

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAFİF RAYLI TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİNİN ENERJİ KALİTESİNE
ETKİ EDEN TEMEL GÜÇ PROBLEMLERİNİN İNCELENMESİ
VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İbrahim ÖZKAN**

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Programı: Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

Ocak 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAFİF RAYLI TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİNİN ENERJİ KALİTESİNE
ETKİ EDEN TEMEL GÜÇ PROBLEMLERİNİN İNCELENMESİ
VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İbrahim ÖZKAN
(Enstitü No 504941310)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 2010**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Turan SÖYLEMEZ (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Ömer GÜL (İTÜ)**

OCAK 2010

Eşime ve kızıma,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında hafif raylı toplu taşıma sistemlerinin ve özel olarak ülkemizde kurulmuş sistemler içinde önde gelen BURULAŞ-BURSARAY işletmesinin, cer gücünü sağlayan enerji sisteminin kalitesine etki eden temel güç problemleri incelenmiştir. Yapılan ölçüm ve analizlerle problemler saptanarak en uygun çözüm yöntemleri tasarım ve benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir. Bu çalışmalara uygun elektrik tesisleri yapılmış ve sistemlerin devreye alınmasıyla ilgili güç kalitesi bileşenleri standartlarda belirtilen sınırların altına çekilmiştir.

Bu tez çalışmamda bilimsel katkılarıyla bana yardımcı olan tez danışmanım ve hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, desteklerini esirgemeyen Burulaş Genel Müdürü Dr. Ali KAYA'ya, Burulaş HRS koordinatörü Adem YAZAR'a, Burulaş Bursaray Güç Kaynakları ve Kataner Grubuna, tez çalışmamda her türlü desteğini esirgemeyen Alper TERCİYANLI'ya, sonsuz desteği için eşim Emine ÖZKAN'a ve biricik kızım Berru ÖZKAN'a,

Çok teşekkür ederim.

Ocak 2010

İbrahim ÖZKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Sistem Tanımı	3
1.2 Güç Üçgeni ve Güç Faktörü	4
1.3 Yasal Düzenlemeler.....	4
1.4 Ölçme Tekniği ve Veri Toplama Sistemi	6
2. BURSARAY HAFİF RAYLI SİSTEMİ TEMEL GÜÇ PROBLEMLERİ	
AA DAĞITIMDA KAPASİTİF REAKTİF GÜÇ AKIŞININ	
DÜZENLENMESİ	7
2.1 Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemi İçin Temel Ölçütler.....	7
2.2 Bursaray Fiderlerinde Güç Kalitesi Problemlerinin Saptanması İçin Uygulanan Ölçüm ve Hesap Yöntemleri.....	7
2.3 Bursaray-1 Fideri Kompanzasyon Öncesi Ölçüm Sonuçları ve Saptamalar	9
2.3.1 Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi.....	21
2.4 Bursaray-2 Fideri Kompanzasyon Öncesi Ölçüm Sonuçları ve Saptamalar	34
2.4.1 Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi.....	35
2.5 Şekil 2.21(a) ve Şekil 2.36(a)'da Verilen Olası Çözüm Tekniklerinin Kullanılan Anahtar Elemanı Tipi Açısından Değerlendirilmesi.....	38
2.6 Şönt Reaktörlerin ve Aktif Filtrelerin Fiderlere Bağlanacağı Olası Noktalar	39
2.7 Reaktör Tasarımında Dikkat Edilecek Konular ve Eşdeğer Devre.....	39
2.8 Bursaray Fiderleri Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemleri Kısa Devre Hesapları.....	40
2.8.1 Bursaray-1 reaktif güç kompanzasyon sistemi	40
2.8.2 Bursaray-2 reaktif güç kompanzasyon sistemi	42
2.9 Kompanzasyon Sistemlerinin Devreye Alınmasından Sonra Yapılan Ölçüm ve Değerlendirmeler	44
2.9.1 Bursaray-1 fideri ölçümleri ve değerlendirmeler	45
2.9.2 Bursaray-2 fideri ölçümleri ve değerlendirmeler	54
2.9.3 Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderleri sayaç okumaları.....	63
3. BURSARAY HAFİF RAYLI SİSTEMİ TEMEL GÜÇ PROBLEMİ	
AA/DA DÖNÜŞÜM SİSTEMİ AKIM HARMONİKLERİ	
PROBLEMLERİ.....	65
3.1 Harmonik Nedir?	65
3.1.1 Harmonik üreten yükler	66

3.1.2 Harmoniklerin zararlı etkileri	67
3.2 Harmoniklerin Filtrelenmesi.....	68
3.2.1 Pasif filtreler	68
3.2.1.1 Seri filtreler	68
3.2.1.2 Şönt filtreler	69
3.2.1.3 Pasif filtrelerin üstünlükleri ve dezavantajları	69
3.2.2 Aktif güç filtreleri	70
3.2.2.1 Gerilim kaynaklı aktif güç filtresi	71
3.2.2.2 Akım kaynaklı aktif güç filtresi	72
3.2.2.3 Gerilim kaynaklı aktif güç filtresinin üstünlükleri	73
3.2.2.4 Akım kaynaklı aktif güç filtresinin üstünlükleri	73
3.3 Bursaray Hafif Raylı Sistemi İçin Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresinin Öne Çıkan Özellikleri.....	74
3.4 Bursaray Hafif Raylı Sistemi 2006 Yılı Harmonik Ölçümleri.....	75
3.4.1 Ölçüm yöntemi	75
3.4.2 Bursaray-2 fideri harmonik ölçüm sonuçları ve saptamalar.....	76
3.4.3 Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi	101
3.5 Bursaray-2 Fideri Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresi Sistemi.....	102
3.5.1 Tek hat şeması ve temel ölçütler.....	102
3.5.2 Sistem donanım yapısı	103
3.5.2.1 Giriş filtre kondansatörü	104
3.5.2.2 Güç yarı iletkenleri (IGBT + Diyot)	106
3.5.2.3 DA bağ reaktörü	106
3.5.2.4 Gerilim koruma devresi (Crowbar)	107
3.5.3 Sistem yazılım yapısı	107
3.5.4 Kontrol sistemi.....	108
3.5.4.1 Faz kilitlemeli döngü	108
3.5.4.2 Referansların üretilmesi	110
3.5.4.3 Aktif sönümlendirme	110
3.5.4.4 Hata kompanzasyonu	111
3.5.4.5 DA bağ akımı ve reaktif güç kontrolü	112
3.5.4.6 Referansların toplanması ve ateşleme sinyallerinin üretilmesi	112
3.6 Bursaray-2 Fideri Aktif Güç Filtresi Devreye Alma Sonrası Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	113
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	125
KAYNAKLAR.....	127
EKLER	129

KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
AG	: Alçak Gerilim
AGF	: Aktif Güç Filtresi
AKAGF	: Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresi
APF	: Active Power Filter
BURSARAY	: Bursa Hafif Raylı Toplu Taşıma Sistemi
DA	: Doğru Akım
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FKD	: Faz Kilitlemeli Döngü
GKAGF	: Gerilim Kaynaklı Aktif Güç Filtresi
KGK	: Kesintisiz Güç Kaynağı
N.O.	: Normal Operasyon
OG	: Orta Gerilim
P	: Aktif Güç
PSCAD	: Power Systems Computer Aided Design
Q	: Reaktif güç
Q_L	: Endüktif Reaktif Güç
Q_C	: Kapasitif Reaktif Güç
S	: Görünür Güç
SCADA	: Supervisory Control And Data Acquisition
RGK	: Reaktif Güç Kompanzasyonu
TAŞR	: Tristör Ateşlemeli Şönt Reaktör
TCR	: Thyristor Controlled Reactor
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
THB	: Toplam Harmonik Bozulması
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Akım harmonikleri için maksimum yük akımına (IL) göre sınır değerler.....	5
Çizelge 2.1 : Bursaray-1 fideri ölçülen akım harmonikleri.	14
Çizelge 2.2 : Bursaray-1 fiderinde ölçülen enerji tüketimleri.....	45
Çizelge 2.3 : Bursaray-1 fideri ölçülen akım harmonikleri (kompanzasyon sistemi devrede).....	49
Çizelge 2.4 : Bursaray-2 fiderinde ölçülen enerji tüketimleri.....	54
Çizelge 2.5 : Bursaray-2 fideri ölçülen akım harmonikleri (kompanzasyon sistemi devrede).....	58
Çizelge 2.6 : Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderlerinde ölçülen enerji tüketimleri (kompanzasyon sistemi devrede).	63
Çizelge 3.1 : Bursaray-2 fideri enerji tüketimleri ve endüktif/kapasitif reaktif enerji aktif enerji oranları.	76
Çizelge 3.2 : Akım harmonikleri için maksimum yük akımına (IL) göre sınır değerler.....	101
Çizelge 3.3 : Aktif filtre devrede ve devre dışı iken şebeke akımı 11. ve 13. harmonik yüzde değerleri.....	120

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Güç üçgeni.....	4
Şekil 1.2 : Güç faktörü.....	4
Şekil 1.3 : Veri toplama sistemi.	6
Şekil 2.1 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).....	10
Şekil 2.2 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).....	10
Şekil 2.3 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).....	11
Şekil 2.4 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca güç faktörü değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).	11
Şekil 2.5 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).	12
Şekil 2.6 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca gerilim ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).	12
Şekil 2.7 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 5. harmonik bileşeninin değişimi.	15
Şekil 2.8 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 7. harmonik bileşeninin değişimi.	15
Şekil 2.9 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 11. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).....	16
Şekil 2.10 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 13. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).	16
Şekil 2.11 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 23. harmonik bileşeninin değişimi.	17
Şekil 2.12 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 25. harmonik bileşeninin değişimi.	17
Şekil 2.13 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 29. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).	18
Şekil 2.14 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın toplam harmonik bozulumu değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).	18
Şekil 2.15 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca gerilim toplam harmonik bozulumu (yeşil çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).....	19
Şekil 2.16 : 2 MVA servis trafosunda 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 25-26 Şubat 2003).	19

Şekil 2.17 : 2 MVA servis trafosunda 1 gün boyunca reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 25-26 Şubat 2003).....	20
Şekil 2.18 : 2 MVA servis trafosunda 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 25-26 Şubat 2003).....	20
Şekil 2.19 : 2 MVA servis trafosunda 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (350 kVAr şönt reaktör bağlanması durumunda oluşacak yeni güç değişimi benzetim sonucu).	21
Şekil 2.20 : Tek kademeli şönt reaktörün reaktif güç kompanzasyonu amacıyla mevcut 34,5 kV şebekeye bağlanma seçenekleri.....	25
Şekil 2.21 : (a) Tek kademeli şönt reaktörün reaktif güç kompanzasyonu amacıyla mevcut 34,5 kV şebekeye bağlanma seçenekleri (b) Deney düzeneği ölçüm noktaları.	26
Şekil 2.22 : 2-1': S1 devreye alınırkenki (fazlar arası) gerilim (2 ve 1' Şekil 2.21 (b)'de gösterilen ölçüm noktalarıdır).	28
Şekil 2.23 : 1-2: S1 devreden çıkarılırkenki (fazlar arası) gerilim.	28
Şekil 2.24 : 3-4: S2 devreden çıkarılırkenki gerilim.	29
Şekil 2.25 : 3-4: S2 devreye alınırkenki gerilim.	29
Şekil 2.26 : 4-3': S2 devreden çıkarılırkenki (faz-nötr) gerilim.	30
Şekil 2.27 : 4-3': S2 devreye alınırkenki (faz-nötr) gerilim.	30
Şekil 2.28 : S2 devreye alınırken (Ch2: 2-1' arası, Ch3: 4-3' arası, Ch4: 3-3' arası).31	
Şekil 2.29 : S2 devreden çıkarken (Ch2: 2-1' arası, Ch3: 4-3' arası, Ch4: 3-3' arası).	32
Şekil 2.30 : Tipik bir tristör anahtarlama şönt reaktör uygulamasına ilişkin tek-faz devre şeması.....	33
Şekil 2.31 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).	35
Şekil 2.32 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).....	36
Şekil 2.33 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).	36
Şekil 2.34 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 11. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).....	37
Şekil 2.35 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 13. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).....	37
Şekil 2.36 : (a), (b)Tek kademeli şönt reaktörün reaktif güç kompanzasyonu amacıyla mevcut 34,5 kV şebekeye bağlanma seçenekleri.	38
Şekil 2.37 : Şönt reaktör eşdeğer devre ve vektör şeması.	40
Şekil 2.38 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).	45
Şekil 2.39 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	46
Şekil 2.40 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca reaktif güç (kVAr) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	46
Şekil 2.41 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca hat akımının ana bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).	47
Şekil 2.42 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca hatlar arası gerilimin ana bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).	47

Şekil 2.43 : Bursaray-1 fiderinde 15 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	48
Şekil 2.44 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 5. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	50
Şekil 2.45 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 7. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	50
Şekil 2.46 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 11. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	51
Şekil 2.47 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 13. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	51
Şekil 2.48 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 23. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	52
Şekil 2.49 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 25. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	52
Şekil 2.50 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın toplam harmonik bozulumu değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).	53
Şekil 2.51 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca gerilimin toplam harmonik bozulumu değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).	53
Şekil 2.52 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	54
Şekil 2.53 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	55
Şekil 2.54 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca reaktif güç (kVAr) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	55
Şekil 2.55 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca hat akımı ana bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	56
Şekil 2.56 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca hatlar arası gerilimin ana bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	56
Şekil 2.57 : Bursaray-2 fiderinde 15 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	57
Şekil 2.58 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 5. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	59
Şekil 2.59 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 7. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	59
Şekil 2.60 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 11. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	60
Şekil 2.61 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 13. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	60
Şekil 2.62 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 23. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	61
Şekil 2.63 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 25. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).....	61
Şekil 2.64 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın toplam harmonik bozulumu değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).	62

Şekil 2.65 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca gerilimin toplam harmonik bozulumu değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).	62
Şekil 3.1 : Harmonikli gerilimin dalga şeklinin oluşumu.	66
Şekil 3.2 : (a) Şönt pasif filtre (b) Aktif filtre.	68
Şekil 3.3 : Pasif filtre çeşitleri.	69
Şekil 3.4 : Paralel aktif filtre.	70
Şekil 3.5 : Paralel aktif güç filtresinin çalışma ilkesi.	71
Şekil 3.6 : (a) Gerilim kaynaklı. (b) Akım kaynaklı aktif güç filtresi.	71
Şekil 3.7 : Gerilim kaynaklı aktif güç filtresi sistem yapısı.	72
Şekil 3.8 : Akım kaynaklı aktif güç filtresi sistem yapısı.	73
Şekil 3.9 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).	77
Şekil 3.10 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).	77
Şekil 3.11 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).	78
Şekil 3.12 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).	78
Şekil 3.13 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).	79
Şekil 3.14 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).	79
Şekil 3.15 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).	80
Şekil 3.16 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).	80
Şekil 3.17 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).	81
Şekil 3.18 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).	81
Şekil 3.19 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).	82
Şekil 3.20 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).	82
Şekil 3.21 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).	83
Şekil 3.22 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).	83
Şekil 3.23 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).	84
Şekil 3.24 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).	84
Şekil 3.25 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım temel bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).	85
Şekil 3.26 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım temel bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).	85
Şekil 3.27 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım temel bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).	86

Şekil 3.28 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım temel bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).	86
Şekil 3.29 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 3. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	87
Şekil 3.30 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 3. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	87
Şekil 3.31 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 3. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	88
Şekil 3.32 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 3. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	88
Şekil 3.33 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 5. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	89
Şekil 3.34 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 5. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	89
Şekil 3.35 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 5. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	90
Şekil 3.36 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 5. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	90
Şekil 3.37 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 7. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	91
Şekil 3.38 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 7. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	91
Şekil 3.39 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla Akım7. Harmonik Bileşen Değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	92
Şekil 3.40 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 7. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	92
Şekil 3.41 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 11. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	93
Şekil 3.42 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 11. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	93
Şekil 3.43 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 11. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	94
Şekil 3.44 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 11. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).	94

