

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

SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA GÜÇ
TANIMLARI VE YÜK MODELLERİ

Murat Erhan BALCI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK
ANABİLİM DALI

GEBZE
2004

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

SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA GÜÇ
TANIMLARI VE YÜK MODELLERİ

Murat Erhan BALCI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK
ANABİLİM DALI

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

GEBZE
2004

ÖZET

Son yıllarda güç kalitesi kavramı üzerine olan ilgi güç sistemlerinin verimliliğinin güç kalitesi olaylarının başarılı olarak ele alınmasına bağlı hale gelmesinden ve müşterilerin daha bilinçli olmasından dolayı artmaktadır. En önemli güç kalitesi olaylarından biride güç elektroniği cihazlarının kullanımının yaygınlaşmasından kaynaklanan gerilim ve akım dalga formundaki bozulmalardır.

Burada sunulan çalışmaların ana konusu olan güç sistemlerindeki bozulmuş dalga formları genel olarak harmonik teorisi kullanılarak analiz edilir. Dolayısıyla bu çalışmanın ilk bölümünde; güç kalitesi problemlerine bilhassa harmoniklerin üzerinde durularak genel bir bakış yapılmıştır. İkinci bölümde ise harmonik domenindeki güç tanımları ve harmonik üreten yüklere ait modeller hakkında literatür taraması sunulmuştur. Daha sonra, literatürde sinüzoidal olmayan şartlar için oluşturulmuş güç tanımları diferansiyel durum denklemleri ile elde edilen gerçekçi bir yük modeli ile kaynak empedansının etkisi dikkate alınarak analiz edilmiştir. Oluşturulan gerçekçi yük modeli yardımıyla yük gerilimi ve hat akımına ait kapalı form ifadeler elde edilmiştir. Bu ifadeler kullanılarak geleneksel harmonik yük modelleri olan Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin geçerliliği parametrik analizlerle incelenmiştir.

Sonuç olarak; Fryze, Shepherd ve Zand, Sharon ve Czarnecki tarafından önerilen güç tanımlarının kaynak verimine yönelik doğru bilgiler sağlandığı görülmüştür. Shepherd ve Zand'ın güç bileşenlerinin hattın yüklenme şartlarının anlaşılmasında yararlı olduğu anlaşılmıştır. Bunlara ek olarak; her iki harmonik üreten yüklere ait modelin harmonik analizlerinde rahatlıkla kullanılabileceği tespit edilmiştir. Her iki modelin incelenen durumlar için gerçekçi model ile karşılaştırıldığında küçük yüzdelerde hatalar yaptığı elde edilen sonuçlardan açıkça görülmektedir. Sonuç olarak; Sabit Akım Kaynağı modeli kullanımı daha kolay olduğu için Norton modelinden daha fazla tercih edilebilir.

SUMMARY

It is already known that, in the last decades, great interests have been focused on power quality concept, mainly due to the fact that customer awareness on the subject has been gradually increased and also effective utilisation of the network has become largely depend on successful handling of the power quality events. One of the most important power quality events is distortion on the voltage and current waveforms, which is primarily caused by large proliferation of power electronics devices.

The distorted waveforms of the power system, which is the main subject of the studies presented here, is generally analysed by using harmonic theory. Accordingly, in the first part of the study, a general overview on the power quality problems is provided giving particular emphasis to the harmonics. In the second part, a thorough literature survey on power definitions on harmonic domain and harmonic load models are presented. Consequently, power definitions for nonsinusoidal conditions in existing literature are analysed using a realistic load model, which is determined via differential state equations, and considering the effect of source impedance. By using developed realistic model, closed form expressions of the load voltages and line currents are determined. Furthermore validity of traditional harmonic load models, namely; Constant Current Source and Norton models, are investigated through parametric analyses.

It is concluded that, power definitions proposed by Fryze, Shepherd and Zand, Sharon, and Czarnecki provide correct information regarding the source efficiency. Power decomposition according to Shepherd and Zand can also be useful to understand line loading conditions. In addition to these, it is found that, both harmonic load models could fairly be used for harmonic analysis. It is evident from results that errors, when evaluated against to the realistic model, are in the order of a few percent for both models for the considered cases. Therefore usage of Norton models maybe discouraged due to its complexity.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Eğitimime başladığımdan bu yana, anlayış ve hoşgörüsüyle yardımlarını benden esirgemeyen, hocam sayın Yrd. Doç. Dr. M.Hakan HOCAOĞLU'na ve Yüksek Lisans yapmam için beni teşvik eden, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve destekleyen babam Mehmet Can BALCI ve annem Selma BALCI 'ya teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLOLAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Arka Plan	2
1.2. Tezin Amacı	3
1.3. Tezin Sınırları	3
1.4. Tezin İçeriği	4
2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER	5
2.1. Giriş	5
2.2. Sinüzoidal ve Sinüzoidal Olmayan Dalga Şekilleri	5
2.3. Sinüzoidal Olmayan Dalga Şekillerinin Fourier Serileri ile Analizi	8
2.4. Harmonikler Konusunda Oluşturulan Sınırlamalar ve Önerileri İçeren Standartlar	9
2.5. Standartlardaki Harmonik İndisleri	10
2.6. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Sonuçlar	12
2.6.1. Rezonans	12
2.6.2. Sıfır Geçişlerdeki Artış	16
2.6.3. Dalga Formunun Tepe Değerindeki Değişmeler	16
2.6.4. Gerilim Çentikleri	17
2.6.5. Sonuç ve Özet	17
3. HARMONİKLERİN GÜÇ SİSTEMLERİ ELEMANLARINA ETKİLERİ	18
3.1. Giriş	18
3.2. Kondansatörler	18
3.3. Motorlar	19
3.4. Güç Kabloları ve Nötr İletkenleri	20

3.5. Elektronik Cihazlar	21
3.6. Telekomünikasyon Hatları	21
3.7. Transformatörler	23
3.7.1. Sayısal Analiz	29
3.8. Enerji Sayaçları	32
3.8.1. Sayısal Analiz	34
3.8.2. Aktif Ölçüm Sonuçları	35
3.8.3. Reaktif Ölçüm Sonuçları	36
3.9. Sonuç	39
4. SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA İFADE EDİLEN GÜÇ TANIMLARI	40
4.1. Giriş	40
4.2. Sinüzoidal Şartlarda Güç Tanımları	40
4.3. Sinüzoidal Olmayan Şartlar	43
4.3.1. Budeanu Reaktif Güç Tanımı	44
4.3.2. Fryze Güç Tanımı	45
4.3.3. Shepherd ve Zand Güç Tanımı	46
4.3.4. Sharon Güç Tanımı	47
4.3.5. Kimbark Güç Tanımı	48
4.3.6. Czarnecki Güç Tanımı	48
4.4. Sonuç ve Özet	50
5. SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU	52
5.1. Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı Lineer Yük Durumu	52
5.2. Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı Lineer Olmayan Yük Durumu	53
5.3. Kompanzasyon Kapasitesinin Değişiminin Güç Tanımlarına Etkisi	62
5.4. Sonuç	73
6. HARMONİK ÜRETEN YÜK MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	75
6.1. Giriş	75
6.2. Harmonik Üreten Yük Modellerinin Tanıtılması	75
6.3. Sabit Akım Kaynağı ve Norton Modellerinin Performans Analizleri	77
6.3.1. Reaktif Güç Kompanzasyonunda Model Performans Analizi	78
6.3.2. Hat Empedansının Büyüklüğünün Değişimi Sırasında Model Performans Analizi	85

6.3.3. Hat Empedansının L/R Oranının Değişimi Sırasında Model Performans Analizi	93
6.4. Sonuç	100
7. SONUÇLAR VE İLERİYE YÖNELİK ÇALIŞMALAR	102
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ	109
EKLER	
<u>Ek-1</u>	
<u>Ek-2</u>	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Analitik_S	Gerilim ve akımın analitik ifadelerle elde edilen anlık değerleri.
A_n, B_n	Gerilim ve akımın analitik ifadelerinde verilen gerilim kaynağının n.harmoniğinden meydana gelen katsayılar.
β_n	n.harmonik suseptansı.
C	Kondansatörün sığası.
c	Kontrol değişkeni.
CF	Krest faktör.
$c1_n, c2_n, c3_n$	Gerilim kaynağının n.harmoniğinden meydana gelen geçici hal katsayıları.
D_B	Budeanu bozulma gücü.
D_K	Kimbark bozulma gücü.
D_S	Kaydırılmış güç.
D_H	Ütilen harmonik gücü.
D_E	Emanuel bozulma gücü.
D_1, D_2 ve D_3	Karakteristik denklemin kökleri.
EMTP_S	Gerilim ve akımın EMTP ile elde edilen anlık değerleri.
f	Frekans
f_c	Rezonans frekansı.
F_{HL}	Harmonik kayıp faktörü.
φ	Faz açısı.
φ_n	n.harmonik faz açısı.
g.f	Güç faktörü.
G_n	n.harmonik konduktansı.
G_e	Eşdeğer konduktansı.
% Hata	Modellerinin toplam etkin değerlerine ait yüzde hata.
HataAçı_n	Modellerin n.harmonik açılarına ait hata.
HataGenlik_n	Modellerin n.harmonik etkin değerlerine ait hata.
I	Akımın etkin değeri.
I_{da}	Akımın doğru akım bileşeni.
I_n	Akımın n.harmoniğinin etkin değeri.

I_m	Akımın azami değeri.
I_{max}	Transformatörün sinüzoidal olmayan şartlarda verebileceği azami akım.
I_R	Transformatörün anma akımı.
I_{Aktif}	Fryze güç tanımında akımın aktif bileşeninin etkin değeri.
$I_{Reaktif}$	Fryze güç tanımında akımın reaktif bileşeninin etkin değeri.
I_R	Shepherd ve Zand ile Czarnecki güç tanımında akımın aktif bileşeni.
I_X	Shepherd ve Zand güç tanımında akımın reaktif bileşeni.
I_D	Shepherd ve Zand güç tanımında akımın bozulma bileşeni.
I_{Re}	Czarnecki güç tanımında akımın reaktif bileşeni
I_S	Czarnecki güç tanımında kayma akımı.
I_H	Czarnecki güç tanımında üretilen harmonik akımı.
$I_{N,n}$	Norton akım kaynağının n.harmonik bileşeni.
I_{1-R}	Transformatörün primer sargısının anma akımı.
I_{2-R}	Transformatörün sekonder sargısının anma akımı.
$i(t)$	Akımın zamana bağlı ifadesi.
$i_h(t)$	Hat akımının zamana bağlı ifadesi.
$i_y(t)$	Yük akımının zamana bağlı ifadesi.
$i_{kap}(t)$	Kondansatör akımının zamana bağlı ifadesi.
$i_{h,n}$	Hat akımının başlangıç değeri.
$i_{y1,n}$	Yük akımının devrenin ilk durumu için fazör değeri.
$i_{y2,n}$	Yük akımının devrenin ikinci durumu için fazör değeri.
k-faktör	k faktörü.
K	C57.110.1998 standardında geçen bir indistir.
k	Akımın içerdiği gerilimin içerdiğinden farklı harmonik numaraları.
L	Endüktans.
L_h	Hattın indüktansı.
L_y	Yükün indüktansı.
P_{LL}	Yükteki kayıplar.
P_{LL-R}	Anma akımındayükteki kayıplar.
P_{EC}	Fuko akımı kayıpları.
P_{EC-R}	Anma akımı fuko akımı kayıpları.
P_{0SL}	Kaçak akım diğer kayıpları.
P_{OSL-R}	Anma akımı Kaçak akım diğer kayıpları.
P_1	Temel harmonik aktif gücü.

P	Aktif güç.
Q_B	Budenau reaktif gücü
Q_1	Temel harmonik reaktif gücü.
Q_F	Fryze reaktif gücü
Q_K	Kimbark reaktif gücü.
Q_R	Czarnecki reaktif gücü.
Q_C	Kapasitif reaktif güç.
Q_L	İndüktif reaktif güç.
R	Ohmik direnç.
R_1	Transformatörün primer sargısının direnci.
R_2	Transformatörün sekonder sargısının direnci.
R_h	Hattın direnci.
R_y	Yükün direnci.
RMS_{Hata}	Toplam RMS hata.
S_{max}	Transformatörün sinüzoidal olmayan şartlarda verebileceği azami güç.
S_R	Shepherd ve Zand aktif görünür gücü
S_X	Shepherd ve Zand reaktif görünür gücü
S_D	Shepherd ve Zand distorsiyon görünür gücü
S_Q	Sharon reaktif görünür gücü
S_C	Sharon tamamlayıcı görünür gücü
S	Görünür güç.
s_1, s_2 ve s_3	Test edilen aktif sayaçlar.
S_1, S_2 ve S_3	Test edilen reaktif sayaçlar.
t	Saniye olarak zaman
T_f	Temel harmonik periyodu.
t_i	Triak pozitif alternansta iletme girdiği zaman.
t_b	Triakın her iki alternansta iletme girdiği zaman.
t_k	Triak pozitif alternansta kesime girdiği zaman.
TIF	Telefon etkileşim faktörü.
THD_x	Akım (yada Gerilimin) toplam harmonik bozulması.
$\theta_n(R)$	(5.11)-(5.28) ve (2.5)-(2.6) denklemleri kullanılarak elde edilen yük gerilimi ve hat akımı n.harmonikleri açılarıdır.
$\theta_n(M)$	(6.1)-(6.3) ve (2.5)-(2.6) denklemleri kullanılarak elde edilen modellere ait yük gerilimi ve hat akımı n.harmonikleri açılarıdır.

u	Gerilimin içerdği akımın içerdüğinden farklı harmonik numaraları.
V_m	Gerilimin azami değeri
V	Gerilimin etkin değeri.
V_{da}	Gerilimin doğru akım bileşeni.
V_n	Gerilimin n.harmoniğinin etkin değeri.
V_{m_n}	Gerilimin n.harmoniğinin azami değeri.
$v(t)$	Gerilimin zamana bağlı ifadesi.
$v_y(t)$	Yük akımının zamana bağlı ifadesi.
$v_{kay}(t)$	Kaynak geriliminin zamana bağlı ifadesi.
v_{kay_n}	Kaynak geriliminin n.harmonik için fazör değeri.
$v_{y1,n}$	Yük geriliminin devrenin ilk durumu için fazör değeri.
$v_{y2,n}$	Yük geriliminin devrenin ikinci durumu için fazör değeri.
$v_{y,n}$	Yük geriliminin başlangıç değeri.
ω	Açısal frekans
ω_n	n.harmoniğin açısal frekansı
WTHD	Ağırlık toplam harmonik bozulması.
X_1	Gerilim veya akımın temel harmonik etkin değeri.
X_n	Gerilimin veya akımın n. harmonik etkin değeri.
X	Toplam rms değer.
X_m	Gerilim veya akımın azami değeri.
$X(R)$	(5.11)-(5.28) ve (2.5)-(2.6) denklemleri kullanılarak elde edilen yük gerilimi ve hat akımı toplam etkin değerleridir.
$X(M)$	(6.1)-(6.3) ve (2.5)-(2.6) denklemleri kullanılarak elde edilen modellere ait yük gerilimi ve hat akımı toplam etkin değerleridir.
$X_n(R)$	(5.11)-(5.28) ve (2.5)-(2.6) denklemleri kullanılarak elde edilen yük gerilimi ve hat akımı n.harmonikleri etkin değerleridir.
$X_n(M)$	(6.1)-(6.3) ve (2.5)-(2.6) denklemleri kullanılarak elde edilen modellere ait yük gerilimi ve hat akımı n.harmonikleri etkin değerleridir.
$X_{kap,n}$	n.harmonikte kapasitans değeri.
Y_n	n.harmonik admıansı.
Z	Empedans.
$Z_{h,n}$	Hat empedansının n.harmonik değeri.
$Z_{y,n}$	Hat empedansının n.harmonik değeri.

$Z_{N,n}$ n.harmonik Norton eşdeğer empedansı.

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2-1 : Transformatör karakteristik eğrileri [14]	6
2-2 : Tam dalga doğrultucu devresi	6
2-3 : Tam dalga doğrultucu devresindeki gerilim dalga formları	7
2-4 : Tam Dalga Doğrultucu Devresinin Akım Dalga formları	7
2-5 : Sinüzoidal olmayan dalga şeklinin farklı frekanslardaki sinüzoidal dalga şekillerinin toplamı biçiminde ifadesi	8
2-6: Seri rezonans	13
2-7 : Seri rezonans gerilim, akım, empedans	13
2-8 : Paralel rezonans	14
2-9 : Paralel rezonans sırasında her harmoniğe ait gerilim, akım ve empedans	15
2-10 : Sıfır geçişlerde artış	16
2-11 : Gerilim çentikleri.	17
3-1 : Dengeli bir sistemde faz iletkenlerindeki 3.harmonik akımlarının nötr noktasında oluşturdukları akım	20
3-2 : Nötr iletkeninden akan harmonikli akımın haberleşme hatlarına indüktif etkisi	22
3-3 : Kuplaj etkileşiminin ekranlanmış zırh tarafından engellenmesi	22
3-4 : Direkt iletkenlik ile haberleşme hattının etkilenmesi	23
3-5 : Transformatörün sinüzoidal olmayan şartlarda verebileceği azami akımın elde edilmesi	29
3-6 : Ölçüm yapılan transformatörün yapısı	30
3-7 : Transformatörün alçak gerilim 1 sargısına ait faz-faz gerilimi ve hat akımının dalga formları	31
3-8 : Transformatörün alçak gerilim 1 sargısına ait faz-faz gerilimi ve hat akımının harmonik spektrumu	31
3-9 : 3.,5. ve 7.harmonik akımları kaynağa doğru akan lineer olmayan yük	33
3-10 : 3.,5. ve 7.harmonik akımları yüke doğru akan lineer yük	33
3-11 : Gerilimin sinüzoidal ve akımın harmonikli olması durumunda gerilim ve akım arasında açı farkının 25° çalışma koşulunda elde edilen sonuçlar	35
3-12 : Akım ve gerilimin harmonikli olması durumunda gerilim ve akım arasındaki açı farkının 25° olduğu çalışma koşulunda elde edilen sonuçlar	36

3-13 : Harmonikli akımdaki k faktör 'e göre birimlendirilmiş güç değerleri	37
3-14 : Gerilim sinüzoidal, akım harmonikli, gerilim ve akım arasındaki açı 25° iken referans sayaç ile test edilen sayaçların ölçtüğü güç ve Budeanu reaktif güç değeri	37
3-15 : Gerilim ve akım harmonikli, gerilim ve akım arasındaki açının 25° olması durumunda, referans sayaç ile test edilen sayaçların ölçtüğü güç ve Budeanu reaktif güç değeri	38
4-1 : Ani aktif, ani reaktif ve ani gücün zamana göre değişimi	41
5-1 : Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı lineer yük durumu için kullanılan devre	52
5-2 : Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumu	54
5-3 : Şekil 5-2'deki devrenin EMTP'de oluşturulmuş modeli	61
5-4 : EMTP sonuçları ile analitik hesaplama sonucunun karşılaştırılması	62
5-5 : Yük geriliminin güç faktörünün azami olduğu andaki harmonik spektrumu	64
5-6 : Hat akımının güç faktörünün azami olduğu andaki harmonik spektrumu	65
5-7 : Yük gerilimi ve hat akımının toplam harmonik bozulmasının kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri	67
5-8 : Budeanu, Kimbark, Fryze, Shepherd ve Zand, Sharon ve Czarnecki reaktif güçleri ile güç faktörünün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri	69
5-9 : Shepherd ve Zand güç tanımının aktif güç bileşeni ile ortalama gücün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri	71
5-10 : Budeanu ve Kimbark bozulma güçleri, Sharon tamamlayıcı görünür gücü ve Czarnecki kaydırılmış gücünün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri	72
6-1 : Sabit Akım kaynağı modeli	76
6-2 : Norton modeli	76
6-3 : Farklı tetikleme açıları için kapasitenin büyüklüğünün değişimine bağlı olarak; her iki modelin yük gerilimi etkin değerlerinin ve hat akımı etkin değerlerinin % hata miktarları	79
6-4 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları güç faktörünün azami olduğu anda için her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları	80
6-5 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları	81

6-6 : Triakın 90°-270° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları	82
6-7 : Triakın 90°-270° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları	82
6-8 : Triakın 135°-315° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları	83
6-9 : Triakın 135°-315° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları	84
6-10 : Triakın farklı tetikleme açıları için devredeki hat empedansının değişimi sırasında her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı sonuçlarına ait % hatalar	86
6-11 : Triakın 45°-225° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü 0,0625Ω iken her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları	87
6-12 : Triakın 45°-225° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü 0,0625Ω iken her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları	88
6-13 : Triakın 90°-270° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü 0,0625Ω iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları	89
6-14 : Triakın 90°-270° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü 0,0625Ω iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları	90
6-15 : Triakın 135°-315° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü 0,0625 Ω iken her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları	91
6-16 : Triakın 135°-315° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü 0,0625Ω iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları	92
6-17 : Devredeki hat empedansının L/R oranının değişimi sırasında her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı toplam etkin değer sonuçlarına ait % Hata	94

- 6-18 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken;
her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata
miktarları 95
- 6-19 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken;
her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata
miktarları 95
- 6-20 : Triakın 90° - 270° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken;
her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata
miktarları 96
- 6-21 : Triak 90° - 270° tetikleme açıları için hat empedansının L / R oranı 0,025 iken;
her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata
miktarları 97
- 6-22 : Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken;
her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata
miktarları 98
- 6-23 : Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken;
her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata
miktarları 99

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2-1 : Harmonikler hakkındaki standartlar	10
2-2 : Standartlarda belirtilmiş harmoniklere ait bazı indisler	11
3-1 : Transformatör Tipi , Kurulu Gücü ve Gerilimine Göre P_{EC-R}	25
3-2 : F_{HL} ve k -faktör için kullanılan transformatörün verebileceği azami akım ve azami güç değerleri	32
3-3 : Test edilen sayaçların özellikleri	34
4-1 : Güç tanımlarına ait bileşenler	50
5-1 : Bir periyot boyunca triakın durumu ve o aralık için çözüm yöntemi	60
5-2 : Gerilim kaynağının sinüzoidal olmayan şartlar için harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulması	61

1 GİRİŞ

Elektrik enerjisi, endüstriyel faaliyetlerin en iyi şekilde yürütülebilmesi için gerekli bir unsurdur. Bu bakımdan, son kullanıcılara ulaştırılan elektrik enerjisinin kesintisiz, dalga formunun sinüzoidal, genlik ve frekansının ise standartlarda belirtilen toleranslar dahilinde bulunmasını ifade eden “*güç kalitesi*” elektrik enerjisinden azami yarar sağlanması açısından önemlidir [1].

Güç kalitesinin en çok incelenen dallarından birisi de harmonikler ve etkileridir. Harmonikler; transformatör ve motor gibi elektromanyetik doyma özelliğine sahip, lineer olmayan güç sistemi elemanlarından dolayı elektrik güç sistemlerinin var oluşundan beri bilinen ve analiz edilen bir olaydır. Son yıllarda, harmonik üreten cihazların artan oranlarda sisteme bağlanması ve güç sistemlerinde güç kalitesi olaylarına dayanıklı olmayan cihazların artarak yer alması ile harmoniklerin analizi ve güç sistemlerine etkisinin incelenmesi daha fazla önem kazanmıştır. Güç kalitesinin güç sistem elemanlarının zarar görmelerini engelleyecek düzeyde tutulabilmesi için çeşitli ulusal ve uluslararası standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlardan harmonikler hakkında oluşturulmuş olanlarından en önemlileri sırasıyla; sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda güç tanımlarını anlatan IEEE Std. 1459-2000 [2], harmonik limitleri ve güç sistemlerine etkileriyle alakalı örnek analizler içeren IEEE Std. 519-1992 [3], sinüzoidal olmayan şartlarda transformatörlerin verebileceği azami akımın belirlenmesine ait prosedürün anlatıldığı IEEE Std. C57.110-1998 [4] ve elektromanyetik uyumluluk testlerinin anlatıldığı IEC 61000 3-2 [5], IEC 61000 3-4 [6], IEC 61000 3-6 [7] standartlarıdır. Ayrıca elektrik dağıtım şirketleri ve düzenleyici kuruluşların belirlediği bir çok uygulama standartları da mevcuttur.

Harmonikler ve etkileri konusunda yapılan çalışmalar :

- Reaktif güç kompanzasyonuna olumsuz etkileri [8, 9, 10]
- Enerji sayaçlarındaki ölçme hatalarına etkileri [11, 12, 13]
- Elektrik makinelerinde meydana getirdikleri frekansa bağlı kayıplardaki artış ve bu artışın etkileri [14, 15]

- Rezonans olayının sistemdeki elemanlara etkileri ve harmonik filtre tasarımı [16, 17]

alt konularında yoğunlaşmıştır. Harmonikler çok büyük boyutlarda zararlar doğuran rezonans olaylarına, elektrik makinelerinin ömürlerini kısaltan sargı kayıplarındaki artışlara ve koruma elemanlarının hatalı çalışması gibi güvenilirliği azaltan olaylara yol açarlar. Ayrıca harmonikler enerji ölçümlerinde ihmal edilemeyecek hatalara da sebep olarak ciddi maddi kayıplar meydana getirirler. Yukarıda sayılan olumsuz etkilerinden dolayı harmonikler üzerinde durulması gereken önemli bir inceleme konusudur [17, 18, 19].

1.1 Arka Plan

Literatürde geniş olarak yer bulan, sinüzoidal olmayan şartlarda tek fazlı sistemler için oluşturulmuş güç tanımları sırasıyla; Budeanu [20, 21], Fryze [21, 22], Shepherd ve Zand [23], Sharon [24], Kimbark [25] ve Czarnecki [26] tarafından verilmiştir. Harmoniklere neden olan yükler ise literatürde yaygın olarak iki farklı biçimde modellenmişlerdir : Sabit akım kaynağı modeli [27] ve Norton modelidir [28].

Sinüzoidal olmayan şartlarda, tek fazlı sistemler için oluşturulan ve yaygın olarak bilinen güç ifadeleri üzerinde literatürde birçok inceleme yapılmıştır [29, 30, 31]. Yapılan analizler, genellikle hat empedansının ihmal edildiği, lineer olmayan basitleştirilmiş yük modellerinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Hat empedansının ihmal edilmesi, şebekenin arayüz (point of common coupling, PCC) noktalarında akım ve gerilim harmonik numaralarının farklı değerler alabilmesine yol açmaktadır. Ayrıca, lineer olmayan yük için basitleştirilmiş modeller kullanılması sonuçlarda hatalar meydana getirmektedir. Bu sebeplerle analizlerin daha gerçekçi modeller üzerinde gerçekleştirilmesi, yapılan hataların azalmasını sağlayacaktır.

Harmonik analizlerinde yaygın olarak kullanılan modellerin hatalarının belirlenmesi analiz sonuçlarının güvenilirliği yönünden önemlidir. Sabit akım kaynağı ve Norton modelinde yapılan hatalarının karşılaştırılmasına dönük olarak

literatürde çalışmalar yapılmıştır [32, 33]. Bu çalışmalarda model hatalarının belirlenmesi için referans olarak genellikle EMTP (Electromagnetic Transients Program) [34], EMTDC (Electromagnetic Transients Simulation Program) [35] gibi zaman domeninde sayısal çözüm yapan programlar kullanılmıştır. Bu programlarda harmonik kaynakları sabit akım kaynağı olarak modellenmektedir. Dolayısıyla model hatası referans devrede de bulunmaktadır. Sabit akım kaynağı ve Norton modellindeki hatalarının analitik ifadelerle bulunan sonuçlarla karşılaştırılması daha gerçekçi olacaktır.

1.2 Tezin Amacı

Tek fazlı bir sistemde gerçekçi, lineer olmayan bir yük modeli kullanılarak ve kaynak empedansının devre üzerine etkisini de dikkate alarak

- literatürde verilen güç tanımlarının geçerliliğini incelemek ve birbiriyle karşılaştırmak,
- klasik harmonik analiz metotlarının geçerliliğini incelemek,
- basitleştirilmiş metotların sınırlarını ve kullanım yerlerini tespit etmektir.

1.3 Tezin Sınırları

Tez içerisinde incelenilen konular ve bu konularla alakalı analizlerde

- çok fazlı sistemlerle ilgilenilmeyecek,
- literatürde mevcut bütün güç tanımları dikkate alınmayacak sadece yaygın olanları incelenecek,
- yük olarak sabit empedans kullanılacak,
- rezonans durumu incelenmeyecektir.

1.4 Tezin İçeriği

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

nc bölümde harmoniklerin g sistemleri elemanlarına, transformatörlere ve enerji sayaçlarına etkilerini gösteren analizler yapılmıştır.

Dördüncü ve beşinci bölümlerde literatürde, sinüzoidal olmayan şartlar için kullanılan başlıca g tanımları verildikten sonra, bu tanımlar kullanılarak sinüzoidal olmayan şartlardaki gerilim kaynakları ve yk karakteristikleri için yapılan reaktif güç kompanzasyonu hesaplamaları incelenecektir.

Altıncı bölümde literatürde yer alan başlıca harmonik üreten yüklere ait modeller tanıtılacak ve bu modellere dayanarak yapılan hesaplama sonuçları analitik hesaplama sonuçları ile karşılaştırılacaklardır.

Yedinci bölümde ise ilk altı bölümdeki bilgilerin ışığında ulaşılan sonuçlar özetlenecek ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulacaktır.

2 GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER

2.1 Giriş

Bu bölümde sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan dalga şekilleri tarif edilerek sinüzoidal olmayan dalga şekline sahip akım ve gerilimlerin *Fourier* serileri ile analizi anlatıldıktan sonra sinüzoidal olmayan şartlar ile ilgili standartlar verilecektir.

2.2 Sinüzoidal ve Sinüzoidal Olmayan Dalga Şekilleri

Alternatif akım güç sistemindeki elemanların hepsinin lineer olduğu kabul edilirse, elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılmasına ilişkin hesaplamalarda akım ve gerilimler sinüzoidal olacaktır. Kullanıcı hakkına saygılı bir enterkonnekte sistemde frekans sabit, gerilim ve akım dalga şekli ise sinüzoidal formda olmalıdır [1].

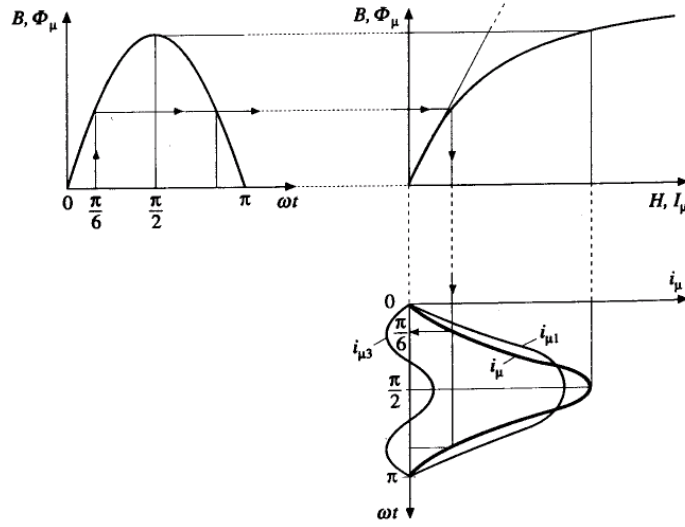
Sinüzoidal dalga formundaki akım ve gerilim;

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (2.1)$$

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.2)$$

biçiminde ifade edilir

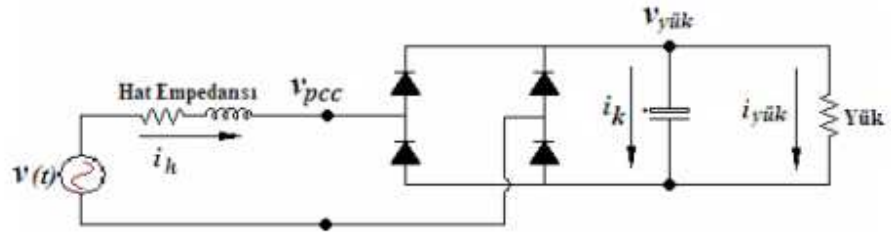
Santrallerde sinüzoidal dalga formunda üretilen gerilim, iletim ve dağıtım sırasında kullanılan transformatör ve dağıtım baralarına bağlı motorlar gibi elemanlardaki manyetik doyma olayından dolayı sinüzoidal dalga formunu kaybeder. Manyetik doyma; motor ve transformatör gibi manyetik çekirdeğe sahip elemanların yüklenmeleriyle, akımın artışına bağlı olan manyetik akı artışının doğrusal olmaması nedeni ile ortaya çıkmaktadır. Bu durum **Şekil 2-1**'de verilen transformatör karakteristik eğrilerinde gösterilmiştir.



