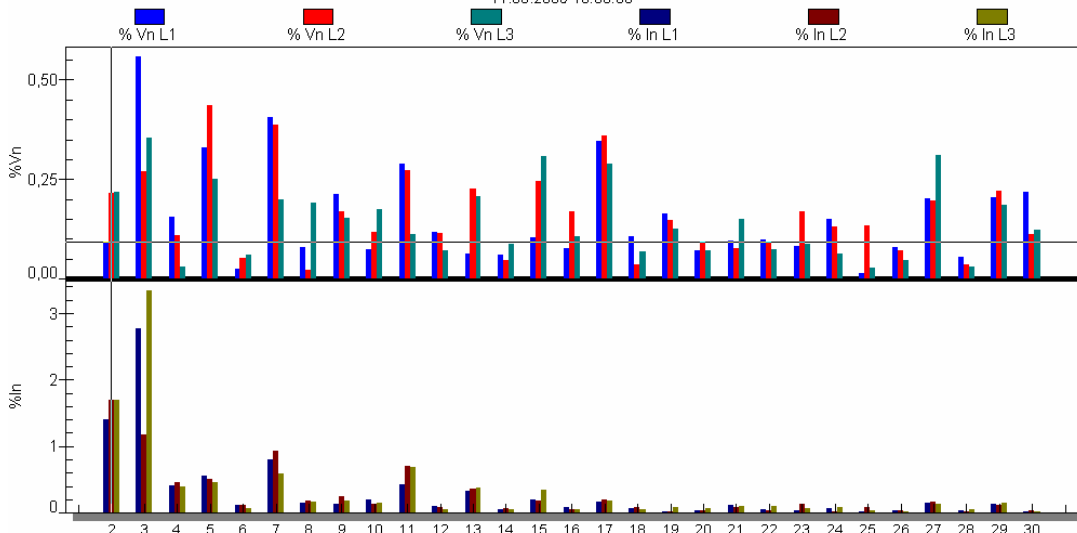
Act : -2142 (V)

Maximum : 5166 (V)

Minimum : -5103 (V)

HARMONICS (D12.a5i)

11.06.2005 18:30:00



Vn F1: 3643.592 (V)
In F1: 162634.093 (mA)

Vn F2: 3658.361 (V)
In F2: 145200.779 (mA)

Vn F3: 3647.372 (V)
In F3: 155800.443 (mA)

Act : 2
Act : 0.093 (%Vn)

Selected Variable: % Vn L1
From : 2
Maximum : 0.558 (%Vn)

To : 30
Minimum : 0.014 (%Vn)

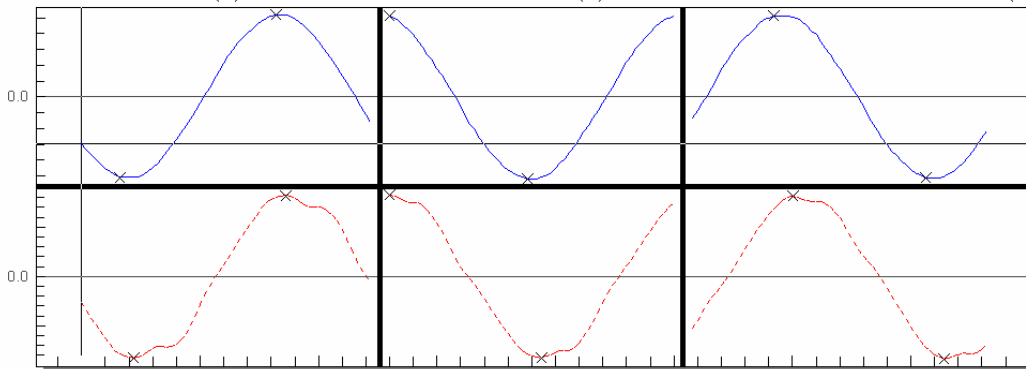
WAVE FORM (D11_2.a5i)