Şekil 3.45 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 13. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	95
Şekil 3.46 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 13. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	95
Şekil 3.47 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 13. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	96
Şekil 3.48 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 13. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	96
Şekil 3.49 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 23. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	97
Şekil 3.50 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 23. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	97
Şekil 3.51 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 23. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	98
Şekil 3.52 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 23. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	98
Şekil 3.53 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 25. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	99
Şekil 3.54 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 25. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	99
Şekil 3.55 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 25. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	100
Şekil 3.56 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 25. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).....	100
Şekil 3.57 : Bursaray-2 fideri akım kaynaklı aktif güç filtresi tek hat şeması.	102
Şekil 3.58 : Bursaray-2 fideri AGF sistemi donanım yapısı.	103
Şekil 3.59 : Giriş filtresi devre yapısı.....	105
Şekil 3.60 : Bursaray-2 AGF sistemi yazılım prensip şeması.	108
Şekil 3.61 : Faz kilitlemeli döngü.	108
Şekil 3.62 : Bursaray-2 AGF kontrol sistemi blok şeması.	109
Şekil 3.63 : Senkron referans düzlemi ile referans akımların bulunması.....	110
Şekil 3.64 : Bursaray-2 AGF aktif sönümlendirme bloğu.....	110
Şekil 3.65 : Bursaray-2 AGF referans akım ile gerçekleşen filtre akımı arasındaki hata kompanzasyonu bloğu.....	111
Şekil 3.66 : Bursaray-2 AGF DA-bağ akımı ve reaktif güç kontrolü blok şeması..	112
Şekil 3.67 : Bursaray-2 AGF IGBT'ler için ateşleme sinyallerinin üretildiği blok şema.	112
Şekil 3.68 : Bursaray-2 AGF'ne ilişkin basitleştirilmiş tek hat şema.....	113

Şekil 3.69 : Sadece 11. harmonik basılırken A ve B noktasından ölçülen akımlar (a) Hat akımının (b) Çevirici akımının zamanla değişimi.	114
Şekil 3.70 : Sadece 11. harmonik basılırken A ve B noktasından ölçülen akımların frekans spektrumları (a) Hat akımının (b) Çevirici akımının frekans spektrumu.	115
Şekil 3.71 : Sadece 13. harmonik basılırken A ve B noktasından ölçülen akımlar (a) Hat akımının (b) Çevirici akımının zamanla değişimi.	116
Şekil 3.72 : Sadece 13. harmonik basılırken A ve B noktasından ölçülen akımların frekans spektrumları (a) Hat akımının (b) Çevirici akımının frekans spektrumu.	116
Şekil 3.73 : Sadece DA-bağ akımı tutulurken IGBT-4 ve DA-bağ gerilimi (1.0 kV / div).	117
Şekil 3.74 : Sadece DA-bağ akımı tutulurken IGBT-6 ve DA-bağ gerilimi (1.0 kV / div).	118
Şekil 3.75 : Normal işletme sırasında B ve E noktasından yapılan ölçümler (a) DA-bağ akımının AA bileşeninin (b) Hat akımının (c) DA-bağ geriliminin zamanla değişimi.	119
Şekil 3.76 : Normal işletme sırasında B noktasından ölçülen hat akımının harmonik spektrumu.	119
Şekil 3.77 : Normal işletme sırasında C ve D noktalarından ölçülen akımların 11. harmonik dalga şekilleri (a) TCR+APF akımı 11.harmonik dalga şekli (b) Şebeke akımı 11. harmonik dalga şekli (c) Doğrusal olmayan yük akımı 11.harmonik dalga şekli.	121
Şekil 3.78 : Normal işletme sırasında C ve D noktalarından ölçülen akımların 13. harmonik dalga şekilleri (a) TCR+APF akımı (b) Şebeke akımı (c) Doğrusal olmayan yük akımı 13.harmonik dalga şekli.	122
Şekil 3.79 : IGBT üzerinden ölçülen (a) gerilim ve (b) akım dalga şekilleri.	122
Şekil 3.80 : Normal işletme sırasında B noktasından ölçülen aktif güç değişimi.	123
Şekil 3.81 : Normal işletme sırasında B noktasından ölçülen reaktif güç değişimi.	123
Şekil 3.82 : Normal işletme sırasında aktif filtre izleme ekranı.	124
Şekil A.1 : Bursaray-1 fiderine tesis edilen tek kademe şönt reaktörlü RGK.	131
Şekil A.2 : Bursaray-2 fiderine tesis edilen TAŞR+AKAGF sistemi.	132
Şekil A.3 : Bursaray OG ring hattı.	136
Şekil A.4 : Bursaray-1 fiderine tesis edilen tek kademeli şönt reaktörün tek hat şeması.	137
Şekil A.5 : Bursaray-2 fiderine tesis edilen TAŞR+AKAGF sistemi tek hat şeması.	138

HAFİF RAYLI TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİNİN ENERJİ KALİTESİNE ETKİ EDEN TEMEL GÜÇ PROBLEMLERİNİN İNCELENMESİ VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, büyük şehirlerin kent içi ulaşım problemlerinin çözümünde ilk sıralarda kendine yer bulan modern hafif raylı toplu taşıma sistemlerinin ve özel olarak 2002 Ağustos ayında yolculu işletime başlayan Bursa Hafif Raylı Toplu Taşıma Sistemi'nin (Bursaray) enerji kalitesine etki eden güç kalitesi problemleri incelenmiştir.

Bursaray'ın enerji sistemi 2008 yılından itibaren, TEİAŞ'a ait iki ayrı indirici merkezinde mevcut 4 ayrı besleme noktasından beslenmektedir. Bursaray orta gerilim (OG) ringi içersinde 7 adet cer trafo istasyonu ve 8 adet tünel havalandırma sistemi besleme istasyonu mevcuttur. Her bir cer trafo istasyonu içersinde trenlerin hareket için gereksinim duydukları 1500 volt doğru gerilimi sağlayan 12 darbeli doğrultucular vardır. İndirici merkezler ile ilk giriş istasyonları arasındaki OG kablolar $3 \times (1 \times 185 + 25) \text{ mm}^2$ XLPE, istasyonlar arası OG kablolar $3 \times (1 \times 150 + 25) \text{ mm}^2$ XLPE'dir.

2002 Ağustos ayında yolculu işletime başlayan Bursaray'ın o gün için mevcut iki adet enerji besleme koluna kesilen elektrik faturalarında kapasitif reaktif cezalar görölüyordu. Faturalarda görülen kapasitif reaktif enerjinin kaynağını tesbit etmek için her iki kolda ölçüm ve incelemeler yapıldı. Ölçümler esnasında kapasitif reaktif enerji problemi yanında her iki besleme kolunda, benzer baskın akım harmonikleri tesbit edildi. Bu nedenle, her iki güç kalitesi problemini dikkate alan çözüm yöntemleri incelenmiştir.

Bu çalışmada, Bursaray OG yeraltı kablolarının kaçak kapasitanslarının ürettiği kapasitif reaktif gücün kompanze edilmesi ve cer gücünü sağlayan 12 darbeli doğrultucuların yaratmış olduğu baskın 11. ve 13. akım harmoniklerinin filtrelenmesi amacıyla tristör anahtarlamalı şönt reaktör (TAŞR) ve akım kaynaklı aktif güç filtresine dayalı sistemin tasarım, benzetim ve uygulama çalışmaları sunulmuştur. Sunulan veriler 2003 ile 2008 yılları arasında yapılan çalışmaları kapsamaktadır.

Sistemlerin devreye alınmasıyla gerek aylık olarak reaktif enerji tüketimlerinin gerekse akım harmoniklerinin yasal yönetmeliklerde verilen sınır değerleri karşılaması sağlanmıştır.

A STUDY OF FUNDAMENTAL POWER PROBLEMS EFFECTING POWER QUALITY ON THE LIGHT RAIL TRANSPORTATION ENERGY SYSTEMS AND COMPARISON OF THE SOLUTION METHODS

SUMMARY

In this thesis, power quality conditions were analyzed on electrical network of modern light rail transportation system, which is the most important solution of transportation problems of the Metropolitan cities and particularly studied on traction power supply system of Bursa Light Rail Transportation System (Bursaray), which was started passenger operation in 2002.

Power supply system of Bursaray has been feeding from four feeders on the two separate switchyards of TEIAS since 2008. There are seven substations for traction power and eight substations for tunnel ventilation system in the medium voltage ring of Bursaray. In each traction substation there are 12 pulse power rectifiers supplying feeding voltage of 1500 V DC, which is necessary for train movement. The cross-section of cables are $3 \times (1 \times 185 + 25) \text{ mm}^2$ XLPE for MV cables between first substation and switchyard and $3 \times (1 \times 150 + 25) \text{ mm}^2$ XLPE for MV cables between the substations.

The limit value of capacitive reactive energy consumption on the invoices belongs to existing two feeders had been exceeding when Bursaray started passenger operation in august 2002. The measurement and analyses were made on the two feeders in order to find out the reason of capacitive ractive energy. The selective current harmonics on these feeders were realized together with capacitive reactive energy problem during measurement. For this purpose, solution methods were studied considering these two power quality problems.

In this study, it is presented that design, simulation and applying works of the system based on current source active power filter for selective harmonic elimination of 11. and 13. current harmonics by produced 12 pulse power rectifiers and of thyristor switched shunt reactor for compensation of capacitive reactive power by produced leakage capacitances of medium voltage underground cables The presented data include all works between 2003 and 2008.

It was supplied that not only limit values of current harmonics given by legal regulations but also consumption of reactive energy in monthly when the systems started up.

1. GİRİŞ

Son yıllarda yarı-iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak doğrusal olmayan yüklerin kullanımında yaşanan artış birtakım problemleri de beraberinde getirmiştir. Doğrusal olmayan yükler, elektrik şebekesinden harmonik ve reaktif güç bileşeni içeren akım talep ederler. Ayrıca bu yükler, üç-fazlı elektrik sistemlerinde dengesizliğe sebep olabilirler ve sistemden aşırı nötr-akım çekebilirler. Harmonik basımı, reaktif güç yüklemesi, dengesizlik ve aşırı nötr-akımları sistem verimliliğinin düşmesine ve güç faktörünün kötüleşmesine sebebiyet vermektedir [1]. Şebekedeki diğer kullanıcılar için de problem teşkil eden bu olumsuzluklar, güç kalitesi sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmuşlardır. Güç kalitesi, elektrik güç sisteminde belli bir yerde ve belli bir anda akım ile gerilimi tanımlayan çeşitli elektromanyetik olguları kapsamaktadır [2]. Elektrik enerjisi arzının sürekliliği, frekans, gerilimin etkin değeri, gerilimde geçici süre için oluşan çukur (sag) ve tepeler (swell), kırpışma (flicker), gerilim ve akım dalga şekillerinde oluşan harmonik bileşenler, fazlar arası dengesizlik, ani gerilim değişimleri güç kalitesi bileşenleri olarak sayılır. Özellikle tüketicilerin kesintisiz ve daha kaliteli enerji taleplerine cevap vermeyi amaçlayan hizmet sağlayıcılar, sistemin işletilmesinde problemler teşkil eden güç kalitesi kavramına daha fazla önem vermeye başlamışlardır. Bunun bir yansıması olarak uluslararası standartlarda kendine yer bulan birçok güç kalitesi kavramı ile bunlara ilişkin sınır değerler ve yaptırımlar, yönetmeliklerde ve tebliğlerde de yer bulmaya başlamıştır [3,4,5].

Güç kalitesi kavramının dolaylı ancak ayrılmaz bir parçası olan reaktif güç akışının kontrolü, iletim ve dağıtım sisteminde yeni sınır değerlerin gündeme gelmesine sebep olmuştur. Bunun sonucunda 2004 yılının Kasım ayı itibarıyla bütün alçak gerilim (AG) ve orta gerilim (OG) kullanıcılarının aylık olarak endüktif ve kapasitif reaktif enerji tüketimlerinin aktif enerji tüketimlerine oranı sırasıyla % 20 ve % 15 olacak şekilde sınırlandırılmıştır [4]. Bunun yanında daha önce iletim sistemi kullanıcıları için tanımlanan akım harmonikleri sınır değerlerinin, dağıtım sistemi kullanıcıları içinde geçerli olmasıyla birlikte, reaktif güç kompanzasyonu ile akım

harmoniklerinin filtrelenmesinin beraber düşünülmesini kaçınılmaz kılmıştır [3]. Ancak hem AG hem de OG müşterilerinin birçoğunun reaktif güç kompanzasyon sistemleri tesis ederken akım ve gerilim harmoniklerini dikkate almadan yaptıkları uygulama çalışmaları, güç kalitesi açısından yeni problemleri de beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, bazı uygulamalarda özgün koşullardan kaynaklı olarak konvansiyonel yöntemler kullanılarak hem reaktif güç akışını hem de akım harmoniklerinin denetim altında tutulması mümkün olmamaktadır. Özellikle Ortak Bağlantı Noktasında (OBN) birden fazla bozucu etki yaratan kullanıcının olası ya da reaktif güç ihtiyacının görece az ancak şebekeye basılan akım harmoniklerinin fazla olması gibi koşullarda, uygulana gelen pasif filtre sistemlerine dayalı konvansiyonel güç kalitesi düzenleyici sistemler kullanıcıların problemlerine çözüm sağlamamaktadır. Bu gibi koşulların olduğu durumlarda konvansiyonel sistemler yerine, modern yarı iletken teknolojilerine dayalı aktif kontrol olanağı sunan sistemler kullanılmaya başlamıştır.

Akım harmoniklerinin filtrelenmesi ve reaktif güç akışının kontrol edilmesi için kullanılan en yaygın teknoloji aktif güç filtreleridir. Aktif güç filtreleri, problemin türüne ve kullanılan devre elemanlarına göre yapısal farklılıklar göstermektedir.

En genel anlamda aktif güç filtreleri, devre yapısına göre akım ve gerilim kaynaklı; sisteme bağlantı şekline göre ise seri veya paralel aktif güç filtreleri olarak adlandırılmaktadır. Gerilim kaynaklı aktif güç filtrelerinin düşük maliyet ve boyut, yüksek verimlilik gibi özellikleri ön plana çıkarken, akım kaynaklı aktif güç filtrelerinin hızlı tepki süresi, kolay kontrol yapıları ve doğal koruma özellikleri ön plana çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderlerindeki reaktif enerji ve akım harmonikleri problemlerini gidermek için yapılan tasarım, benzetim ve uygulama sonuçları verilmektedir. Bu amaçla, incelemek ve çözüm bulmak amacıyla 2003 yılında sözü edilen fiderlerde ölçüm ve inceleme yapılmıştır. İlk etap da bahsi geçen fiderlerin reaktif enerji problemlerinin çözümüne ilişkin yatırımlar yapılmıştır. Akım harmoniklerine yönelik tebliğlerin yayınlanması ile birlikte bu problemin çözümüne ilişkin olarak 2007 senesinde Bursaray-2 fiderine TÜBİTAK Kamu Kurumları Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Program Kodu: 1007) kapsamındaki 105G129 no'lu "Türkiye Elektrik Sistemi'nde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Akışını İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin

Hayata Geçirilmesi Projesi”, “OG Aktif Güç Filtresi” alt projesi kapsamında yatırım yapılmıştır.

Mevcut problemlerin çözümüne ilişkin öneriler geliştirmek amacıyla aşağıdaki bulgular göz önüne alınmıştır:

1. Aylık elektrik faturalarındaki aktif ve reaktif enerji tüketimleri,
2. Ana barada ve istasyonlarda kesintisiz 24 saatlik zaman diliminde yapılan ölçüm ve kayıtlar,
3. Sistemin özellikleri ve işletme stratejilerine ilişkin bilgi, belge ve öneriler,
4. Konu ile ilgili standartlar [6-13].