Şekil 2-1 : Transformatör karakteristik eğrileri [14]

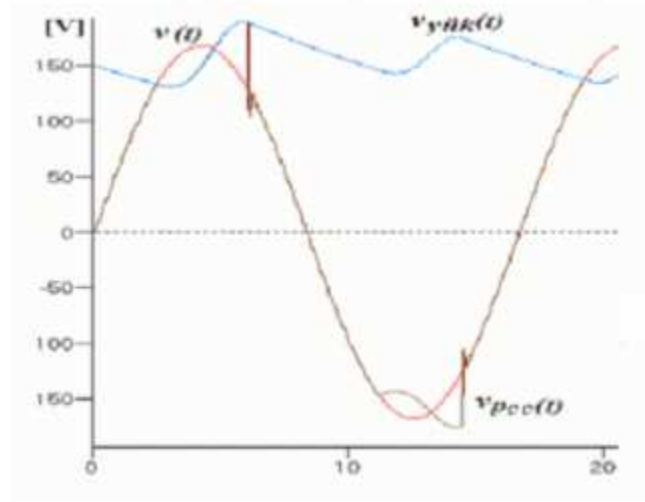
Şekil 2-1'deki magnetik çekirdek akımı (i_μ)' nın sinüs fonksiyonu şeklinde olmamasından dolayı, transformatörün şebekeden çektiği akım sinüzoidal olmayan dalga şekline sahiptir. Böylece transformatör ve motor gibi elemanlar güç sistemlerinde dolaşan akımın sinüzoidal olmamasında önemli bir etkiye sahiptir.

Güç elektroniği elemanlarının kullanımındaki artış, bunların kullanıldıkları yerlerdeki akım ve gerilimin dalga şekillerinin sinüzoidal formdan uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Güç sistemlerinde harmonik üretiminin asıl kaynağı olan güç elektroniği devresine ilişkin bir örnek (tam dalga doğrultucu devresi) Şekil 2-2'de verilmiştir.

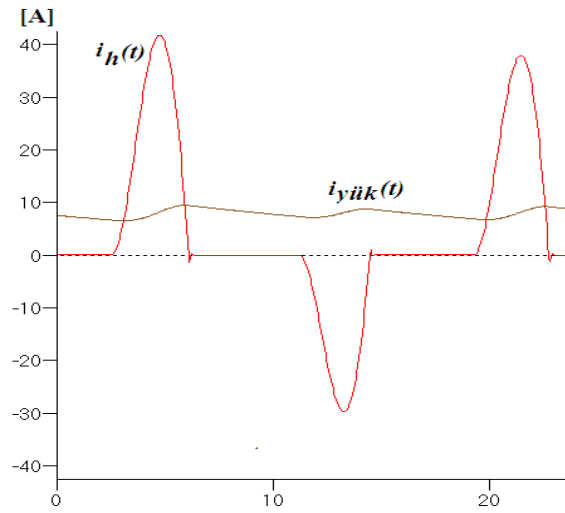


Şekil 2-2 : Tam dalga doğrultucu devresi

Şekil 2-2’de verilen devrenin Şekil 2-3 ve Şekil 2-4’de gösterilen akım ve gerilim dalga formları; yarı iletken teknolojisi ile üretilmiş cihazların oluşturduğu harmonik etkisinin ne kadar büyük olduğunu ispatlamaktadır.



Şekil 2-3 : Tam dalga doğrultucu devresindeki gerilim dalga formları



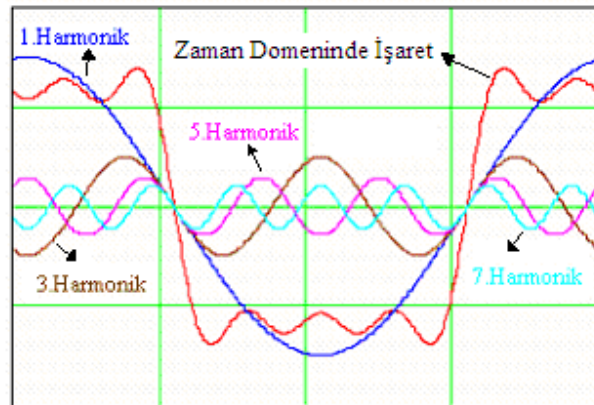
Şekil 2-4 : Tam Dalga Doğrultucu Devresinin Akım Dalga formları

Şekil 2-3 ve Şekil 2-4’den açıkça görüldüğü gibi, tam dalga doğrultucunun bağlı olduğu noktadaki (arayüz) gerilim ve yükün çektiği akım sinüzoidal olmayan formdadır.

Lineer olmayan akım karakteristiğine sahip güç elektroniği devreleri ile kontrol edilen yüklerin güç sistemlerinde ortak noktaya bağlı olması halinde bu noktadan kaynağa doğru bakıldığında görülen eşdeğer empedans üzerinde sinüzoidal olmayan gerilim düşümleri ortaya çıkar. Harmonik içeren gerilim düşümü, bağlantı noktasındaki gerilimin de sinüzoidal biçimden uzaklaşmasına sebep olacaktır.

2.3 Sinüzoidal Olmayan Dalga Şekillerinin Fourier Serileri ile Analizi

Sinüzoidal olmayan dalga şekillerinin ifadesi ve analizleri için genellikle Fourier serileri kullanılır. Fransız matematikçisi J. Fourier sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların, genlik ve frekansları farklı sinüzoidal işaretlerin toplamı şeklinde ifade edilebildiğini göstermiştir. Sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı sinüzoidal dalgaların toplamından oluşan matematiksel ifadelerine “*Fourier serileri*”denmiştir [1]. **Şekil 2-5**'te sinüzoidal olmayan periyodik bir dalgayı oluşturan 1., 3., 5. ve 7.harmonik değerleri gösterilmiştir.



Şekil 2-5 : Sinüzoidal olmayan dalga şeklinin farklı frekanslardaki sinüzoidal dalga şekillerinin toplamı biçiminde ifadesi

Fourier serisi kullanılarak sinüzoidal olmayan akım $i(t)$ ve gerilim $v(t)$ dalga formları;

$$i(t) = I_{da} + \sum_1^n \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t - \varphi_n) \quad (2.3)$$

$$v(t) = V_{da} + \sum_1^n \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t) \quad (2.4)$$

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

$$V = \sqrt{\sum_1^n V_n^2} \quad (2.5)$$

$$I = \sqrt{\sum_1^n I_n^2} \quad (2.6)$$

eşitlikleri yardımı ile hesaplanabilir [2].

2.4 Harmonikler Konusunda Oluşturulan Sınırlamalar ve Önerileri İçeren Standartlar

IEEE ve IEC'nin harmonik standartlarında gerekli tanım, indisler ve sınırlamalar tanıtılmış, harmonik bozulmasının olduğu durumlarda güç sistemleri elemanlarının ömürlerinin kısılmaması ve zarar görmemeleri için alınması gereken önlemler verilmiştir. Harmoniklere ait IEEE ve IEC standartlarından önemlileri **Tablo 2-1**'de özet olarak verilmiştir [37].

Tablo 2-1 : Harmonikler hakkındaki standartlar

Standart	İçeriği
IEEE Std 1459-2000	Sinüzoidal, sinüzoidal olmayan, dengeli ve dengesiz durumlarda güç tanımlamalarını anlatan, örnek analizlerle bu tanımlamaları açıklayan standarttır
IEEE Std 519-1992	Harmonik kaynakları, harmoniklerin elektrik güç sistemindeki elemanlara etkisi, sinüzoidal olmayan şartlarda reaktif güç kompanzasyonu, harmonik kontrol, harmonik analizi ve ölçüm yöntemlerinden bahsetmektedir
IEEE Std C57.110-1998	Transformatörlerde sinüzoidal olmayan yükleri beslerken oluşan ek kayıpları, bu kayıplara göre transformatörün verebileceği azami akım ve görünür gücün belirlenmesine ait prosedür anlatılmaktadır
IEC 61000-3-2	Harmonik akım emisyonu limitlerini içeren standarttır. Her faza ait çektiği akım 16 A’i geçmeyen cihazlar için geçerlidir.
IEC 61000-3-4	Anma akımı 16 A’den büyük olan alçak gerilimde çalışan cihazlar için geçerli harmonik akım emisyonu standardıdır.
IEC 61000-3-6	Orta ve yüksek gerilimde çalışan harmonik üreten yükler için geçerli olan emisyon standardıdır.

Bu standartlara uyulduğu takdirde, güç kalitesinin iyi hale gelmesi ve harmoniklere bağlı maddi kayıpların azaltılması temin edilir.

2.5 Standartlardaki Harmonik İndisleri

Harmoniklere ait oluşturulmuş tanım ve indisler, daha iyi bir güç kalitesi düzeyine ulaşmak ve güç sistem elemanlarının harmoniklerden nasıl etkilendiklerini belirlemek açısından önemlidirler. Bu sebeple standartlarda belirtilmiş harmoniklere ait yaygın olarak kullanılan indisler **Tablo 2-2’de** verilmiştir [37, 38].

Tablo 2-2 : Standartlarda belirtilmiş harmoniklere ait bazı indisler

İndis	Tanımı	İfadesi
THD	Gerilim veya akım dalga formunda olan temel harmoniğin dışındaki harmoniklerin toplam etkin değerinin temel harmoniğin etkin değerine oranı toplam harmonik bozulması olarak tanımlanmaktadır.	$THD_x = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n X_n^2}}{X_1} \quad (2.7)$
Krest Faktörü	Dalga formunun tepe değerinin etkin değerine oranı olarak tanımlanmıştır.	$CF = \frac{X_m}{X} \quad (2.8)$
K Faktörü	Akım dalga formunda bulunan harmonik frekanslarının ve etkin değerlerinin dikkate alınarak transformatör gibi şebeke elemanları üzerindeki sinüzoidal olmayan akımların ısı etkilerini belirlemek amacıyla oluşturulmuş bir indistir.	$k - \text{faktör} = \sum_1^{n_{\max}} n^2 \cdot \left(\frac{I_n}{I_R} \right)^2 \quad (2.9)$
F _{HL} Faktörü	Harmoniklerin transformatör kayıplarına etkisini incelemek için oluşturulmuş bir indistir	$F_{HL} = \frac{\sum_1^{n_{\max}} \left[\frac{I_n}{I_1} \right]^2 \cdot n^2}{\sum_1^{n_{\max}} \left[\frac{I_n}{I_1} \right]^2} \quad (2.10)$
TIF Faktörü	Harmonik akım ve gerilimlerinin ürettiği magnetik ve elektrik alanları haberleşme sistemlerinin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. TIF faktörü çeşitli frekansların ses bandındaki bağıl parazit etkisini hesaplayan bir indistir.	$TIF = \frac{\sqrt{\sum (I_n \cdot \omega_n)^2}}{I} \quad (2.11)$
WTHD Faktörü	Ağırlıklı toplam harmonik bozunma faktörü olarak tanımlanmıştır. Motor gibi uygulanan gerilimin bozunmasına göre çalışması değişebilen ve kayıpları artan elemanların yeniden oranlanması için kullanılan bir faktördür.	$WTHD = \sqrt{\sum V_n^2 \cdot n^{-0.8}} \quad (2.12)$

K-faktörü üreticilerin oluşturduğu harmoniklerin transformatörler üzerinde meydana getirdiği ısı kayıpları belirlemek için oluşturulan bir indistir. F_{HL}, IEEE tarafından harmoniklerin transformatörlerde meydana getirdiği ısı kayıpları belirlemek için oluşturulmuş bir indistir. F_{HL}, transformatörün anma akımına bağlı olmadığından dolayı, aynı harmonik spektrumuna sahip yük için farklı anma akımındaki transformatörlerde aynı değerdedir. Transformatör anma akımına bağlı olduğu ve bu sebeple aynı harmonik spektrumuna sahip yük için, farklı anma akımına sahip transformatörlerde K-faktörü farklı değerler alır. Krest faktör ise kondansatör gibi dielektrik malzemeye sahip elemanların dayanabilecekleri azami gerilim değerini belirlemekte kullanılan bir indistir. WTHD faktörü, sinüzoidal olmayan gerilim ile

beslenen motordan alınabilecek azami çıkış gücünün belirlenmesinde kullanılan bir indistir.

2.6 Harmoniklerin Meydana Getirdiği Sonuçlar

Harmoniklerin güç sistemlerinde yol açtığı sonuçlar şu şekilde sınıflandırılmaktadır :

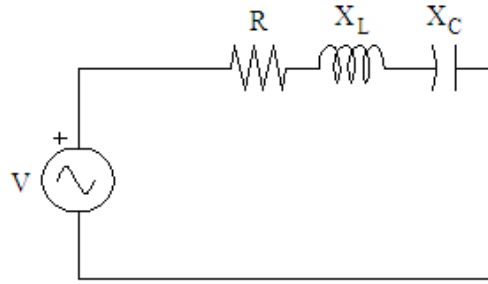
- Rezonans,
- Dalga formunun tepe değerindeki değişimler,
- Sıfır geçişlerdeki artış,
- Gerilim çentikleri,

yukarıda belirtilen harmonik etkileri aşağıda detaylı olarak incelenecektir.

2.6.1 Rezonans

Bobin ve kondansatör içeren elektrik devrelerinde, devrenin eşdeğer empedansının zahiri kısmının sıfır olması bir başka ifade ile empedansın sadece omik dirençten ibaret olması halinde, elektrik devrelerinde bir rezonanstan bahsedilebilir. Rezonans, seri ve paralel rezonans olmak üzere iki türlü oluşabilir.

Lineer olmayan yüklerin bulunduğu bir güç sisteminde tüketicilerden birindeki reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan kondansatör bankının kapasitansı ile bu yüke ait transformatör indüktansının eşdeğeri herhangi bir harmonik frekansında birbirlerine çok yakın değerde olabilir. Bu durum elektrik devrelerinde seri rezonans olarak ortaya çıkar. **Şekil 2-6**'de seri R, L, C devresi gösterilmiştir.



Şekil 2-6: Seri rezonans

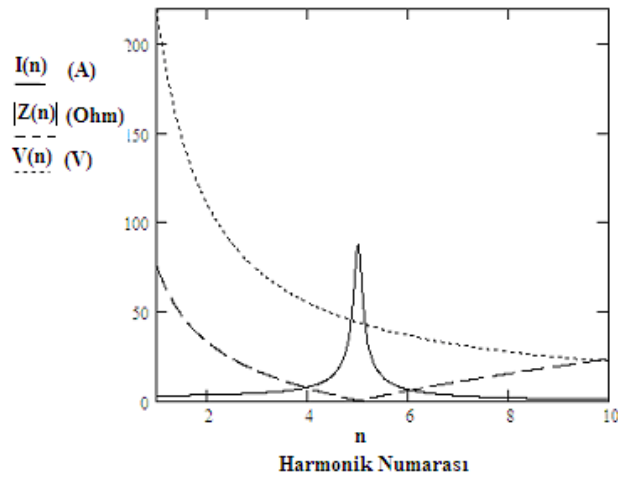
Şekil 2-6’da verilen devrenin eşdeğer empedansı;

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.13)$$

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

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.14)$$

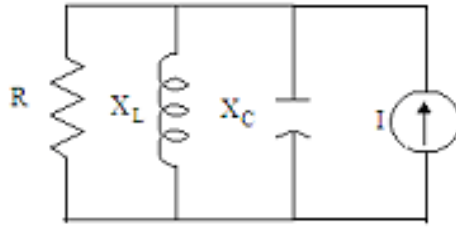
rezonans frekansı olarak tanımlanır. Seri rezonans halinde, harmonik numarasına bağlı olarak gerilim, akım ve empedansın değişimi Şekil 2-7’de verilmiştir.



Şekil 2-7 : Seri rezonans gerilim, akım, empedans

Seri rezonansta eşdeğer devre empedansı çok küçük, devre akımı ise büyük değerlerdedir [3, 37].

Lineer olmayan yüklerin bulunduğu bir güç sisteminde kondansatör bankı bütün yüklerin bağlı olduğu dağıtım barasına bağlı ise, herhangi bir harmonik frekansında, dağıtım transformatörü ve kaynak eşdeğer reaktansı ile kondansatör bankının kapasitif reaktansı eşdeğeri birbirlerine yakın değerde olabilir. Bu durumda elektrik devresinde paralel rezonanstan bahsedilebilir. **Şekil 2-8**'da paralel bağlı R, L, C devresi gösterilmiştir.



Şekil 2-8 : Paralel rezonans

Şekil 2-8'de kaynaktan bakıldığında görülen eşdeğer empedans Z ise

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \quad (2.15)$$

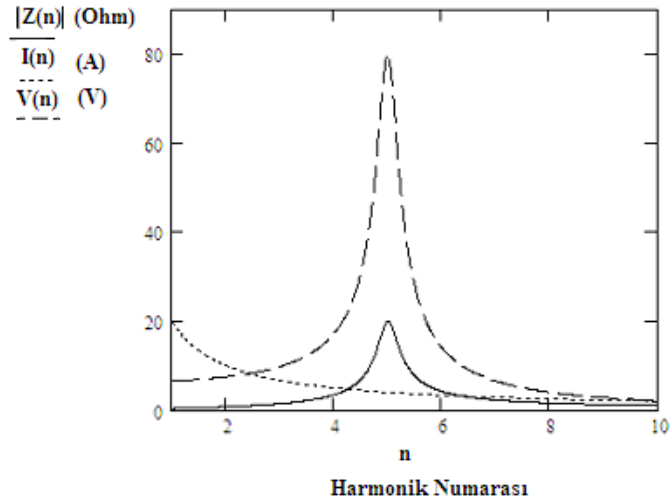
eşitliği geçerlidir. Eğer devrede;

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

eşitliğini sağlayan;

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

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 2-9**'da verilmiştir.



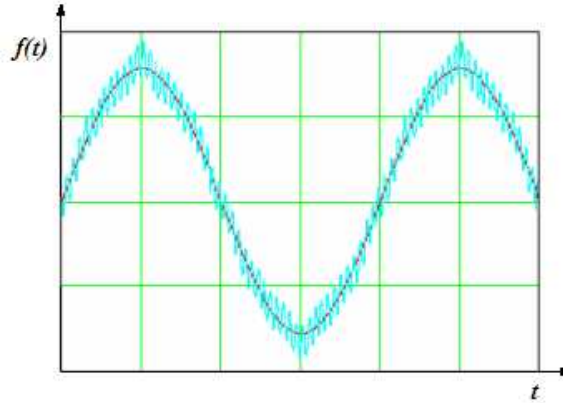
Şekil 2-9 : Paralel rezonans sırasında her harmoniğe ait gerilim, akım ve empedans

Paralel rezonans sonucu aşırı gerilimler meydana gelir. Bu durum gerilim dalga şeklinde pikler oluşmasına ve akabinde kondansatör gibi elemanların dielektriklerinin bozulmasına sebep olabilir [39, 40, 41].

Sinüzoidal şartlarda, çalışma frekansı olan 50 Hz için, devredeki bobin ve kondansatör değerleri rezonansa gelmeyecek büyüklüklerde seçilir. Sinüzoidal olmayan şartlarda harmonik domeninde analiz yapıp buna göre her bir harmoniğin frekansı dikkate alınarak güç sistemini rezonans durumuna sokmayacak bobin ve kondansatör değerleri sistemde kullanılmalıdır. Aksi takdirde güç sisteminde seri rezonans sebebi ile aşırı akımlar veya paralel rezonans sebebi ile aşırı gerilimler oluşabilir. Bu durum kompanzasyon kondansatörlerinin delinmesi veya transformatör sargılarının yanması gibi büyük zararlara neden olabilir.

2.6.2 Sıfır Geçişlerde Artış

Harmoniklerin etkisinden dolayı gerilim dalga formu çok kısa sürelerde (+) ve (-) eksenleri arasında geçişler yapabilir. **Şekil 2-10**'da harmoniklerin sıfır geçiş sayısına ve krest faktöre etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2-10 : Sıfır geçişlerde artış

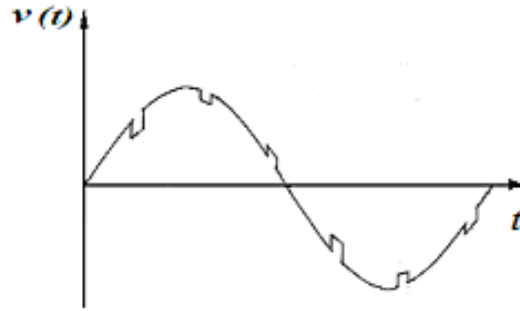
Şekil 2-10'daki düz çizgi ile çizilmiş olan temel dalga formudur. Bu dalga formuna yüksek frekanstaki harmoniklerin etki etmesi sonucunda, oluşan dalga formunda sıfır geçişlerde artış meydana gelmiştir. Bozulmuş dalgaanın Krest faktörü ise temel dalga krest faktöründen büyük değerdedir. Dalga formunun kısa aralıklarda bir çok defa sıfır ekseninin her iki tarafı arasında salınması, elektronik cihazlardaki mikro işlemcilerdeki referans zamana olumsuz etkisi nedeni ile istenmeyen bir durumdur [14].

2.6.3 Dalga Formunun Tepe Değerindeki Değişmeler

Harmonikler akım yada gerilim dalga formunun tepe değerinde artmalara veya azalmalara sebep olabilirler. **Şekil 2-10**'da görüldüğü gibi harmonikli dalga formunun tepe değeri sinüzoidal dalga formunun tepe değerine göre büyük olabilir. Bu tepe değerinin boyutunu bilmek açısından krest faktör önemli bir indistir.

2.6.4 Gerilim Çentikleri

Gerilimdeki ani meydana gelen değişimlerdir. **Şekil 2-11**'de gerilim çentikleri görölmektedir.



Şekil 2-11 : Gerilim çentikleri.

Gerilimdeki bu çentikler çeviricilerdeki yarı iletkenlerin komütasyonu sırasında meydana gelebilen gerilim değişim oranı (dv/dt) olarak değerlendirilen durumlardır [14].

2.6.5 Sonuç ve Özet

Harmonikler güç sistemlerindeki elemanların düzgün çalışmalarını engellemekte ayrıca bu elemanların ömürlerinin kısaltmalarına ya da zarar görmelerine sebep olmaktadır. Bu olaylardan en önemlileri rezonans, sıfır geçişlerdeki artış, dalga formunun tepe değerindeki değişmeler (Ripple) ve gerilim çentikleridir.

Rezonans olayı sırasında sistemde aşırı akımlar ve gerilimler meydana gelebilmektedir. Bu aşırı akımlar ve gerilimler sistemdeki kondansatör gibi elemanların dielektriğinin delinmesine ve bozulmalarına neden olabilmektedir. Diğer taraftan sıfır geçişlerdeki artış, dalga formunun tepe değerindeki değişimler ve gerilim çentikleri gerilim dalga şekline hassas olan veya sıfır geçişleri sayma prensibine göre çalışan cihazların hatalı çalışmasına neden olabilmektedir.

3 HARMONİKLERİN GÜÇ SİSTEMLERİ ELEMANLARINA ETKİLERİ

3.1 Giriş

Harmonikler, güç sistemindeki elemanlar üzerindeki kayıpların artışına sebep oldukları ve bu elemanların aşırı gerilim ve akımlara maruz kalmalarına yol açtıkları için zararlıdır. Bu zararlara kondansatörlerin dielektriklerinin bozulması ve elektrik makinelerinin ömürlerinin kısılması örnek olarak verilebilir. Diğer taraftan harmonikler ölçü aletlerinde ölçüm hatalarına sebep olabilmektedirler [1, 14, 37].

Harmoniklerin güç sistemleri elemanlarından bazılarına etkileri ve bu elemanların harmoniklerin olumsuz etkilerinden nasıl korunabileceği aşağıda açıklanmıştır.

3.2 Kondansatörler

Güç faktörünü yükseltmek ve belli bir noktadaki gerilimi istenilen değerde tutmak amacıyla kullanılan kondansatörler harmonik üretmezler ama olası rezonans durumları için ortam hazırlarlar. Eğer kondansatör yük akımındaki yada sistem gerilimindeki harmoniklerden birinin frekansına yakın bir frekansta sistemi rezonansa getirecek değerde seçilirse, bu frekansta yüksek akım ve gerilimler oluşabilir. Bu durum kondansatörler dahil olmak üzere şebeke elemanlarının zarar görmesine neden olabilir [1, 37, 39, 40, 41].

Harmonikler kondansatör uçları arasındaki gerilimin etkin değerinin kondansatör nominal geriliminden yüksek değerde olmasına ve dielektriğinin bozulmasına yol açabilir. Buna ilave olarak kondansatör üzerindeki harmonik gerilimleri harmonik numarası arttıkça kondansatör empedansının daha küçülmesine sebep olur ve sonuç olarak kondansatör üzerinden akan akım değeri artar. Bu durum kondansatörlerin iç direncinden dolayı kayıplarının artmasına ve ömürlerinin kısılmasına sebep olur.

3.3 Motorlar

Harmonik içeren gerilim ve akımların alternatif akım ile çalışan dönen elektrik makinelerine ana etkisi, harmonik frekanslarındaki bakır ve demir kayıplarındaki artıştan dolayı oluşan ek ısınmalardır. Ek ısınmaların oluşturduğu kayıplar makinenin verimini ve momentini etkiler. Statorda akan akım hava aralığında meydana getirdiği magnetomotor kuvvetten dolayı rotorda da bir akım indükler. Harmonikler gerilim ve akım bileşenlerinin arasındaki faz açılarının (-) yada (+) olmasına göre negatif yada pozitif dizi harmoniği olarak tanımlanırlar. Faz açılarından dolayı pozitif sıra harmonikleri rotoru bir yöne döndürmeye çalışırken negatif sıra harmonikleri ise buna ters yönde rotoru döndürmeye çalışırlar. Rotordaki harmoniklerin etkileriyle alakalı iki ana durum vardır:

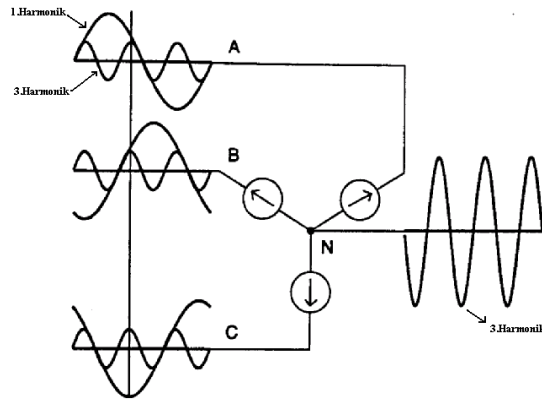
- Rotor ısınması artışı
- Darbe torkları.

Rotor ısınmalarındaki artış dolayısıyla motorun normal çalışma sıcaklığının üzerinde çalışması motor ömrünü azaltır. Harmoniklerin meydana getirdiği darbe torkları sentetik fiber sarımı gibi hassas uygulamalarda istenmeyen bir olaydır. Ayrıca harmonikler mekanik rezonanslara sebep olabilirler. Bu mekanik rezonanslar şaft gibi mekanik aksamalarda yorulmalara ve dolayısıyla ömür kısaltmalarına sebep olurlar [14, 37].

Sinüzoidal olmayan gerilim ile beslenen motorların harmoniklerin olumsuz etkilerinden dolayı ömürlerinin kısaltılmasını önlemeye yönelik derating çalışmaları literatürde bulunmaktadır [38, 42]. Bu çalışmalarda motor deratingi için kayıplardan yola çıkılarak elde edilen yeniden oranlama faktörleri oluşturulmuştur. Fakat bunlardan hiçbiri henüz transformatörlerde olduğu gibi standart haline gelmiş bir derating faktörü değildir.

3.4 Güç Kabloları ve Nötr İletkenleri

Kabloların deri ve yakınlık etkisi gibi frekansa bağlı olan özellikleri, alternatif akımdaki kablo direncinin doğru akımdaki kablo direncine nazaran artmasına, dolayısıyla kablo kesitinin büyümesine sebep olur. İşte bu iki etki sinüzoidal olmayan akımdaki yüksek frekanslı harmoniklerden dolayı daha da artar ve kablunun alternatif akım direnci kablunun sinüzoidal olmayan şartlardaki doğru akım direncine göre daha büyük hale gelir. Bu durum kablo üzerinden akan sinüzoidal olmayan akımın oluşturduğu kaybın aynı etkin değerdeki sinüzoidal olan akımın oluşturduğu kayıptan daha fazla olacağını gösterir. Harmoniklerin kablolarda meydana getirdiği ısınma normalde çok büyük bir sorun teşkil etmez. Harmoniklerin yüksek değerlerde olduğu elektrik güç sistemlerinde kablo kapasitesinin derating edilmesi ihtiyat açısından iyi bir harekettir [37]. Ayrıca üç ve üçün katları harmonikler (3., 9. ve 15. harmonikler) 4 iletkenli sistemlerde özellikle sorun çıkartırlar. **Şekil 3-1**'de dengeli bir sistemde faz iletkenlerindeki 3.harmonik akımlarının nötr noktasında oluşturdukları akım gösterilmiştir.



Şekil 3-1 : Dengeli bir sistemde faz iletkenlerindeki 3.harmonik akımlarının nötr noktasında oluşturdukları akım

Dengeli bir sistemde faz iletkenlerinden akan 1. harmonik akımlarının faz açıları arasında 120° fark olduğu için nötr iletkeninden 1. harmonik akımı akmaz. Faz iletkenlerinden akan 3.harmonik akımlarının aynı faz açısına sahip olması dolayısıyla

nötr iletkeninden, faz iletkenindekinin üç katı değerinde 3.harmonik akımı akar. Bu durum **Şekil 3-1**'de görülmektedir.

3.5 Elektronik Cihazlar

Harmoniklerin elektronik cihazlara olan etkileri çok fazladır. Bunlardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Bazı elektronik cihazların çalışması gerilim dalga formunun tepe değerine göre düzenlenir. Tepe değerindeki değişim durumu dolayısıyla bu tür cihazların çalışmasında bozulmalar meydana gelir. Örneğin elektronik güç kaynakları, filtre kondansatörlerinin tam dolmasını sağlamak amacıyla, gerilim dalga formunun tepe değerine karşı duyarlıdır. Buna göre kondansatörlerin tam dolup dolmadığını kontrol eder. Harmonik bozulması temel dalga şeklinin tepe değerinin yükselmesine yada azalmasına sebep olur. Sonuç olarak elektronik güç kaynağı giriş geriliminin etkin değeri nominal değerde olmasına rağmen tepe değerinin düşük yada yüksek olmasından dolayı çalışmaya devam edecektir.