30.09.2005 09:40:00

Vn F1: 3631 (V)
THD: 1.2 %
Maximum: 5166 (V)
Minimum: -5103 (V)

Vn F2: 3626 (V)
THD: 1.2 %
Maximum: 5040 (V)
Minimum: -5103 (V)

Vn F3: 3623 (V)
THD: 1.5 %
Maximum: 5103 (V)
Minimum: -5103 (V)



In F1: 239045 (mA)
THD: 6.3 %
Maximum: 333760 (mA)
Minimum: -336160 (mA)

In F2: 291570 (mA)
THD: 4.4 %
Maximum: 410560 (mA)
Minimum: -411680 (mA)

In F3: 261655 (mA)
THD: 4.6 %
Maximum: 366400 (mA)
Minimum: -376800 (mA)

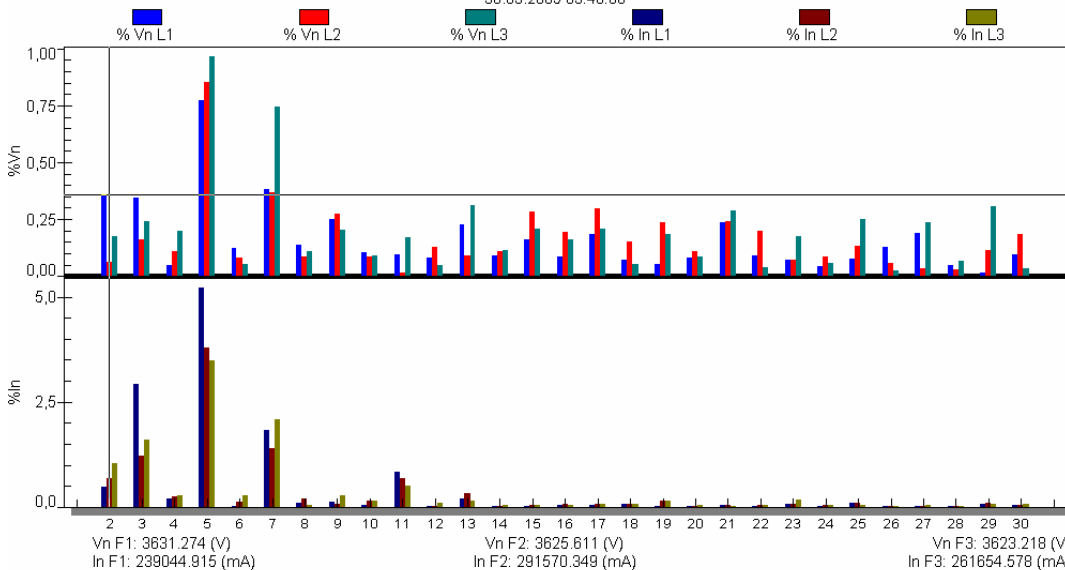
Act: -2961 (V)

Maximum: 5166 (V)

Minimum: -5103 (V)

HARMONICS (D11_2.a5i)

30.09.2005 09:40:00



Vn F1: 3631.274 (V)
In F1: 239044.915 (mA)

Vn F2: 3625.611 (V)
In F2: 291570.349 (mA)

Vn F3: 3623.218 (V)
In F3: 261654.578 (mA)

Act: 2
Act: 0.357 (%Vn)

Selected Variable: % Vn L1
From: 2
Maximum: 0.772 (%Vn)

To: 30
Minimum: 0.017 (%Vn)