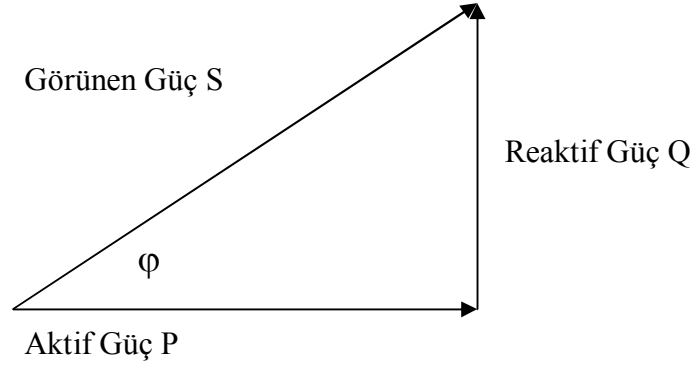
1.1 Sistem Tanımı

Bursaray OG dağıtım sistemi, doğrudan TEİAŞ Beşevler İndirici Merkezi’nden 100 MVA, 154/34,5 kV trafo çıkışından iki adet fider ile beslenmektedir. İndirici merkezden gelen yeraltı kablosu Bursaray-1 fideri için ilk istasyon olan, SS03 cer trafo istasyonuna girmektedir.

İndirici merkez ile SS03 istasyonu arasındaki bağlantı 5750 m, 3 x (1 x 185 mm²); cer ve servis trafolarının bulunduğu ara istasyonlar arası bağlantı ise toplamda 5380 m, 3 x (1 x 150 mm²) yeraltı kablosu ile sağlanmaktadır. İndirici merkezden gelen diğer yeraltı kablosu Bursaray-2 fideri için ilk istasyon olan, SS07 cer trafo istasyonuna girmektedir. İndirici merkez ile SS07 istasyonu arasındaki bağlantı 2385 m, 3 x (1 x 185 mm²); cer ve servis trafolarının bulunduğu ara istasyonlar arası bağlantı ise toplamda 16495 m, 3 x (1 x 150 mm²) yeraltı kablosu ile sağlanmaktadır.

OG dağıtım sistemi içersinde 7 adet cer trafo istasyonu, 8 adet tünel havalandırma sistemi besleme istasyonu vardır. Her bir cer trafo istasyonunda trenlerin hareket için ihtiyaç duydukları 1500 volt doğru gerilimi sağlayan 12 darbeli doğrultucular mevcuttur.

1.2 Güç Üçgeni ve Güç Faktörü



Şekil 1.1 : Güç üçgeni.

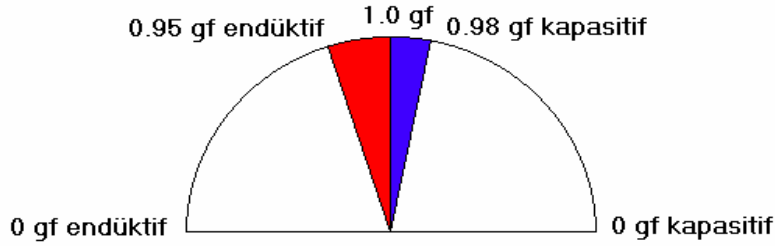
$$S = P + jQ = VI^*$$

$$\text{Güç faktörü, } gf = \cos \varphi$$

- Birimsizdir
- $0 \leq gf \leq 1$

Yükün kapasitif veya endüktif olduğunu anlamak için güç faktörünün yanında endüktif veya kapasitif terimlerini belirtmek gerekir.

1.3 Yasal Düzenlemeler



Şekil 1.2 : Güç faktörü.

Bu tezin konusu olan Bursaray fiderlerinin güç kalitesi problemlerinden reaktif güç akışının düzenlenmesi esnasında geçerli olan ulusal yönetmelik, 2000 yılında ETKB tarafından hazırlanan yönetmelik olup, bu yönetmelik gereğince; aylık ortalama güç faktörünün (gf)

- 0.95 - 1.0 endüktif ve
- 0.98 - 1.0 kapasitif

aralığında gerçekleşmesi gerekmektedir [7].

Kabul edilebilir çalışma bölgesi yukarıdaki şemada endüktif bölge için kırmızı, kapasitif bölge için mavi renk ile işaretlenmiştir.

Aylık elektrik faturaları bazında, tüketilen aktif enerjinin (MWh)

- % 33 ve üzeri endüktif bölgede reaktif enerji (MVarh) ve/veya
- % 20 ve üzeri kapasitif bölgede reaktif enerji (MVarh)

tüketilmesi durumunda hem endüktif hem kapasitif reaktif enerji bedeli ödenir. Fakat bu çalışmalar esnasında ulusal yönetmelikte yapılan yeni düzenlemelerden haberdar olup tasarım çalışmalarında bunlar dikkate alınmıştır. 2004 Kasım ayında yayınlanan tebliğ ile aylık elektrik faturaları bazında, tüketilen aktif enerjinin (MWh)

- % 20 ve üzeri endüktif bölgede reaktif enerji (MVarh) ve/veya
- % 15 ve üzeri kapasitif bölgede reaktif enerji (MVarh)

tüketilmesi durumunda hem endüktif hem kapasitif reaktif enerji bedeli ödenir [4].

Şebekeye bağlı, gerilim ve akımı arasında doğrusal bağıntı bulunan doğrusal yükler yanında gerilimi ve akımı arasında doğrusal bağıntı bulunmayan doğrusal olmayan yükler de mevcut olduğu için ideal elektrik şebekesi mümkün değildir. Doğrusal olmayan bir yüke sinüzoidal gerilim uygulandığında bu yük şebekeden sinüzoidal olmayan akım çeker. Doğrusal olmayan yüklerin talep ettikleri akımların temel frekanstaki bileşeni dışında kalan bütün bileşenlerine harmonik denmektedir. 12 Eylül 2006 tarihli “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticaret ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik” hükümleri uyarınca Çizelge 1.1’de akım harmonikleri için maksimum yük akımına göre verilmiş sınır değerler görülmektedir [3].

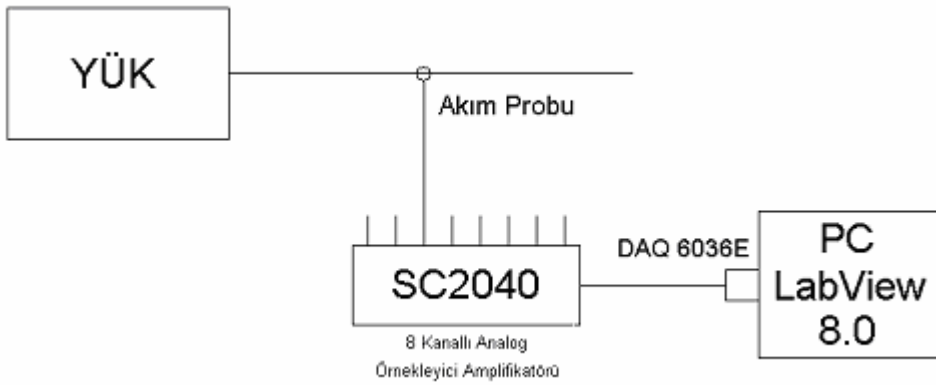
Çizelge 1.1 : Akım harmonikleri için maksimum yük akımına (IL) göre sınır değerler.

Tek Harmonikler						
I_{SC}/I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TTB
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

1.4 Ölçme Tekniği ve Veri Toplama Sistemi

Ölçme sisteminde National Instruments firmasına ait SC2040 model sekiz kanal eş zamanlı olarak örnekleme yapabilen analog signal örnekleyci diferansiyel kuvvetlendirici (amplifikatör) kullanılmıştır. Bu cihazın her kanalı ± 10 V giriş düzeyine sahiptir. Çarpan 10 olarak set edilmiştir. Faz akımları için akım trafolarının sekonderlerine akım probları takılmıştır (100 mV/A).

SC2040'ın maksimum örnekleme kapasitesi 12,8 kS/s dir. SC2040'ın örneklediği sinyaller, DAQ 6036 E veri toplama kartı üzerinden National Instruments firmasının LabVIEW 8.0 programının kurulu olduğu bilgisayara aktarılır. LabVIEW her bir dakikalık kayıt için bir dosya oluşturur.



Şekil 1.3 : Veri toplama sistemi.

2. BURSARAY HAFİF RAYLI SİSTEMİ TEMEL GÜÇ PROBLEMLERİ AA DAĞITIMDA KAPASİTİF REAKTİF GÜÇ AKIŞININ DÜZENLENMESİ

2.1 Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemi İçin Temel Ölçütler

Bursaray-1 ve Bursaray-2 besleme kollarında bulunan uzun OG yeraltı kabloları, kaçak kapasitelerinden dolayı baskın kapasitif reaktif yük tipini oluşturduğu için geliştirilip tasarlanması gereken reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin temel özellikleri aşağıda sıralandığı gibi olmalıdır:

- Endüktif bölgede kompanzasyon yapma yeteneği
- Şebekede mevcut harmonik bileşenlerle etkileşime girmeme özelliği
- Bağlandığı baradaki gerilimlerinde devreye girme ve devreden çıkma anlarında yüksek gerilim oluşturmama özelliği

2.2 Bursaray Fiderlerinde Güç Kalitesi Problemlerinin Saptanması İçin Uygulanan Ölçüm ve Hesap Yöntemleri

Reaktif güç kompanzasyonu ve filtreleme ihtiyaçlarının saptanması ve ilgili sorunun başarılı bir şekilde çözümüne yönelik katkı sunulması için olabildiğince çok veriye gereksinim duyulmaktadır. Bursaray işletmesinde yükün güç değişimlerinin gece ve gündüz farklılık göstermesi ve bu süreçlerde de yükün değişken olması bu ihtiyacı daha fazla artırmaktadır. Sahada yapılan ölçümler şu şekilde özetlenebilir:

1. Ana baralarda (Bursaray-1 ve Bursaray-2 34,5 kV fiderleri) faturalandırmaya esas sayaçların bulunduğu noktalarda ve gerekli görülen istasyonlarda akım ve gerilim 24 saat kayıt edilmiştir. Sinyal örnekleme hızı 3,2 kS/s seçilmiştir [14]. Analiz için her bir elektriksel büyüklüğün 10 periyotluk çerçevesine bakılır [14]. Harmonik izleme için MATLAB'da 5 Hz çözünürlükte (veriler sayısal olduğundan) bir FFT algoritması (fast Fourier transform) çalıştırılmıştır [15]. Bu, bir periyot (20 ms) boyunca 64 adet örnek alınması demektir. Her bir fider veya bara için iki faz-faz

gerilimi ve iki faz akım bilgisi kaydedilmiştir. Şebeke frekansının sabit ve 50 Hz olduğu kabul edilmiştir [14]. Bu veriler daha sonra bilgisayar yardımıyla işlenerek aşağıda verilen büyüklüklerin zamanla değişimleri elde edilmiştir. Güç grafikleri için kullanılan eşitlikler (2.1)-(2.4)'te verilmiştir.

- Görünen güç, kVA
- Aktif güç, kW
- Reaktif güç, kVAr
- Akımın etkin değeri, A
- Gerilimin etkin değeri, kV
- Güç faktörü
- Akım ve gerilim için Toplam Harmonik Bozulma, THB %
- Akım harmonik bileşenlerinin 31. harmoniğe kadar etkin değerleri, A

2. Yukarıda belirtilen veri toplama sisteminin yanı sıra Güç Kalitesi Analizörü de bağlanarak 24 saat kesintisiz kayıtlar alınmıştır. Güç Kalitesi Analizörü bağlanan akım ve gerilim sinyallerinin 24 saat boyunca 8-10'ar dakikalık aralıklarla

- Maksimum değeri
- Ortalama değeri
- Minimum değeri

hesaplar ve zamanla değişimlerini belleğinde saklar.

$$P = V_{AB} \cdot I_A + V_{CB} \cdot I_C \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{AB} \cdot I_C - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{CB} \cdot I_A \quad (2.2)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.4)$$

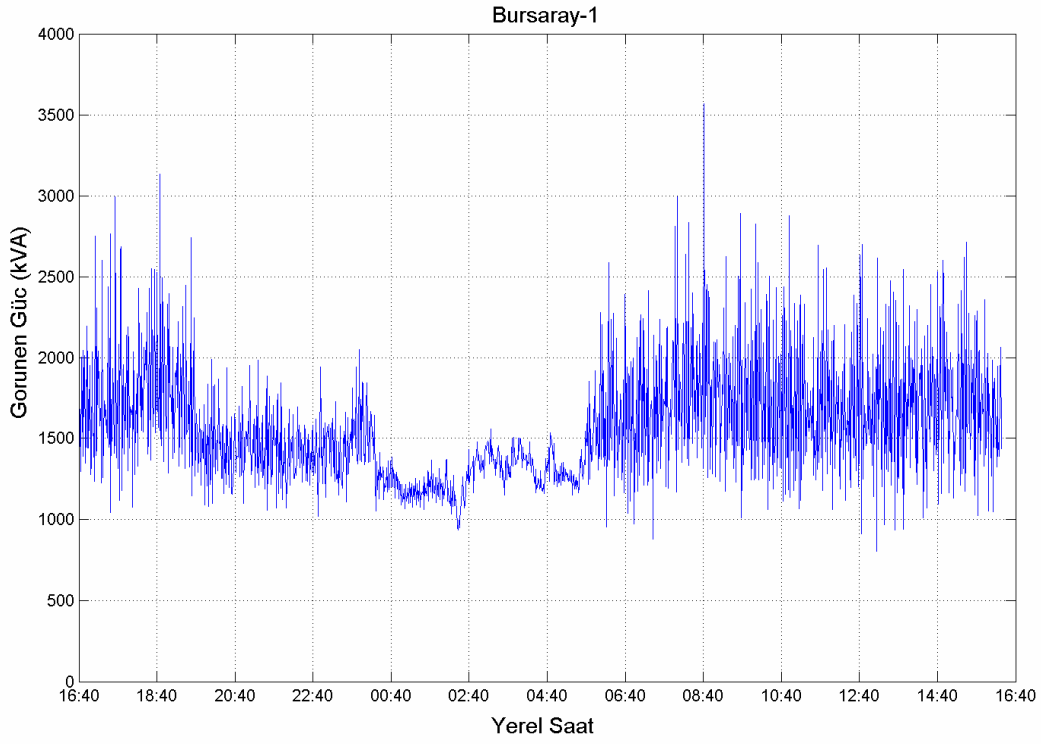
Bu ölçümler sonucunda elde edilen verilerle Matlab, EMTDC/PSCAD programları kullanılarak mevcut durum analizine ve olası çözümlere ulaşılmıştır.

Öncelikle faturalandırmaya esas sayaçların bulunduğu 34,5 kV fiderlerinden (Bursaray-1 ve Bursaray-2) bilgisayar yardımıyla 24 saat süreyle ölçümler alınmıştır. Bu esnada Bursaray-2 hattının başına ve sonuna Güç Kalitesi Analizörü bağlanarak gerilimin değişimi izlenmiş ve kaydedilmiştir. Mevcut sistemin benzetimlerini gerçekleştirebilmek ve yük değişimlerini istasyon bazında görebilmek amacıyla SS-03 ve SS-04 istasyonlarından veri toplama sistemi ile ölçümler alınmıştır. Ayrıca olası bir çözümün gerçekleşmesinde kullanılması olası olan atölyede mevcut 2 MVA servis trafosundan da veri toplama sistemi ile 24 saat kesintisiz ölçüm gerçekleştirilmiştir.