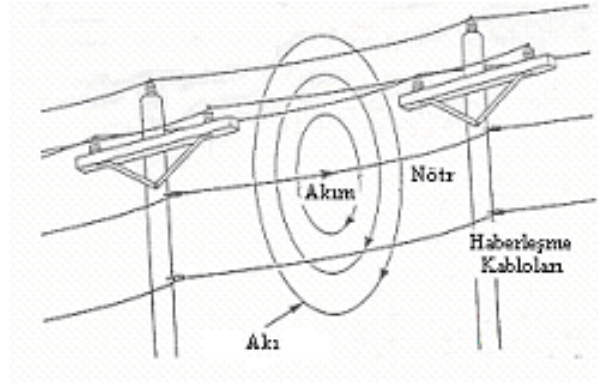
Birçok elektronik cihazda şebeke frekansına göre sıfır geçişleri sayan sayıcılar vardır. Bu sayıcılar harmonik bozunmadan dolayı çok fazla sıfır geçişlerin olmasından etkilenirler. Yarı iletkenler demeraj akımlarını ve elektromanyetik girişimi azaltmak için sıfır geçişlerde anahtarlanır. Sıfır geçişlerin fazla olması durumu yarı iletkenlerin anahtarlama zamanlarını ve dolayısıyla cihazın çalışma düzenini etkiler.

Gerilim çentikleri sebebiyle gerilim değeri çok kısa sürelerde çok büyük değişimler gösterebilir. Bu durum hassas elektronik cihazların zarar görmelerine yada performanslarının azalmasına sebep olur [14].

3.6 Telekomünikasyon Hatları

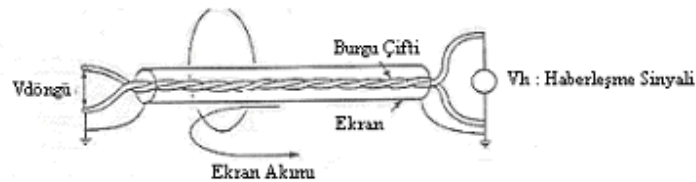
Dağıtım hattından akan harmonik akımları aynı direkleri paylaşan iletim hattında parazitler meydana getirebilirler. Paralel iletkenlerde ortak harmonik akımları tarafından indüklenen gerilimlerin frekansları sıklıkla sesli iletişim bandı aralığına girerler. Bu

durumda 540 Hz ile 1200 Hz arasında frekansa sahip harmonikler (11-24 numaralı harmonikler arası) bozucu etkiye sahiptirler. Nötr iletkeninden akan akımın 3 ve 3'ün katı harmoniklerden dolayı büyük değerlere ulaşması nötr iletkeninin haberleşme hatlarına etkisini artırır [37]. **Şekil 3-2'**de nötr iletkeninden akan harmonikli akımın haberleşme hatlarına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3-2 : Nötr iletkeninden akan harmonikli akımın haberleşme hatlarına indüktif etkisi

Harmonik akımlarının aktığı güç sistemi, haberleşme devreleri ile indüksiyon veya direkt iletimle etkileşirler. Bir havai dağıtım hattının nötr iletkeni ile haberleşme hattı arasındaki indüksiyon yollu etkileşim **Şekil 3-2'**de gösterilmiştir. Bu durum açık iletkenli telefon devrelerinde çeşitli problemlere neden olur. Ekranlanmış çift burgulu telefon tellerinde ise kuplaj etkileşimi daha az önemlidir. Kuplaj etkileşiminin ekranlanmış zırh tarafından ortadan kaldırılmasına ilişkin bağlantı şeması **Şekil 3-3'**de gösterilmiştir.



Şekil 3-3 : Kuplaj etkileşiminin ekranlanmış zırh tarafından engellenmesi

Diğer etkileşim biçimi olan direkt iletkenlik ile etkileşim ise **Şekil 3-4'**de gösterilmiştir.



Şekil 3-4 : Direkt iletkenlik ile haberleşme hattının etkilenmesi

Güç sistem topraklama hattı ile haberleşme hattı birbirlerine paralel bağlı ise, topraklama şartlarından dolayı haberleşme kablosunun ekranlama zırhı üzerinden çok büyük değerlerde harmonikli akımlar akabilir. Direkt iletkenlik ile etkileşim durumunda ekranlama zırhı haberleşme hatlarını koruyamaz [37].

3.7 Transformatörler

Güç sistemlerindeki harmonik akımları transformatörlerde frekansa bağlı kayıpları artırır. Diğer bir etki ise transformatör indüktansı ile sistem kapasitansı arasında, rezonans sebebi ile transformatör çekirdeğinde meydana gelen küçük titreşimlerdir [4].

Harmonik içeren yük akımlarının transformatörlerde meydana getirdiği sıcaklık artışlarının sebepleri:

- **Fuko kayıplarındaki artış:** Transformatörlerde manyetik akı tarafından indüklenen akımlar sargıdan, çekirdekten ve diğer iletken kısımlardan akarak ek ısınmalara sebep olurlar. Fuko kayıpları yük akımının frekansının karesiyle artar. Yük harmonik spektrumunda bulunan yüksek frekanslı bileşenler, fuko kayıplarını artırır.
- **Çekirdek kayıplarındaki artış:** Harmoniklerin çekirdek kayıplarında sebep olduğu artış, transformatör çekirdeğinin dizaynına ve uygulanan gerilime bağlıdır. Gerilim bozulmasındaki artış, çekirdek levhalarındaki fuko akımlarının artmasına

neden olur. Bu etki çekirdek levhaların kalınlığına ve kullanılan malzemenin kalitesine bağlıdır.

Bu kısımda harmonikler sebebi ile transformatör kayıplarındaki artışın transformatör kapasitesinde yol açacağı azalma IEEE Std C57.110:1998 standardına göre incelenmiştir. Gerçek bir sistemde yapılan ölçümler ile anlatılan yöntem uygulanacaktır.

Anma akımındaki I^2R kaybı bir birim alındığında yükteki transformatör kaybı;

$$P_{LL-R} = 1 + P_{EC-R} + P_{OSL-R} \quad (3.1)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem (3.1)'de P_{EC-R} birim olarak anma akımında sargılardaki fuko akım kaybını, P_{OSL-R} ise aynı anma akımında transformatörde meydana gelen diğer demir kayıplarını ifade eder.

Anma koşulları altında transformatör sinüzoidal olmayan yük akımında transformatörlerdeki fuko akım kayıpları;

$$P_{EC} = P_{EC-R} \cdot \sum_{n=1}^n \left(\frac{I_n}{I_R} \right)^2 \cdot n^2 \quad (3.2)$$

olarak ifade edilebilir [4].

Harmonik bileşenli yük akımının transformatörler üzerinde etkisinin hesaplanabileceği indisler tanımlanmıştır. (IEEE Std C57.110:1998 [4] tanımlanan Harmonik Kayıp Faktörü (F_{HL}), UL:1562:1994 [43] standardında tanımlanan K faktörü ile benzer olmasına karşın aynı değildir.) Harmonik Kayıp Faktörü (F_{HL}), toplam fuko kayıplarının (P_{EC}), temel bileşen akımının meydana getirdiği fuko akım kayıplarına (P_{EC-O}) oranı olarak tanımlanır.

Eşitlikte pay ve payda temel bileşen akımına veya efektif değerine bölüldüğünde harmonik kayıp faktörü Denklem (2.12)'de verilen ifadeden hesaplanmaktadır.

Transformatör anma koşulları altındaki fuko akım kayıpları (P_{EC-R});

- transformatör üreticilerinden,
- transformatör tip ve büyüklüğüne göre tanımlanmış tablodan,
- transformatöre ait test raporlarındaki verileri kullanarak yapılan hesap metoduyla

hesaplanabilir.

Transformatör tipi, kurulu gücü ve gerilimine göre **Tablo 3-1**'den P_{EC-R} değeri belirlenebilir.

Tablo 3-1 : Transformatör Tipi , Kurulu Gücü ve Gerilimine Göre P_{EC-R}

Tip	MVA	GERİLİM	$\%P_{EC-R}$
Kuru	≤ 1	480V LV	3-8
	≥ 1.5	5kV HV	12-20
	≤ 1.5	15kV HV	9-15
Yağlı	≤ 2.5	480V LV	1
	2.5-5	480V LV	1-5
	>5	480V LV	9-15

Elde mevcut olan sınırlı sayıdaki verilerle hesaplama yapabilmek için ANSI/IEEE C57.110/D7-1998 standardında bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller transformatör üreticisinden alınan veriler dikkate alınarak düzenlenebilir.

Kabul 1-) Onaylanmış test raporu, IEEE Std C57.12.90:1993 veya IEEE Std C57.12.91:1995'in eklerindeki tüm veri listesini içermelidir.

Kabul 2-) Fuko kayıpları belirli bir katsayı ile çarpılması sonucunda diğer kaçak kayıplar bulunur.

a-) Kuru tip transformatörler için; anma koşulları altında bağlantı noktaları, çekirdek ve yapısal elemanlardaki toplam diğer kaçak kayıplar, fuko kayıplarının % 67'si olarak kabul edilir.

b-) Yağlı tip transformatörler için; anma koşulları altında bağlantı noktaları, çekirdek ve yapısal elemanlardaki toplam diğer kaçak kayıplar, fuko kayıplarının % 33'ü olarak kabul edilir.

Kabul 3-) $I^2 R$ kaybı her bir sargı grubuna eşit dağılmış (uniform) kabul edilir.

Kabul 4-) Sargılar arasındaki fuko akım kaybı oranı aşağıdaki gibi kabul edilir.

a-) Nominal akımı 1000 A'den küçük kendi kendine soğumalı tüm transformatörlerde ısının % 60 iç sargılarda, % 40 dış sargılarda soğur.

b-) Isının % 60'ı iç sargılarda ve % 40'ı dış sargılarda soğuyan tüm transformatörler için sarım oranı 4:1 dir.

c-) Isının % 70'i iç sargılarda ve % 30'u dış sargılarda tüm transformatörler için sarım oranı 4:1 den büyüktür.

Kabul 5-) Her bir sargıdaki fuko akım dağılımı eşit dağıtılmamış (uniform) olarak kabul edilir.

IEEE Std C57.12.90:1993 ve IEEE Std C57.12.91:1995 standartlarında belirtildiği gibi, yük kaybının kaçak (stray) kayıp bileşeni, transformatörün ölçülen toplam kaybindan $I^2 R$ kaybı çıkartılarak hesaplanır.

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K \cdot \left[(I_{1-R})^2 \cdot R_1 + (I_{2-R})^2 \cdot R_2 \right] \quad (3.3)$$

Kuru tip transformatörler için sargı fuko kayıpları, toplam kaçak kayıplarının % 67 sidir. Diğer kaçak kayıplar toplam kaçak kayıpları ile fuko kayıplarının farkından elde edilir. Kabul 3'den dolayı yukarıdaki $I^2 R$ kaybının sargılara eşit olarak dağıldığı kabul edilir. Kabul 5'den azami fuko-akımı kayıp yoğunluğunun ortalama değerini %400 olduğu kabulü ile

$$P_{EC-Rmax} = \frac{2.4 \cdot P_{EC-R}}{K \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2} \quad (3.4)$$

olarak hesaplanabilir. K katsayısı tek fazlı transformatörler için 1'e eşit olup üç fazlı kuru tip transformatörler için ise 1,5'a eşittir [4].

K-faktör, harmoniklerin transformatörü yüklemesi ve kayıpları üzerindeki etkilerini hesaplamak için geliştirilmiş bir sabittir. *K-faktör* UL 1562:1994'de ifade edilmiştir. Fakat IEEE Std C57.110:1998 standartlarında, *K-faktör* ifadesine karşılık olarak harmonik kayıp faktörü (F_{HL}) terimi kullanılmıştır.

K-faktör, transformatörleri harmoniklere göre sınıflandırarak, transformatörlerdeki deri etkisi kayıpları ve çekirdekteki doyma olasılığı hakkında bilgi içerir. *K-faktör* UL 1562:1994 standardında (2.9)'daki biçimde tanımlanmıştır.

(2.10)'da belirtilen harmonik kayıp faktörü (F_{HL})'de I_1 sabiti pay ve paydada toplam dışına alındığında;

$$F_{HL} = \frac{\frac{1}{I_1^2} \cdot \sum_1^{n_{max}} I_n^2 \cdot n^2}{\frac{1}{I_1^2} \cdot \sum_1^{n_{max}} I_n^2} = \frac{\sum_1^{n_{max}} I_n^2 \cdot n^2}{\sum_1^{n_{max}} I_n^2} \quad (3.5)$$

elde edilir. UL 1562:1994 standardında ifade edilen *k-faktör* ile F_{HL} (IEEE Std C57.110:1998) arasındaki ilişki

$$k - faktör = (1 + THD_I^2) \cdot F_{HL} \quad (3.6)$$

biçiminde ifade edilebilir.

IEEE Std C57.110:1998 standardında belirtilen transformatörün sekonderinden çekilen izin verilebilir azami sinüzoidal olmayan yük akımının değeri;

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{LL-R}}{1 + F_{HL} \cdot P_{EC-R \max}}} \quad (3.7)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir [4, 44].

UL 1562:1994 standardında belirtilen transformatör sekonderinden çekilen izin verilebilir azami sinüzoidal olmayan yük akımının değeri ise

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{LL-R}}{1 + k - \text{faktörü} \cdot P_{EC-R \max}}} \quad (3.8)$$

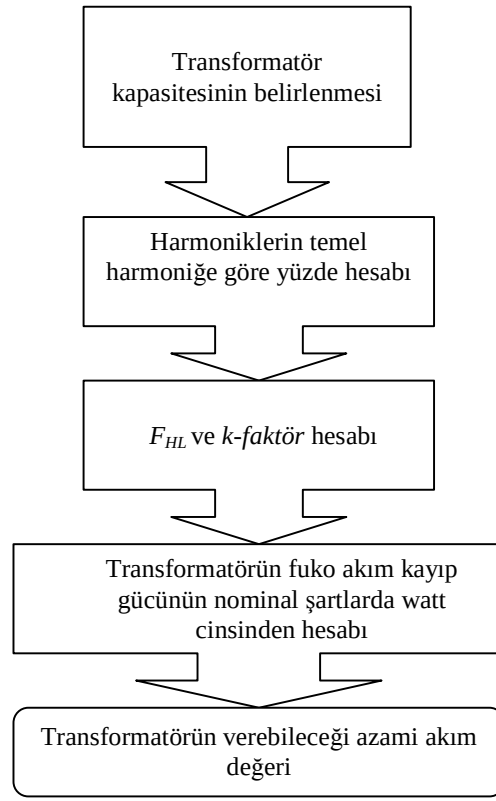
eşitliği yardımı ile hesaplanabilir [43, 44].

Bu harmonik spektrumunda transformatörün çıkışına bağlanabilecek izin verilebilir yükün azami görünür gücü;

$$S_{\max} = S_{\text{anma}} \cdot I_{\max} \quad (3.9)$$

olur. Sinüzoidal olmayan yükün transformatöre zarar vermemesi için transformatörler (3.8) ile verilen yük akımı ve (3.9) ile verilen görünür güç değerinin altında çalıştırılmalıdır [1, 44].

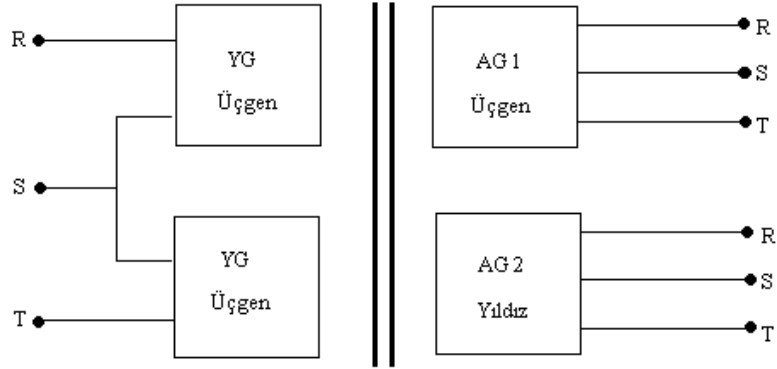
k-faktör aynı akım harmonik spektrumundaki bir yükü besleyen farklı güç değerlerindeki transformatörler için farklı değerdedir. Buna karşılık F_{HL} ise aynı akım harmonik spektrumundaki bir yükü besleyen farklı güç değerlerindeki transformatörler için aynı değeri alır. Bunun nedeni *k-faktör*'ün transformatörün anma akım değerine bağlı olmasıdır. Yukarıda verilen bu iki indise göre transformatörün sinüzoidal olmayan şartlarda verebileceği azami akımın elde edilmesini sağlayan akış diyagramı **Şekil 3-5**'de gösterilmiştir.



Şekil 3-5 : Transformatörün sinüzoidal olmayan şartlarda verebileceği azami akımın elde edilmesi

3.7.1 Sayısal Analiz

Analizde kullanılan akım ve gerilim harmonik değerleri İstanbul Ulaşım A.Ş.'nin tramvay sistemindeki 2 tane 6 darbeli doğrultucunun alçak gerilim tarafına bağlı olduğu 3 sargılı bir transformatörün alçak gerilim tarafında yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Ölçüm sırasında Circutor AR5 [45] cihazı kullanılmıştır. Şekil 3-6'da ölçüm yapılan transformatörün yapısı gösterilmiştir.



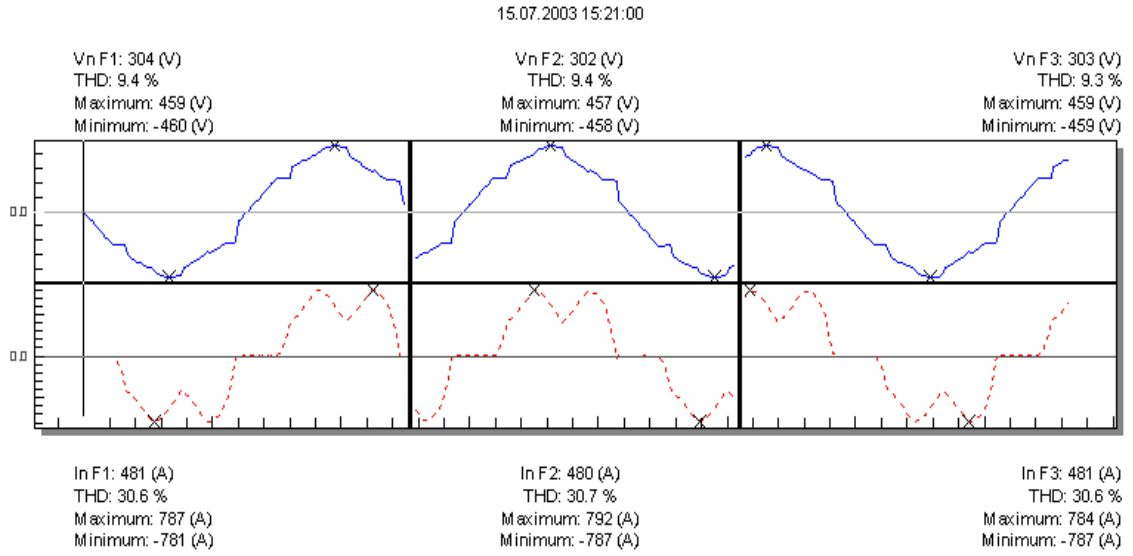
Şekil 3-6 : Ölçüm yapılan transformatörün yapısı

Sistemde kullanılan bu transformatöre ilişkin parametreler Ek-1’de verilmiştir.

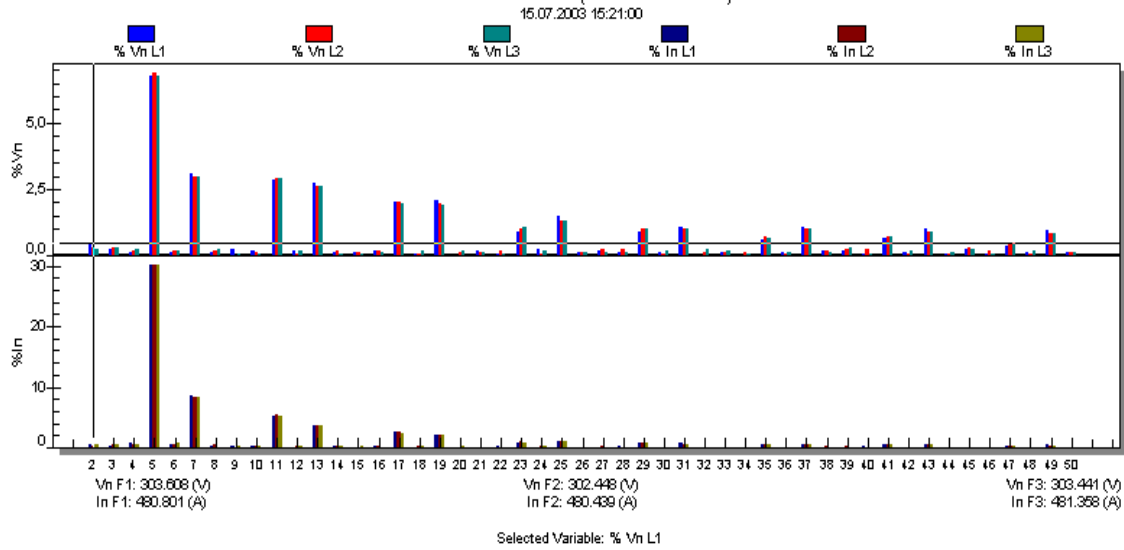
Ek-1’de gösterilen veriler ile trafonun yüksek gerilim sargısı ile alçak gerilim 1 sargısı, bir transformatör olarak, yüksek gerilim sargısı ile alçak gerilim 2 sargısı ise ayrı bir transformatör olarak düşünülüp her iki kısım olarak yeniden oranlanmalıdır.

Bu çalışmada alçak gerilim 1 terminallerine ait kaydedilmiş akım ve gerilim datası kullanılarak yüksek gerilim sargısı ve alçak gerilim 1 sargısı grubu için derating yapılmıştır. Alçak gerilim 2 terminallerine ait kaydedilmiş akım ve gerilim datası elde edildiği takdirde aynı derating yöntemi izlenerek, yüksek gerilim sargısı ve alçak gerilim 2 sargı grubu için de derating yapılabilir.

Transformatörün alçak gerilim 1 çıkışında yapılan ölçümler sonucunda **Şekil 3-7**’deki faz-faz gerilimine ve hat akımına ait dalga formları elde edilmiştir. Bu dalga formlarına ait harmonik spektrumu **Şekil 3-8**’de verilmiştir.



Şekil 3-7 : Transformatörün alçak gerilim 1 sargısına ait faz-faz gerilimi ve hat akımının dalga formları



Şekil 3-8 : Transformatörün alçak gerilim 1 sargısına ait faz-faz gerilimi ve hat akımının harmonik spektrumu

Ölçüm sonucunda elde edilen datalardan, transformatörün alçak gerilim 1 sargısına ait hat akımının harmonik spektrumu kullanılarak, $F_{HL}=4.5$ ve $k\text{-faktör} = 4.9$ değerlerinde hesaplanmıştır.

Ölçümler sırasında F_{HL} 'nin transformatörün az yüklü olduğu anlardaki değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna karşın yeniden oranlama hesabı sırasında trafonun temel harmonikte anma akımında yüklendiği andaki harmonik akım ve gerilim değerleri kullanılmıştır.

Analizdeki harmonik içeriği incelendiğinde izin verilebilir sinüzoidal olmayan yük akımı değerinin F_{HL} 'ye göre hesaplanması durumunda anma akımının % 67 si olduğu görülmüştür. Ayrıca analizdeki harmonik içeriğinde izin verilebilir sinüzoidal olmayan yük akımı değerinin k -faktör'e göre hesaplanması durumunda anma akımının % 65 ine ulaştığı görülmüştür.

Bu verilere göre F_{HL} ve k -faktör için elde edilen transformatöre ilişkin azami akım ve azami güç değerleri **Tablo 3-2'**de verilmiştir.

Tablo 3-2 : F_{HL} ve k -faktör için kullanılan transformatörün verebileceği azami akım ve azami güç değerleri

İndis	Transformatör Gücü (kVA)	Azami Akım (A)	Azami Güç (kVA)
F_{HL}	500 kVA	333.6 A	335 kVA
k -faktör	500 kVA	315.9 A	325 kVA

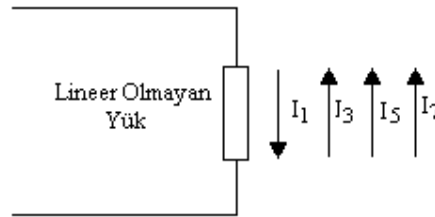
Tablo 3-2 incelendiğinde **Şekil 3-8** ile verilen harmonik spektrumunda, sinüzoidal olmayan yükün izin verilebilir azami gücünün anma görünür gücünden az olduğu görülmektedir.

3.8 Enerji Sayaçları

Lineer olmayan yüklerin şebekeden çektiği akımlardaki harmonik bileşenleri aktif ve reaktif güç sayaçlarının doğruluklarına etki etmektedir. İndüksiyon prensibine dayalı

aktif güç sayaçlarındaki manyetik disk dönme hızı 50 Hz için kalibre edildiğinden harmoniklerin bulunduğu durumlarda ölçüm hataları ortaya çıkmaktadır.

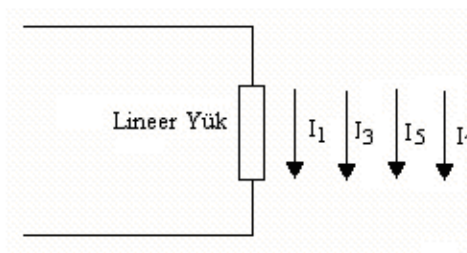
Lineer olmayan bir yük, Şekil 3-9'de gösterildiği gibi temel harmonik dışındaki harmoniklerde güç sistemine bağlı bir akım kaynağı olarak modellenenebilir.



Şekil 3-9 : 3.,5. ve 7.harmonik akımları kaynağı doğru akan lineer olmayan yük

Bu durumda lineer olmayan yük bozulmuş akım dalga formundan dolayı güç sistemindeki dağıtım hatlarında kayıpların artışına sebep olacaktır.

Lineer yükler ise **Şekil 3-10**'da gösterildiği biçimde kendileri harmonik akımları üretmemelerine rağmen şebeke gerilimindeki bozulmadan dolayı harmonik akımlarına maruz kalırlar.



Şekil 3-10 : 3.,5. ve 7.harmonik akımları yüke doğru akan lineer yük

Lineer yük müşterilerinin sayaçları, yukarıda bahsedilen ve lineer olmayan yüklerin oluşturduğu gerilim bozulması nedeni ile, daha farklı yazacaktır. Bu durum enerji sistemi işletenin mağduriyetine de yol açabilmektedir.

İndüksiyon prensibine dayalı sayaçlarda 50 Hz in katı olan frekanslarda disk döndüren manyetik moment ters yönde etki ettiğinden sayacın ölçtüğü toplam aktif güç ana harmonik aktif güç değerinden daha küçük değerde olabilmektedir.

Reaktif güç ölçümü için sinüzoidal olmayan şartlarda ortak kabul edilen bir tanım yoktur. Bu sorunun yanında hali hazırda var olan reaktif güç sayaçları akımın açısını 90° faz kaydırıp gerilimle çarpma temeline dayanarak ölçüm yapmaktadır. Reaktif güç sayaçlarında da harmoniklerin bulunduğu durumlarda frekansa bağlı hatalar meydana gelecektir.

3.8.1 Sayısal Analiz

Sayısal analizdeki sonuçlar [46] numaralı kaynaktan alınmıştır. Bu çalışmada farklı tipte sayaçların sinüzoidal olmayan çalışma koşullarındaki ölçüm hataları belirlenmiş referans sayacın ve test edilen sayaçların sinüzoidal olmayan şartlar için oluşturulmuş güç tanımlarından hangisine yakın değerler verdiği belirlenmeye çalışılmıştır. Sayaç hatalarının analizleri sırasında dikkate alınan güç tanımlarının ifadeleri Ek-2’de verilmiştir. [46] numaralı kaynaktan alınan ölçümlerde 1Ω ’ luk direnç akım devresine seri olarak bağlanmıştır ve bu direnç üzerinden okunan gerilim değeri akım değeri olarak alınmıştır. Test edilen sayaçların özellikleri ise **Tablo 3-3**’de verilmiştir. Sayaçların testi sırasında kullanılan güç tanımları Ek-2’de verilmiştir. Bu sayaçlar halen çeşitli markalarla piyasa da bulunmaktadır.

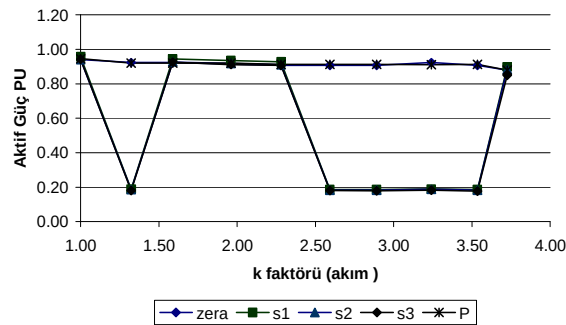
Tablo 3-3 : Test edilen sayaçların özellikleri

Sayaç No	Tipi	Diğer Özellikleri
s1	3 fazlı aktif indüksiyon	220/380Volt, 10(30)Amper 240 devir /kWh
s2	1 fazlı aktif indüksiyon	220/380Volt, 10(30)Amper 600 devir /kWh
s3	Kombi	220/380Volt, 10(30)Amper 50000 darbe /kVarh
S1	indüksiyon reaktif	220/380Volt, X5Amper (akım transformatörü ile bağlanan) 480Devir/kVAr
S2	indüksiyon reaktif	220/380Volt, 480devir/ kVArh
S3	elektronik reaktif	220/380Volt, 10(30)Amper, 200darbe/kVArh

Tabloda verilen sayaçların yanında testler sırasında Zera [46] referans sayaç test sisteminin ölçüm sonuçları da analiz edilmiştir. Almanya'dan temin edilmiş olan Zera marka sayaç test sistemi dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar akım gerilim kaynakları, referans sayaç, sayaçların test edilmek üzere montajının yapıldığı ve optik okuyucu aracılığı ile hatalarının okunduğu test masası ve sisteme kumanda eden bilgisayar. Akım ve gerilim kaynakları üç fazlı olup her faz birbirinden bağımsızdır. Akım ve gerilim kaynakları D.A. gerilim üreten bir regülatörden beslenirler ve oluşturulacak olan dalga şekli bu D.A. gerilimden elektronik devreler aracılığı ile elde edilir. Bu kaynaklara sistemin bilgisayarı ile kumanda edilir. Kaynakların uygulayacağı akım ve gerilim değerleri harmonik içerikleri sistemin bilgisayarı ile hazırlanır.

3.8.2 Aktif Ölçüm Sonuçları

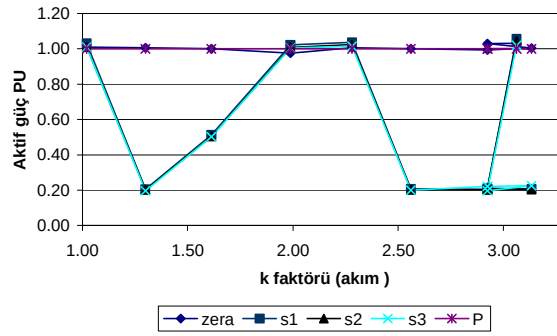
Grafikte Zera ile referans sayaç, s1 ve s2 ile indüksiyon tipi sayaçlar, ve s3 ise elektronik tip sayacı göstermektedir. Grafikte Zera ile referans sayaç, s1 ve s2 ile indüksiyon tipi sayaçlar, ve s3 ise elektronik tip sayacı göstermektedir. Hesaplama ile elde edilen değerler ve ölçüm sonucu bulunan değerler; sistem için belirlenen baz güç değeri olan görünür güce bölünerek, birim değerlere dönüştürülmüştür. **Şekil 3-11** ve **Şekil 3-12** ile verilen güç değerleri bu yüzden birim değerlerdir. **Şekil 3-11**'de gerilim sinüzoidal ve akım harmoniklidir. Gerilim ve akım arasında açı farkı 25° 'dir.