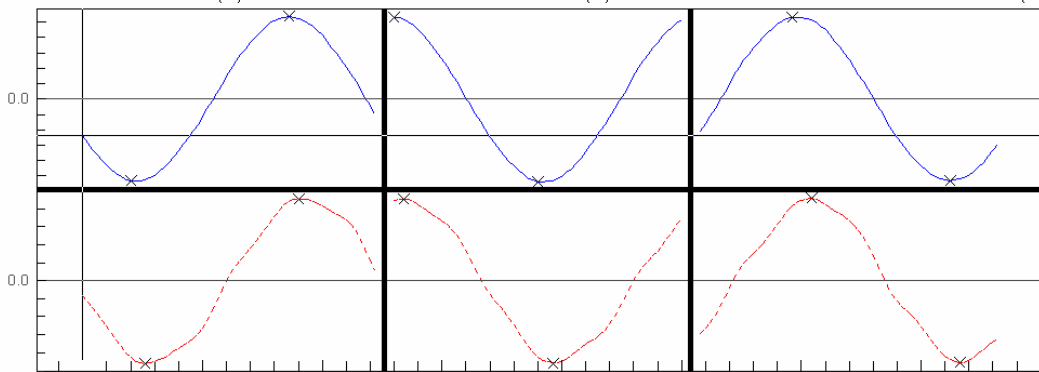
WAVE FORM (D12_2.a5i)

05.10.2005 01:40:00

Vn F1: 3746 (V)
THD: 1.0 %
Maximum: 5355 (V)
Minimum: -5292 (V)

Vn F2: 3744 (V)
THD: 0.9 %
Maximum: 5229 (V)
Minimum: -5292 (V)

Vn F3: 3735 (V)
THD: 1.1 %
Maximum: 5292 (V)
Minimum: -5292 (V)



In F1: 161263 (mA)
THD: 5.0 %
Maximum: 226920 (mA)
Minimum: -229680 (mA)

In F2: 156376 (mA)
THD: 5.0 %
Maximum: 226680 (mA)
Minimum: -228480 (mA)

In F3: 154582 (mA)
THD: 6.0 %
Maximum: 225720 (mA)
Minimum: -225360 (mA)

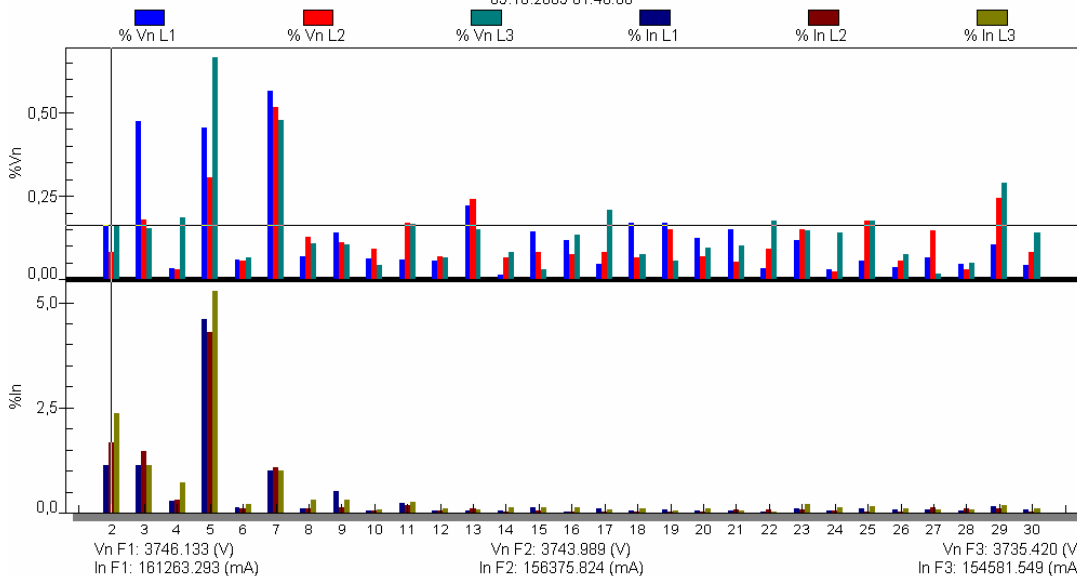
Act : -2394 (V)

Maximum : 5355 (V)

Minimum : -5292 (V)

HARMONICS (D12_2.a5i)

05.10.2005 01:40:00



Vn F1: 3746.133 (V)
In F1: 161263.293 (mA)