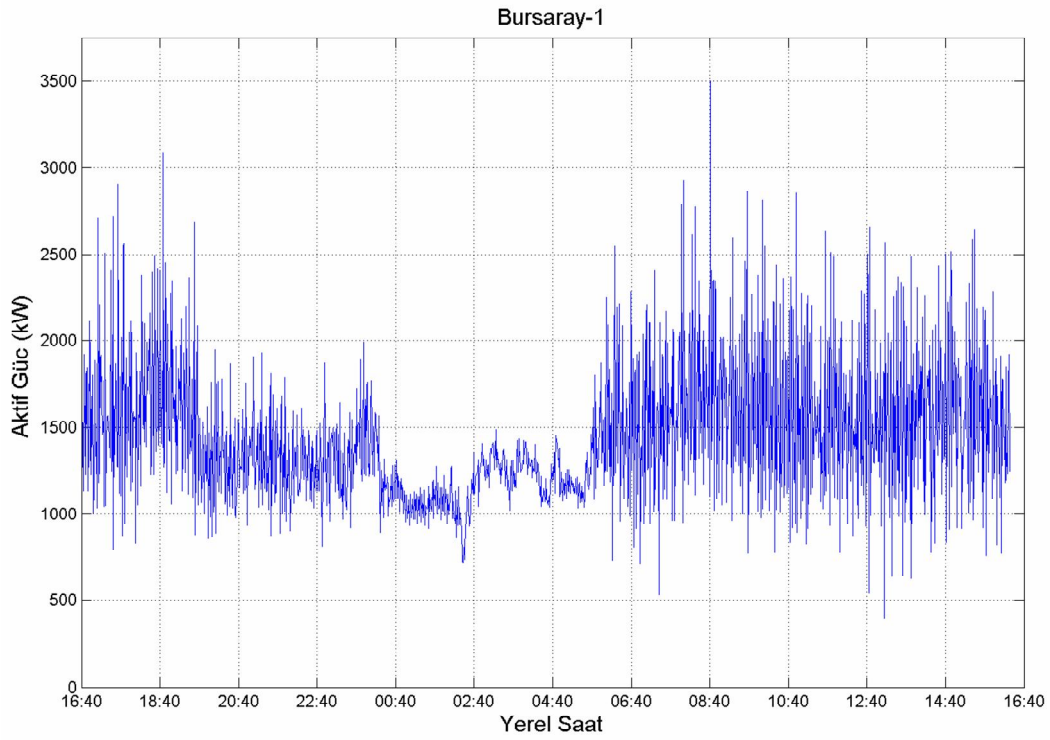
Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderlerinin önemli karakteristikleri ayrı ayrı verilmekte ve olası çözüm yöntemleri açısından önemli olan noktalara değinilmektedir. Ayrıca olası çözüm yöntemlerini saptamak ve yapılabirlik/teknik uygunluk açısından değerlendirmek amacıyla atölyede mevcut servis trafosu karakteristikleri, Güç Kalitesi Analizörü kayıtları ve gerçekleştirilen deneylerin ve benzetimlerin sonuçları da verilmektedir.

2.3 Bursaray-1 Fideri Kompanzasyon Öncesi Ölçüm Sonuçları ve Saptamalar

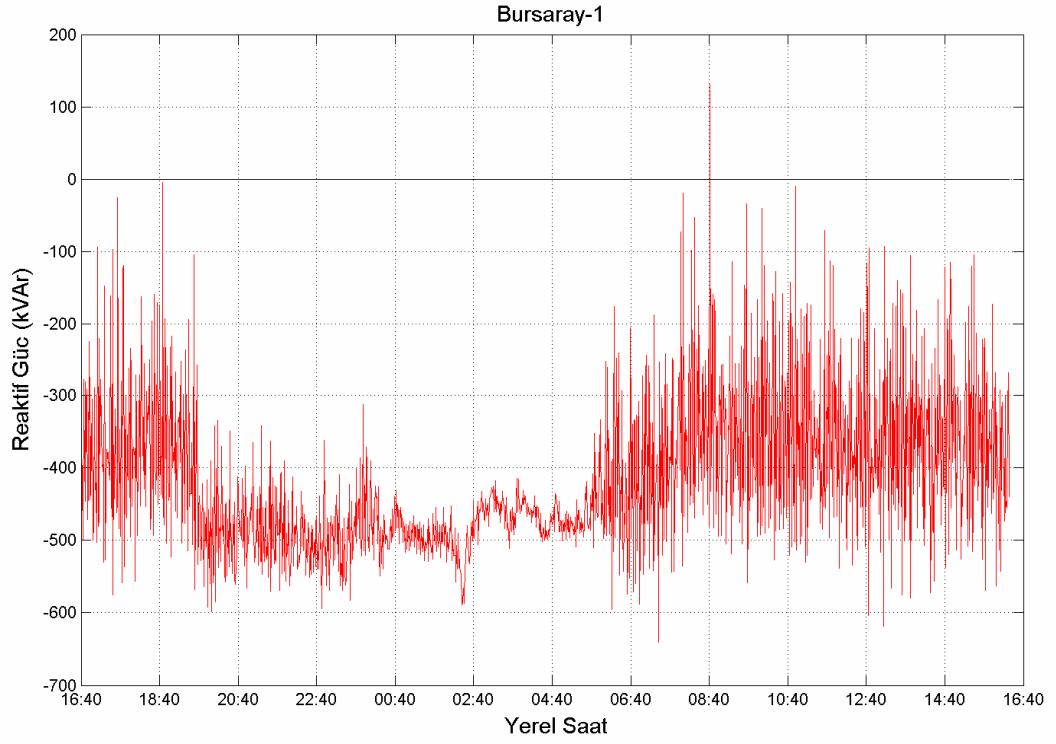
34,5 kV Bursaray-1 fiderinde yapılan ölçüm esnasında, ölçüm yapılan noktada bulunan faturalandırmaya esas sayacın endeks değerleri de kaydedilerek ölçüm sonuçları sayaç okumaları ile karşılaştırılmıştır. Bursaray-1 fiderinin görünen, aktif, reaktif güç ve güç faktörü değişimleri, akım-gerilim ana bileşenlerinin etkin değerlerinin değişimi Şekil 2.1-2.6'da verilmiştir.



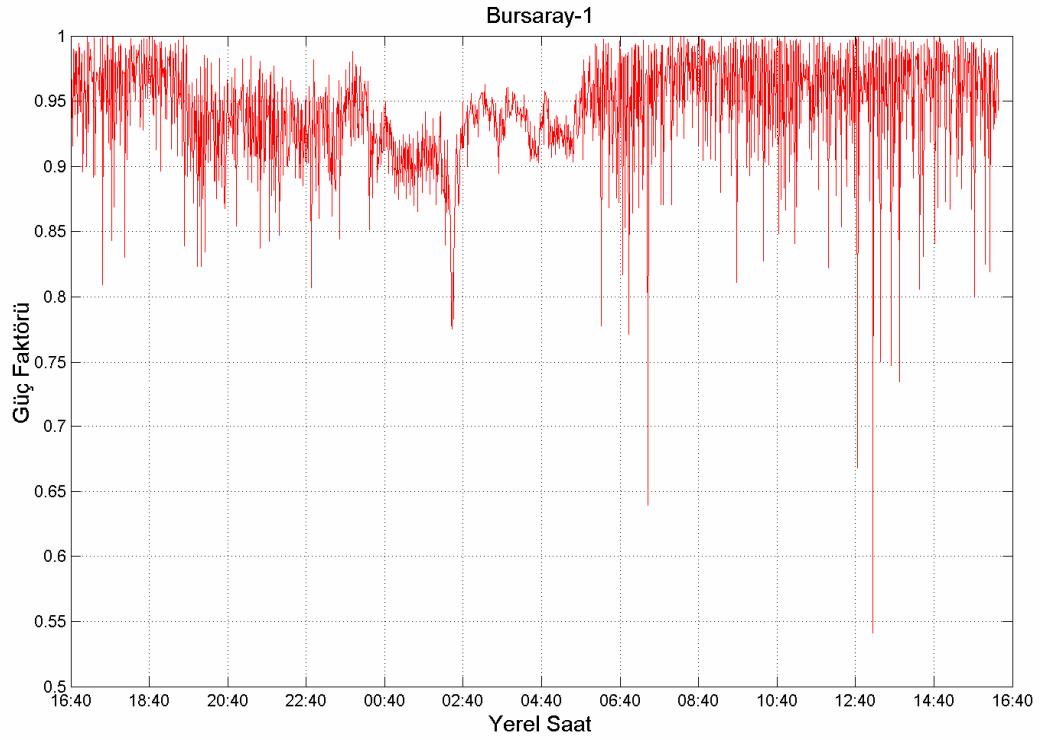
Şekil 2.1 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).



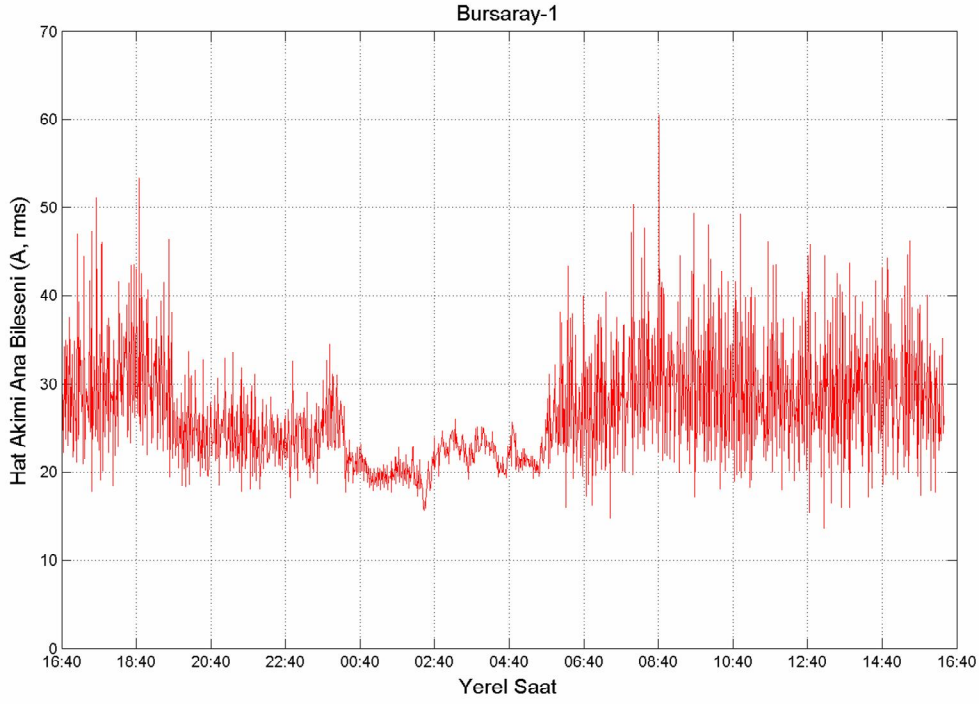
Şekil 2.2 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).



Şekil 2.3 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).

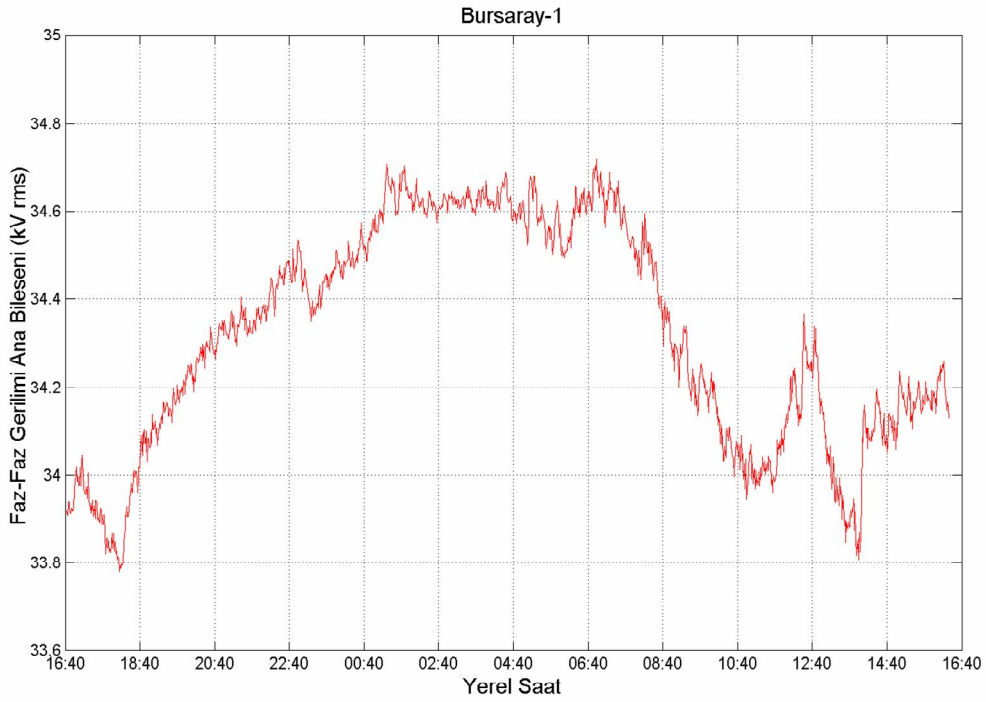


Şekil 2.4 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca güç faktörü değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).



Şekil 2.5 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).

Şekil 2.5 ve 2.6’da akımın ana bileşeni ile gerilimin ana bileşeninin günlük değişimleri görülmektedir.



Şekil 2.6 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca gerilim ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).

24 saatlik zaman diliminde bilgisayara kaydedilen ölçüm sonucunda hesaplanan enerji tüketimleri ve faturalandırmaya esas sayaçtan okunan enerji tüketimleri aşağıda verilmiştir:

- Bilgisayarda hesaplanan enerji tüketimleri
 - Aktif enerji tüketimi
 $P = 34.030 \text{ kWh}$
 - Endüktif reaktif enerji tüketimi
 $Q_L = 306 \text{ kVArh}$
 - Kapasitif reaktif enerji tüketimi
 $Q_C = 10.160 \text{ kVArh}$
- Sayaçtan okunan enerji tüketimleri
 - Aktif enerji tüketimi
 $P = 33.660 \text{ kWh}$
 - Endüktif reaktif enerji tüketimi
 $Q_L = 396 \text{ kVArh}$
 - Kapasitif reaktif enerji tüketimi
 $Q_C = 10.296 \text{ kVArh}$

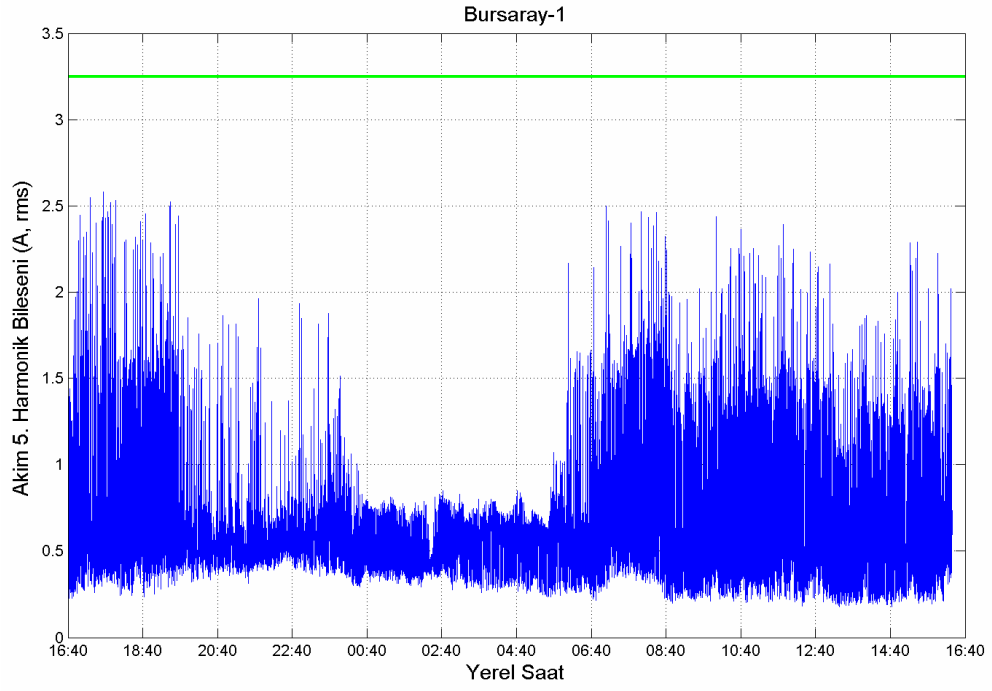
İki farklı yöntemle bulunan enerji tüketimlerindeki küçük farklar sayacın göstergesindeki yuvarlamadan ve ölçümden gelen hatalardan kaynaklanmaktadır. Ölçüm sonuçlarının ve sayaç okumalarının yaklaşık aynı oldukları bu değerlerden anlaşılmaktadır.

Çizelge 2.1’de Bursaray-1 fiderinde ölçülen akım harmoniklerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri, etkin değer (rms) ve maksimum yük akımının yüzdesi şeklinde verilmektedir. Konu ile ilgili standartlar göz önüne alınarak önem arz eden akım harmoniklerinin zamana karşı değişimi ve standartlarda belirtilen limit değerleri ise Şekil 2.7-2.14’de gösterilmektedir [6,9,12].