Şekil 3-11 : Gerilimin sinüzoidal ve akımın harmonikli olması durumunda gerilim ve akım arasında açı farkının 25° çalışma koşulunda elde edilen sonuçlar

Şekil 3-11’de görüldüğü gibi referans sayaç doğru ölçüm yaparken her üç sayaç ta %80 ile %50 arasında değişen oranlarda eksik ölçüm yapmaktadır.

Gerilimin ve akımın harmonik içerdiği çalışma koşulunda, gerilim akım arasındaki açı farkının 25° olduğu kabulü ile elde edilen sonuçlar Şekil 3-12’de verilmiştir.

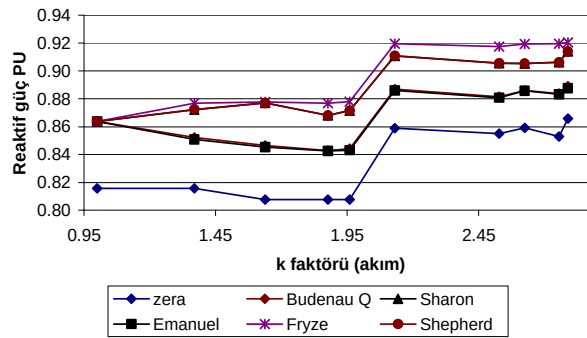


Şekil 3-12 : Akım ve gerilimin harmonikli olması durumunda gerilim ve akım arasındaki açı farkının 25° olduğu çalışma koşulunda elde edilen sonuçlar

Şekil 3-12’de görülen değişiklikler incelendiğinde referans sayaç doğru ölçüm yaparken her üç sayacında % 80 ile % 50 arasında değişen oranlarda eksik ölçüm yaptığı anlaşılmaktadır.

3.8.3 Reaktif Ölçüm Sonuçları

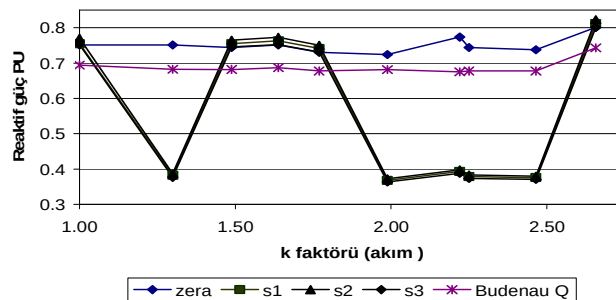
Reaktif sayaç testlerinde kullanılan sayaçlar **Tablo 3-3**’de verilen S1, S2 ve S3 sayaçlarıdır. Şekil 3-13’de yapılan tüm reaktif ölçümlerde kaydedilen datalar Budeanu, Fryze, Emanuel, Shepherd ve Zand, Sharon’un reaktif güçleri çizdirilmiştir. Sayaç testleri sırasında belirtilen reaktif güçlere ait ifadeler ekler kısmında verilmiştir. Şekil 3-13’de harmonikli akım durumunda *k- faktör*’e göre birimlendirilmiş güç değerleri verilmiştir.



Şekil 3-13 : Harmonikli akımdaki k faktörü 'e göre birimlendirilmiş güç değerleri

Sharon ve Budeanu reaktif güç değerleri birbirinin aynı olmasına rağmen Emanuel, Fryze, Shepherd ve Zand, Sharon reaktif güçleri değişik güç hesaplama yöntemleri nedeniyle % 2 oranında farklı sonuca neden olmuşlardır. Bu ölçümlerde referans sayaç Zera'ya en yakın değerleri Budeanu yöntemi ile hesaplanan reaktif güç sağlamaktadır. Bu sebeple ölçüm sonuçları Budeanu reaktif gücüne göre kıyaslanacak ve grafiklerde Budeanu gücü ile birlikte gösterilecektir.

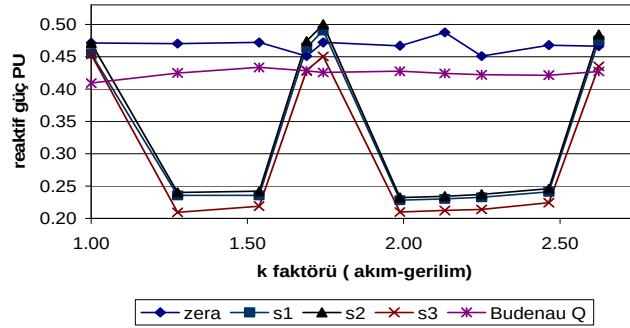
Tablo 3-3'de verildiği gibi S1 ve S2 indüksiyon tipi sayaç S3 ise elektronik tip sayaçtır. Gerilim sinüzoidal, akım harmonikli, gerilim ve akım arasındaki açı 25° iken referans sayaç ile test edilen sayaçların ölçtüğü güç ve Budeanu reaktif güç değeri **Şekil 3-14** 'de verilmiştir.



Şekil 3-14 : Gerilim sinüzoidal, akım harmonikli, gerilim ve akım arasındaki açı 25° iken referans sayaç ile test edilen sayaçların ölçtüğü güç ve Budeanu reaktif güç değeri

Şekil 3-14’de görüldüğü gibi aktif güç ölçümüne benzer biçimde aynı harmonik içerikli deneylerde referans sayaç ve Budeanu reaktif gücü yaklaşık aynı çıkarken, sayaçların k -faktör’ün 1.3 olduğu anda ve 2-2.5 aralığında % 50 oranında hatalı ölçüm yapmaktadır.

Gerilim ve akımın harmonikli, gerilim ve akım arasındaki açının 25° olması durumunda, referans sayaç ile test edilen sayaçların ölçtüğü güç ve Budeanu reaktif güç değeri Şekil 3-15’de verilmiştir.



Şekil 3-15 : Gerilim ve akım harmonikli, gerilim ve akım arasındaki açının 25° olması durumunda, referans sayaç ile test edilen sayaçların ölçtüğü güç ve Budeanu reaktif güç değeri

Şekil 3-15’deki grafikte Zera referans sayacı ile Budeanu reaktif gücü birbirlerine yakın değerdedir. Bununla birlikte k -faktör’ün 1.25-1.53 ve 2.00-2.50 olduğu aralıklarda diğer sayaçlar % 50 hatalı ölçüm yapmışlardır.

Deney sonuçlarına ait grafikler detaylı incelendiğinde bu hataların k faktör’e bağlı olmadığı görülmektedir. Çünkü k faktör’ün hem küçük olduğu hem de büyük olduğu ölçümlerde hatalı ölçmeler görülmektedir. Yine aynı şekilde hemen hemen tüm harmonik içerikli deneylerde THD seviyesi %25-%30 aralığında olduğundan hatalı ölçümlerin THD seviyesine de bağlı olmadığı görülmektedir.

Literatürdeki benzer [47-49] çalışmalarda olduğu gibi deneyler sırasında indüksiyon tipi ve örneklemeli elektronik tip sayaçların toleranslarının üzerinde hatalar yaptığı görülmüştür.

Bu hataların elektronik tip sayaçlarda örnekleme sayılarının azlığından indüksiyon tipi sayaçlarda ise manyetik akının bozulmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

3.9 Sonuç

Harmonikler güç sistemleri elemanların ömürlerinin kısılmasına ve enerji sayaçlarının hatalı ölçümlerine sebep olabilmektedirler. Bu durum büyük maddi kayıplara yol açmaktadır. Bu kayıpların azaltılması için harmoniklerin; standartların gösterdiği yöntemlerle sınırlandırılması gerekmektedir.

4 SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA İFADE EDİLEN GÜÇ TANIMLARI

4.1 Giriş

Güç faktörü ve reaktif güç konusunda 1888'den sonra (Steinmetz ile başlayan) çalışmalardan bu yana sinüzoidal olmayan şartlarda güç hesaplama ihtiyacına cevap vermek amacıyla farklı güç tanımları oluşturulmuştur [29, 30, 31, 50, 51, 52, 53]. Sinüzoidal olmayan şartlar için oluşturulmuş bu güç tanımlarından en önemlileri Budeanu [20, 21], Fryze [21, 22], Shepherd ve Zand [23], Sharon [24], Kimbark [25] ve Czarnecki [26] tarafından verilmiştir.

Bu güç tanımlarının geçerliliğinin incelendiği çalışmalarda; çeşitli güç tanımları, ihmal ve yaklaşıklıklarla elde edilmiş gerçekçiliği sorgulanabilir modeller kullanılarak ve hat empedansı ihmal edilerek analiz edilmiştir. Tezin bu bölümünde tek fazlı bir sistemde gerçekçi bir yük modeli kullanılarak ve kaynak empedansının devre üzerine etkisini de dikkate alarak literatürdeki analizler tekrar yapılmıştır.

4.2 Sinüzoidal Şartlarda Güç Tanımları

Sinüzoidal şartlarda ani gerilim ve akım :

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega t \quad (4.1)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.2)$$

ise bu değerlerin çarpımından ani güç

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = 2 \cdot V \cdot I \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.3)$$

biçiminde elde edilir.

Ani güç yarım açı formülleri kullanılarak

$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) - V \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (4.4)$$

biçimine dönüştürülebilir. Bu ifadede;

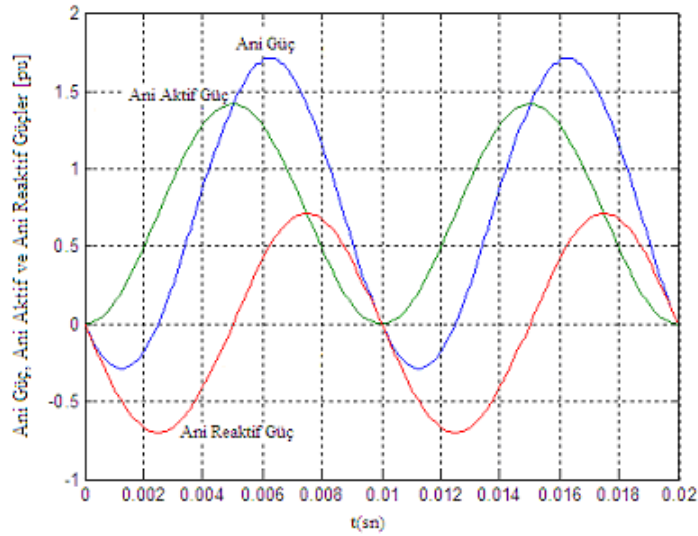
$$p_a(t) = V \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) \quad (4.5)$$

terimi ani aktif güç,

$$p_r(t) = V \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (4.6)$$

terimi ise ani reaktif güçtür.

Denklem (4.4), (4.5) ve (4.6)'da belirtilmiş olan ani güç, ani aktif ve ani reaktif güçlerin zamana göre değişimleri **Şekil 4-1**'de verilmiştir.



Şekil 4-1 : Ani aktif, ani reaktif ve ani gücün zamana göre değişimi

Şekil 4-1'den görüldüğü gibi ani aktif gücün bir periyot boyunca işareti değişmez. Bu anlık aktif gücün ortalama değerinin sıfırdan farklı olduğunu gösterir. Ani aktif gücün ortalama değeri aktif güç olarak tanımlanmıştır ve bu değer ani gücün ortalama değerine

eşittir. Ani reaktif gücün bir yarı periyottaki akış yönü diğer yarı periyottakinin tersi yönde olduğu için ortalama değeri sıfırdır. Ani reaktif gücün azami değeri reaktif güç olarak tanımlanmıştır.

Aktif güç (4.5)' de verilen ani aktif gücün ortalama değeri;

$$P = V.I.\cos\phi \quad (4.7)$$

ifadesi ile hesaplanabilir [2].

(4.6)'da verilen anlık reaktif gücün azami değeri;

$$Q = V.I.\sin\phi \quad (4.8)$$

ifadesi ise reaktif güç olarak tanımlanmıştır [2].

Sinüzoidal şartlarda aktif ve reaktif güçlerin vektör toplamı görünür güç olarak isimlendirilmiştir. Görünür güç

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.9)$$

biçiminde ifade edilmiştir [2].

Verimlilik ölçmeye yönelik bir terim olan güç faktörü aktif güç ile görünür gücün birbirine oranı olan

$$g.f = \frac{P}{S} = \frac{P}{V \cdot I} \quad (4.10)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır [2]. Sinüzoidal şartlarda indüktif özellikte yüke sahip bir devrede $Q_C=Q_L$ eşitliğini sağlayan kapasite değeri yüke paralel bağlanırsa $g.f=1$ yapılabilir.

4.3 Sinüzoidal Olmayan Şartlar

Akım veya gerilime ait sinüzoidal olmayan bir periyodik dalga; Fourier teoreminden yararlanarak;

$$v(t) = \sum_1^n \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t) \quad (4.11)$$

$$i(t) = \sum_1^n \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t - \varphi_n) \quad (4.12)$$

biçiminde ifade edilebilir. Sinüzoidal olmayan şartlarda ani güç ise akım ve gerilimin ani değerlerinin çarpımından;

$$p(t) = \sum_1^n \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(\omega_n t) \cdot \sum_1^n \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(\omega_n t - \varphi_n) \quad (4.13)$$

biçiminde elde edilebilir.

Sinüzoidal olmayan şartlarda görünür güç bileşenlerinin tanımlanmasında karşılaşılan zorluğun sebebi ani gücün içeriğinde bulunan farklı harmoniklere ait akım ve gerilim değerleri arasındaki çapraz çarpımlardır. Kompanzasyon, iletim verimi ve hat gerilim düşümü gibi elektrik tesislerine ait özellikler hakkında bilgi veren reaktif güç tanımı sinüzoidal şartlar halinde var olmasına rağmen, sinüzoidal olmayan şartlarda bunların hepsi hakkında bilgi veren bir reaktif güç tanımı yoktur. Bu sebeple sinüzoidal olmayan şartlarda güç hesabı için belirlenmiş yöntemlerden hangisinin kompanzasyon bakımından doğru bilgi verdiği konusunda karar vermek, hem sinüzoidal olmayan şartlarda kompanzasyonun optimum şekilde yapılması, hem de reaktif gücün fiyatlandırılması açısından gereklidir.

4.3.1 Budeanu Reaktif Güç Tanımı

Budeanu görünür gücü aktif ve aktif olmayan güç olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [20, 21]. Aktif güç; her bir harmonik bileşeni için ani güçlerin ortalama değerleri alınarak hesaplandığında;

$$P = \sum_{n=1}^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (4.14)$$

eşitliği yardımı ile hesaplanabilir.

Budeanu aktif gücü işe dönüşen gerçek güç hakkında bilgi vermesi sebebiyle seçmiştir. Bu yaklaşımda aktif olmayan güç ise; Budeanu reaktif ve bozulma gücü olarak iki dik bileşene ayrılmıştır. Budeanu reaktif gücü denklem (4.15)'de verildiği gibi tüm harmoniklere ait reaktif güçlerin toplamından oluşmaktadır.

$$Q_B = \sum_{n=1}^n V_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n \quad (4.15)$$

Budeanu yönteminde bozulma gücü farklı harmoniklerin akım ve gerilim bileşenlerinin çapraz çarpımları arasındaki ilişkiden elde edilmiştir. (4.16)'da bozulma güç değeri görülmektedir.

$$D_B^2 = S^2 - P^2 - Q_B^2 = \sum_{n=1}^{n \neq m} V_n^2 \cdot I_m^2 + V_m^2 \cdot I_n^2 - 2 \cdot V_n \cdot I_m \cdot I_n \cdot V_m \cdot \cos(\varphi_n - \varphi_m) \quad (4.16)$$

Budeanu reaktif güç bileşenini basit bir kapasite ile tamamen kompanze edilebilecek reaktif gücü olarak belirlemiştir. Bozulma gücü için ise $n \neq m$ şartıyla (4.16)'daki $V_m \cdot I_n$ ile $V_n \cdot I_m$ çapraz çarpımları basit bir kapasite ile sıfır yapılamayacağından basit bir kapasite ile kompanze edilebilme durumu yoktur.

4.3.2 Fryze Güç Tanımı

Budeanu reaktif güç ifadesi basit bir kapasite ile kompanze edilebilen reaktif güç hakkında bilgi vermesine rağmen güç tanımındaki aktif ve reaktif güç ifadeleri kaynak verimi hakkında yeterli bilgi vermemektedir. Ayrıca Budeanu güç tanımı harmonik domeninde ölçümler ve sofistike ölçüm aletleri gerektirmektedir. Fryze akımı aktif ve reaktif olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [21, 22]. Aktif bileşen

$$I_{\text{Aktif}} = \frac{P}{V} \quad (4.17)$$

reaktif bileşeni ise

$$I_{\text{Reaktif}} = \sqrt{I^2 - I_{\text{Aktif}}^2} \quad (4.18)$$

olarak ifade edilir.

Gerilimin etkin değeri ile akımın reaktif bileşeninin etkin değerlerinin çarpımı Fryze'nin tanımlamış olduğu reaktif güçtür. Buna göre Fryze'nin reaktif güç tanımı

$$Q_F = V \cdot I_{\text{Reaktif}} \quad (4.19)$$

olarak ifade edilir.

Bu yöntemde aktif güç ile reaktif gücün vektör toplamı olan

$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad (4.20)$$

ifadesi görünür güç olarak belirlenmiştir.

Bu ifadelerdeki akımın reaktif bileşeni fiziksel olarak iş yapmayan akım bileşenidir. Fryze yönteminin akımı böyle aktif ve reaktif olarak iki bileşene ayırması sonucunda elde edilen aktif ve reaktif güç tanımları kaynağın verimliliği hakkında bilgi verir.

4.3.3 Shepherd ve Zand Güç Tanımı

(4.14)'te tüm harmoniklere ait aktif güçler toplamı verilmiştir. İşareti negatif olan harmonik güçleri yükten kaynağa doğru akmaktadır. Ana harmonik gücü ise pozitif değerde olduğu için denklem (4.14) ile verilen toplam aktif güç ana harmonik aktif gücünden küçük olabilmektedir. Bu duruma Shepherd ve Zand tarafından dikkat çekilmiştir [23]. Shepherd ve Zand akımı aktif, reaktif ve bozulma akımı olmak üzere üç dik bileşene ayrılmıştır. Bu akım bileşenleri:

aktif akım;

$$I_R = \sqrt{\sum_1^n I_n^2 \cdot \cos^2 \phi_n} \quad (4.21)$$

reaktif akım;

$$I_X = \sqrt{\sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \phi_n} \quad (4.22)$$

ve bozulma akımları;

$$I_D = \sqrt{I^2 - I_R^2 - I_X^2} \quad (4.23)$$

şeklinde ifade edilirler.

Shepherd ve Zand' ın oluşturduğu güç tanımı

$$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2 \quad (4.24)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Buradaki güç bileşenleri :

aktif görünür güç, S_R ;

$$P \neq S_R = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \cos^2 \phi_n} \quad (4.25)$$

reaktif görünür güç, S_X ;

$$Q_B \neq S_X = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n} \quad (4.26)$$

ve bozulma görünür gücü, S_D ;

$$D_B \neq S_D = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^r I_k^2 + \sum_1^s V_u^2 \cdot \left(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^r I_k^2 \right)} \quad (4.27)$$

k : Akımın içerdği gerilimin içerdğinden farklı harmonik numaraları,

u : Gerilimin içerdği akımın içerdğinden farklı harmonik numaraları,

n : Hem akım hem de gerilimin içerdği ortak harmonik numaraları,

olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak; bu güç tanımının aktif ve reaktif bileşenleri kaynak ve hattan meydana gelen sistemin yüklenme şartları hakkında anlamlı bir bilgi sağlamaktadır.

4.3.4 Sharon Güç Tanımı

Shepherd ve Zand güç tanımı hattın yüklenme şartları hakkında anlamlı bir bilgi sağlamasına rağmen bu güç tanımı güç faktörünün hesaplanmasında kullanılamamaktadır. Sharon güç ifadesi, Shepherd ve Zand'ın güç ifadesi içinde yer almayan P aktif gücünü içermektedir [24]. Sharon güç tanımına göre reaktif görünür güç

$$S_Q^2 = V \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n \quad (4.28)$$

olarak ifade edilmiştir. Sharon güç tanımında görünür güç; ortalama güç, reaktif görünür güç ile tamamlayıcı görünür gücün vektör toplamı olan

$$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2 \quad (4.29)$$

ifadesiyle tanımlanmıştır.

Sharon güç tanımı hem hatlardaki reaktif güce bağlı yüklenme şartları hem de güç faktörü hakkında bilgi veren bir güç tanımıdır.

4.3.5 Kimbark Güç Tanımı

Kimbark görünür gücü aktif ve aktif olmayan güç olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [25]. Bu güç tanımında aktif güç ani gücün ortalama değeri olarak ifade edilmiştir. Aktif olmayan güç ise iki dik bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar ilki (4.30) ile verilen reaktif güç;

$$Q_K = Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \phi_1 \quad (4.30)$$

diğeri ise denklem (4.31) ile verilen bozulma gücüdür.

$$D_K = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_K^2} \quad (4.31)$$

Kimbark'a göre devre parametreleriyle en kolay şekilde ilişkilendirilebilecek reaktif güç, temel dalgaının akım ve gerilim bileşenleriyle hesaplanabilen reaktif güç tanımıdır.

4.3.6 Czarnecki Güç Tanımı

Czarnecki sinüzoidal olmayan dalga formundan dolayı kaynak verimindeki azalmanın tanımlanma ihtiyacı doğrultusunda bir güç ifadesi meydana getirmiştir. Czarnecki'nin kaynak ve yükün lineer olmama durumuna yönelik akım ifadesi

$$I^2 = I_{\text{Aktif}}^2 + I_{\text{Re}}^2 + I_S^2 + I_H^2 \quad (4.32)$$

biçiminde oluşturulmuştur [26]. Bu ifadede akım bileşenleri;

reaktif akım;

$$I_{Re} = \sqrt{\sum_{n \in N} \beta_n^2 \cdot V_n^2} \quad (4.33)$$

kaydırılmış akım;

$$I_S = \sqrt{\sum_{n \in N} (G_n - G_e)^2 \cdot V_n^2} \quad (4.34)$$

üretile harmonik akımı;

$$I_H = \sqrt{\sum_{n \in k} I_n^2} \quad (4.35)$$

olarak tanımlanmıştır.

(4.34)'de yer alan eşdeğer admitans G_e ise;

$$G_e = \frac{P}{V^2} \quad (4.36)$$

biçiminde elde edilir. G_n ise harmonik numarasına bağlı olarak yükün admitans değeridir.

Czarnecki'nin güç tanımı

$$S^2 = P^2 + D_S^2 + Q_R^2 + D_H^2 \quad (4.37)$$

biçiminde oluşturulmuştur. Burada güç bileşenleri :

reaktif güç;

$$Q_R = V \cdot I_{Re} \quad (4.38)$$

kaydırılmış güç;

$$D_S = V \cdot I_S \quad (4.39)$$

üretile harmonik gücü;

$$D_H = V \cdot I_H \quad (4.40)$$

biçiminde tanımlanmıştır.

Bu güç tanımının en önemli avantajı kaynak akımındaki lineer olmama durumundan kaynaklanan artışı belirlemesidir.

4.4 Sonuç ve Özet

Tablo 4-1'de bu bölümde verilen güç tanımlarına ait bileşenler sınıflandırılmıştır.

Tablo 4-1 : Güç tanımlarına ait bileşenler

	Aktif güç	Reaktif güç	Görünür güç	Bozulma gücü
Budeanu	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_B = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n$	$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2$	$D_B \neq S_D = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_k^2 + \sum_1^n V_u^2 \cdot \left(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^n I_k^2 \right)}$
Fryze	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_F = V \cdot I_{\text{Reaktif}}$	$S^2 = P^2 + Q_F^2$	Q_F içerisinde tanımlanmıştır.
Shepherd ve Zand	$P \neq S_R = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_n}$	$Q_B \neq S_X = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n}$	$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2$	$S_D^2 = \sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_k^2 + \sum_1^n V_u^2 \cdot \left(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^n I_k^2 \right)$
Sharon	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_B \neq S_Q = V \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n$	$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2$	$S_C = \sqrt{S^2 - P^2 - S_Q^2}$
Kimbark	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_K = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$	$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D_K^2$	$D_K = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2}$
Czarnecki	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_B \neq Q_R = V \cdot I_{\text{Re}}$	$S^2 = P^2 + D_S^2 + Q_R^2 + D_H^2$	$D_S = V \cdot I_S, D_H = V \cdot I_H$

Literatürde **Tablo 4-1**'de belirtilen güç tanımlarının geçerliliklerinin incelenmesi ve karşılaştırılmalar sonucunda sinüzoidal olmayan şartlarda

- Budeanu reaktif gücünün basit bir kapasite ile kompanze edilebildiği fakat Fryze reaktif gücünün basit bir kapasite ile kompanze edilemediği
- Shepherd ve Czarnecki reaktif güçlerinin hat empedansı ihmal edildiği analizlerde temel harmonik reaktif gücüne eşit oldukları bulunmuştur. Bu sonuç ise Shepherd

ve Czarnecki reaktif güçlerinin sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumunda basit bir kapasite ile kompanze edilebildiğini

- Shepherd bozulma gücü ile Czarnecki üretilen harmonik gücünün sıfırdan farklı değerler alabileceği

görülmüştür.

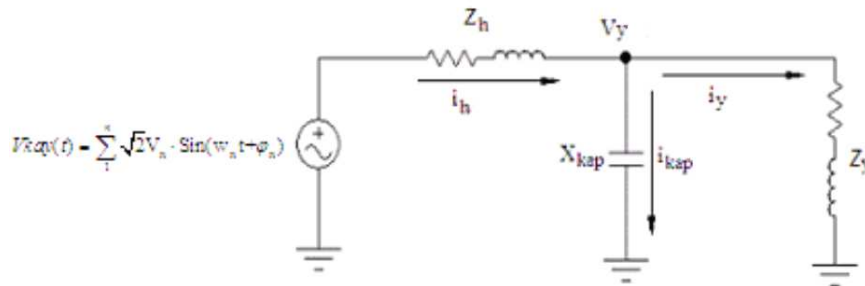
5 SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONU

Sinüzoidal olmayan şartlarda, tek fazlı sistemler için oluşturulan ve yaygın olarak bilinen güç ifadeleri üzerinde literatürde birçok inceleme yapılmıştır [29, 30, 31, 50, 51, 52, 53]. Yapılan analizler, genellikle hat empedansının ihmal edildiği, lineer olmayan basitleştirilmiş yük modellerinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Hat empedansının ihmal edilmesi, şebekenin arayüz noktalarında akım ve gerilim harmonik numaralarının farklı değerler alabilmesine yol açmaktadır. Ayrıca, lineer olmayan yük için basitleştirilmiş modeller kullanılması sonuçlarda hatalar meydana getirmektedir. Bu kısımda yapılan analizlerde triak kontrollü bir RL yükün bulunduğu hat empedansının ihmal edilmediği tek fazlı bir sistem için geçici hal analizi ile elde edilmiş analitik ifadeler kullanılmıştır. Böylece analizlerin daha gerçekçi model üzerinde gerçekleştirilmesi ve yapılan hataların azaltılması sağlanmıştır.

Sinüzoidal olmayan şartlardaki kompanzasyon analizini üç farklı kaynak ve yük karakteristiği için yapabiliriz. Bu yapılan analizin amacı incelenilen güç tanımlarının hangisinin kompanzasyon için en doğru bilgiyi verdiğini belirlemektir.

5.1 Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı Lineer Yük Durumu

Bu kaynak ve yük karakteristiğinde kullanılan devre **Şekil 5-1**'de verilmiştir.



Şekil 5-1 : Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı lineer yük durumu için kullanılan devre

Hat empedansı yük empedansına göre çok küçük değerde seçilmiştir. Kaynak geriliminin

$$V_{kay}(t) = \sum_1^n V_{m_n} \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (5.1)$$

olarak verilen **Şekil 5-1**'deki bu devrede fazör çözüm kullanılarak hat akımı, yük akımı ve yük geriliminin her bir harmonik için etkin değerleri ile faz açıları elde edilebilir. Buna göre hat akımı $ih(t)$, yük gerilimi $vy(t)$ ve yük akımı $iy(t)$ ifadeleri,

$$ih(t) = \sum_1^n \frac{V_{m_n} \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n)}{\left(\frac{(R_y + j\omega_n L_y) \cdot j \left(\frac{1}{\omega_n C} \right)}{R_h + j\omega_n L_h - \left(R_y + j \left(\omega_n L_y - \frac{1}{\omega_n C} \right) \right)} \right)} \quad (5.2)$$

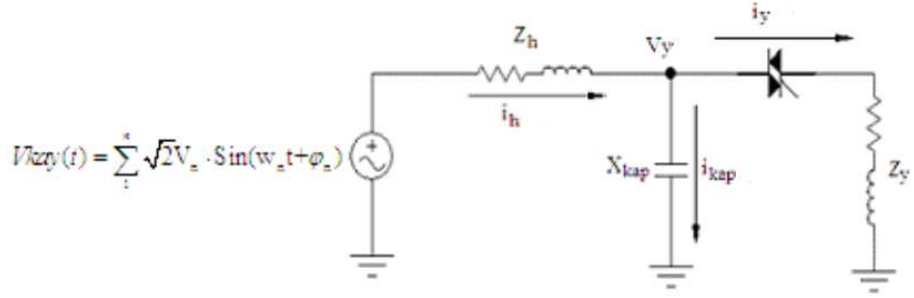
$$iy(t) = -j \frac{ih(t) \cdot \left(\frac{1}{\omega_n C} \right)}{\left(R_y + j \left(\omega_n L_y - \frac{1}{\omega_n C} \right) \right)} \quad (5.3)$$

$$vy(t) = iy(t) \cdot (R_y + j\omega_n L_y) \quad (5.4)$$

olarak elde edilir.

5.2 Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı Lineer Olmayan Yük Durumu

Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı, lineer olmayan yük modundaki çalışmada yük olarak triak üzerinden beslenen Z(L,R) yükü seçilmiştir. Model devre **Şekil 5-2**'de verilmiştir.



Şekil 5-2 : Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumu

Şekil 5-2’de verilen devredeki akım ile gerilim fonksiyonları triak kesimdeyken ve triak iletimdeyken olmak üzere iki durum için ayrı ayrı ifade edilebilir.