Vn F2: 3743.989 (V)
In F2: 156375.824 (mA)

Vn F3: 3735.420 (V)
In F3: 154581.549 (mA)

Act : 2
Act : 0.163 (%Vn)

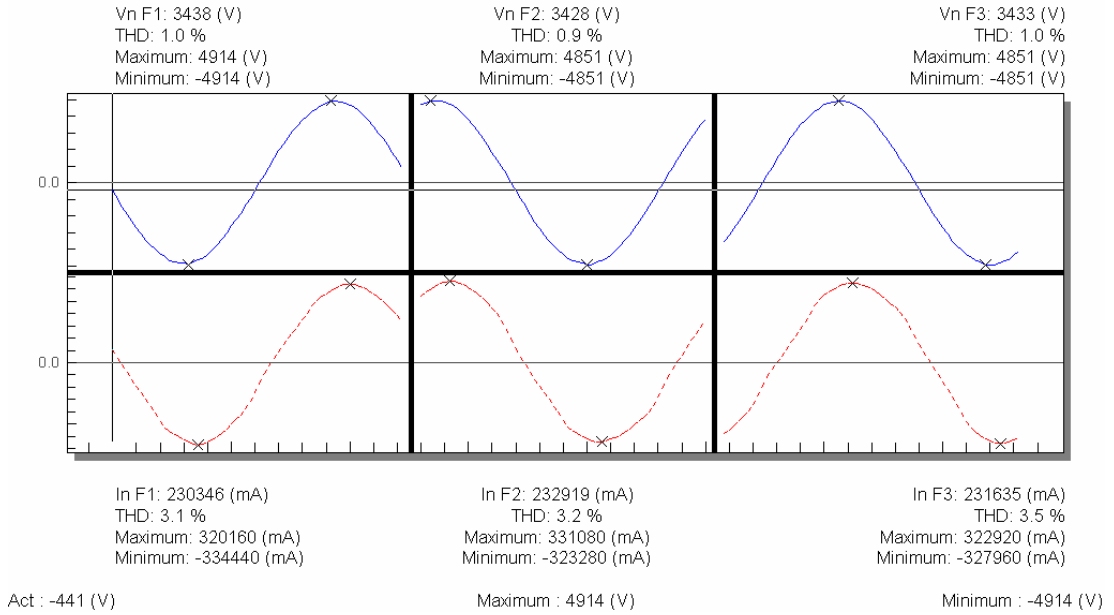
Selected Variable: % Vn L1
From : 2
Maximum : 0.584 (%Vn)

To : 30
Minimum : 0.014 (%Vn)

Generatörler devrede iken gerilim ve akımın dalga formu ve harmonik spektrumu aşağıda görülmektedir.

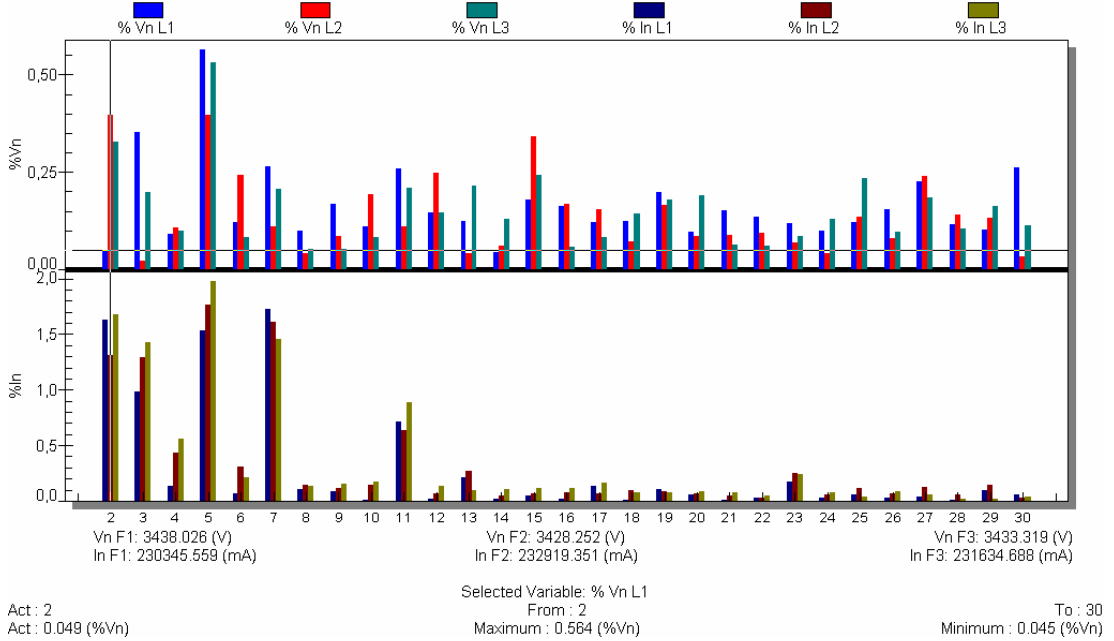
WAVE FORM (D10_2.a5i)