Bu değerlendirmede kullanılan varsayımlar şunlardır: TEDAŞ yetkilileri tarafından daha önce yapılan incelemelerde verilen raporda I_{SC}/I_n oranı 50-100 arasında belirtilmektedir. Burada standartlarda belirtilen sınır değerleri bulmak amacıyla bu veri kullanılmıştır. Ayrıca Bursaray-1 fideri için 15 dakikalık maksimum güç talebi 1,94 MVA olarak bulunmuş ve buna karşılık gelen akım değeri $I_n = 32,47 \text{ A}$ hesaplanmıştır. Bursaray-2 fideri için ise maksimum güç talebi 2,22 MVA ve akım değeri $I_n = 37,15 \text{ A}$ olmaktadır.

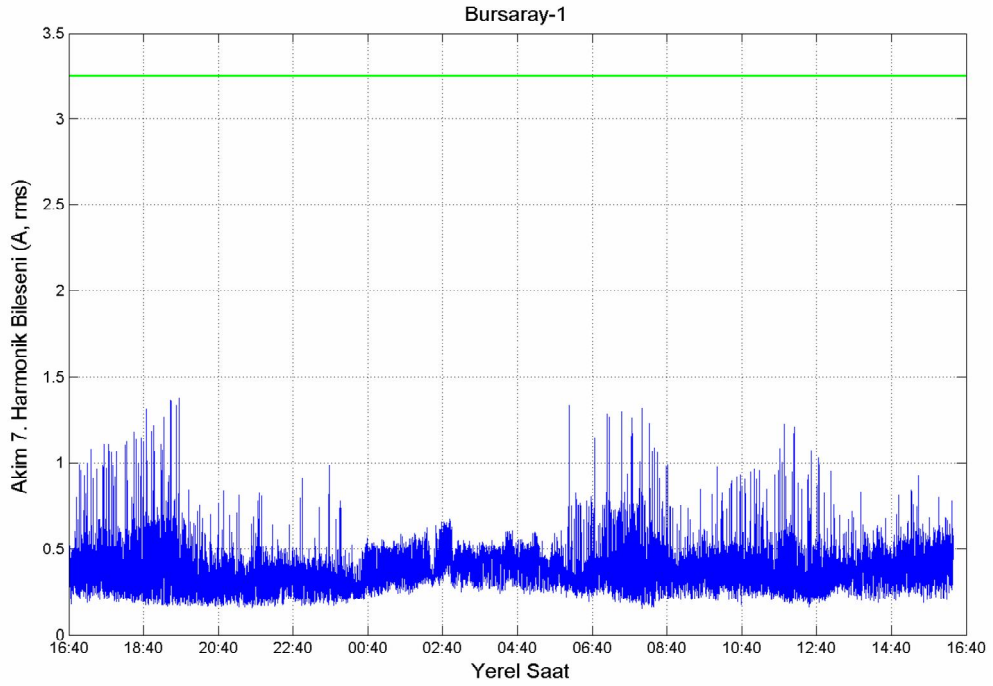
Çizelge 2.1 : Bursaray-1 fideri ölçülen akım harmonikleri.

Harmonik Sırası	Toplam Yük Akımının Yüzdesi, (%) (I_k/I_L)				Etkin Değer, (A-rms) (I_L)		
	Minimum	Ortalama	Maksimum	Sınır Değer	Minimum	Ortalama	Maksimum
2	0,45	0,58	6,67	2,5	0,15	0,19	2,17
3	0,85	1,48	5,66	10	0,28	0,48	1,84
4	0,53	0,63	4,49	2,5	0,17	0,20	1,46
5	0,55	1,99	7,96	10	0,18	0,65	2,58
6	0,44	0,53	2,26	2,5	0,14	0,17	0,73
7	0,47	1,15	4,25	10	0,15	0,37	1,38
8	0,44	0,51	0,96	2,5	0,14	0,17	0,31
9	0,44	0,56	1,00	10	0,14	0,18	0,33
10	0,43	0,52	0,89	1,13	0,14	0,17	0,29
11	0,48	4,21	17,71	4,5	0,16	1,37	5,75
12	0,43	0,54	1,03	1,13	0,14	0,17	0,34
13	0,48	2,43	13,79	4,5	0,16	0,79	4,48
14	0,43	0,52	0,78	1,13	0,14	0,17	0,25
15	0,45	0,59	1,76	4,5	0,15	0,19	0,57
16	0,43	0,52	0,72	1	0,14	0,17	0,23
17	0,45	0,98	3,73	4,0	0,15	0,32	1,21
18	0,43	0,52	0,71	1,0	0,14	0,17	0,23
19	0,45	0,67	2,03	4,0	0,15	0,22	0,66
20	0,43	0,52	0,65	1,0	0,14	0,17	0,21
21	0,45	0,60	1,68	4,0	0,15	0,20	0,54
22	0,43	0,52	0,77	0,38	0,14	0,17	0,25
23	0,48	1,26	6,44	1,5	0,16	0,41	2,09
24	0,43	0,54	0,81	0,38	0,14	0,17	0,26
25	0,46	0,91	5,00	1,5	0,15	0,29	1,62
26	0,43	0,52	0,69	0,38	0,14	0,17	0,22
27	0,45	0,70	2,67	1,5	0,15	0,23	0,87
28	0,43	0,52	0,71	0,38	0,14	0,17	0,23
29	0,47	1,05	4,15	1,5	0,15	0,34	1,35
30	0,43	0,52	0,70	0,38	0,14	0,17	0,23
31	0,45	0,59	1,44	1,5	0,15	0,19	0,47

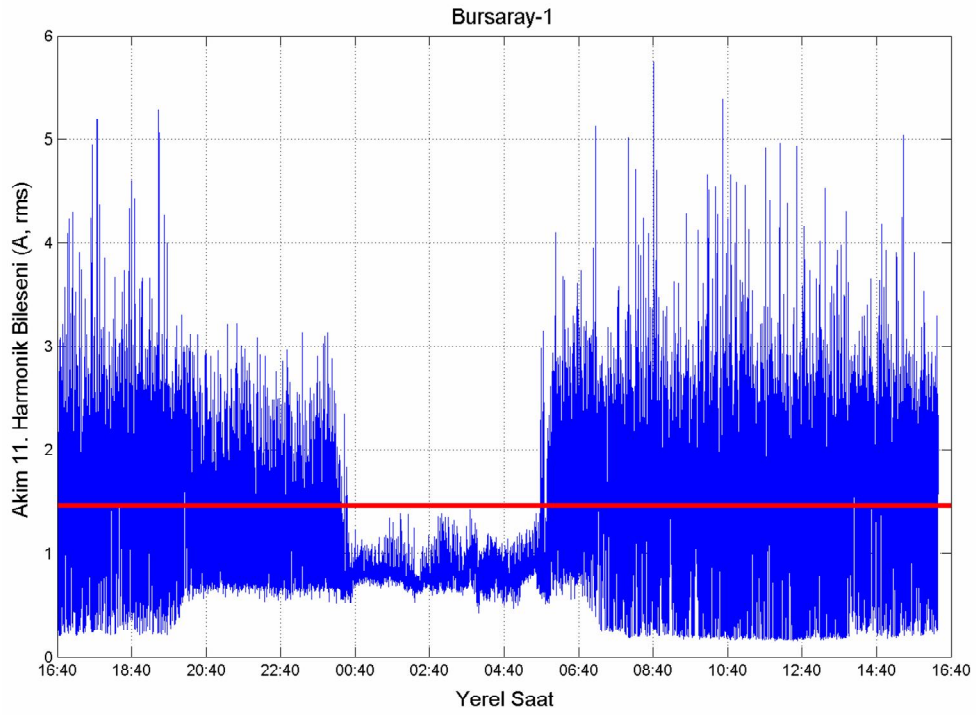


Şekil 2.7 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 5. harmonik bileşeninin değişimi.

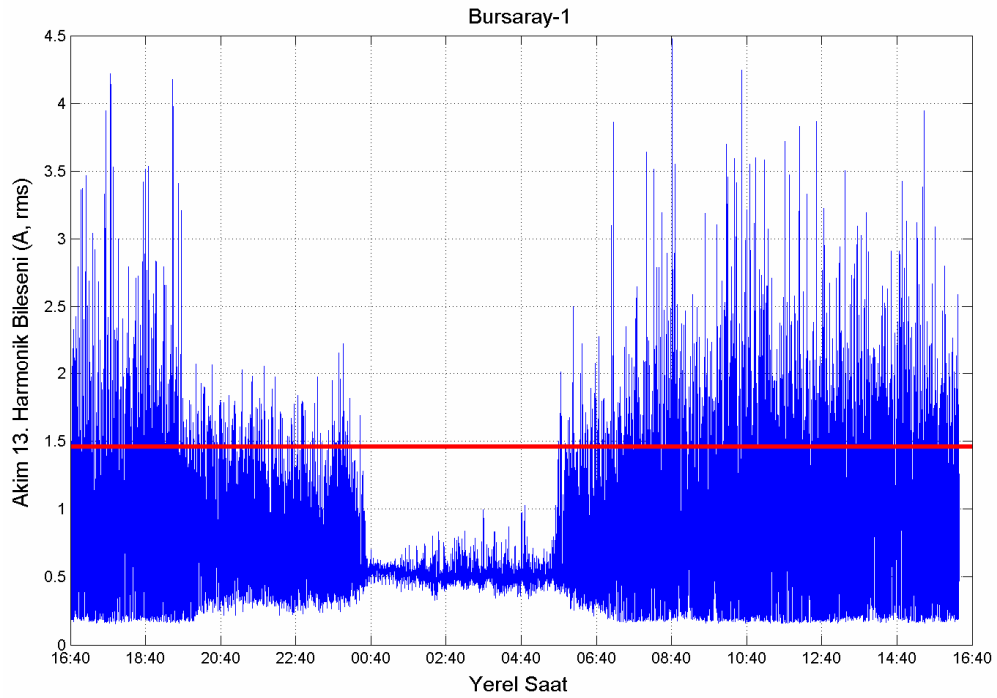
Şekil 2.7 ve 2.8’de Bursaray 1 nolu besleme koluna ait akımın 5. ve 7. harmonik bileşenlerinin değişimi görülmektedir. Grafiklerdeki yeşil çizgi standartlara göre sınır değerleri göstermektedir.



Şekil 2.8 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 7. harmonik bileşeninin değişimi.

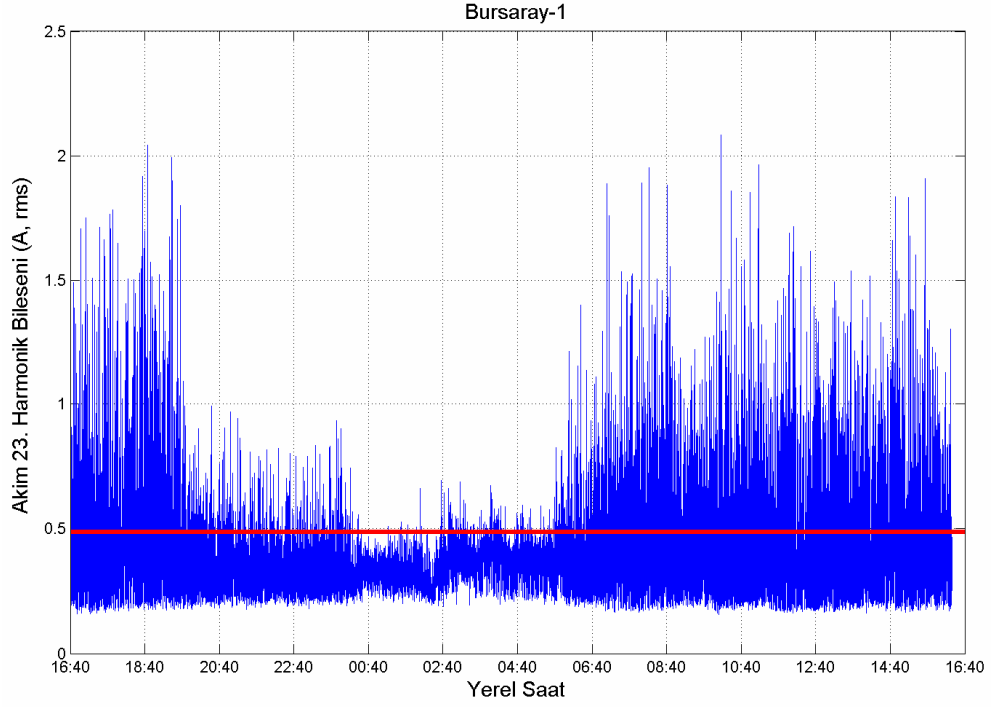


Şekil 2.9 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 11. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).

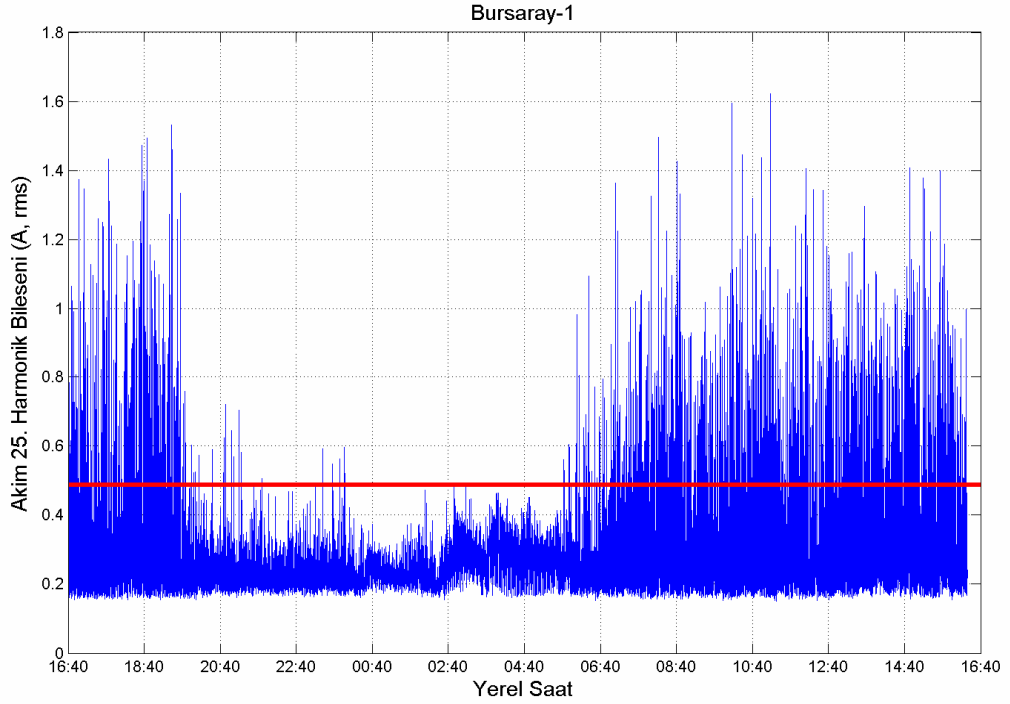


Şekil 2.10 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 13. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).