Triak kesimdeyken yük devreye dahil değildir dolayısı ile yük akımı sıfır değerindedir. Bu durum için fazör çözüm ile hat akımı ve yük gerilimine ait ifadeler;

$$i_h(t) = \sum_1^n \frac{Vm_n \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n)}{\left(R_h + j \left(\omega_n L_h - \frac{1}{\omega_n C} \right) \right)} \quad (5.5)$$

$$v_y(t) = -i_h(t) \cdot j \left(\frac{1}{\omega_n C} \right) \quad (5.6)$$

$$i_y(t) = 0 \quad (5.7)$$

Triakın iletimde olduğu zaman aralığında ise hat akımı $i_h(t)$, yük gerilimi $v_y(t)$ ve yük akımı $i_y(t)$ ’nin zamana bağlı fonksiyonları aşağıda elde edilmiştir. Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumu için Kirckhoff’un gerilim yasası uygulanır ise;

$$R_h \cdot i_h(t) + L_h \cdot \frac{di_h}{dt} + v_y(t) = V_{kay}(t) \quad (5.8)$$

$$R_y \cdot iy(t) + L_y \cdot \frac{diy}{dt} - vy(t) = 0 \quad (5.9)$$

$$ih(t) - iy(t) - C \cdot \frac{dvy}{dt} = 0 \quad (5.10)$$

$$Vkay(t) = \sum_1^n Vm_n \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (5.11)$$

elde edilir. (5.8) - (5.11) denklem sistemi çözülerek hat akımı, yük akımı ve yük gerilimi için (triak iletimdeyken) geçerli olan ifadeler;

$$ih(t) = \sum_1^n \left(A_n \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n) + B_n \cdot \cos(\omega_n t + \varphi_n) + c1_n e^{D_1 \cdot t} + c2_n \cdot e^{D_2 \cdot t} + c3_n \cdot e^{D_3 \cdot t} \right) \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} vy(t) = & \sum_1^n \left[(Vm_n - R_h \cdot A_n + L_h \cdot B_n \cdot \omega_n) \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n) + (-R_h \cdot B_n - L_h \cdot A_n \cdot \omega_n) \cdot \cos(\omega_n t + \varphi_n) \right] \\ & + \sum_1^n \left[-(R_h + L_h \cdot D_1) \cdot c1_n \cdot e^{D_1 \cdot t} - (R_h + L_h \cdot D_2) \cdot c2_n \cdot e^{D_2 \cdot t} - (R_h + L_h \cdot D_3) \cdot c3_n \cdot e^{D_3 \cdot t} \right] \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} iy(t) = & \sum_1^n (A_n \cdot C \cdot R_h \cdot B_n \cdot \omega_n - C \cdot L_h \cdot A_n \cdot \omega_n^2) \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n) + \\ & + \sum_1^n (B_n \cdot Vm_n \cdot C \cdot \omega_n + R_h \cdot A_n \cdot C \cdot \omega_n - L_h \cdot B_n \cdot C \cdot \omega_n^2) \cdot \cos(\omega_n t + \varphi_n) + \\ & + \sum_1^n \left[(1 + R_h \cdot C \cdot D_1 + L_h \cdot C \cdot D_1^2) \cdot c1_n \cdot e^{D_1 \cdot t} + (1 + R_h \cdot C \cdot D_2 + L_h \cdot C \cdot D_2^2) \cdot c2_n \cdot e^{D_2 \cdot t} + (1 + R_h \cdot C \cdot D_3 + L_h \cdot C \cdot D_3^2) \cdot c3_n \cdot e^{D_3 \cdot t} \right] \end{aligned} \quad (5.14)$$

eşitlikleri ile verilebilir. Elde edilen ifadelerdeki gerilim kaynağının n. harmoniği için A_n ve B_n katsayıları;

$$A_n = \frac{\begin{vmatrix} \Delta_{1,n} & \Delta_{5,n} \\ \Delta_{2,n} & \Delta_{6,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \Delta_{3,n} & \Delta_{5,n} \\ \Delta_{4,n} & \Delta_{6,n} \end{vmatrix}} \quad (5.15)$$

$$B_n = \frac{\begin{vmatrix} \Delta_{3,n} & \Delta_{1,n} \\ \Delta_{4,n} & \Delta_{2,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \Delta_{3,n} & \Delta_{5,n} \\ \Delta_{4,n} & \Delta_{6,n} \end{vmatrix}} \quad (5.16)$$

$$\Delta_{1,n} = L_y \cdot C \cdot Vm_n \cdot \omega_n^2 - Vm_n \quad (5.17)$$

$$\Delta_{2,n} = -R_y \cdot C \cdot Vm_n \cdot \omega_n \quad (5.18)$$

$$\Delta_{3,n} = (R_h \cdot L_y \cdot C + R_y \cdot L_h \cdot C) \cdot \omega_n^2 - R_y - R_h \quad (5.19)$$

$$\Delta_{4,n} = L_y \cdot L_h \cdot C \cdot \omega_n^3 - (R_y \cdot R_h \cdot C + L_h + L_y) \cdot \omega_n \quad (5.20)$$

$$\Delta_{5,n} = -L_y \cdot L_h \cdot C \cdot \omega_n^3 + (R_y \cdot R_h \cdot C + L_h + L_y) \cdot \omega_n \quad (5.21)$$

$$\Delta_{6,n} = (R_h \cdot L_y \cdot C + R_y \cdot L_h \cdot C) \cdot \omega_n^2 - R_y - R_h \quad (5.22)$$

olur.

Gerilim kaynağının n.harmoniğinden dolayı meydana gelen $c1_n$, $c2_n$ ve $c3_n$ geçici hal katsayıları ise;

$$c1_n = \frac{\begin{vmatrix} \varepsilon_{1,n} & \delta_{2,n} & \delta_{3,n} \\ \varepsilon_{2,n} & \lambda_{2,n} & \lambda_{3,n} \\ \varepsilon_{3,n} & \gamma_{2,n} & \gamma_{3,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \delta_{1,n} & \delta_{2,n} & \delta_{3,n} \\ \lambda_{1,n} & \lambda_{2,n} & \lambda_{3,n} \\ \gamma_{1,n} & \gamma_{2,n} & \gamma_{3,n} \end{vmatrix}} \quad (5.23)$$

$$c2_n = \frac{\begin{vmatrix} \delta_{1,n} & \varepsilon_{1,n} & \delta_{3,n} \\ \lambda_{1,n} & \varepsilon_{2,n} & \lambda_{3,n} \\ \gamma_{1,n} & \varepsilon_{3,n} & \gamma_{3,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \delta_{1,n} & \delta_{2,n} & \delta_{3,n} \\ \lambda_{1,n} & \lambda_{2,n} & \lambda_{3,n} \\ \gamma_{1,n} & \gamma_{2,n} & \gamma_{3,n} \end{vmatrix}} \quad (5.24)$$

$$c3_n = \frac{\begin{vmatrix} \delta_{1,n} & \delta_{2,n} & \varepsilon_{1,n} \\ \lambda_{1,n} & \lambda_{2,n} & \varepsilon_{2,n} \\ \gamma_{1,n} & \gamma_{2,n} & \varepsilon_{3,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \delta_{1,n} & \delta_{2,n} & \delta_{3,n} \\ \lambda_{1,n} & \lambda_{2,n} & \lambda_{3,n} \\ \gamma_{1,n} & \gamma_{2,n} & \gamma_{3,n} \end{vmatrix}} \quad (5.25)$$

$$\varepsilon_{1,n} = ih_n - A_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t_b + \varphi_n) - B_n \cdot \cos(\omega_n \cdot t_b + \varphi_n) \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2,n} = & v y_n - (V m_n - R_h \cdot A_n + L_h \cdot B_n \cdot \omega_n) \cdot \sin(\omega_n \cdot t_b + \varphi_n) - \\ & - (-R_h \cdot B_n - L_h \cdot A_n \cdot \omega_n) \cdot \cos(\omega_n \cdot t_b + \varphi_n) \end{aligned} \quad (5.27)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{3,n} = & -(A_n - \omega_n \cdot C \cdot (R_h \cdot B_n + L_h \cdot A_n \cdot \omega_n)) \cdot \sin(\omega_n \cdot t_b + \varphi_n) - \\ & - (B_n - C \cdot \omega_n \cdot (V m_n - R_h \cdot A_n + L_h \cdot B_n \cdot \omega_n)) \cdot \cos(\omega_n \cdot t_b + \varphi_n) \end{aligned} \quad (5.28)$$

$$\delta_{1,n} = e^{D_1 \cdot t_b} \quad (5.29)$$

$$\delta_{2,n} = e^{D_2 \cdot t_b} \quad (5.30)$$

$$\delta_{3,n} = e^{D_3 \cdot t_b} \quad (5.31)$$

$$\lambda_{1,n} = (-R_h - L_h \cdot D_1) \cdot e^{D_1 \cdot t_b} \quad (5.32)$$

$$\lambda_{2,n} = (-R_h - L_h \cdot D_2) \cdot e^{D_2 \cdot t_b} \quad (5.33)$$

$$\lambda_{3,n} = (-R_h - L_h \cdot D_3) \cdot e^{D_3 \cdot t_b} \quad (5.34)$$

$$\gamma_{1,n} = (1 + R_h \cdot C \cdot D_1 + L_h \cdot C \cdot D_1^2) \cdot e^{D_1 \cdot t_b} \quad (5.35)$$

$$\gamma_{2,n} = (1 + R_h \cdot C \cdot D_2 + L_h \cdot C \cdot D_2^2) \cdot e^{D_2 \cdot t_b} \quad (5.36)$$

$$\gamma_{3,n} = (1 + R_h \cdot C \cdot D_3 + L_h \cdot C \cdot D_3^2) \cdot e^{D_3 \cdot t_b} \quad (5.37)$$

biçiminde ifade edilebilir. Bu denklemlerde vy_n ve ih_n gerilim kaynağının n numaralı harmoniği için triakın tetiklendiği t_b anındaki yük gerilimi ve hat akımının başlangıç değerleridir. t_b anı ilk alternans için t_i , ikinci alternans için $t_i + T_f/2$ dir. Bu başlangıç değerleri

$$ih_n = \frac{Vm_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t_b + \varphi_n - \phi_n)}{\left| R_h + j \left(\omega_n L_h - \frac{1}{\omega_n C} \right) \right|} \quad (5.38)$$

$$vy_n = -ih_n \cdot j \frac{1}{\omega_n C} \quad (5.39)$$

$$\phi_n = \arctan \left(\frac{\left(\omega_n L_h - \frac{1}{\omega_n C} \right)}{R_h} \right) \quad (5.40)$$

Triakın kesime gittiği zaman olan t_k anında ise denklem (5.14);

$$iy(t_k) = 0 \quad (5.41)$$

için, $t_i < t_k < (t_i + T_f/2)$ aralığında çözülerek bulunur. $iy(t)$ akımının, $t_i < t_k < (t_i + T_f/2)$ aralığında t_k nın ilk alternanstan sonra sıfıra gittiği anı veren bir tane çözümü vardır. İfadelerdeki D_1 , D_2 ve D_3 değerleri (5.8)-(5.11) diferansiyel denklem sisteminin karakteristik denkleminin;

$$D^3 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} D^2 + \frac{\alpha_3}{\alpha_1} D + \frac{\alpha_4}{\alpha_1} = 0 \quad (5.42)$$

$$\alpha_1 = L_y L_h C \quad (5.43)$$

$$\alpha_2 = R_y L_h C + R_h L_y C \quad (5.44)$$

$$\alpha_3 = R_y R_h C + L_h + L_y \quad (5.45)$$

$$\alpha_4 = R_h + R_y \quad (5.46)$$

$$D_1 = \frac{\beta}{6\alpha_1} - \frac{6\alpha_1\alpha_3 - 2\alpha_2^2}{3\alpha_1\beta} - \frac{\alpha_2}{3\alpha_1} \quad (5.47)$$

$$D_2 = -\frac{\beta}{12\alpha_1} + \frac{3\alpha_1\alpha_3 - \alpha_2^2}{3\alpha_1\beta} - \frac{\alpha_2}{3\alpha_1} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\beta}{6\alpha_1} + \frac{6\alpha_1\alpha_3 - 2\alpha_2^2}{3\alpha_1\beta} \right) \quad (5.48)$$

$$D_3 = -\frac{\beta}{12\alpha_1} + \frac{3\alpha_1\alpha_3 - \alpha_2^2}{3\alpha_1\beta} - \frac{\alpha_2}{3\alpha_1} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\beta}{6\alpha_1} + \frac{6\alpha_1\alpha_3 - 2\alpha_2^2}{3\alpha_1\beta} \right) \quad (5.49)$$

$$\beta = \sqrt[3]{36\alpha_1\alpha_2\alpha_3 - 108\alpha_1^2\alpha_4 - 8\alpha_2^3 + 12\alpha_1\sqrt{12\alpha_1\alpha_3^3 - 3\alpha_2^2\alpha_3^2 - 54\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4 + 81\alpha_1^2\alpha_4^2 + 12\alpha_2^3\alpha_4}} \quad (5.50)$$

biçiminde elde edilmiştir.

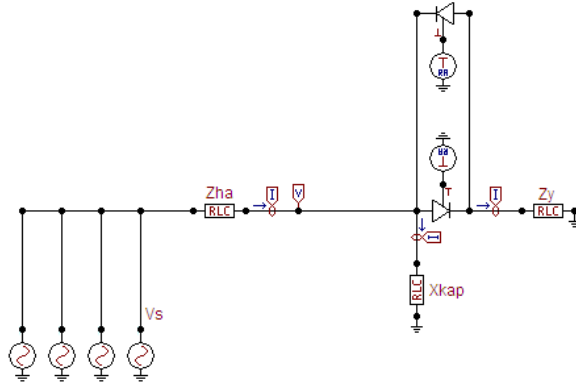
Tablo 5-1’de bir periyot boyunca zaman aralıkları için triakın durumu ve o aralık için kullanılan çözüm yöntemleri belirtilmiştir.

Tablo 5-1 : Bir periyot boyunca triakın durumu ve o aralık için çözüm yöntemi

Zaman Aralığı	Triak Durumu	Çözüm
$0 \leq t < t_i$	Kesimde	Fazör
$t_i \leq t < t_k$	İletimde	Diferansiyel Durum Denklemleri
$t_k \leq t < (t_i + T_f / 2)$	Kesimde	Fazör
$(t_i + T_f / 2) \leq t < T_f$	İletimde	Diferansiyel Durum Denklemleri

Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumunda verilen ifadelerde $n=1$ alınırsa sinüzoidal gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumu için akım ve gerilim ifadeleri elde edilir.

EMTP kullanılarak elde edilmiş gerilim ve akım değerleri, analitik metod ile elde edilen gerilim ve akım değerlerinin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için, **Şekil 5-2**’deki devrenin EMTP [34] de oluşturulmuş modeli **Şekil 5-3**’de verilmiştir.



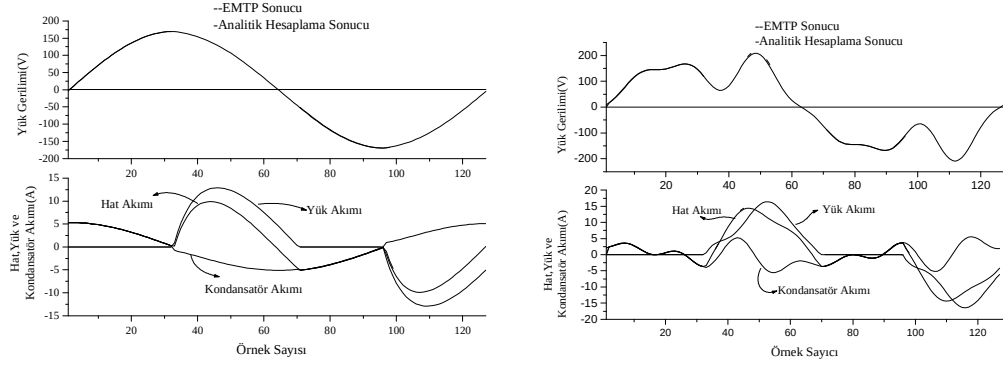
Şekil 5-3 : Şekil 5-2’deki devrenin EMTP’de oluşturulmuş modeli

Şekil 5-3’de sinüzoidal olmayan gerilim modellenirken 1.,3.,5. ve 7.harmoniklerin frekanslarına sahip sinüzoidal gerilim kaynakları paralel olarak bağlanmıştır. Gerilim kaynağının sinüzoidal olmayan şartlar için harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulması **Tablo 5-1**’de verilmiştir. Hat empedansı (Z_h)’nın omik direnci (R_h) $0,5\Omega$ endüktansı (L_h) ise $10\mu H$ dir. Yük empedansı (Z_y)’nin omik direnci (R_y) 10Ω endüktansı (L_y) ise $10mH$ ’dir.

Tablo 5-2 : Gerilim kaynağının sinüzoidal olmayan şartlar için harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulması

Harmonik Numarası	Etkin Değeri (Volt)	Açısı (Derece)
1	120	0
3	40	0
5	24	120
7	120/7	240
% THD	41	

Şekil 5-4 (a)’da sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük, Şekil 5-4 (b)’de ise sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumu için analitik ifadenin ve EMTP’deki modelin 90° - 270° tetikleme açılarında elde edilen değerler mukayeseli olarak verilmiştir.



Şekil 5-4 : EMTP sonuçları ile analitik hesaplama sonucunun karşılaştırılması

Bu çözüm triakın bir alternanstaki kesime girme açısının diğer alternansta iletme girme açısından küçük olduğu durumları sağlayan yükün L_y / R_y oranları için geçerlidir. EMTP sonucu ile analitik hesaplama sonucu birbirine çok yakın değerlerdedir. Diğer taraftan iki çözümün birbirine ne kadar yakın olduğunu ortaya koymak amacıyla Toplam RMS hatası

$$RMS_{Hata} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^N (Analitik_s - EMTP_s)^2}{N}} \quad (5.51)$$

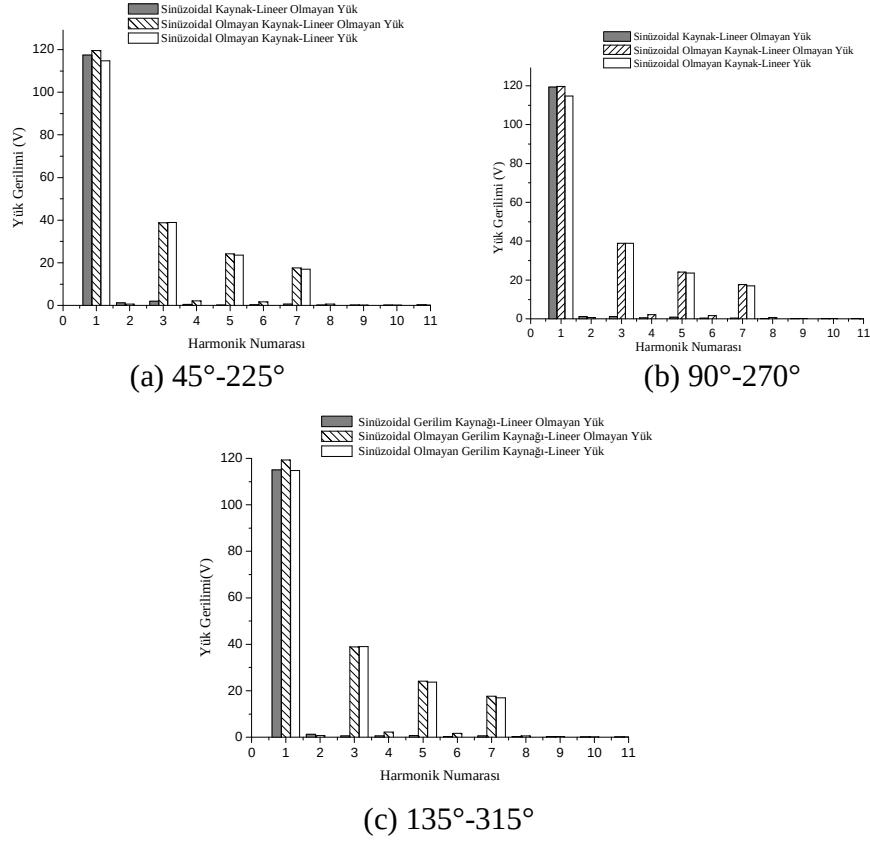
ifadesinden hesaplanır. Sinüzoidal gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumunda 90° - 270° tetikleme açıları için Toplam RMS hata değerleri sırasıyla; yük gerilimi 1.37, hat akımı 0.15, yük akımı 0.15 ve kondansatör akımı 0.05' dir. Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumunda 90° - 270° tetikleme açıları için Toplam RMS hata değerleri ise sırasıyla; yük gerilimi 4.5, hat akımı 0.33, yük akımı 0.35 ve kondansatör akımı 0.16' dir.

5.3 Kompanzasyon Kapasitesinin Değişiminin Güç Tanımlarına Etkisi

Kompanzasyon kapasitesinin değişiminin güç tanımlarına etkisinin analiz edildiği devrede yük parametreleri $R_y = 10 \Omega$ ve $L_y = 10 \text{ mH}$, hat parametreleri ise $R_h = 0.5 \Omega$ ve $L_h = 10 \mu\text{H}$ olarak belirlenmiştir. Analizler sırasında yükü kontrol eden triakın tetikleme

açıları 45° - 225° , 90° - 270° ve 135° - 315° değerlerinde seçilerek farklı çalışma koşullarının da dikkate alınmıştır. Bu analizler sırasında elde edilen yük gerilimi, yük akımı ve hat akımına ait ani değerlerin FFT leri alınarak incelenilen güç tanımlarına ait bileşenler ve güç faktörü hesaplanmıştır. Böylece reaktif güç kompanzasyonu sırasında farklı yük ve gerilim kaynağı karakteristikleri için güç tanımlarının nasıl bir sonuç verdiği, grafikler doğrultusunda incelenmiştir. Yapılan analizin amacı incelenilen güç tanımlarının hangisinin kompanzasyon için en doğru bilgiyi verdiğini belirlemektir. Bu çalışma, gerilim kaynağı ve yük karakteristikleri sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı-lineer yük, sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı-lineer olmayan yük ve sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumlarıdır. Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağının sahip olduğu harmonikler ve % THD **Tablo 5-2'**de verilmiştir.

Kompanzasyon kapasitesinin (C) $1\mu F$ 'dan $200\mu F$ 'a kadar artırılması ile güç faktörünün maksimum olduğu durum belirlenmiştir. Yük geriliminin harmonik spektrumu güç faktörünün azami olduğu kapasite değerinde, üç farklı gerilim kaynağı ve yük karakteristiği için **Şekil 5-5'**de verilmiştir. Triak tetikleme açısı **Şekil 5-5 (a)**'da 45° - 225° , **Şekil 5-5 (b)**'de 90° - 270° ve **Şekil 5-5 (c)**'de 135° - 315° olarak seçilmiştir.

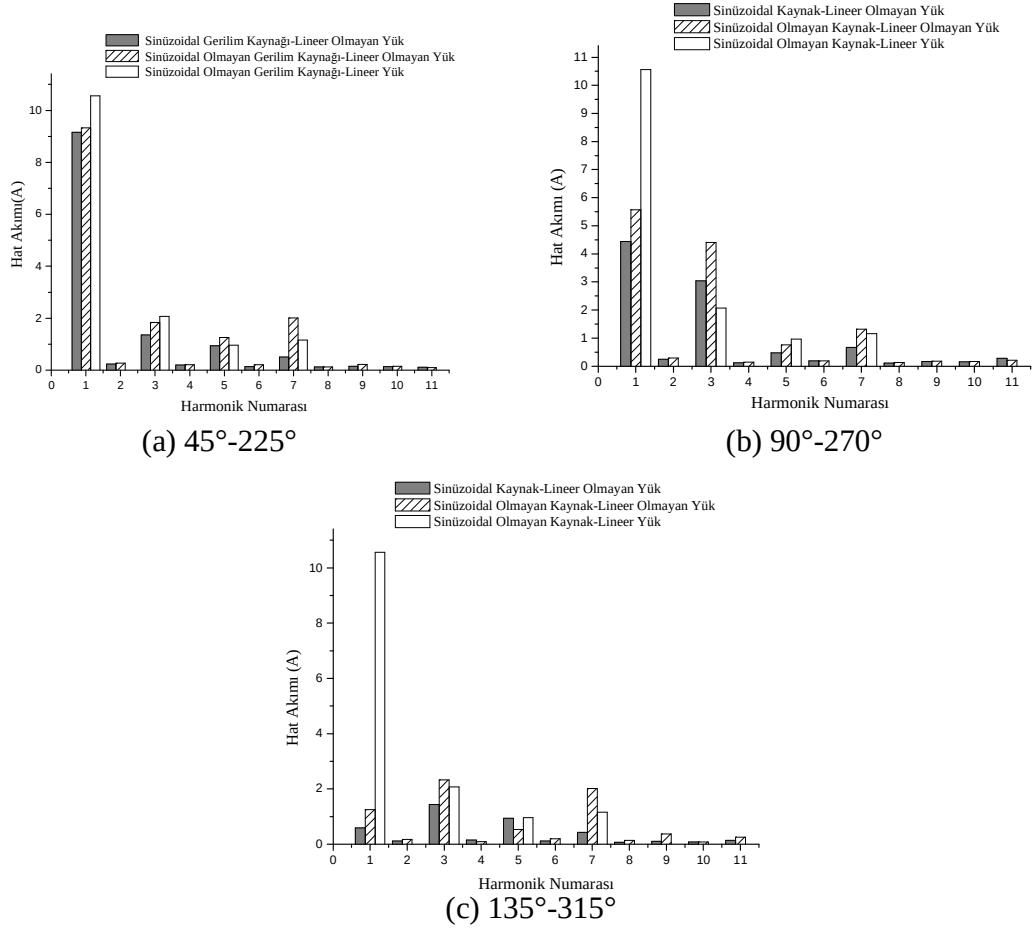


Şekil 5-5 : Yük geriliminin güç faktörünün azami olduğu andaki harmonik spektrumu

Şekil 5-5'deki her üç grafik için :

Sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumundaki harmonik gerilimleri, diğer iki gerilim kaynağı yük karakteristiği durumundaki harmonik gerilimlerine göre çok küçüktür.

Hat akımının harmonik spektrumu, güç faktörünün azami olduğu kapasite değerinde üç farklı gerilim kaynağı ve yük karakteristiği için Şekil 5-6'da verilmiştir. Triak tetikleme açısı Şekil 5-6 (a)'da 45°-225°, Şekil 5-6 (b)'de 90°-270° ve Şekil 5-6 (c)'de 135°-315° olarak seçilmiştir.



Şekil 5-6 : Hat akımının güç faktörünün azami olduğu andaki harmonik spektrumu

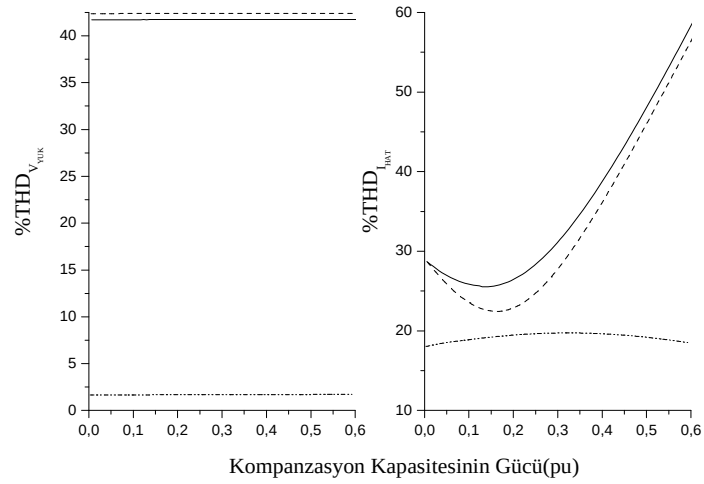
Şekil 5-6'daki her üç grafik için :

Tetikleme açısı arttıkça (akım değeri azaldığı için) akımın temel dalga bileşeninin büyüklüğü harmonik bileşenlerinin büyüklüğüne göre küçülmektedir.

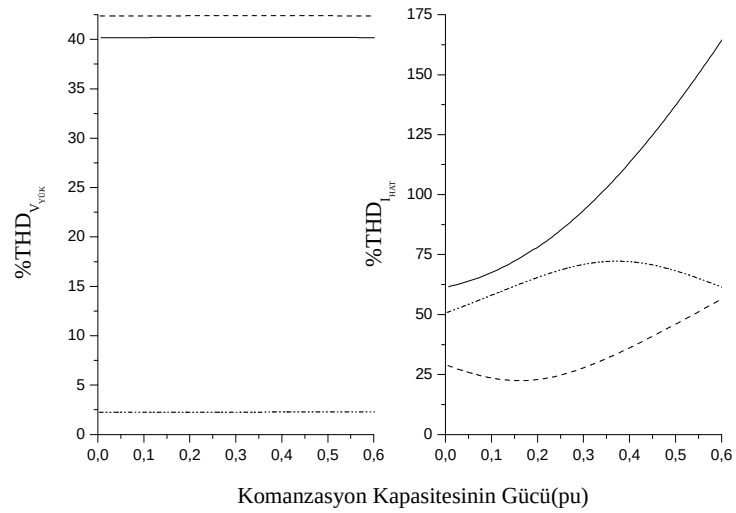
Yük gerilimi ve hat akımının toplam harmonik bozulmasının kompanzasyon kapasitesinin gücüne bağlı değişimleri üç farklı gerilim kaynağı ve yük karakteristiği için Şekil 5-7'de verilmiştir. Kapasitenin gücü ise görünür güç olarak hesaplanmıştır. Triak tetikleme açısı Şekil 5-7 (a)'da 45°-225°, Şekil 5-7 (b)'de 90°-270° ve Şekil 5-7 (c)'de 135°-315° olarak seçilmiştir.

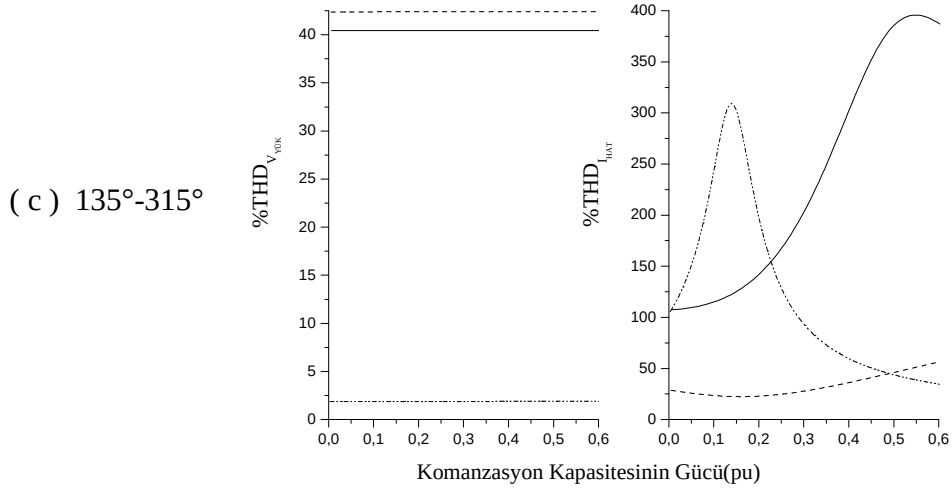
..Sinüzoidal Gerilim Kaynağı-Lineer Olmayan Yük
 - Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı-Lineer Olmayan Yük
 -- Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı-Lineer Yük

(a) 45° - 225°



(b) 90° - 270°





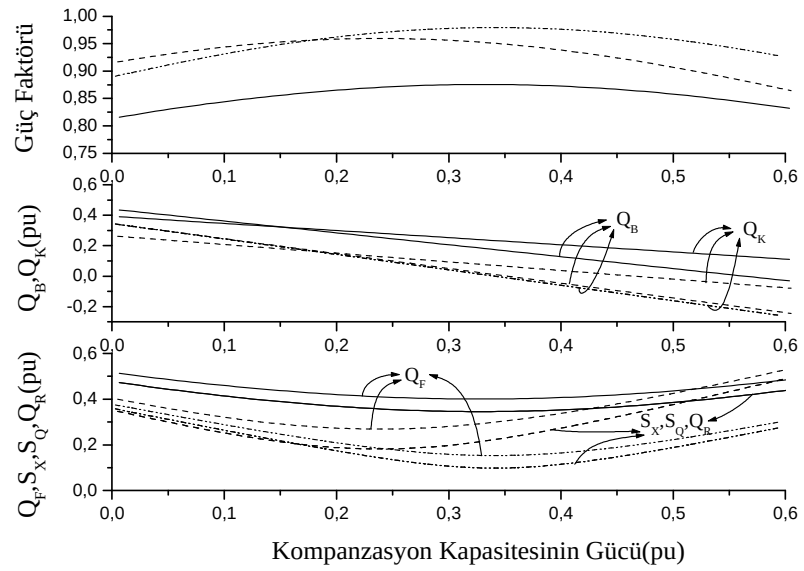
Şekil 5-7 : Yük gerilimi ve hat akımının toplam harmonik bozulmasının kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri

Şekil 5-7’deki her üç grafik için :

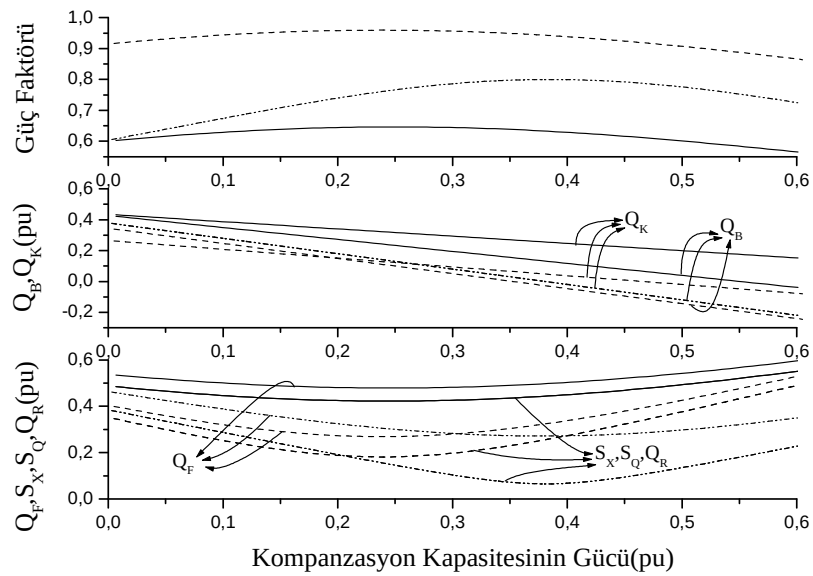
Güç faktörünün azami olduğu anda yük geriliminin ve hat akımının toplam harmonik bozulmaları sıfır olmamaktadır. Ayrıca sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı – lineer olmayan yük durumunda yük geriliminin toplam harmonik bozulması triakın tetikleme açısının artışı ile çok fazla değişmiyor. Tetikleme açısının büyümesi ile artan hat akımı harmoniklerinin oluşturduğu yük gerilimindeki bozulmanın kaynak geriliminin harmonik bileşenlerinin oluşturduğu yük gerilimindeki bozulmanın yanında çok küçük olmasıdır. Tetikleme açısı büyüdükçe hat akımının toplam harmonik bozulması da artmaktadır.