22.09.2005 11:50:00



HARMONICS (D10_2.a5i)

22.09.2005 11:50:00



Durum 1 için, ölçümü yapılan kesicilere ait Z_N ve I_N değerleri aşağıda tablo olarak verilmektedir.

Tablo 20: 3 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri

HARMONİK	Z_N (pu)	AÇI (derece)	HARMONİK	I_N (A)	AÇI (derece)
1	1.79	-46.82	1	5167	46.20
2	49.53	12.64	2	0.349	219.140
3	47.33	57.63	3	1.010	2.080
4	71.41	89.32	4	0.019	-50.830
5	11.23	155.22	5	5.000	85.470
6	108.54	190.61	6	0.043	14.030
7	16.93	49.57	7	0.926	39.280
8	47.42	265.73	8	0.156	89.800
9	79.65	199.40	9	0.400	-87.900
10	93.24	219.81	10	0.035	140.300
11	110.01	226.89	11	0.216	-26.560

Tablo 21: 4 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri

HARMONİK	Z_N (pu)	AÇI (derece)	HARMONİK	I_N (A)	AÇI (derece)
1	8.242	64.28	1	1103	64.28
2	3.846	86.25	2	3.645	86.25
3	14.494	7.35	3	2.71	7.35
4	18.887	169.57	4	0.254	169.57
5	4.086	-62.32	5	12.775	-62.32
6	3.727	70.73	6	1.303	70.73
7	44.149	20.30	7	4.26	20.30
8	28.329	41.91	8	0.184	41.91
9	29.694	154.79	9	0.357	154.79
10	26.242	126.03	10	0.428	126.03
11	15.131	256.33	11	0.643	256.33

Tablo 22: 5 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri

HARMONİK	Z_N (pu)	AÇI (derece)	HARMONİK	I_N (A)	AÇI (derece)
1	2.811	-58.21	1	3328	54.25
2	10.71	205.01	2	2.441	235.93
3	6.754	-4.94	3	2.483	149.61
4	81.883	-7.36	4	0.459	158.80
5	3.879	-16.73	5	6.587	120.38
6	29.139	159.81	6	0.411	227.26
7	12.099	226.40	7	1.596	-21.53
8	84.985	176.08	8	0.35	54.76
9	82.203	22.09	9	0.145	23.72
10	13.481	156.87	10	0.595	89.97
11	6.011	135.18	11	1.458	-87.79

Durum 2 için, ölçümü yapılan kesicilere ait Z_N ve I_N değerleri aşağıda tablo olarak verilmektedir.