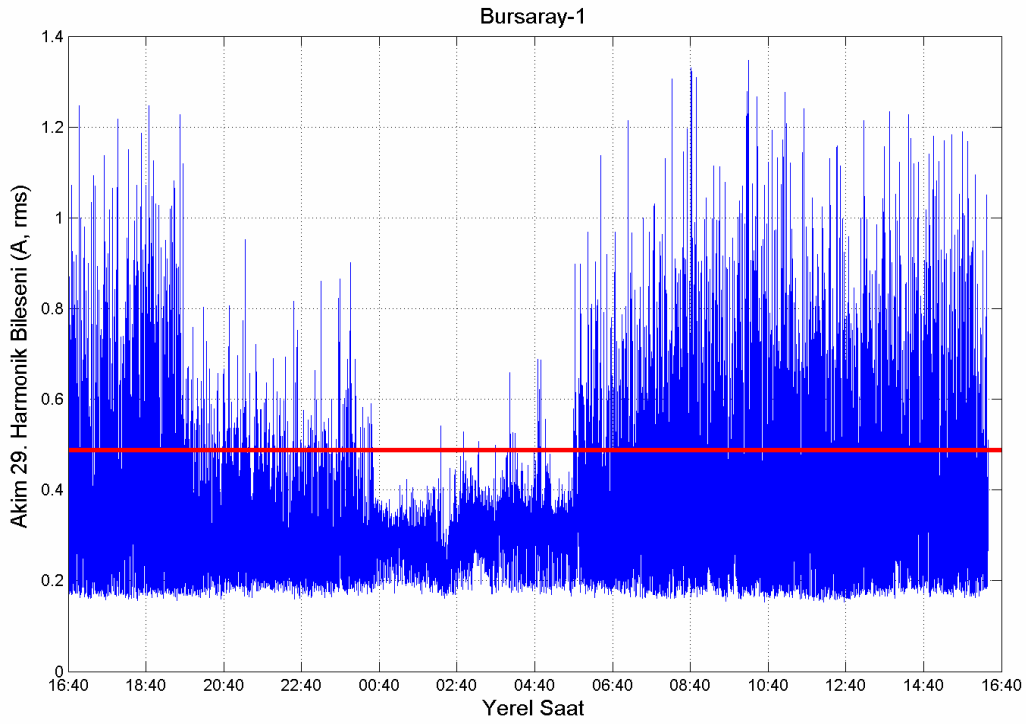
Şekil 2.11 ve 2.12’de Bursaray’ın 1 numaralı besleme koluna ait akımın 23. ve 25. harmonik bileşenlerinin değişimi görülmektedir. Grafiklerdeki kırmızı çizgi standartlara göre sınır değerleri göstermektedir.



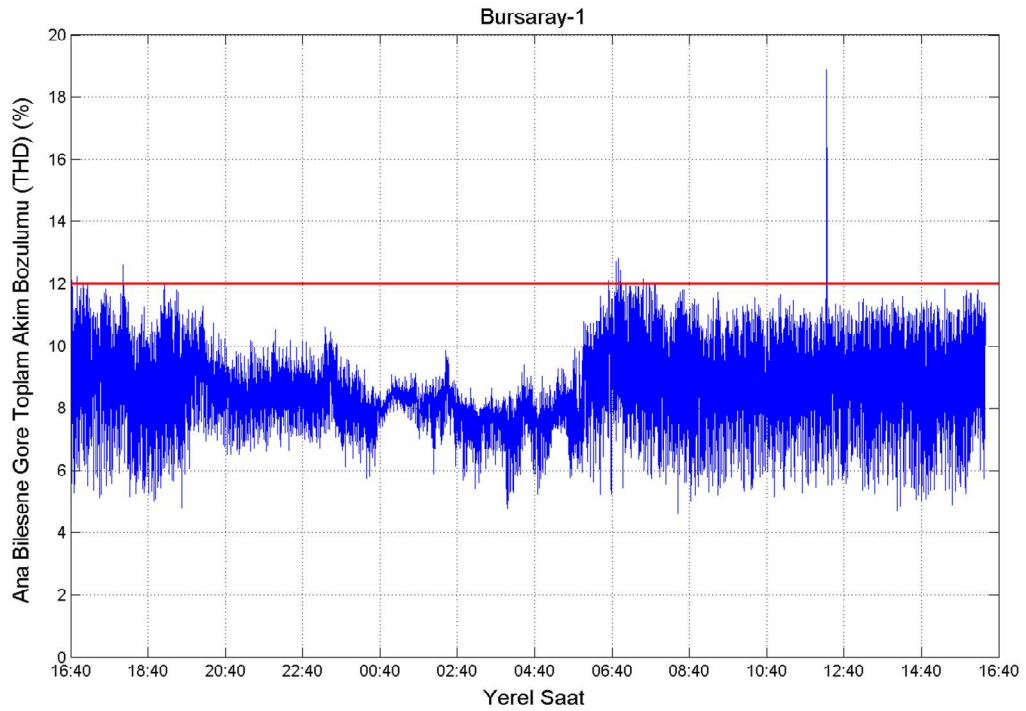
Şekil 2.11 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 23. harmonik bileşeninin değişimi.



Şekil 2.12 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 25. harmonik bileşeninin değişimi.

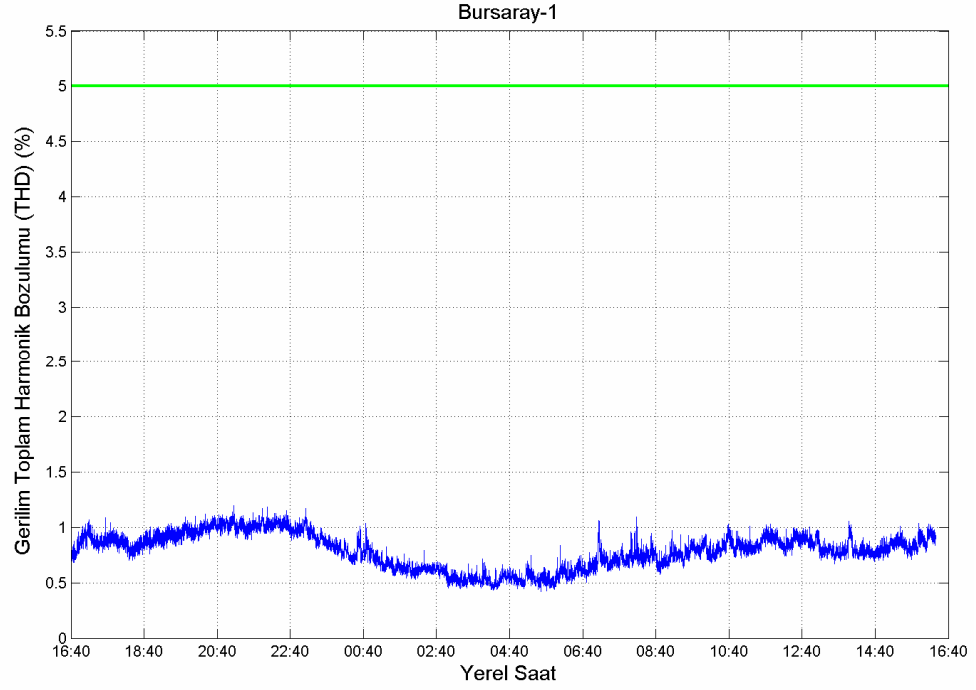


Şekil 2.13 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 29. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).

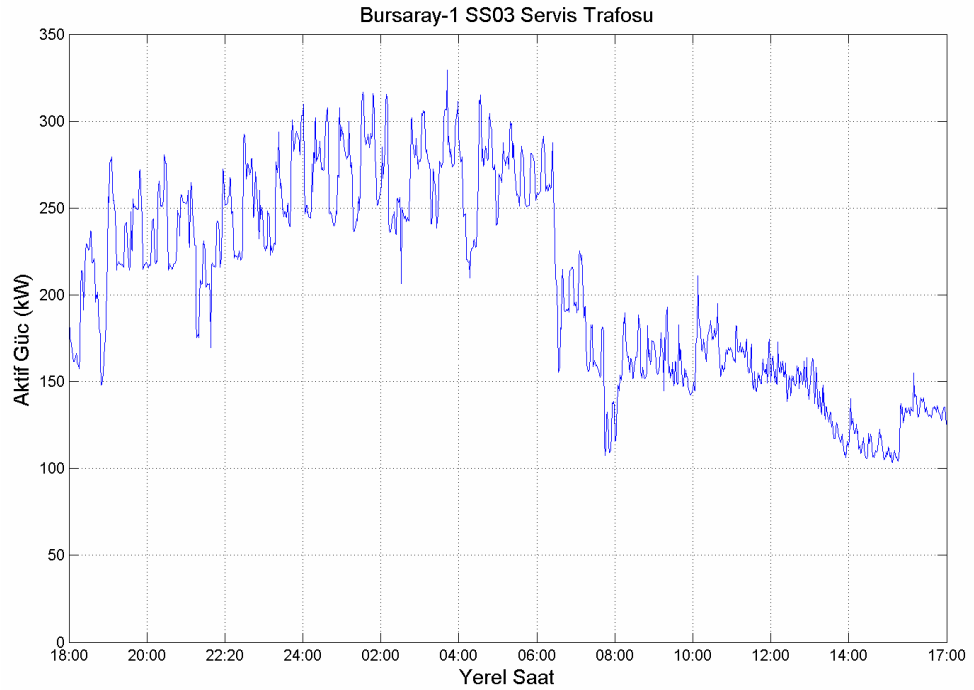


Şekil 2.14 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın toplam harmonik bozulumu değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).

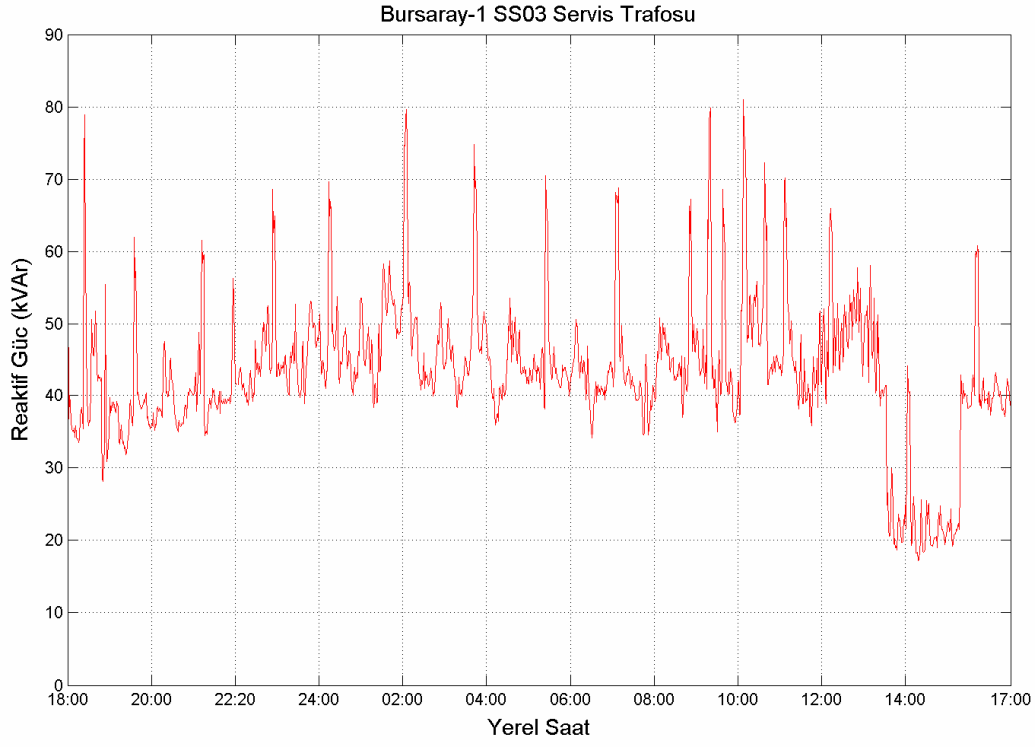
Şekil 2.16-2.19’da atölye binasında bulunan 2 MVA’lık servis trafosunun güç değişimleri görülmektedir.



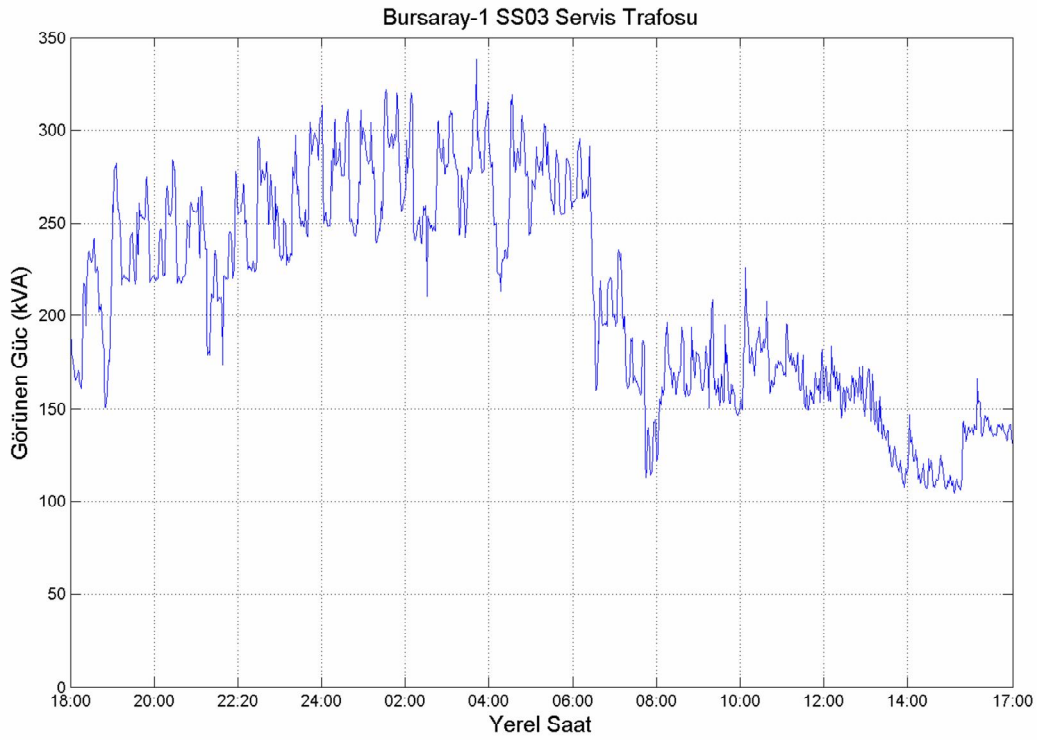
Şekil 2.15 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca gerilim toplam harmonik bozulumu (yeşil çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).



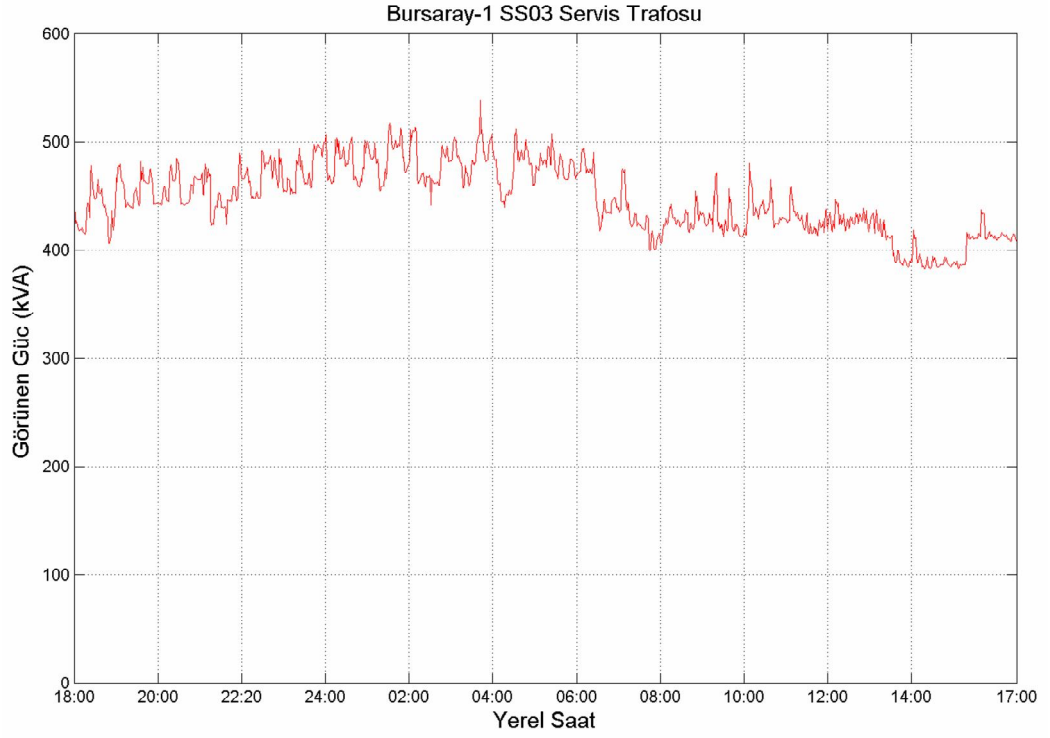
Şekil 2.16 : 2 MVA servis trafosunda 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 25-26 Şubat 2003).