Budeanu, Kimbark, Fryze, Shepherd ve Zand, Sharon ve Czarnecki reaktif güçleri ile güç faktörünün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri üç farklı gerilim kaynağı ve yük karakteristiği için Şekil 5-8’de verilmiştir. Triak tetikleme açısı Şekil 5-8 (a)’da 45°-225°, Şekil 5-8 (b)’de 90°-270° ve Şekil 5-8 (c)’de 135°-315° olarak seçilmiştir.

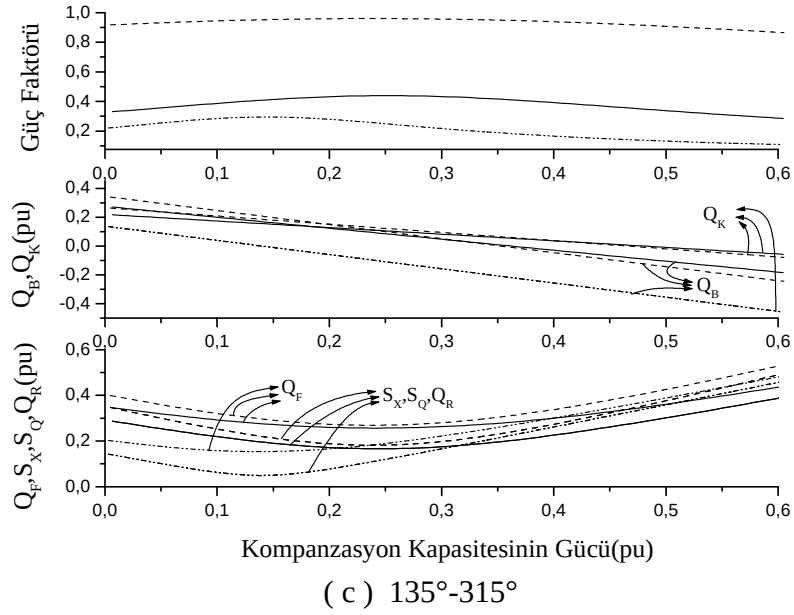
- ..Sinüzoidal Gerilim Kaynağı-Lineer Olmayan Yük
- Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı-Lineer Olmayan Yük
- Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı-Lineer Yük



(a) 45°-225°



(b) 90°-270°



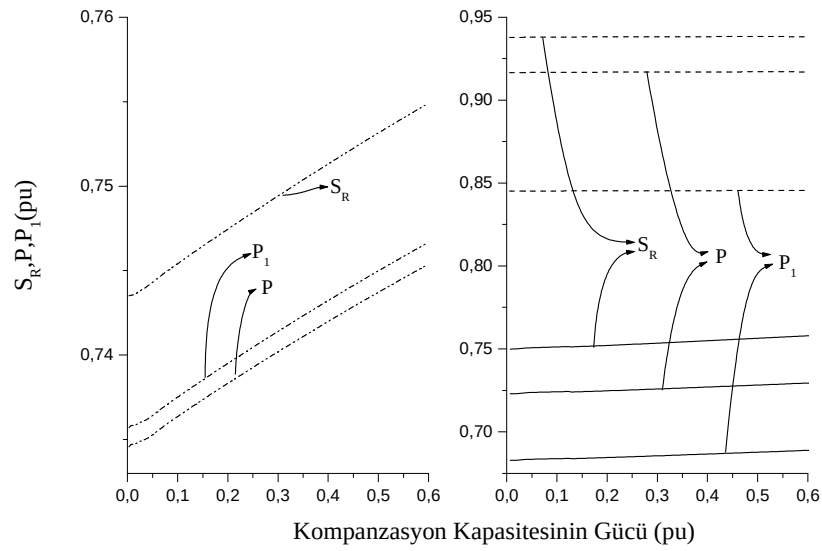
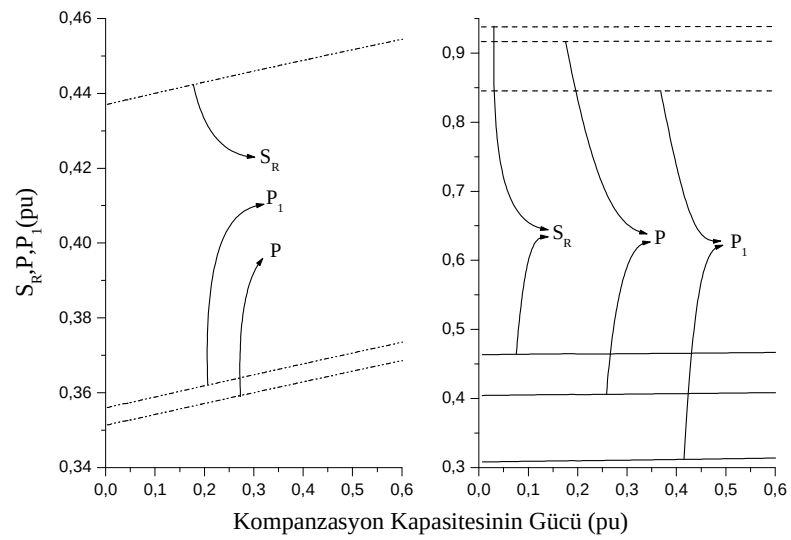
Şekil 5-8 : Budeanu, Kimbark, Fryze, Shepherd ve Zand, Sharon ve Czarnecki reaktif güçleri ile güç faktörünün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri

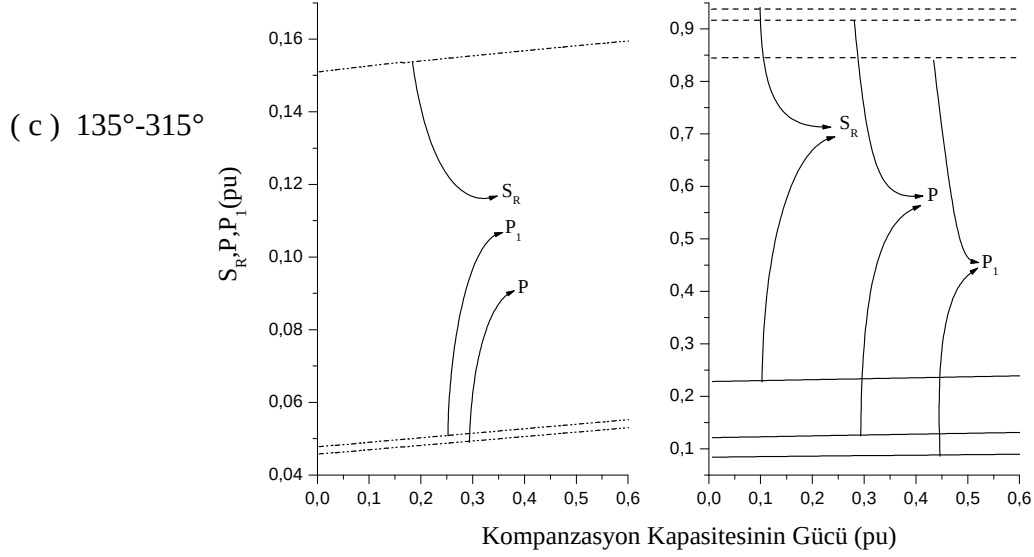
Şekil.5.8.'deki her üç grafik için :

S_X , S_Q ve Q_R reaktif güçleri her kapasite gücü için aynı değerleri almaktadır. Q_F , S_X , S_Q ve Q_R reaktif güçleri tamamen kompanse edilememektedirler. Bununla birlikte bu reaktif güçler üç farklı gerilim kaynağı yük karakteristiği için güç faktörü azami iken en küçük değerde olmaktadır. Q_B ve Q_K ise üç farklı gerilim kaynağı yük karakteristiği durumunda da tamamen kompanse edilebilmektedirler fakat sadece sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumunda güç faktörü azamiyken sıfır olmaktadır.

Shepherd ve Zand güç tanımının aktif güç bileşeni ile ortalama gücün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri üç farklı gerilim kaynağı ve yük karakteristiği için **Şekil 5-9**'da verilmiştir. Triak tetikleme açısı **Şekil 5-9 (a)**'da 45°-225°, **Şekil 5-9 (b)**'de 90°-270° ve **Şekil 5-9 (c)**'de 135°-315° olarak seçilmiştir.

-- Sinüzoidal Gerilim Kaynağı-Lineer Olmayan Yük
 - Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı-Lineer Olmayan Yük
 -- Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı-Lineer Yük

(a) 45° - 225° (b) 90° - 270° 



Şekil 5-9 : Shepherd ve Zand güç tanımının aktif güç bileşeni ile ortalama gücün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri

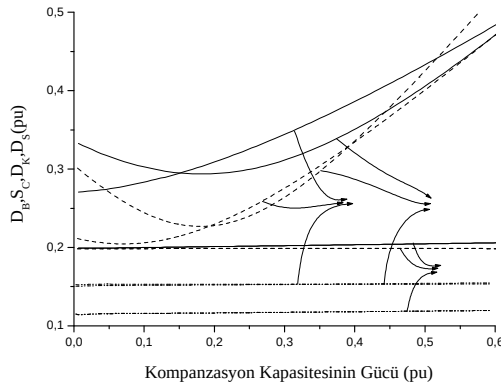
Şekil 5-9'daki her üç grafik için :

Sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumunda temel harmonik aktif gücü (P_1)' in ortalama güç (P)'den büyük olduğu görülmüştür. Fakat üç farklı gerilim kaynağı ve yük karakteristiği durumlarında da Shepherd ve Zand aktif görünür gücü (S_R) temel harmonik aktif gücü (P_1)'den büyüktür. Bu durum harmoniklerin hattın yüklenme şartları hakkında Shepherd ve Zand aktif görünür gücünün doğru bilgi sağladığını gösteren bir sonuçtur.

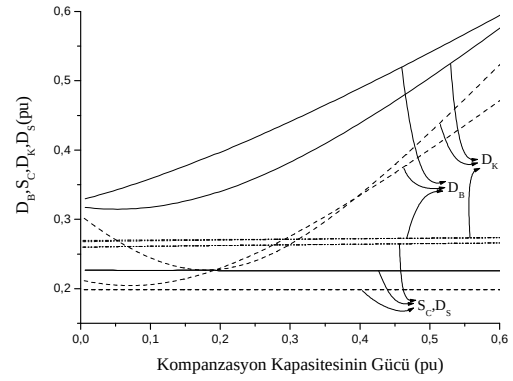
Yapılan analizler sırasında bütün gerilim kaynağı ve yük karakteristiklerinde Shepherd ve Zand bozulma gücü (S_D) ve Czarnecki üretilen harmonik gücü (D_H) değerlerinin sıfır olduğu görülmüştür. Bunun sebebi yük gerilimi ve hat akımının farklı harmonik numaralarına sahip olmamalarıdır.

Budeanu ve Kimbark bozulma güçleri, Sharon tamamlayıcı görünür gücü ve Czarnecki kaydırılmış gücünün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri üç farklı gerilim kaynağı ve yük karakteristiği için **Şekil 5-10**'da verilmiştir. Triak tetikleme açısı **Şekil 5-10** (a)'da 45° - 225° , **Şekil 5-10** (b)'de 90° - 270° ve **Şekil 5-10** (c)'de 135° - 315° olarak seçilmiştir.

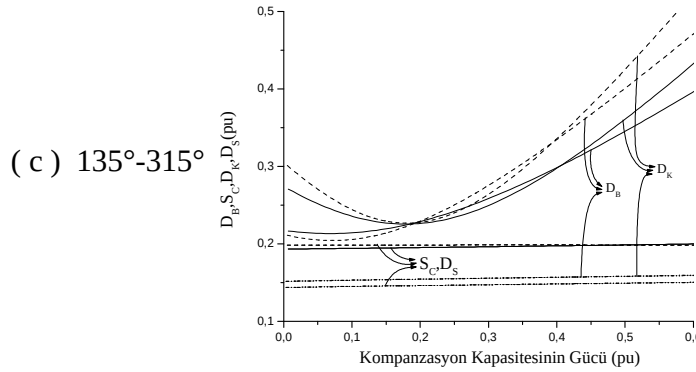
- ..Sinüzoidal Gerilim Kaynağı-Lineer Olmayan Yük
- Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı-Lineer Olmayan Yük
- Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı-Lineer Yük



(a) 45° - 225°



(b) 90° - 270°



(c) 135° - 315°

Şekil 5-10 : Budeanu ve Kimbark bozulma güçleri, Sharon tamamlayıcı görünür gücü ve Czarnecki kaydırılmış gücünün kompanzasyon kapasitesine bağlı değişimleri

Şekil 5-10'daki her üç grafik için :

Budeanu bozulma gücü (D_B) ve Kimbark bozulma gücü (D_K) kompanzasyon kapasitesinin değişimi sırasında asgari değerlere inmişlerdir. Bu durum Budeanu bozulma ve Kimbark bozulma güçlerinin hala basit bir kapasite ile kompanse edilebilen bileşenler

içerdiğini göstermektedir. Sharon tamamlayıcı görünür gücü (S_C) ve Czarnecki kaydırılmış gücü (D_S) aynı değerlerdedirler.

5.4 Sonuç

Literatürdeki sinüzoidal olmayan şartlar için oluşturulmuş güç tanımlarının geçerliliğinin incelenmesi ve birbirleriyle karşılaştırılmaları konulu çalışmalarda lineer olmayan yüklerin akım, gerilim karakteristiklerinden elde edilen modeller kullanılmış ve bu çalışmaların çoğunda ise hat empedansı yok kabul edilmiştir. Bu bölümde yapılan analizlerde sinüzoidal olmayan şartlar için oluşturulmuş güç tanımlarının reaktif güç kompanzasyonu yönünden karşılaştırılmaları gerçekçi sonuçlar veren analitik bir ifadeyle ve hat empedansı ihmal edilmeden yapılmıştır.

İncelenilen güç tanımlarının üç farklı gerilim kaynağı ve yük durumu için analizi doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir :

- Fryze, Shepherd ve Zand, Sharon ve Czarnecki güç tanımları kaynak verimi yönünden doğru bilgi vermektedirler.
- Shepherd ve Zand güç tanımının aktif ve reaktif bileşenleri hattın yüklenme şartları hakkında anlamlı bilgi vermektedir.
- Sinüzoidal gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumunda Shepherd ve Zand reaktif güç tanımının temel harmonik reaktif gücüne eşit olduğu ve tamamen kompanze edilebileceği literatürde belirtilmiştir. Bu durum ise literatürdeki çalışma sırasında hat empedansının ihmal edilmesinden ve harmonik gerilimi bileşenine sahip olmayan sabit akım kaynağı yük modeli kullanılmasından kaynaklanan bir sonuçtur. Literatürdeki bu sonuçların aksine Fryze, Shepherd ve Zand, Sharon ve Czarnecki reaktif güçleri basit bir kapasite ile tamamen kompanze edilemezler.

- Optimum kompanzasyon kapasitesi değeri hiç bir güç tanımı ile kolayca belirlenemez.
- Diğer taraftan Fryze, Shepherd ve Zand, Sharon ve Czarnecki reaktif güçlerinin analitik ifadesinin kompanzasyon kapasitesinin sığasına göre türevleri alınıp sıfıra eşitlenirse hangi sığa değerinde güç faktörünün azami olduğu bulunabilir.
- Analizler sırasında gerilim ve akımın arasındaki farklı harmoniklerin çarpımından oluştuğu belirtilerek tanımlanan güç bileşenlerinden Czarnecki üretilen harmonik gücü ile Shepherd ve Zand bozulma gücünün her gerilim kaynağı yük karakteristiği için sıfır olduğu görülmüştür.
- Kimbark bozulma gücünün kapasitesinin değişimi sırasında azalmaya başladığı görülmüştür. Bu durumun; Kimbark bozulma gücünün kompanze edilebilen aynı harmonik gerilim ve akım bileşenlerine ait reaktif güçleri içermesinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Budeanu bozulma gücü ise kapasitenin değişimiyle azalma göstermemiştir.

6 HARMONİK ÜRETEN YÜK MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

6.1 Giriş

Harmonik modellerine :

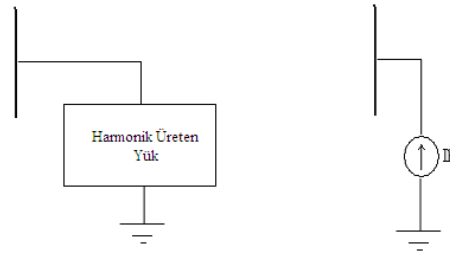
- harmonik üreten yüklerin lineer yüklere ve güç sistemlerine etkisini tahmin etmek,
- rezonans frekansındaki akım ve gerilim değerlerini hesaplamak,
- güç sistemindeki elemanlara ait harmonik indislerini hesaplamak,
- güç akışı hesaplamalarında kullanılmak,
- reaktif güç kompanzasyonu kapasitesi ve harmonik filtrelerinin büyüklüklerinin belirlemek

gibi işlemleri yapmak için ihtiyaç duyulurlar [54, 55, 56]. 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.

6.2 Harmonik Üreten Yük Modellerinin Tanıtılması

Literatürdeki iki farklı genelleştirilmiş harmonik üreten yük modeli vardır. Bu modeller sabit akım kaynağı ve Norton modelleridir [27, 32-33].

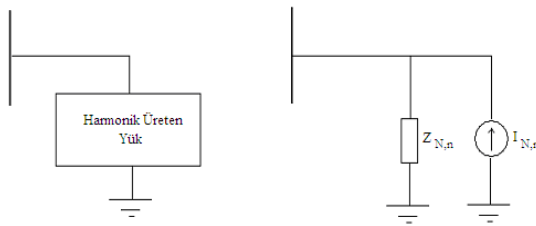
Harmonik üreten yükler, ilk olarak sabit akım kaynağı olarak modellendiler. Sabit akım kaynağı modeli Şekil 6-1’de verilmiştir.



Şekil 6-1 : Sabit Akım kaynağı modeli

Sabit akım kaynağı modelinde n.harmonik akımı n.harmonikte sabit akım kaynağı olarak düşünülür. Modelin n.harmonikte gerilim bileşeni yoktur.

Norton modeli n.harmonikte Norton akım kaynağı ile bu akım kaynağına paralel n.harmonikte Norton eşdeğer empedansına sahiptir. Norton modelinin eşdeğer devresi ise **Şekil 6-2**'de verilmiştir [32, 33].



Şekil 6-2 : Norton modeli

Norton modeli **Şekil 5-2**'deki devrenin hat empedansının ve/veya kompanzasyon kapasitesinin farklı parametrelerine ait akım ve gerilim değerleri kullanılarak;

$$Z_{N,n} = \frac{v_{y1,n} - v_{y2,n}}{i_{y2,n} - i_{y1,n}} \quad (6.1)$$

$$i_{N,n} = \left[i_{h1,n} - \frac{V_{kay,n}}{\left(Z_{h1,n} - \frac{jX_{Kap1,n} \cdot Z_{N,n}}{Z_{N,n} - jX_{Kap1,n}} \right)} \right] \cdot \frac{\left(Z_{h1,n} - \frac{jX_{Kap1,n} \cdot Z_{N,n}}{Z_{N,n} - jX_{Kap1,n}} \right)}{\left(\frac{-jX_{Kap1,n} \cdot Z_{N,n}}{Z_{N,n} - jX_{Kap1,n}} \right)} \quad (6.2)$$

ifadeleri ile elde edilebilir. Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin haricinde harmonik analizlerinde harmonik iterasyon methodu ile Newton tipi algoritma metodları da kullanılmaktadır. Harmonik iterasyon metodunda harmonik üreten yük besleme gerilimine bağlı akım kaynağı olarak modellenmektedir [54, 55].

$$I_n = F(V_1, V_2, \dots, V_n, c) \quad (6.3)$$

$$[Y_h][V_h] = [I_h] \quad (6.4)$$

(6.3)'deki c değişkeni konverterin çıkış gücü veya tetikleme açılarıyla bağlantılı kontrol değişkenidir. Bu metotta akımın harmonik bileşenleri yeterli doğruluğa ulaşana kadar (6.3) ve (6.4) denklemleri iteratif olarak çözülür.

Newton tipi algoritma metodunda ise (6.3) ve (6.4) denklemleri eş zamanlı olarak Newton algoritması ile çözülür. Her iki metot da bu çalışma sırasında incelenmemiş ve bu metotların performans analizi ileriki çalışmalara bırakılmıştır [54, 55].

6.3 Sabit Akım Kaynağı ve Norton Modellerinin Performans Analizleri

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 **Şekil 5-2**'deki devrenin farklı parametrelerinde sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumu için (5.5) - (5.50) kullanılarak elde edilen sonuçlar referans alınarak her iki modelin performansları karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırma sırasında toplam etkin değerler için elde edilen % hata;

$$\%Hata = \left| \frac{X(R) - X(M)}{X(R)} \right| \cdot 100 \quad (6.5)$$

ifadesi ile elde edilmiştir. (6.5)'deki $X(R)$ (5.5)-(5.50) ve (2.5)-(2.6) denklemleri kullanılarak elde edilen yük gerilimi ve hat akımı toplam etkin değerleridir. $X(M)$ modellere ait yük gerilimi ve hat akımı toplam etkin değerleridir. Modellerin harmoniklere ait etkin değer hataları;

$$HataGenlik_n = \frac{X_n(R) - X_n(M)}{X_1(R)} \quad (6.6)$$

ve harmoniklere ait açılar için hata değerleri ise;

$$HataAçı_n = \theta_n(R) - \theta_n(M) \quad (6.7)$$

ifadeleri ile elde edilmiştir. (6.6)-(6.7)'deki $X_n(R)$ ve $\theta_n(R)$ (5.5)-(5.50) denklemleri kullanılarak elde edilen yük gerilimi ve hat akımı harmoniklerine ait genlik ve açı değerleridir. $X_n(M)$ ve $\theta_n(M)$ modellere ait yük gerilimi ve hat akımı harmoniklerinin genlik ve açı değerleridir.

6.3.1 Reaktif Güç Kompanzasyonunda Model Performans Analizi

Şekil 5-2'deki devrede kaynağın sinüzoidal olduğu durumda kapasitenin değişimine bağlı performans analizinin yapılma amaçları :

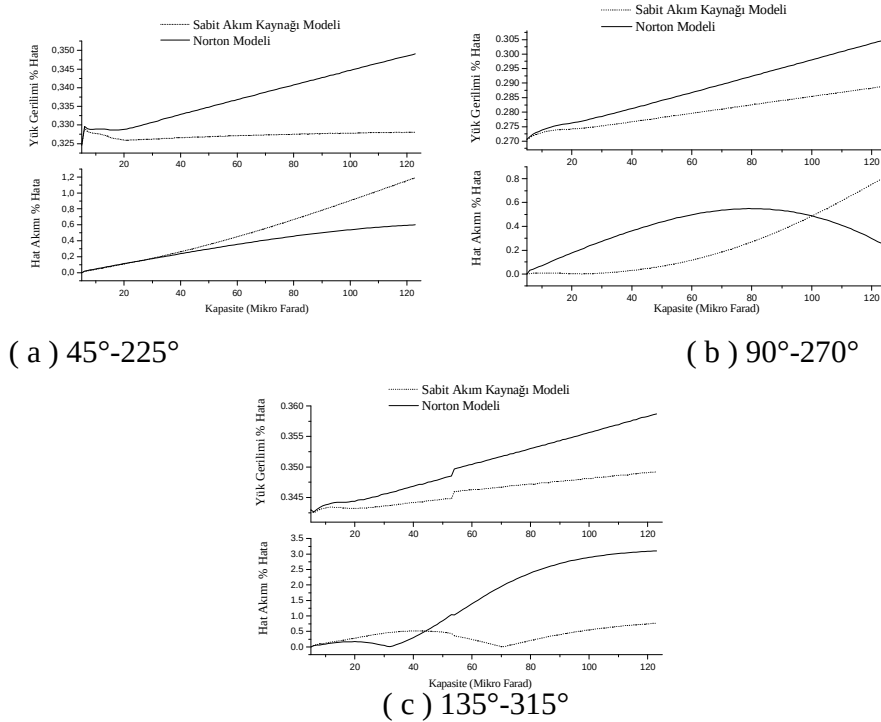
1) modellerin gerilim ve akım toplam etkin değerlerinin hesaplanmasında yaptıkları hataların kapasitenin artışına bağlı değişimlerinin;

2) güç faktörünün azami olduğu kapasite değerinde ise gerilim ve akımın harmonik spektrumlarının hesaplanmasında modellerin yaptıkları hataların

görülmesidir.

Bu analizde sabit parametreler sırasıyla; yükün direnç ve indüktansı $R_y = 10 \Omega$ ve $L_y = 10 \text{ mH}$ ile hattın direnç ve indüktansı $R = 0.5 \Omega$ ve $L = 10 \mu\text{H}$ değerlerinde seçilmiştir. Daha sonra kompanzasyon kapasitesinin $5 \mu\text{F}$ ve $10 \mu\text{F}$ değerlerindeki akım ve gerilimler denklem (6.1 ve 6.2)'de yerlerine konularak yük için Norton modeli elde edilir. Analiz sırasında kompanzasyon kapasitesinin değeri güç faktörünün azami olduğu değere kadar arttırılarak modellerin sonuçlarının referans sonuçlarla farkı karşılaştırılır.

Kapasitenin büyüklüğünün değişimine bağlı olarak farklı tetikleme açıları için her iki modelin verdikleri yük gerilimi etkin değerlerinin ve hat akımı etkin değerlerinin % hata miktarları **Şekil 6-3**'de verilmiştir. Triak tetikleme açısı **Şekil 6-3 (a)**' da 45° - 225° , **Şekil 6-3 (b)**'de 90° - 270° ve **Şekil 6-3 (c)**'de 135° - 315° olarak seçilmiştir.

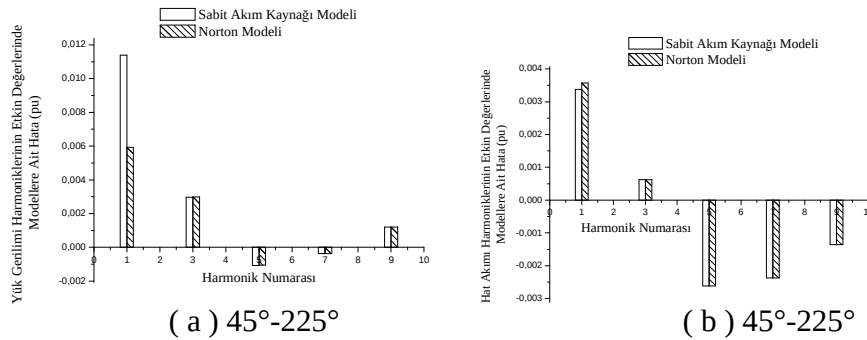


Şekil 6-3 : Farklı tetikleme açıları için kapasitenin büyüklüğünün değişimine bağlı olarak; her iki modelin yük gerilimi etkin değerlerinin ve hat akımı etkin değerlerinin % hata miktarları

Her üç tetikleme açısı için sabit akım kaynağı ve Norton modellerinin yük gerilimi toplam etkin değerinde yaptığı % hata miktarları kapasitenin büyüklüğündeki artış ile

artmaktadır. Sabit akım kaynağı modelinin 45° - 225° ile 90° - 270° tetikleme açıları ve Norton modelinin ise 45° - 225° tetikleme açıları için hat akımının toplam etkin değerinde yaptıkları % hata miktarları kapasitenin değişimine bağlı olarak lineer şekilde artmaktadır. Buna karşın sabit akım kaynağı modelini 135° - 315° tetikleme açıları ve Norton modelinin ise 90° - 270° ve 135° - 315 tetikleme açıları için hat akımının toplam etkin değerinde yaptıkları % hata miktarları kapasitenin değişimine bağlı olarak lineer şekilde değişmemektedir. 135° - 315 tetikleme açıları için her iki modelin hat akımının toplam etkin değerinde yaptıkları % hatalardaki lineer olmama durumunun daha fazla olmasının sebebi bu açı değerleri için sistemden çekilen akımın çok küçük olmasıdır.

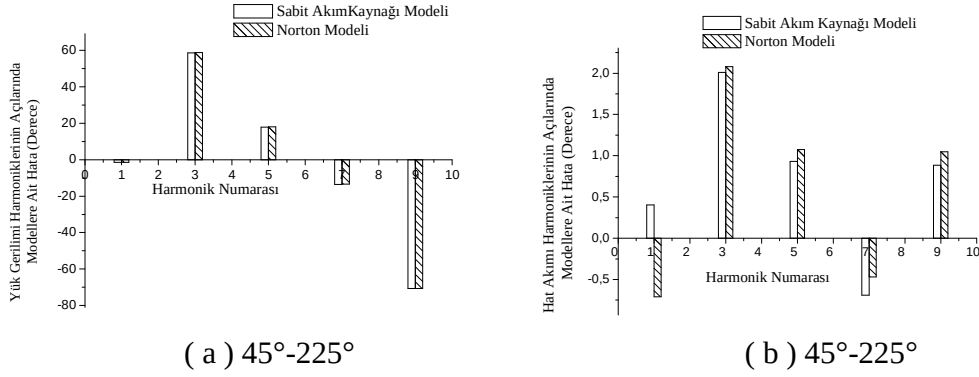
Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda her iki modelin yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-4 (a)** ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-4 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-4 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları güç faktörünün azami olduğu anda için her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

45° - 225° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları arasında önemli bir fark yoktur. Her iki modelin yük gerilimi harmoniklerinin etkin değerlerinin hesaplanmasında yaptıkları hatalar 0,012 pu'den küçük, hat akımı harmoniklerinin etkin değerlerinin hesaplanmasında yaptıkları hatalar ise 0,004 pu ile -0,003 pu arasında değişmektedir.