Tablo 23: 3 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri

HARMONİK	Z_N (pu)	AÇI (derece)	HARMONİK	I_N (A)	AÇI (derece)
1	1.79	-46.82	1	5167	46.20
2	49.53	12.64	2	0.349	219.140
3	47.33	57.63	3	1.010	2.080
4	71.41	89.32	4	0.019	-50.830
5	11.23	155.22	5	5.000	85.470
6	108.54	190.61	6	0.043	14.030
7	16.93	49.57	7	0.926	39.280
8	47.42	265.73	8	0.156	89.800
9	79.65	199.40	9	0.400	-87.900
10	93.24	219.81	10	0.035	140.300
11	110.01	226.89	11	0.216	-26.560

Tablo 24: 4 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri

HARMONİK	Z_N (pu)	AÇI (derece)	HARMONİK	I_N (A)	AÇI (derece)
1	17.00	-46.82	1	733.169	46.20
2	4.63	12.64	2	4.510	219.140
3	18.85	57.63	3	3.220	2.080
4	39.55	89.32	4	0.473	-50.830
5	5.46	155.22	5	5.420	85.470
6	176.04	190.61	6	0.193	14.030
7	5.81	49.57	7	1.380	39.280
8	27.57	265.73	8	0.550	89.800
9	28.28	199.40	9	0.714	-87.900
10	69.42	219.81	10	0.120	140.300
11	11.91	226.89	11	3.430	-26.560

Tablo 25: 5 No' lu kesiciye ait Z_N ve I_N değeri

HARMONİK	Z_N (pu)	AÇI (derece)	HARMONİK	I_N (A)	AÇI (derece)
1	6.71	-46.82	1	1663	46.20
2	26.10	12.64	2	0.729	219.140
3	1.75	57.63	3	16.170	2.080
4	17.38	89.32	4	0.790	-50.830
5	4.58	155.22	5	9.520	85.470
6	28.49	190.61	6	0.406	14.030
7	23.22	49.57	7	3.250	39.280
8	14.79	265.73	8	1.000	89.800
9	16.83	199.40	9	0.852	-87.900
10	13.16	219.81	10	0.678	140.300
11	50.05	226.89	11	4.070	-26.560

EK-3: Test sisteminde kullanılan trafo ve besleme kablolarının değerleri:

TRAFO ADI	KURULU GÜCÜ-kVA-	NOMİNAL GERİLİM-kV-	KESİT-mm ² -XLPE	TRAFO %ük
TR1	6300	34,5-6,3	3x(1x120ş/16)	6,89
TR2	6300	34,5-6,3	3x(1x120ş/16)	7,4
TR3	2500	33000/0,4	3(1x35ş/16)	6,58
TR4	2000	34,5-0,4	3x(1x70ş/16)	5,92
TR5	2000	34,5-0,4	3x(1x70ş/16)	6,32
TR6	6000	34,5/11	3x(1x70ş/16)	6
TR7	1600	6,3-0,4	3x(1x120ş/16)	6,16
TR8	2100	6,3/0,87	3x(1x120ş/16)	6
TR9	760-1070	6000\6(5-41)	3x25ş/16	6
TR10	2000	6,3-0,4	(3x120ş/16)	6,14
TR11	2500	6-0,4	(3x120ş/16)	6,18
TR12	1600	6-0,4	3(1x70ş/16)	5,86
TR13	400	6-0,525	3x25ş/16	5,7
TR14	400	6-0,525	3x25ş/16	5,7
TR15	1250	6-0,4	3x50ş/16	5,45
TR16	1600	6-0,4	3x50ş/16	4,93
TR17	2000	6,3-0,4	3x50ş/16	6,32
TR18	1600	6-0,4	3x50ş/16	4,88
TR19	1250	6-0,4	3x50ş/16	5,38
TR20	1250	6-0,4	3x50ş/16	5,36
TR21	3000	6,2-0,08	3x(1x120ş/16)	6
TR22	1600	6,3-0,4	3x50ş/16	5,75
TR23	2000	6,3-0,4	3x50ş/16	6,31
TR24	1600	6-0,4	3x50ş/16	6,07
TR25	550	6-0,39	3x25ş/16	5,22
TR26	550	6-0,39	3x25ş/16	5,22