Şekil 2.17 : 2 MVA servis trafosunda 1 gün boyunca reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 25-26 Şubat 2003).



Şekil 2.18 : 2 MVA servis trafosunda 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 25-26 Şubat 2003).



Şekil 2.19 : 2 MVA servis trafosunda 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (350 kVAr şönt reaktör bağlanması durumunda oluşacak yeni güç değişimi benzetim sonucu).

2.3.1 Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

1. Bursaray-1 fideri 24 saat boyunca tamamen kapasitif bir yük gibi davranmaktadır. Ekim-Kasım-Aralık 2002 aylarına ait ilgili elektrik faturalarında ‘aylık kapasitif reaktif enerji / aktif enerji’ oranlarının sırasıyla % 58, % 52 ve % 41 olduğu, ‘aylık endüktif reaktif enerji / aktif enerji’ oranlarının ise bu aylarda % 0,5 civarında olduğu görülmektedir. Nitekim yapmış olduğumuz 24 saatlik kayıttanda kapasitif enerjiye ilişkin oranın % 30, endüktif enerjiye ilişkin oranın ise % 1 olduğu ve bu sonuçların aylık fatura değerleriyle iyi bir korelasyon gösterdiği anlaşılmaktadır.

Yönetmelikte ‘Aylık kapasitif reaktif enerji / aktif enerji’ oranının ceza sınırının %20, ‘aylık endüktif reaktif enerji / aktif enerji’ ceza sınırının %33 olduğu belirtilmektedir [7]. Bu durumda mevcut hali ile Bursaray-1 fiderinde her ay kapasitif reaktif enerji cezası ödenmesi ve bu cezanın yaklaşık olarak 30.000-35.000 EURO (cezaya girilmesi durumunda aktif enerjinin % 90’ı kadar kapasitif reaktif enerji tüketildiği varsayılarak) arasında gerçekleşeceği anlaşılmaktadır.

2. Bursaray-1 fiderinin kapasitif bir yük olarak davranmasının nedeni bu fiderden beslenen çevirgeç trafolarının ve servis trafolarının 34,5 kV barasına 34,5 kV ($3 \times 185 \text{ mm}^2$ ve $3 \times 150 \text{ mm}^2$) yeraltı kablolarıyla bağlanmasıdır. Bu kabloların kaçak kapasiteleri kablonun boşta olması durumunda toplam 750 kVAr kapasitif reaktif güç üretmektedir. Şekil 2.3'ten anlaşılabileceği üzere, Bursaray-1 fiderinin reaktif güç değişimi 140 kVAr endüktif ve 635 kVAr kapasitif arasında çok hızlı olarak gerçekleşmektedir.

24 saatlik bu değişimlerin önemli bir bölümü 300-500 kVAr kapasitif aralığında olmaktadır. Bu bulgular, reaktif güç ihtiyacının çok hızlı değişmesine rağmen Bursaray-1 fiderinin tek kademeli sabit bir şönt reaktör ile kompanze edilebileceğini göstermektedir [16,17].

3. Bursaray-1 fiderine ilişkin tek hat şeması incelendiğinde tek kademeli şönt reaktörün ya 34,5 kV gerilim seviyesine ya da atölyelerde bulunan 34,5/0,4 kV, 2 MVA servis trafosunun 0,4 kV tarafına bağlanabileceği anlaşılmaktadır. Ancak en uygun bağlantı noktasının saptanabilmesi için akım harmoniklerine ilişkin problemin nasıl çözüleceğinin ve 2 MVA'lık servis trafosunun kurulu gücünün ve onun beslediği kritik yüklerin bu bağlantıya izin verip vermediğinin de dikkate alınması gerekmektedir.
4. 34,5/0,4 kV, 2 MVA servis trafosunun sekonderinin bu bağlantıya uygun olup olmadığını saptamak amacıyla bu trafonun primerinden 24 saat kesintisiz ölçüm gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçları Şekil 2.16, 2.17, 2.18 ve 2.19'da verilmiştir. Anma gerilimi ve frekansında 350 kVAr tek kademeli şönt reaktör bağlanması durumunda bu trafoya ilişkin yeni görünen güç (kVA) değişimi Şekil 2.20'de verildiği gibi olacaktır. Tek kademeli şönt reaktörün 0,4 kV tarafına bağlanması durumunda trafonun kurulu gücünün aşılmayacağı ve bu nedenle böyle bir bağlantının yapılabilir olduğu anlaşılmaktadır.
5. Bursaray-1 fiderinin hat akımlarının harmonik akım içeriği açısından değerlendirmesi yapıldığında 11., 13., 23. ve 25. harmonik akım bileşenlerinin mevcut standartlarda belirtilen sınır değerlerin üzerinde olduğu anlaşılmaktadır [6,9,12]. Bu nedenle Bursaray-1 fiderinin reaktif güç probleminin çözümünde harmonik akım probleminin çözümü de gerçekleştirilmeli veya en azından seçilecek olan reaktif güç kompanzasyon sisteminin gelecekte harmonik akım

probleminin çözümüne de olanak verecek bir topolojiye sahip olmasına dikkat edilmelidir.

6. Bursaray-1 fiderindeki mevcut akım harmoniklerinin sınır değerlerin altına indirilmesinde pasif şönt harmonik filtrelerin kullanılması ekonomik bir çözüm olmamaktadır.

- a. Harmonik akımlar 34,5 kV fiderin hatlarında mevcuttur. Bu nedenle pasif şönt filtreler 34,5 kV barasına doğrudan veya dolaylı olarak bağlanmaktadır. Bursaray-1 fideri Bursa TEDAŞ'a ait 34,5 kV barasından beslenmektedir. Aynı baradan Küçük Sanayi-1 ve Küçük Sanayi-2 fideri de beslenmektedir. Bu fiderlerde 6-darbeli çevirgeçler gibi harmonik üreten mevcut yüklerin olduğu tahmin edilmektedir. 34,5 kV baraya doğrudan veya dolaylı olarak bağlanan pasif şönt harmonik filtresi Bursaray'ın harmoniklerini filtre ettiği gibi 34,5 kV barasından beslenen Bursa şehrine ilişkin bazı yüklerin harmoniklerini de filtre edecektir. Böyle bir durum tesis edilecek olan harmonik filtre sisteminin ilk yatırım maliyetini de artıracak ve kurulma amacını aşacaktır.

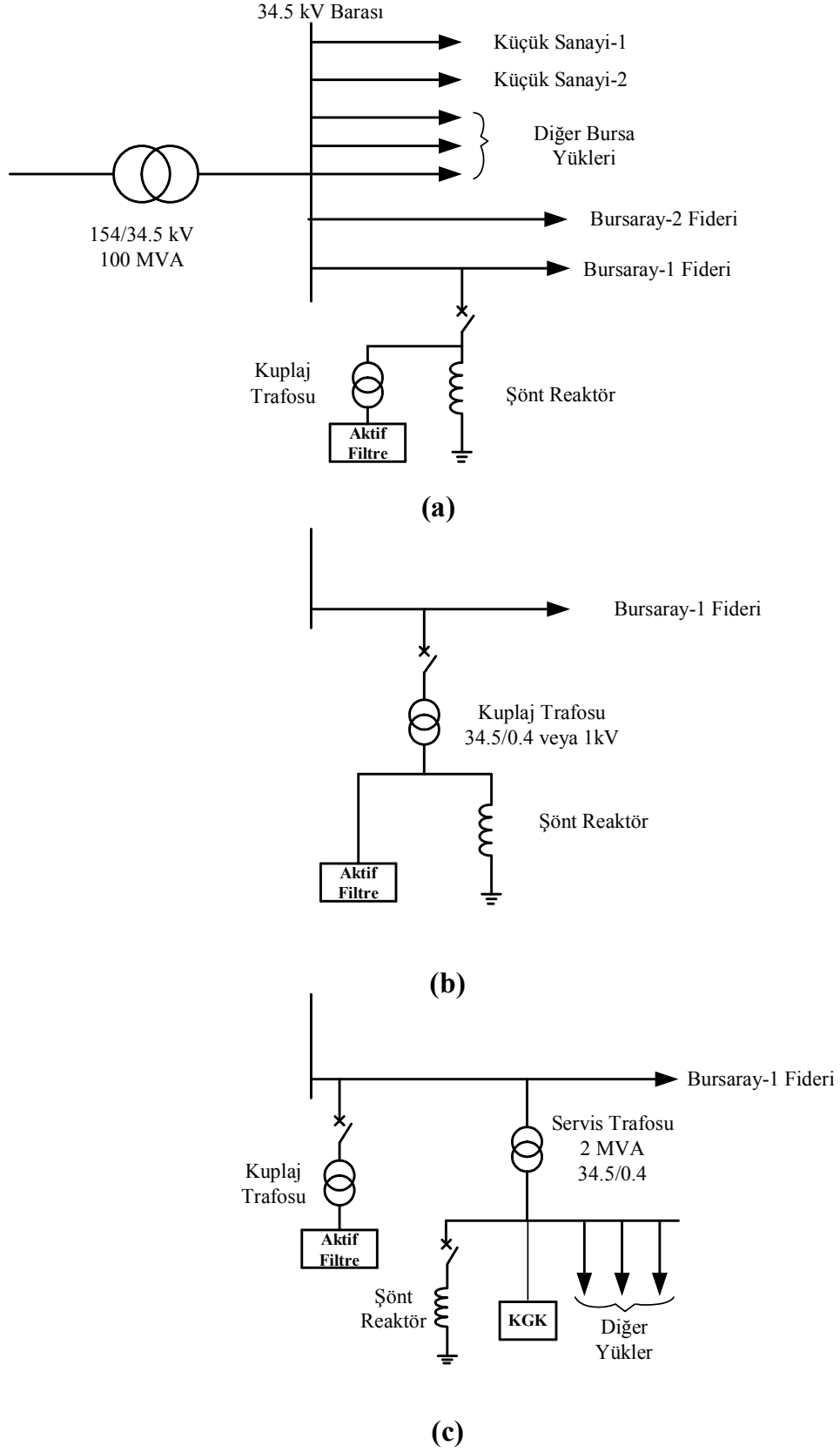
- b. Bursaray-1 fiderindeki baskın harmonikler sırasıyla 11. ve 13. harmoniklerdir. Bu amaçla tesis edilecek pasif şönt filtre, akort frekansının (≈ 550 Hz) üzerindeki harmonikleri süzer, altındaki frekanstaki harmonikleri ise büyütür. TEDAŞ'a ait 34,5 kV barasında en baskın gerilim harmonikleri 5. ve 7. olduğuna göre, 11. ve 13.'ye göre tasarlanmış pasif şönt bir filtrenin amaca hizmet etmeyeceği ve 34,5 kV barada mevcut 5. ve 7. gerilim harmoniklerinden dolayı aşırı yüke maruz kalacağı anlaşılmaktadır. Bu problemin giderilmesi amacıyla, 11. ve 13. harmonik filtresiyle birlikte 5. ve 7. harmonik filtresinin de tesis edilmesi gerekebilecektir. Bu ise yüksek bir ilk yatırım maliyeti ve amacını aşan bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

7. Bursaray-1 fiderinin harmonik akım problemini çözmek amacıyla aktif güç filtresi topolojisi düşünülebilir. Aktif güç filtresinin kurulu gücünün çok düşük olması nedeniyle 34,5 kV seviyesine bağlanması ekonomik bir çözüm olarak mümkün görülmemektedir. Bu nedenle, aktif güç filtresi, 34,5 kV seviyesine

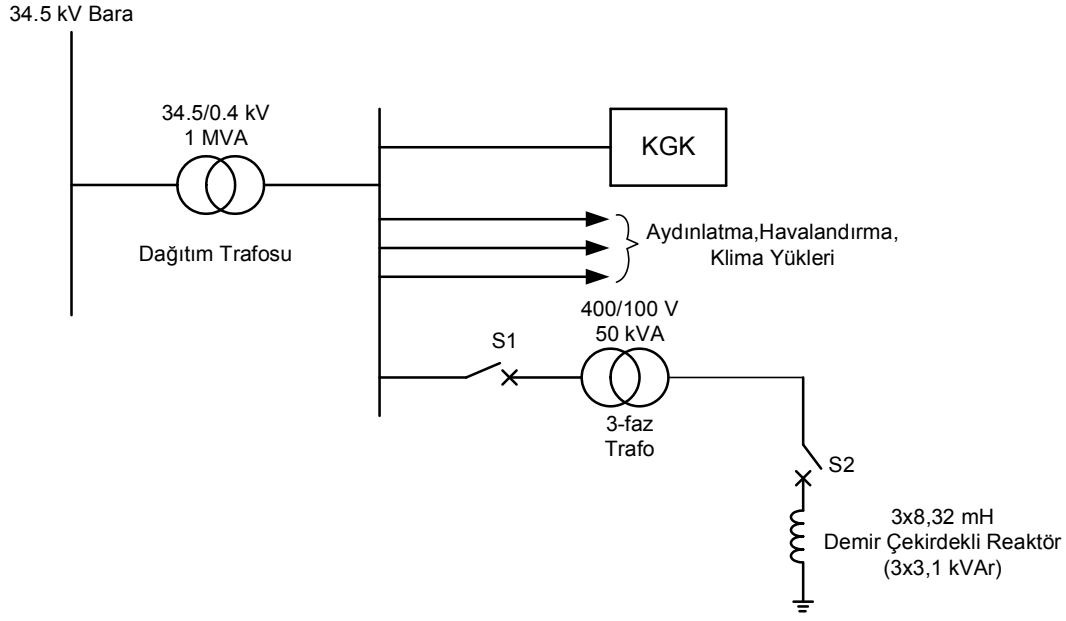
dolaylı olarak bağlanmalıdır. Böyle bir çözüm teknik ve ekonomik olarak yapılabilir, genişletilebilir, kalıcı ve uzun dönemli bir çözüm olacaktır.

8. Tek kademeli şönt reaktörün reaktif güç kompanzasyonu amacıyla mevcut 34,5 kV şebekeye bağlanmasında (doğrudan veya dolaylı) Şekil 2.20’de verilen seçenekler irdelenecektir. Bu reaktif güç kompanzasyonu sistemi, çevirgeç trafoları, besleme trafoları, kesintisiz güç kaynağı gibi ayrı bir birim olup, mevcut mevzuat uyarınca girişinde kendine özgü kesici, ayırıcı ve koruma elemanları ile donatılmalıdır. Bu çözümlerin herbiri teknik ve ekonomik yapılabilir çözümlerdir. Ancak reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtre sisteminin girişindeki anahtarlama elemanının (kesici, kontaktör, statik kesici, statik anahtar vb.) seçimine dikkat edilmesi gerekmektedir.
9. Şönt kondansatör bankaları ve şönt reaktörlerin anahtarlanması (devreye alınıp, devreden çıkarılmasında) çeşitli problemlerle karşılaşıldığı çok iyi bilinmektedir. En önemli problemler şöyledir:
 - a. Şönt kondansatör bankalarının devreye alınması esnasında oluşan ‘geçici aşırı akım bileşenleri’ (demaraj akımları),
 - b. Şönt reaktörlerin devreden çıkarılması esnasında oluşan ‘geçici aşırı gerilim bileşenleri’ (transient overvoltages).