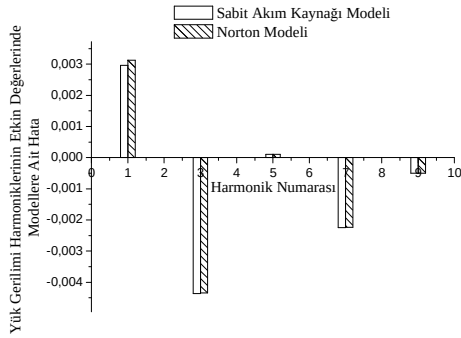
Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-5 (a)** ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-5 (b)**'de verilmiştir.



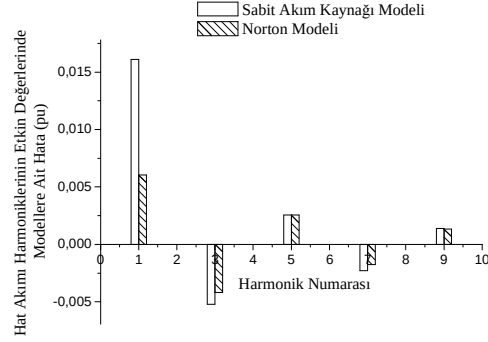
Şekil 6-5 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları

45° - 225° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda her iki modelin sonuçlarında yük gerilimi harmoniklerine ait açı hesaplanmasında 3. harmonik için 60° ve 9. harmonik için -72° değerleri büyüklüğünde hatalar görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açı değerlerinde ise her iki model $-0,5^\circ$ ile 2° arasında değişen büyüklüklerde hatalar vermiştir. Yük gerilimi harmoniklerinin temel harmoniğe göre çok küçüktür. Buna bağlı olarak; kapasitenin büyüklüğündeki artış yük gerilimi harmoniklerinin açılarının hesabında her iki modelin çok büyük hatalar yapmasına sebep olmaktadır.

Triakın 90° - 270° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-6 (a)** ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-6 (b)**'de verilmiştir.



(a) 90°-270°

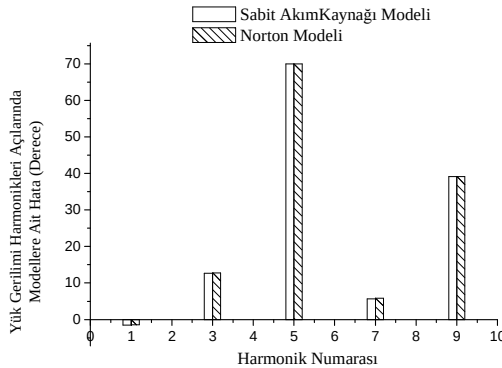


(b) 90°-270°

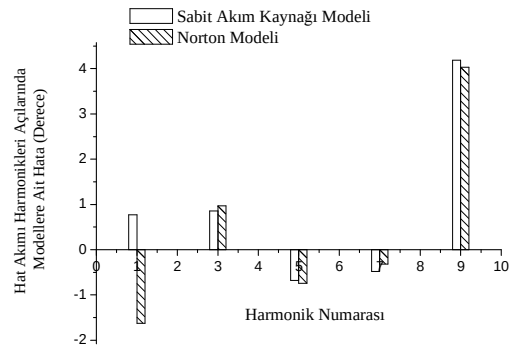
Şekil 6-6 : Triakın 90°-270° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

90°-270° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları 0,003 pu ile -0,004 pu arasında değişmektedir. Hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları ise 0,015 pu ile -0,005 pu arasında değişmektedir.

Triakın 90°-270° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-7 (a)** ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-7 (b)**'de verilmiştir.



(a) 90°-270°

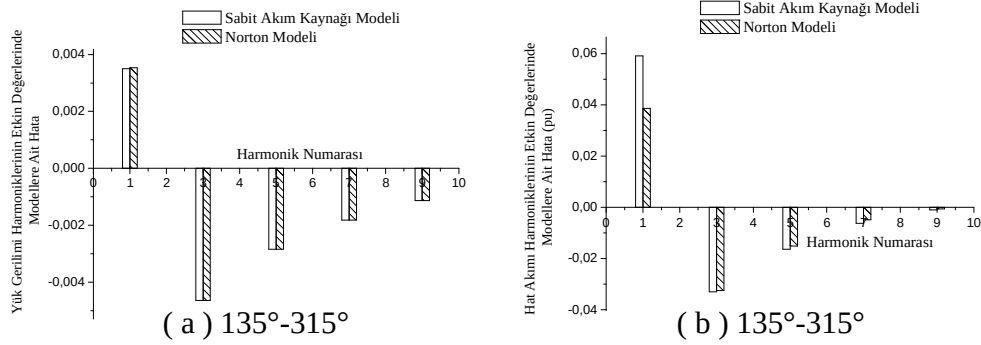


(b) 90°-270°

Şekil 6-7 : Triakın 90°-270° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları

90°-270° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda her iki modelin yük gerilimi harmoniklerine ait açı değerlerinin hesaplanmasında 5. harmonik için 68° ve 9. harmonik için ise 40° gibi büyük hatalar olduğu görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açı değerlerinde ise her iki model 4° ile -2° arasında değişen hatalar vermiştir. Kapasitenin artışıyla çok büyük değerlere ulaşan yük gerilimi harmoniklerine ait açı hataları; triakın 45°-225° ve 90°-270° tetikleme açılarında birbirine yakın değerlerdedir.

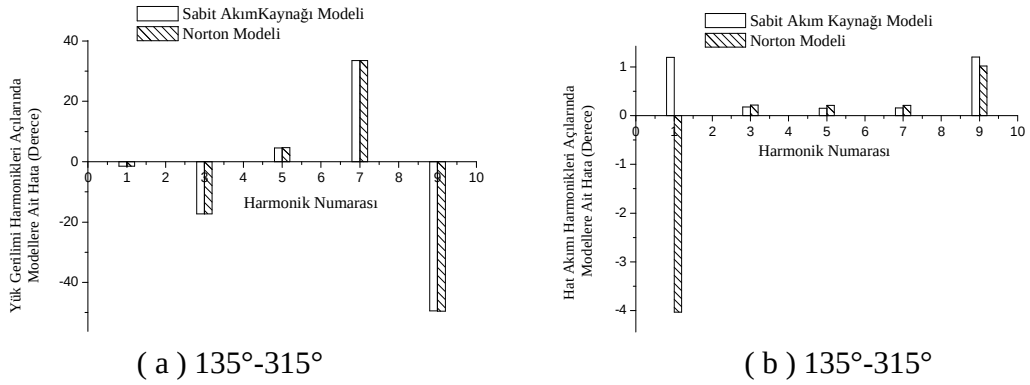
Triakın 135°-315° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-8 (a)** ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-8 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-8 : Triakın 135°-315° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

135°-315° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda diğer tetikleme açılarında olduğu gibi yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları 0,004 pu ile -0,004 pu arasında değişmektedir. Hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları ise 0,06 pu ile -0,03 pu arasında değişmektedir.

Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-9 (a)** ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-9 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-9 : Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları

135° - 315° tetikleme açıları için güç faktörünün azami olduğu anda her iki modelin yük gerilimi harmoniklerine ait açı değerlerinin hesaplanmasında 7. harmonik için 40° ve 9. harmonik için ise -50° gibi büyük hatalar olduğu görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açı değerlerinde ise her iki model 1° ile -4° arasında değişen hatalar vermiştir. Yük gerilimi harmoniklerine ait açı hataları çekilen gücün en küçük olduğu 135° - 315° tetikleme açılarında 45° - 225° ve 90° - 270° tetikleme açılarına göre büyük bir değişim göstermemektedir. Bu durum yük gerilimi açılarındaki hata miktarının gücün büyüklüğünden önemli ölçüde etkilenmedikleri sonucunu vermektedir.

Kompanzasyon kapasitesinin büyüklüğünün değiştiği analizlerde; Sabit Akım Kaynağı ve Norton modelleri gerilim ve akım harmoniklerinin genlik hesaplarında küçük hatalar yapmaktadır. Yine aynı analizlerde akım harmoniklerinin açılarının hesabında her iki model küçük hatalar yaparken gerilim harmoniklerinin açılarının hesabında büyük hatalar yapmaktadırlar.

6.3.2 Hat Empedansının Büyüklüğünün Değişimi Sırasında Model Performans Analizi

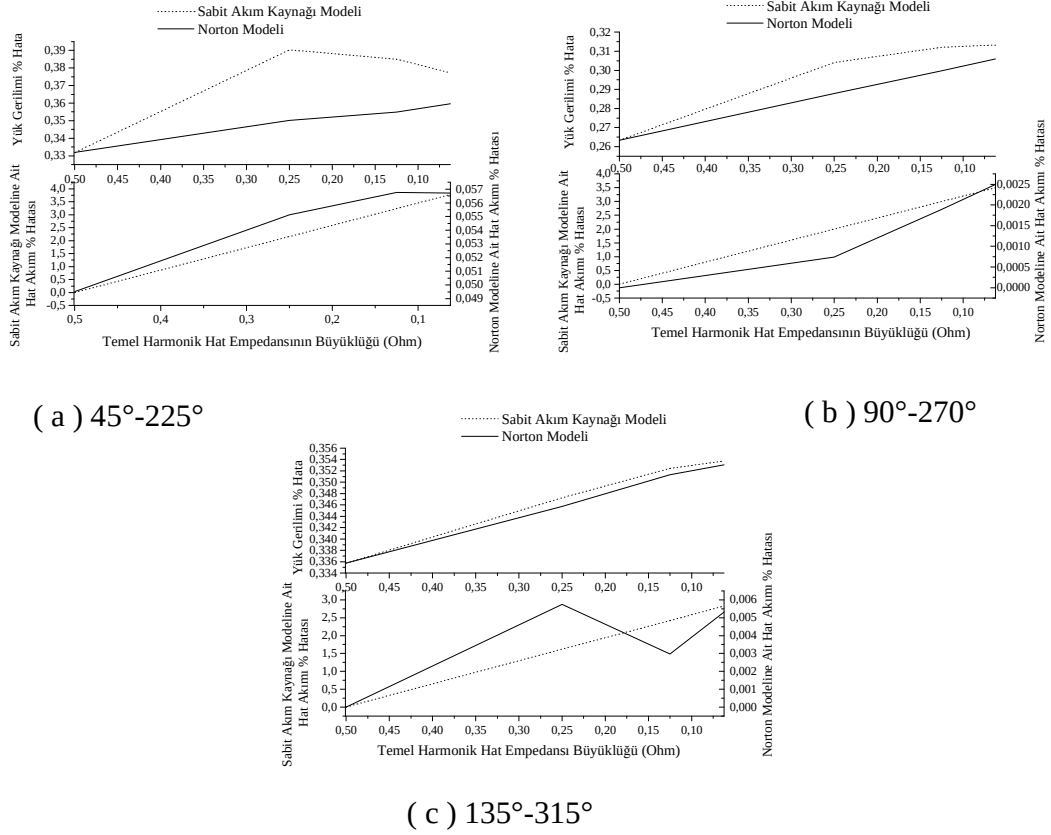
Şekil 5-2'deki devrede kaynağın sinüzoidal olduğu durumda hat empedansının büyüklüğünün değişimine bağlı performans analizinin yapılma amaçları :

1) modellerin gerilim ve akım toplam etkin değerlerinin hesaplanmasında yaptıkları hataların hat empedansının büyüklüğüne bağlı değişimlerinin;

2) gerilim ve akımın harmonik spektrumlarının hesaplanmasında modellerin yaptıkları hataların

görülmesidir.

Bu analizde sabit parametreler sırasıyla; yükün direnç ve endüktansı $R_y = 10 \Omega$ ve $L_y = 10 \text{ mH}$ ile $C = 5 \mu\text{F}$ değerleridir. Hat empedansının temel harmonik için iki farklı büyüklüğü olan $|Z_{h,1}| = 0.5$ ve $|Z_{h,1}| = 0.25$ değerlerindeyken akım ve gerilimler (5.5)-(5.50) denklemleriyle bulunmuştur. Bulunan akım ve gerilim değerleri (6.1) ve (6.2)'de yerlerine konularak yük için Norton modeli elde edilir. Hat empedansının temel harmonik büyüklüğü $|Z_{h,1}| = 0.5$ iken; hat akımının harmoniklerinin etkin değer ile açıları (5.5)-(5.50) denklemleriyle bulunur ve yük her harmonik için sabit akım kaynağı olarak modellenir. Daha sonra devredeki hat empedansının değiştirilmiş ve bu değişim sırasında her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı sonuçlarına ait hataların elde edilmesi amaçlanmıştır. Her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı toplam etkin değer sonuçlarına ait % hatalar **Şekil 6-10'**da verilmiştir. Triak tetikleme açısı **Şekil 6-10 (a)'** da 45° - 225° , **Şekil 6-10 (b)'**de 90° - 270° ve **Şekil 6-10 (c)'**de 135° - 315° olarak seçilmiştir.



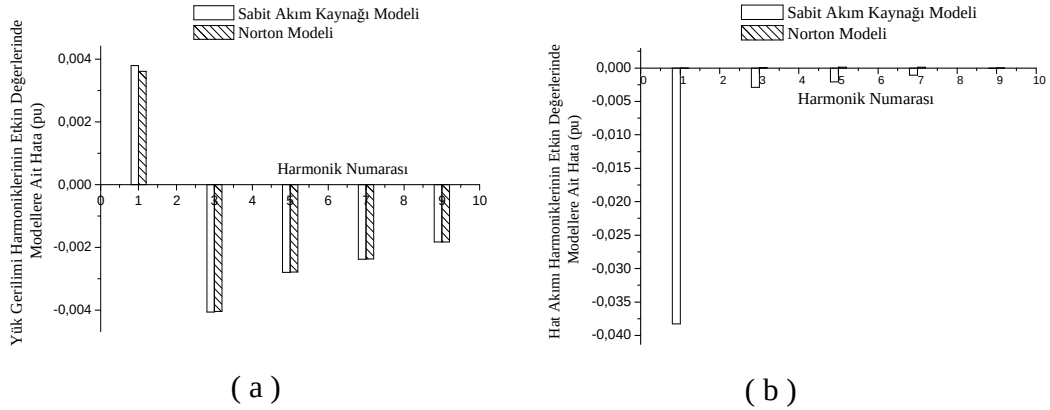
Şekil 6-10 : Triakın farklı tetikleme açıları için devredeki hat empedansının değişimi sırasında her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı sonuçlarına ait % hatalar

Norton devre modeli ile sabit akım kaynağı modelinin triakın 45°-225° ve 90°-270° tetikleme açıları için hat akımının ve yük geriliminin etkin değerinde yaptıkları hatalar; hat empedansının temel harmonikteki büyüklüğü azaltıldıkça büyümektedir. Hatalardaki büyümenin sebebi modellerin hat empedansının 0,5 Ω değeri için oluşturulmasına rağmen hat empedansının değişen değerleri için kullanılmasıdır. Triakın 135°-315° tetikleme açıları için sabit akım kaynağı modelinin hat akımı ve yük gerilimi toplam etkin değerinde yaptığı hatalar; hat empedansının temel harmonikteki büyüklüğü azaltıldıkça büyümektedir. Bununla birlikte yine triakın 135°-315° tetikleme açıları için hat empedansının temel harmonik büyüklüğü azaltıldıkça Norton modelinin yük geriliminin etkin değerinde yaptığı hata artmaktadır. Fakat hat akımının etkin değerinde yaptığı hatalar ise lineer bir değişim göstermemektedir. Bu durumun sebebi triakın 135°-315°

tetikleme açıları için yükün bir periyodun çok az bir bölümünde devreye bağlı kalmasından dolayı çok az akım çekmesidir.

Her üç tetikleme açısı için modellerin gerilim ve akımın toplam etkin değerlerinin hesabında yaptıkları hatanın en büyük olduğu durum; hat empedansı büyüklüğünün $0,0625\Omega$ olduğu andır. Bu sebeple hat empedansının $0,0625\Omega$ olduğu durumdaki modellere ait harmonik genlik ve açıları hesaplarındaki hatalara bakılmıştır.

Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken; her iki modelin verdikleri yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-11 (a)** ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-11 (b)**'de verilmiştir.

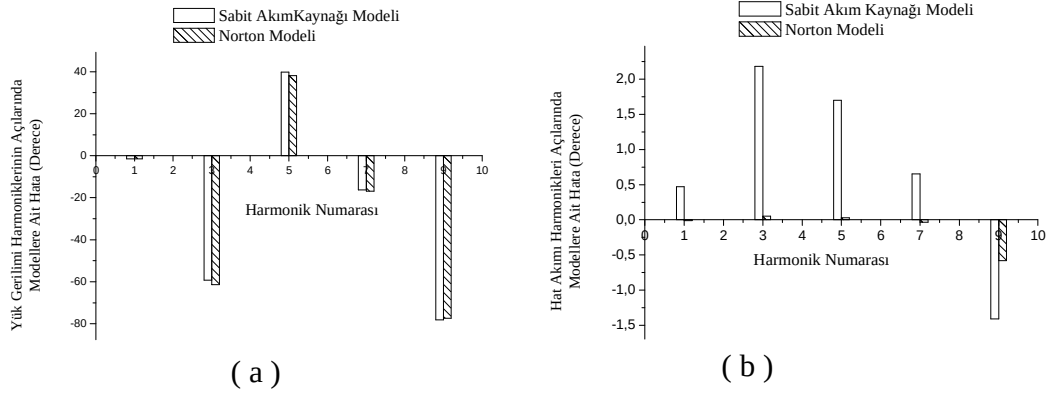


Şekil 6-11 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

45° - 225° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları $0,004$ pu ile $-0,004$ pu arasında değişmektedir. Diğer taraftan hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları ise $-0,04$ pu değerinden küçük değerleri almaktadır.

Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarına ait hata

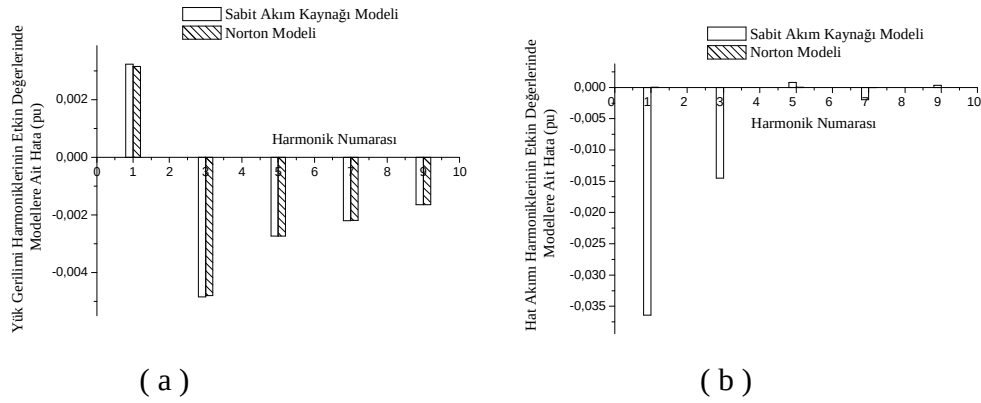
miktarları **Şekil 6-12 (a)** ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-12 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-12 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları

45° - 225° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken her iki modelin sonuçlarında yük gerilimi 3.harmonik açı değerinde -60° , 5.harmonik açı değerinde 40° ve 7.harmonik açı değerinde ise -72° gibi çok büyük hatalar olduğu görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açı değerlerinde ise her iki model $-1,5^\circ$ ile 2° arasında değişen sonuçlar vermiştir. Yük gerilimi harmoniklerinin temel harmoniğe göre çok küçük olmasına bağlı olarak; hat empedansının büyüklüğündeki azalış yük gerilimi harmoniklerinin açılarının hesabında her iki modelin çok büyük hatalar yapmasına sebep olmaktadır.

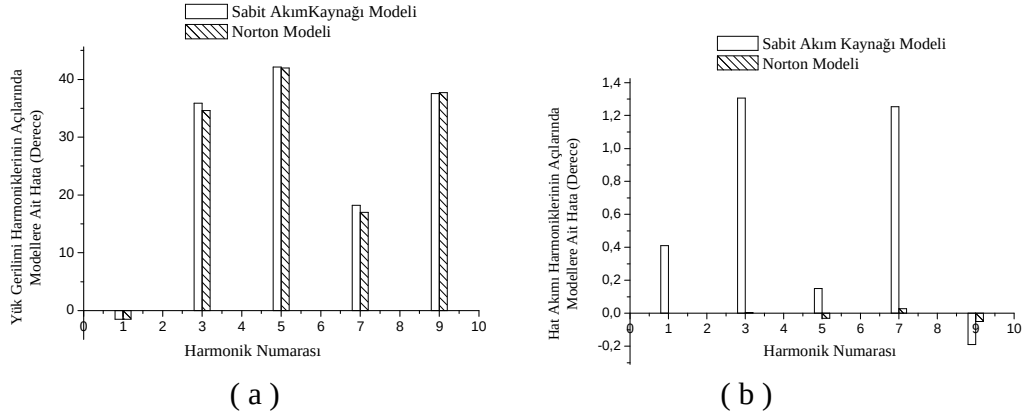
Triakın 90° - 270° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-13 (a)** ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-13 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-13 : Triakın 90° - 270° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

90° - 270° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları $0,003$ pu ile $-0,004$ pu arasında değişmektedir. Hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları ise $-0,04$ pu değerinden küçük değerleri almaktadır.

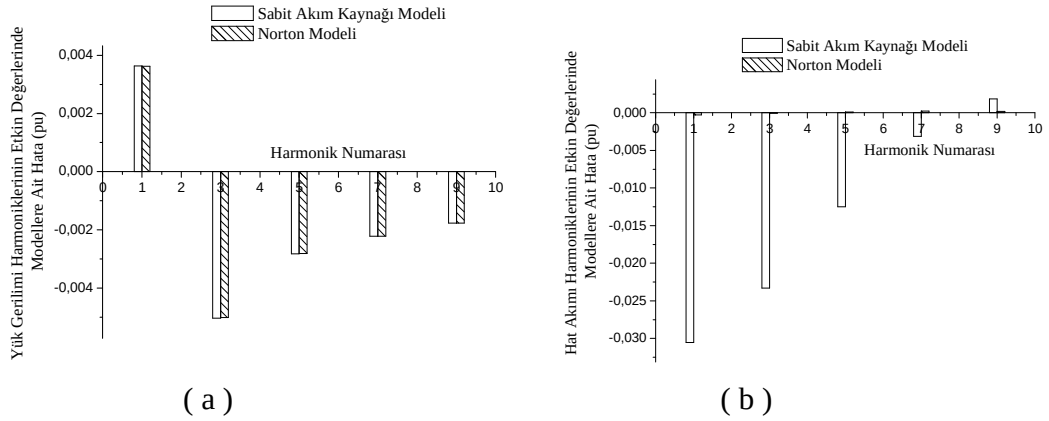
Triakın 90° - 270° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-14 (a)** ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-14 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-14 : Triakın 90° - 270° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları

90° - 270° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken her iki modelin yük gerilimi harmoniklerinin açılarında 3.harmonik için 35° , 5.harmonik için 45° ve 9.harmonik için 40° gibi değerlere varan büyük hatalar olduğu görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açı değerlerinde ise her iki model - $0,2^{\circ}$ ile $1,4^{\circ}$ arasında değişen sonuçlar vermiştir. 90° - 270° tetikleme açıları için yük gerilimi 3. ve 9. harmonik açılarındaki hatalar 45° - 225° tetikleme açıları için aynı harmoniklerdeki hatalardan daha az değerdedir. Her iki tetikleme açısı için diğer yük gerilimi harmoniklerindeki aynı harmoniklere ait hatalar birbirlerine yakın değerlerdedir.

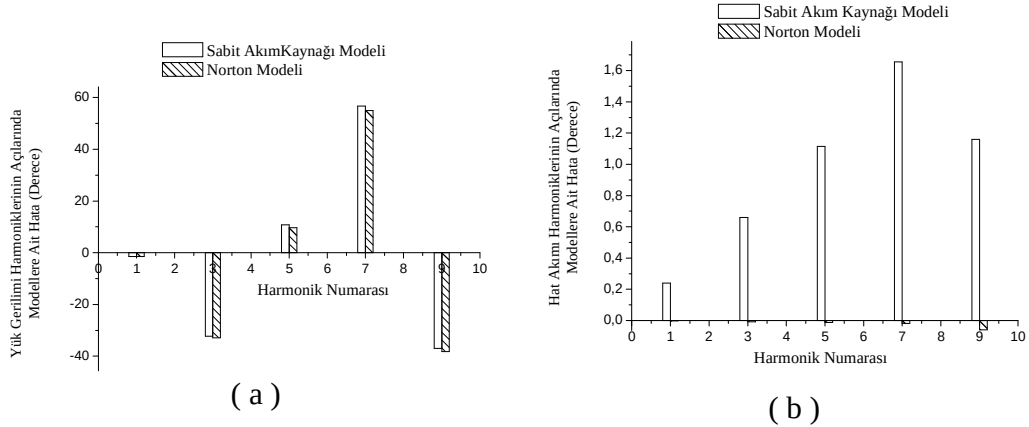
Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları Şekil 6-15 (a) ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları Şekil 6-15 (b)'de verilmiştir.



Şekil 6-15 : Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625 \Omega$ iken her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

135° - 315° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları $0,004$ pu ile $-0,005$ pu arasında değişmektedir. Hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları ise $-0,03$ pu değerinden küçük değerleri almaktadır.

Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625 \Omega$ iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-16 (a)** ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları **Şekil 6-16 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-16 : Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları

135° - 315° tetikleme açıları için temel harmonik hat empedansının büyüklüğü $0,0625\Omega$ iken her iki modelin yük gerilimi 3.harmonik açı değerinde -40° , 7.harmonik açı değerinde 60° ve 9.harmonik açı değerinde ise -40° gibi çok büyük hatalar olduğu görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açı değerlerinde ise her iki model de büyüklüğü $1,6^{\circ}$ 'ye varan hatalı sonuçlar vermiştir. 135° - 315° tetikleme açıları için yük gerilimi 5. harmonik açısındaki hata 90° - 270° tetikleme açılarındaki aynı harmoniğe ait açı hatasından daha küçüktür. Yine 135° - 315° tetikleme açıları için yük gerilimi 7. harmonik açısındaki hata 90° - 270° tetikleme açılarındaki aynı harmoniğe ait açı hatasından daha büyüktür. Her iki tetikleme açısı için diğer yük gerilimi harmoniklerindeki hatalar yaklaşık değerdedir.

Hat empedansının genliğinin değiştiği analizlerde; Sabit Akım Kaynağı ve Norton modelleri gerilim ve akım harmoniklerinin genlik hesaplarında küçük hatalar yapmaktadır. Yine aynı analizlerde akım harmoniklerinin açılarının hesabında her iki model küçük hatalar yaparken gerilim harmoniklerinin açılarının hesabında büyük hatalar yapmaktadırlar. Bu sonuçlar; hat empedansının genliğinde olabilecek muhtemel sapmaların bu modellerin performansını etkilemekle birlikte her iki modelin de bu durum için rahatlıkla kullanılabilir performansa sahip olduklarını göstermektedir.

6.3.3 Hat Empedansının L/R Oranının Değişimi Sırasında Model Preformans Analizi

Şekil 5-2'deki devrede kaynağın sinüzoidal olduğu durumda hat empedansının L/R oranı değişimine bağlı performans analizinin yapılma amaçları :

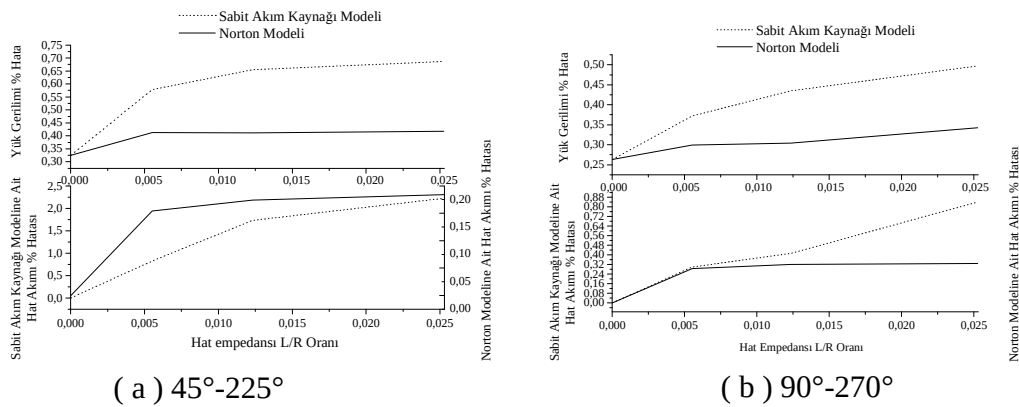
1) modellerin gerilim ve akım toplam etkin değerlerinin hesaplanmasında yaptıkları hataların hat empedansının empedansının L/R oranına bağlı değişimlerinin;

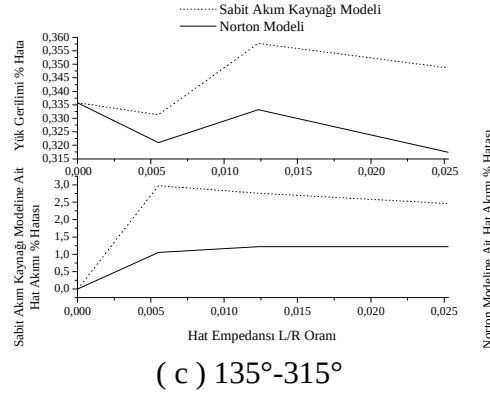
2) gerilim ve akımın harmonik spektrumlarının hesaplanmasında modellerin yaptıkları hataların

görülmesidir.

Bölüm 6.3.2'de belirtilen devre şartları için oluşturulmuş modellerin hat empedansının temel harmonik büyüklüğü sabit iken L/R oranının değişimi sırasında elde edilen yük gerilimi ve hat akımı sonuçlarına ait % hatalar Şekil 6-17'de verilmiştir.

Triak tetikleme açısı Şekil 6-17 (a)'da 45° - 225° , Şekil 6-17 (b)'de 90° - 270° ve Şekil 6-17 (c)'de 135° - 315° olarak seçilmiştir.



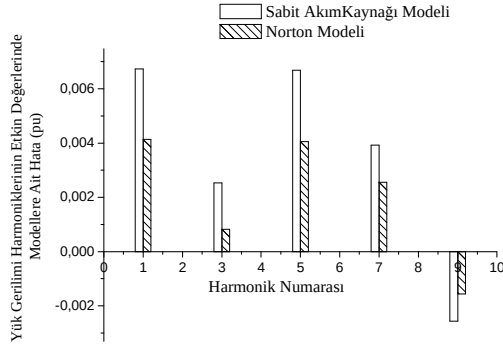


Şekil 6-17 : Devredeki hat empedansının L/R oranının değişimi sırasında her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı toplam etkin değer sonuçlarına ait % Hata

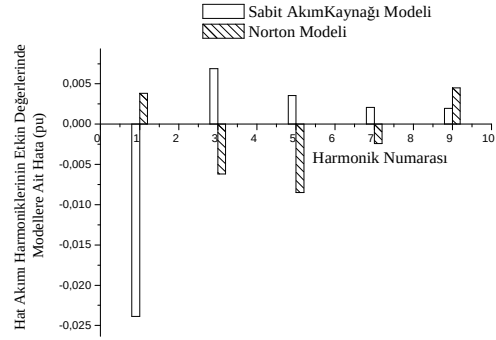
Norton devre modeli ile sabit akım kaynağı modelinin triakın 45°-225° ve 90°-270° tetikleme açıları için hat akımının ve yük geriliminin etkin değerinde yaptıkları hatalar hat empedansının L/R oranı artırıldıkça büyümektedir. Bu değişimin nedeni yükün hat empedansının $L/R = 0,00002$ (temel harmonik için $X/R=0,00628$) oranı için oluşturulan modellerin hat empedansının değişen L/R oranları için kullanılmasıdır. Triakın 135°-315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı artırıldıkça her iki modelin yük geriliminin ve hat akımının etkin değerinde yaptığı hatalar lineer bir değişim göstermemektedir. Bu durum yükün bir periyodun az bir bölümünde devrede kalmasından dolayı çok az akım çekmesidir.

Triakın 45°-225° ve 90°-270° tetikleme açıları için modellerin gerilim ve akımın toplam etkin değerlerinin hesabında yaptıkları hatanın en büyük olduğu durum; hat empedansının L/R oranı 0,025 (temel harmonik için $X/R=7,85$) olduğu andır. Bu sebeple hat empedansının L/R oranı 0,025 olduğu durumdaki modellere ait harmonik genlik ve açıları hesaplarındaki hatalara bakılmıştır.

Triakın 45°-225° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-18 (a)** ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-18 (b)**'de verilmiştir.



(a)

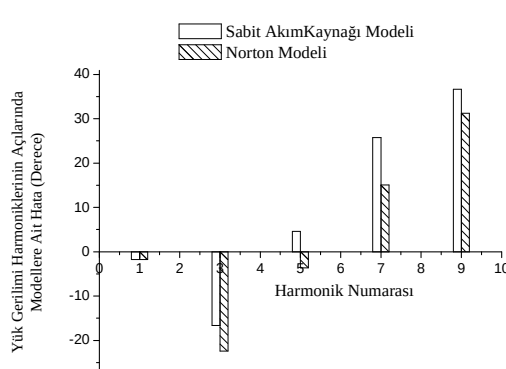


(b)

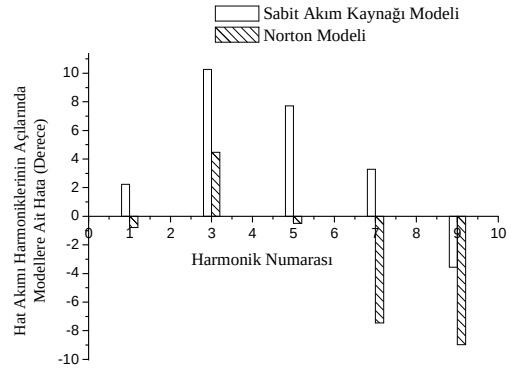
Şekil 6-18 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

45° - 225° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları 0,006 pu ile -0,003 pu arasında değişmektedir. Hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları ise -0,025 pu ile 0,005 pu arasında değişmektedir.

Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarında ait hata miktarları Şekil 6-19 (a) ve hat akımı harmonikleri açılarında ait hata miktarları Şekil 6-19 (b)'de verilmiştir.



(a)

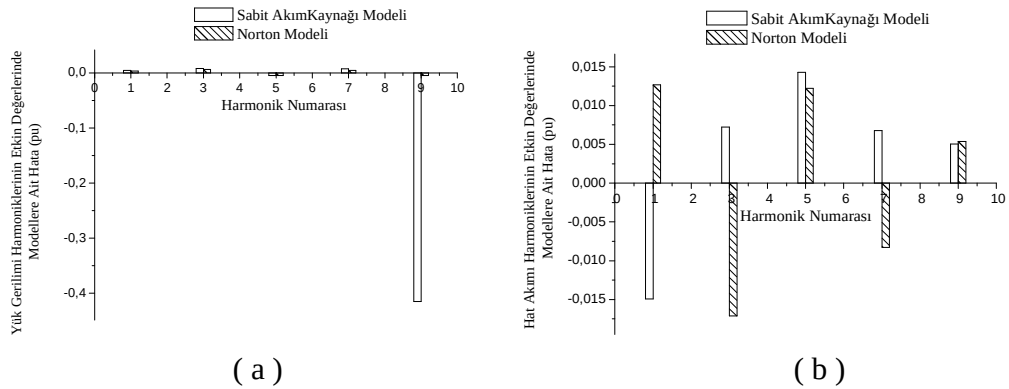


(b)

Şekil 6-19 : Triakın 45° - 225° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarında ait hata miktarları

45°-225° tetikleme açıları için hat empedansının L / R 0,025 iken her iki modelin sonuçlarında yük geriliminin 3.harmonik açısı için -20°, 7.harmonik açısı için 30° ve 9.harmonik açısı için 40° ye varan hatalar olduğu görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açılarında ise sabit akım kaynağı modeli 3.harmonik açısı için 10° ve 5.harmonik açısı için 8° büyüklüğünde hatalar olduğu görülmektedir. Norton modelinin ise 7.harmonik açısı için -8° ve 9.harmonik açısı için -10° büyüklüğünde hatalar olduğu görülmektedir. Yük gerilimi harmoniklerinin temel harmoniğe göre çok küçük olmasına bağlı olarak; hat empedansının L / R oranındaki artış yük gerilimi harmoniklerinin açılarının hesabında her iki modelin çok büyük hatalar yapmasına sebep olmaktadır. 45°-225° tetikleme açıları için kapasitenin ve hat empedansının büyüklüğündeki değişim sırasında elde edilen hat akımı harmonikleri açılarındaki hatalar; hat empedansının L / R oranı artışı sırasında elde edilen hat akımı harmonikleri açılarındaki hatadan daha küçük değerlerdedir.

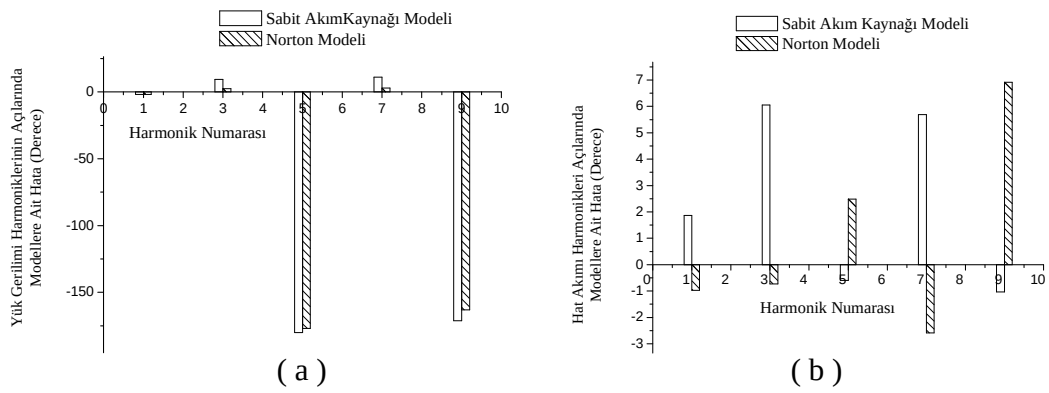
Triakın 90°-270° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-20 (a)** ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-20 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-20 : Triakın 90°-270° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

90°-270° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken yük geriliminin 9.harmonik etkin değerine ait hata miktarı -0,4 pu değerindedir. Hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları ise -0,015 pu ile 0,015 pu arasında değişmektedir.

Triak 90°-270° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarında ait hata miktarları **Şekil 6-21 (a)** ve hat akımı harmonikleri açılarında ait hata miktarları **Şekil 6-21 (b)**'de verilmiştir.

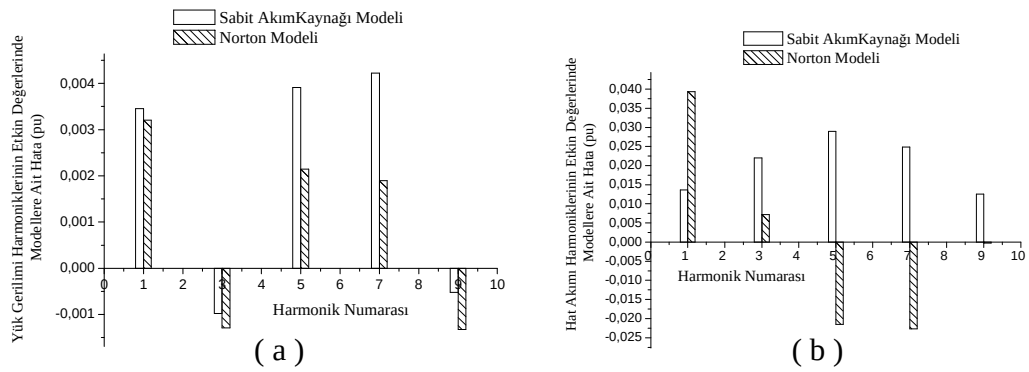


Şekil 6-21 : Triak 90°-270° tetikleme açıları için hat empedansının L / R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarında ait hata miktarları

90°-270° tetikleme açıları için hat empedansının L / R 0,025 iken her iki modelin sonuçlarında yük geriliminin 5.harmonik açısı için -175° ve 9.harmonik açısı için -150° büyüklüğünde hatalar olduğu görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açı değerlerinde ise sabit akım kaynağı modeli 3. ve 5.harmonik açıları için 6° büyüklüğünde hatalar olduğu görülmektedir. Norton modelinin ise 5.harmonik açısı için 3°, 7.harmonik açısı için -3° ve 9.harmonik açısı için 7° büyüklüğünde hatalar olduğu görülmektedir. 90°-270° tetikleme açıları için yük gerilimi 5. ve 9. harmonik açılarındaki hatalar 45°-225° tetikleme açıları için aynı harmoniklerdeki hatalardan daha büyük değerdedir. Her iki tetikleme açısı için diğer yük gerilimi harmoniklerindeki hatalar yaklaşık aynı değerdedir. 90°-270° tetikleme açıları için kapasitenin ve hat empedansının büyüklüğündeki değişim sırasında elde edilen hat akımı harmonikleri açılarındaki hatalar;

hat empedansının L/R oranı artışı sırasında elde edilen hat akımı harmonikleri açılarındaki hatadan daha küçük değerlerdedir.

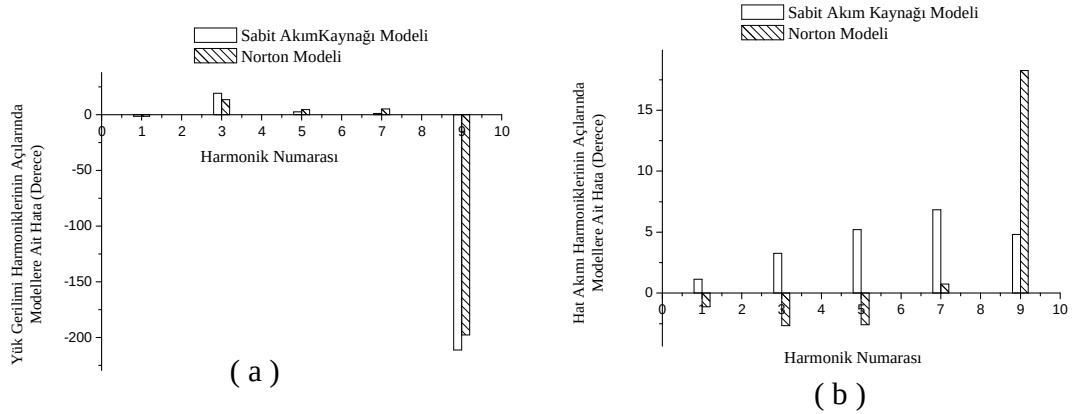
Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-22 (a)** ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları **Şekil 6-22 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-22 : Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları

135° - 315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken yük gerilimi harmonik etkin değerlerine ait hata miktarı -0,001 pu ile 0,004 pu arasında değişmektedir. Hat akımı harmonikleri etkin değerlerine ait hata miktarları ise -0,025 pu ile 0,04 pu arasında değişmektedir.

Triakın 135° - 315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi harmonikleri açılarında ait hata miktarları **Şekil 6-23 (a)** ve hat akımı harmonikleri açılarında ait hata miktarları **Şekil 6-23 (b)**'de verilmiştir.



Şekil 6-23 : Triakın 135°-315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R oranı 0,025 iken; her iki modelin yük gerilimi ve hat akımı harmonikleri açılarına ait hata miktarları

135-315° tetikleme açıları için hat empedansının L/R 0,025 iken her iki modelin yük geriliminin 9.harmonik açısı için -200° büyüklüğünde hata olduğu görülmektedir. Hat akımı harmoniklerine ait açı değerlerinde ise sabit akım kaynağı modeli 5. ve 7.harmonik açıları için 6° büyüklüğünde hatalar olduğu görülmektedir. Norton modelinin ise 9.harmonik açısı için 17° büyüklüğünde hatalar olduğu görülmektedir. 135°-315° tetikleme açıları için yük gerilimi 5. harmoniğin açısındaki hata 90°-270° tetikleme açıları için aynı harmoniğe ait açı hatasından daha küçük değerdedir. Yine 135°-315° tetikleme açıları için yük gerilimi 7. harmonik açısındaki hata 90°-270° tetikleme açılarındaki aynı harmoniğe ait açı hatasından daha büyüktür. Her iki tetikleme açısı için diğer yük gerilimi harmoniklerindeki hatalar yaklaşık aynı değerdedir. 135°-315° tetikleme açıları için kapasitenin ve hat empedansının büyüklüğündeki değişiminden kaynaklanan hat akımı harmonikleri açılarındaki hatalar; hat empedansının L/R oranı değişiminden kaynaklanan hat akımı harmonikleri açılarındaki hatadan daha küçük değerlerdedir.

Hat empedansının L/R oranının değiştiği analizlerde; Sabit Akım Kaynağı ve Norton modelleri gerilim ve akım harmoniklerinin genlik hesaplarında küçük hatalar yapmaktadır. Yine aynı analizlerde akım harmoniklerinin açıların hesabında her iki model küçük hatalar yaparken gerilim harmoniklerinin açıların hesabında büyük hatalar

yapmaktadırlar. Bu sonuçlar; hat empedansının L/R oranında olabilecek muhtemel sapmaların bu modellerin performansını etkilemekle birlikte her iki modelin de bu durum için rahatlıkla kullanılabilecek performansa sahip olduklarını göstermektedir.

6.4 Sonuç

Bu bölümde sırasıyla; kompanzasyon kapasitesi, hat empedansının büyüklüğü ve hat empedansının L/R oranının değişimine ait farklı triak tetikleme açıları için parametrik analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda Sabit Akım Kaynağı ve Norton modellerinin;

- hat akımının ve yük geriliminin harmoniklerine ait etkin değerinde ve toplam etkin değerlerinde yaptıkları hataların kabul edilebilir büyüklükte olduğu,
- kapasitenin ve hat empedansının büyüklüğünün değişiminden kaynaklanan hat akımı harmoniklerinin açılarında yaptıkları hatalarının kabul edilebilir büyüklükte olduğu,
- hat empedansının L/R oranının değişiminden kaynaklanan hat akımı harmoniklerinin açılarında yaptıkları hataların; kapasitenin ve hat empedansının değişiminden kaynaklanan hat akımı harmoniklerinin açılarında yaptıkları hatalardan daha küçük değerde olduğu,
- yük gerilimi harmoniklerinin açılarında yaptıkları hata miktarlarının çok büyük olduğu,
- triakın 135°-315° tetikleme açıları için yük gerilimi ve hat akımının toplam etkin değerindeki hata değişiminin yükün devrede bulunduğu sürenin küçük olması sebebiyle lineer olmadığı,
- Norton modelinde hatalar daha küçük olmasına rağmen hata miktarlarının arasındaki farkların küçük olması sebebiyle daha fazla ölçüm ve hesaplama

gerektiren Norton modelinin incelenen örnek durumlar için verimsiz hale geldiği görülmüştür.

7 SONUÇLAR VE İLERİYE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması içerisinde yer alan analizlerde; triak kontrollü bir $Z(L,R)$ yükün bulunduğu, hat empedansının ihmal edilmediği, tek fazlı bir sistem için gerilim ve akımlara ait analitik ifadeler elde edilmiştir. Bu ifadeler kullanılarak sinüzoidal olmayan şartlarda oluşturulmuş güç tanımlarının asgari ihmallere yaparak reaktif güç kompanzasyonu yönünden karşılaştırılması ve yine sinüzoidal olmayan şartlarda oluşturulan yük modellerinin parametrik analizlerle hata miktarlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu ifadeler bir bilgisayar programı kullanılmadan, sisteme ait diferansiyel durum denklemlerinin çözümüyle elde edilmiştir ve bu ifadeler ulaşılabilen literatürde mevcut değildir.

Yapılan analizler neticesinde;

1) Literatürde güç tanımlarının karşılaştırılmasına yönelik bazı çalışmalarda hat empedansı ihmal edildiği için gerilim ve akımın farklı harmonikler içerebileceği durumlar meydana gelmiştir. Böylece güç tanımlarından bazılarında gerilim ve akımın farklı harmoniklerinin çarpımlarından oluşan güç bileşenleri tanımlanmıştır. Bu tez içerisindeki analizlerde hat empedansı ihmal edilmediği için gerilim ve akımın farklı harmonikler içermesi durumu söz konusu olmamıştır. Bunu takiben analizler sırasında gerilim ve akımın arasındaki farklı harmoniklerin çarpımından oluştuğu belirtilerek tanımlanan güç bileşenlerinden Czarnecki üretilen harmonik gücü ile Shepherd ve Zand bozulma gücünün her gerilim kaynağı yük karakteristiği için sıfır olduğu görülmüştür. Ayrıca sinüzoidal gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumunda Shepherd ve Zand reaktif güç tanımının temel harmonik reaktif gücüne eşit olduğu ve tamamen kompanze edilebileceği literatürde belirtilmiştir. Bu durum ise literatürdeki çalışma sırasında hat empedansının ihmal edilmesinden ve harmonik gerilimi bileşenine sahip olmayan sabit akım kaynağı yük modeli kullanılmasından kaynaklanan bir sonuçtur. Bu tezdeki analizlerde literatürdeki çalışmanın aksine Shepherd ve Zand reaktif gücünün basit bir kapasite ile tamamen kompanze edilemediği görülmüştür. Yine analizler sırasında Budeanu ve Kimbark

reaktif güçlerinin tamamen kompanze edilebileceği fakat Fryze reaktif gücünün tamamen kompanze edilemeyeceği görülmüştür.

2) Literatürde harmoniklerin bulunduğu şartlarda reaktif güç kompanzasyonu ve harmonikli yük akışı analizlerinde kullanılan; harmonik üreten yüklere ait oluşturulmuş modeller sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumuna sahip bir devre üzerinde yapılan simülasyonlar ile verdikleri hatalar yönünden karşılaştırılmışlardır. Bu karşılaştırmalar sırasında hatayı belirlemekte kullanılan referans değerler V.bölümde verilmiş olan analitik ifadelerden elde edilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan harmonik üreten yüklere ait modellerden Norton devre modeli ve sabit akım kaynağı modelleri karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmalar sonucunda her iki modelinde yük gerilimi harmoniklerinin açılar dışında kabul edilebilir sonuçlar verdikleri görülmüştür.

İleriki çalışmalarda tez içerisinde yapılan analizlerin sabit güç için yapılması planlanmaktadır. Ayrıca sinüzoidal olmayan şartlarda tek fazlı sistemler için güç ifadesi oluşturulması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.; “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi, Kasım 2003.
- [2] 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.
- [3] IEEE Std. 519-1992; “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [4] ANSI/IEEE C57.110/D7- 1998; “ANSI/IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, February 1998.
- [5] IEC 61000 3-2; “Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 3 : Limits. Section 2 : Limits for Harmonic Current Emissions”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [6] IEC 61000 3-4; “Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 3 : Limits. Section 4 : Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater Than 16A”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998.
- [7] IEC 61000 3-6; “Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 3 : Limits. Section 6: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996.
- [8] Karakaş, A.; “Harmonikli Devrelerde Güç Kompanzasyonu”, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2000.
- [9] Arifoğlu, U.; “Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi”, Alfa Basım Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ocak 2002.
- [10] 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.
- [11] Arseneau, R., Filipski, P.S.; “Application of a Three Phase Nonsinusoidal Calibration System for Testing Energy and Demand Meters under Simulated

- Field Conditions'', IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.3, pp.874-879, July 1988.
- [12] Arseneau, R., Filipski, P.S., Zelle, J.; "A VA-Meter-Error Analyzer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.6, pp.1769-1773, October 1991.
 - [13] Arseneau, R., Heydt, G.T., Kempker, M.J.; "Application of IEEE Standard 519-1992 Harmonic Limits for Revenue Billing Meters'', IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, pp.346-353, January 1997.
 - [14] Schlabbach, J., Blume, D. and Stephanblame T.; "Voltage Quality in Electrical Power Systems", IEE Publishing, 2001.
 - [15] Chalmers, B. J., Sarker B. R., "Induction Motor Losses Due to Non Sinusoidal Supply Waveforms'', Proc IEE 115, pp.1777-1782, 1968.
 - [16] Uzunoğlu, M., Kocatepe, C., Yumurtacı, R. ve Tanrıöven, M.; "Harmonics and Resonance Conditions in Thyristor Controlled Reactors'', Proc. of Eleco'99, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1-5 December 1999, Bursa, Turkey.
 - [17] Arillaga, L.; "Power System Harmonic Analysis and Measurement'', John Wiley & Sons, Inc. N. Y., USA, 1997.
 - [18] Kennedy B. W.; "Power Quality Primer'', McGraw-Hill Comp. New York, 2000.
 - [19] Owen, E. L.; "A History of Harmonics in Power Systems'', IEEE Industrial Appl. Magazine, pp.6-12, January, 1988.
 - [20] Budeanu, C. I.; "Puissances Reactives et Fictives'', Instytut Romain de L'Energie, 1927, Bucharest.
 - [21] Arrilaga, J., Watson, N. R., Chen, S.; "Power System Quality Assessment'', John Wiley & Sons, 2000.
 - [22] Fryze, S.; "Active-, Reactive-, and Apparent Powers in Networks with Nonsinusoidal Waveforms of Voltage and Current'', ETZ, Bd.53, 1932 (in German).
 - [23] Shepherd, W. and Zand, P.; "Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits'', Cambridge University Press, 1979.
 - [24] Sharon, D.; "Reactive Power Definition and Power Factor Improvement in Nonlinear Systems'', Proc. IEE, 120, pp. 704-706, 1973.
 - [25] Kimbark, E. W., "Direct Current Transmission'', Wiley&Interscience, 1971.

- [26] Czarnecki, L.S.; “Comparison of Power Definitions for Circuits with Nonsinusoidal Waveforms”, IEEE Tutorial Course 90EH0327-7-PWR, pp.43-50.
- [27] Acha, E. and Madrigel, M.; “Power Systems Harmonics Computer Modelling and Analysis”, John Wiley, 2001.
- [28] IEEE Task Force, “The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No : 9, pp.2555-2563, Sept. 1985.
- [29] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effect of Meter Performance and Definitions of Power; “Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.11, pp.79-101, No.1., January, 1996.
- [30] Czarnecki, L.S., Swiatlicki, T.; “Discussion to Powers in Nonsinusoidal Situations - A Review of Definitions and Physical Meaning”, IEEE Trans. Power Delivery., Vol.5, No.3, pp.1377-1378, July 1990.
- [31] Filipski, P. S., Baghzouz, Y., Cox, M. D.; “Discussion of Power Definitions Contained in the IEEE Dictionary”, IEEE Trans. on Power. Delivery., Vol.9, No.1, pp.1237-1244, 1994.
- [32] Thunberg, E. and Söder, L., “A Norton Approach to Distribution Network Modelling”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.14, No.1, pp. 272-277, January, 1999.
- [33] Thunberg, E. and Söder, L., “A Norton Model of a Real Distribution Network”, in Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp.279-284, ICHQP-98-183, 1998.
- [34] CAN/AM EMTP User Group; “Alternative Transient Program (ATP) Rule Book”, (Canadian/American EMTP User Group, 1992).
- [35] Manitoba HVDC Research Centre; “Electromagnetic Transients Simulation Program (EMTDC) Users Guide”, 1992, Canada.
- [36] Carslaw, H. S.; “Theory of Fourier Series and Integrals”, Dover Publications, Inc., 1930.
- [37] Dugan, R. C., McGranagan, M. F. and Beaty, H. W.; “Electrical Power Systems Quality”, Mc Graw-Hill, 1996.

- [38] Pankaj K. S., Hector, A. L.; “Derating of Induction Motors Due to Waveform Distortion”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No : 6, November/December 1990.
- [39] Kocatepe, C., Karakaş, A.; “Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri”, 1.Bölüm, 3e Electrotech Dergisi, Sayı 86, Temmuz, s.80-83, 2001.
- [40] Kocatepe, C., Karakaş, A.; “Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri”, 2.Bölüm, 3e Electrotech Dergisi, Sayı 87, Ağustos, s.90-92, 2001.
- [41] Bayram, M.; “Kompanzasyon Tesislerinde Rezonans Olayları ve Bunların Önlenmesi”, Elektroteknik Mecmuası, Sayı 7, 1985.
- [42] Jalilian, A., Gosbell, V. J., Perera, B. S. P.; “Performance of 7.5kW Induction Motor under Harmonically Distorted Supply Conditions”, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp. MB1/7.1-MB1/7.3, 18-21 May 1997.
- [43] UL 1561 Standad, Dry-Type General Purpose and Power Transformers, Apr. 22, 1994.
- [44] Yıldırım, D., Fuchs, E. F., Grady, W. M.; “Measurement of Eddy-Current Loss Coefficient P_{EC-R} , Derating of Single-Phase Transformers and Comparison with K-factor Approach”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.15, pp.148-154, January 2000.
- [45] Circutor AR5 Manuel Book, 2000.
- [46] Cemek, H.; “Bozulmuş Dalga Şekilli Şebekede Enerji Ölçümü”, GYTE Enerji Sistemleri Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2003.
- [47] Filipiski, P. S. and Labaj, P.W.; “Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No: 4, pp.1793-1799, October 1992.
- [48] Driesen J., Craenenbroeck, T. and Van Dommelen, D.; “The Registration of Harmonic Powers by Analogue and Digital Power Meters”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada, pp 291-296, May 19-21, 1997.
- [49] Baghzouz, Y., Tan, O. T.; “Harmonic Analysis of Induction Watthourmeter Performance”, IEEE Trans. on Power App. Syst., Vol. PAS-104, pp. 965-969, February 1985.

- [50] Emanuel, A. E.; “Powers in Nonsinusoidal Situations A Review of Definitions and Physical Meaning”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No: 3, July 1990.
- [51] Slonim, M.A., Van Wyk, J.D.; “Power Components in A System with Sinusoidal and Nonsinusoidal Voltages and/or Currents”, IEE Proceedings, Vol.135, Pt.B, No: 2, March 1988.
- [52] Slonim, M. A.; “Distortion Power in Linear and Non-Linear Systems”, Int. J. Electronics, 1990, Vol. 68, No: 5, 769-778.
- [53] Czarnecki, L.S.; “Budeanu and Fryze : Two Frameworks for Interpreting Power Properties of Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents”, Archiv fur Elektrotechnik, (81), No : 2, pp. 5-15, 1997.
- [54] Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation, IEEE Special Publication TP-125-0,1998.
- [55] 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.
- [56] Halpin, S. M., “Harmonic Limit Compliance : Issues Associated with Harmonic Modelling and Simulation”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol.2, pp.1063-1067, 16-20 July 2000.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İstanbul-Üsküdar'da doğdu. Lise öğrenimini Balıkesir Lisesi'nde tamamladı. 1996 yılında girmeye hak kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden Temmuz 2001'de mezun oldu. Eylül 2001'de Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Özel bir şirkette şantiye mühendisi olarak çalıştı. Aralık 2002'de Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi oldu.

Ek-1

Tez içerisindeki derating hesaplamalarında incelenen transformatörün parametrik özellikleri ise;

Gücü 1MVA

- 3 fazlı kuru tip 3 sargılı YG/AG1/AG2
- Yüksek Gerilim sargısı
34500V Dd0y5
 $R_1=15,325\Omega@10^\circ\text{C}$
- Alçak Gerilim sargısı 1
580V Dd0
 $R_2=0.003331\Omega@10^\circ\text{C}$
- Alçak Gerilim sargısı 2
580V Dd0
 $R_3=0.003334\Omega@10^\circ\text{C}$
- Boştaki kayıp=3222W
- Yükteki kayıplar;

Alçak Gerilim 1 sargısı kısa devre durumu için Yükteki kayıp=3194W 12,6°C

Alçak Gerilim 2 sargısı kısa devre durumu için Yükteki kayıp=3142W 12,6°C

Alçak Gerilim 1 ve 2 sargılarının kısa devre durumu için Yükteki kayıp=6396W 12,6°C

- $I_{1-R}=16.7\text{A}$, $I_{2-R}=498\text{A}$ ve $I_{3-R}=498\text{A}$ transformatör terminallerindeki nominal hat akımlarıdır.

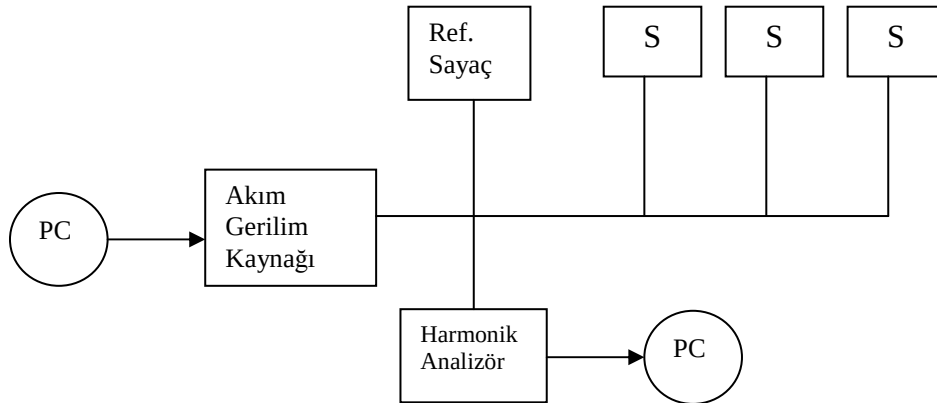
Ek-2

Sayaç testi sırasında dikkate alınan güç tanımları Şekil 1’de verilmiştir.

	Aktif güç	Reaktif güç	Görünür güç	Distorsiyon güç
Budenau	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_B = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n$	$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D$	$D_B^2 = S^2 - P^2 - Q_B^2$
Fryze	P	$Q_F = V \cdot I_R$	$S^2 = P^2 + Q_F^2$	Q_f içerisinde tanımlanmıştır.
Shepherd ve Zand	$S_R = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_n}$	$S_X = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n}$	$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2$	$S_D^2 = \sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^f I_k^2 + \sum_1^s V_u^2 \cdot \left(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^f I_k^2 \right)$
Sharon	P	$S_Q^2 = V \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n$	$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2$	$S_C^2 = S^2 - P^2 - S_Q^2$
Emanuel	P	$Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$	$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D$	$D_E = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2}$

Şekil 1 Sayaç testi sırasında dikkate alınan güç tanımları

Sayaç testi sırasında kullanılan sistem Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2 Sayaç testi sırasında kullanılan sistem

Kullanılan sayaç test sistemi Almanya’dan temin edilmiş olan Zera marka sayaç test sistemi dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar akım gerilim kaynakları, referans sayaç, sayaçların test edilmek üzere montajının yapıldığı ve optik okuyucu aracılığı ile hatalarının okunduğu test masası ve sistemi kumanda eden bilgisayar. Akım ve gerilim kaynakları üç fazlı olup her faz birbirinden bağımsızdır. Bu kaynaklara sistemin bilgisayarı ile kumanda edilir.