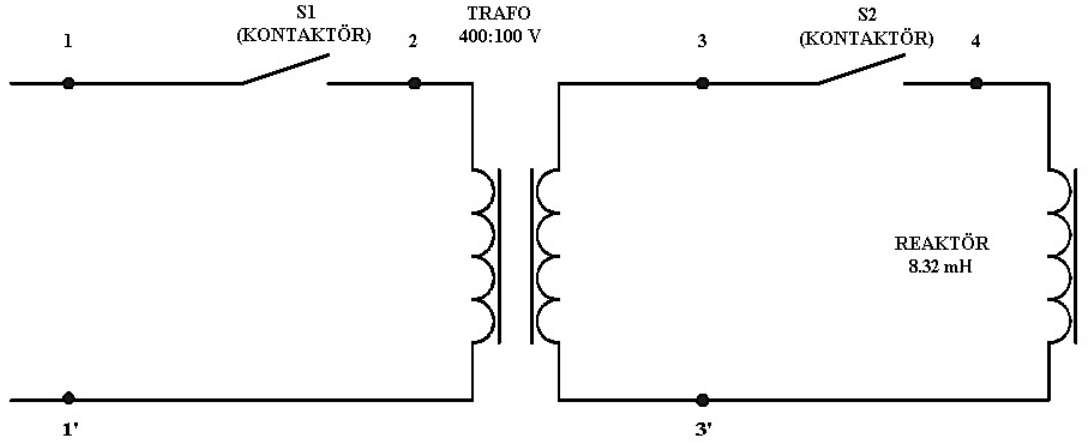
Tek kademeli şönt reaktörler en azından, start-up çalışmaları, geçici kabul çalışmaları, gözlem, bakım veya onarım amacıyla veya şebekede oluşan enerji kesintileri veya sistemin herhangi bir noktasında oluşan kısa devre sebebiyle çeşitli defalar devreye alınıp, devreden çıkarılacaktır. Bu amaçla konvansiyonel bir anahtar kullanılması (kesici, kontaktör gibi) durumunda reaktörün devreden çıkarılması (anahtarlanması) esnasında geçici rejim aşırı gerilim bileşenlerinin oluştuğu bilinmektedir. Bu bileşenler anma gerilimin 5 katına kadar yükselebilmektedir. Bunun önlenmesi amacıyla reaktör uçlarında, aşırı gerilim bileşenlerini bastırıcılar (Transient Overvoltage Suppressors) kullanılması zorunludur. Bu donanım arasında, RC devreleri (snubber), doğrusal olmayan dirençli parafudurlar veya yarı iletken elemanlar sayılabilir. Açma esnasındaki geçici rejim aşırı gerilim bileşenlerinin söndürülmemesi durumunda reaktör yalıtımında yorulma ve yaşlanma oluşacak, kısa, orta veya uzun dönemde yalıtımın delinmesi ile karşılaşılacaktır. Bu durumu deneysel olarak gösterebilmek amacıyla Şekil 2.21’de gösterilen devre kurulmuştur.



Şekil 2.20 : Tek kademeli şönt reaktörün reaktif güç kompanzasyonu amacıyla mevcut 34,5 kV şebekeye bağlanma seçenekleri.



(a)



(b)

Şekil 2.21 : (a) Tek kademeli şönt reaktörün reaktif güç kompanzasyonu amacıyla mevcut 34,5 kV şebekeye bağlanma seçenekleri (b) Deney düzeneği ölçüm noktaları.

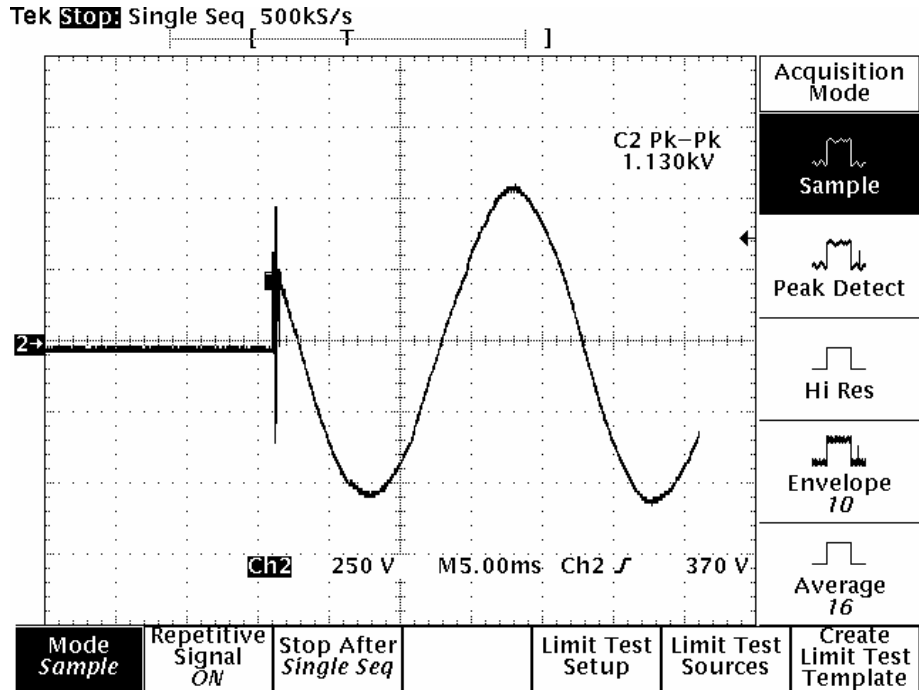
Şekil 2.21 (b)'deki devrede S1 ve S2 anahtarları 600 V, 200 A ve 370 A anma değerlerine sahip kompanzasyon sistemlerinde kullanılmaya uygun üç fazlı kontaktörlerdir. Geçici rejim aşırı gerilim bileşenlerini kaydetmek amacıyla kullanılan tek fazlı reaktörler 230 V, 250 A anma değerlerine sahip reaktörler olup 100 V gibi güvenli bir gerilim seviyesinde anahtarlanmaktadır. Anahtarlanan reaktör kurulu gücü toplam olarak sadece 3,82 kVar olup 50 kVA'lık deneysel trafo kurulu gücünün ve 1 MVA'lık dağıtım trafosunun kurulu gücünün ancak çok küçük bir

kısmını oluşturmaktadır. Bu deneylere ilişkin seçilmiş kayıtlar Şekil 2.22, 2.23, 2.24, 2.25, 2.26 ve 2.27’de verilmiştir. Bu kayıtlardan anlaşılabacağı üzere S2 kontaktörünün açılması esnasında reaktör uçlarında anma gerilimin ($100/\sqrt{3}$ V) 4-5 katına kadar geçici rejim aşırı gerilim bileşenleri meydana gelmektedir. Bunun temel nedeni demir çekirdekli reaktör eşdeğer reaktansının şebekenin iç reaktansına göre çok büyük olması ve açma esnasında reaktörden geçen akımın kontaktör tarafından hızla kesilmesi sonucu oluşan yüksek di/dt ’den kaynaklanan gerilim bileşenlerinin reaktör uçlarında görünmesidir. Benzer aşırı gerilim bileşenleri açma esnasında kontaktör uçları arasında da görünecektir. Bu ise kontaktör anma gerilim ve akımlarının belli emniyet faktörleri dikkate alınarak uygun bir şekilde seçilmesini gerekli kılar.

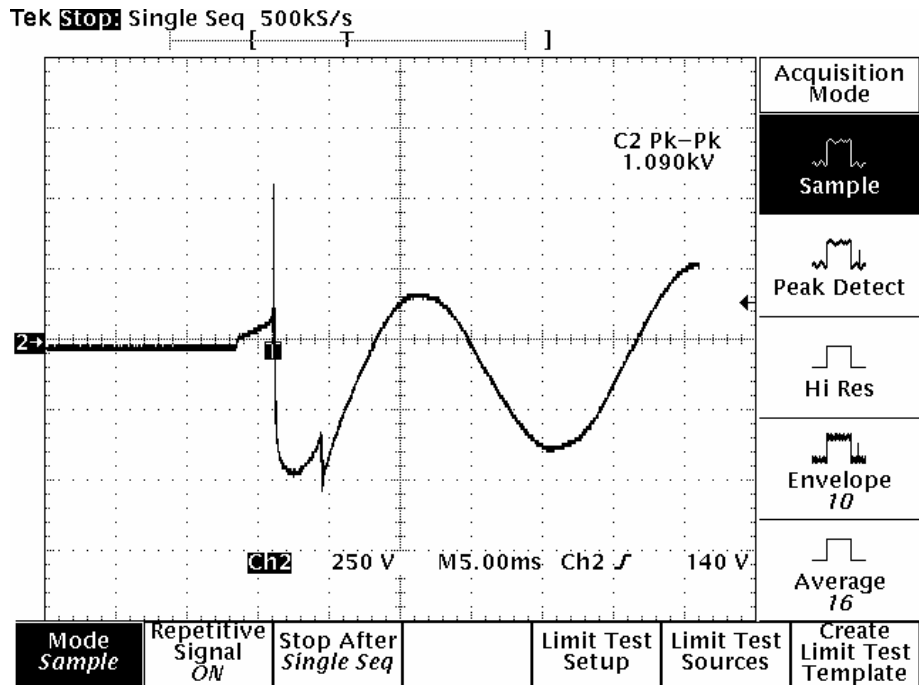
Açma esnasında oluşan aşırı gerilimleri söndürmek amacıyla reaktör uçlarına paralel RC (snubber) devreleri bağlanmıştır ($R = 22$ ohm, $C = 22$ nF). Yeni devreye ilişkin anahtarlama kayıtları Şekil 2.28 ve 2.29’da verilmiştir.

Bu kayıtlardan anlaşılabacağı üzere ‘snubber’ devresi üzerine düşen görevi yaparak reaktör uçlarında oluşan aşırı gerilimleri sınırlandırmakta ve söndürmektedir. Ancak anahtarlama esnasında oluşan aşırı gerilimler bu sefer şebeke tarafına aktarılmaktadır. Bunun temel nedeni, anahtarlama esnasında ‘snubber’ devresinin çalışması nedeniyle reaktör eşdeğer reaktansının çok düşmesi ve yüksek di/dt ’den kaynaklanan aşırı gerilimlerin şebeke üzerinde görünmesidir. Şekil 2.20 (c)’de gösterilen çözüm önerisinde bu şekilde yapılacak bir anahtarlama sonucu SCADA, kontrol sistemi gibi kritik yükleri besleyen kesintisiz güç kaynağının (KGK) giriş uçlarında tehlikeli boyutlarda aşırı gerilim bileşenleri oluşabilecektir.

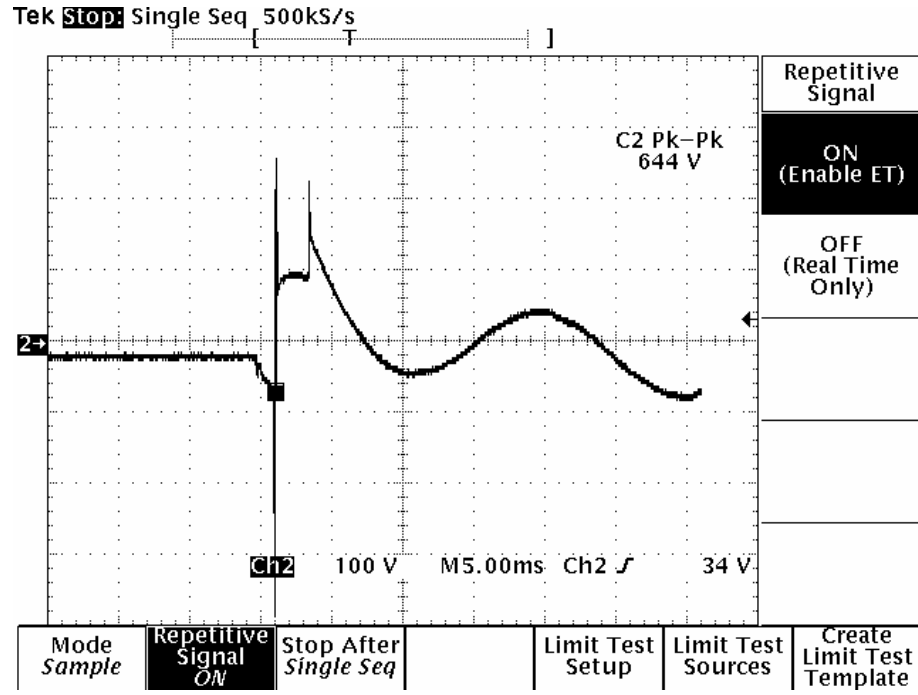
Özetle, anahtarlamanın kontaktör veya kesici ile yapılması durumunda meydana gelen aşırı gerilim bileşenlerinin hem reaktör hem de şebeke tarafında söndürülmesi gerekmektedir.



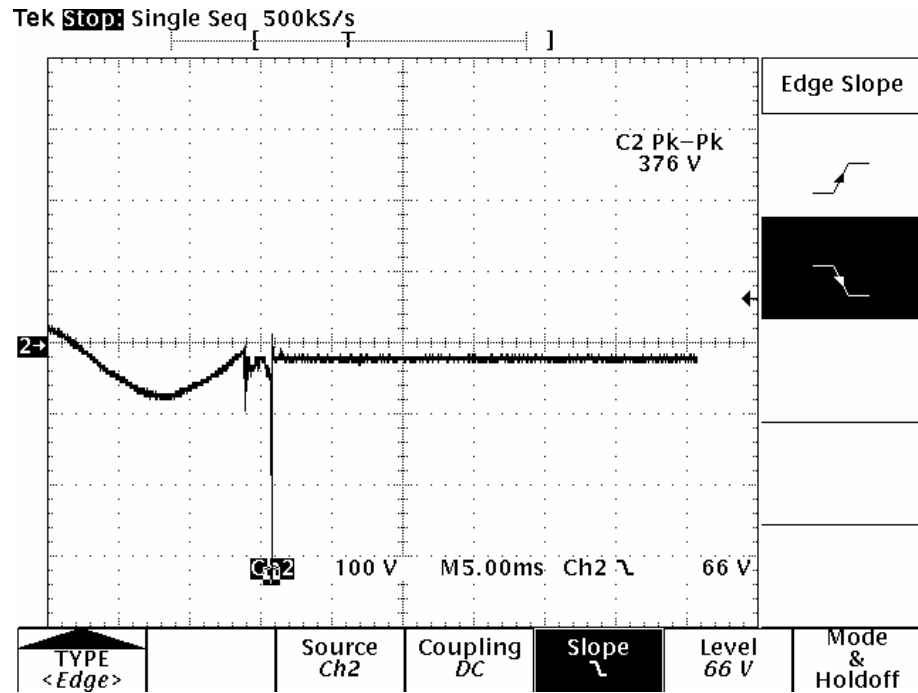
Şekil 2.22 : 2-1': S1 devreye alınırkenki (fazlar arası) gerilim (2 ve 1' Şekil 2.21 (b)'de gösterilen ölçüm noktalarıdır).



Şekil 2.23 : 1-2: S1 devreden çıkarılırkenki (fazlar arası) gerilim.

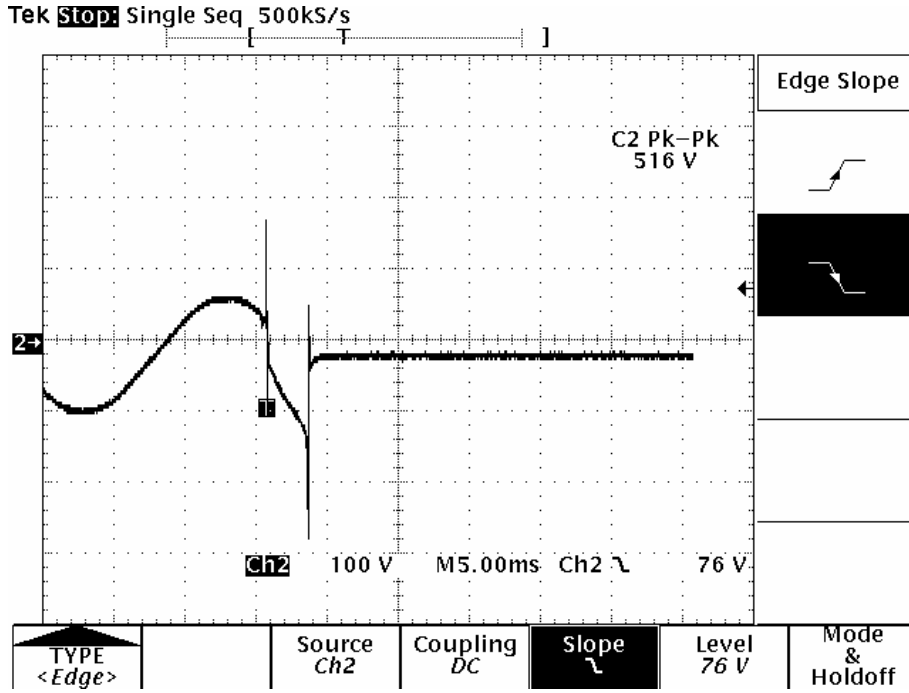


Şekil 2.24 : 3-4: S2 devreden çıkarılırkenki gerilim.

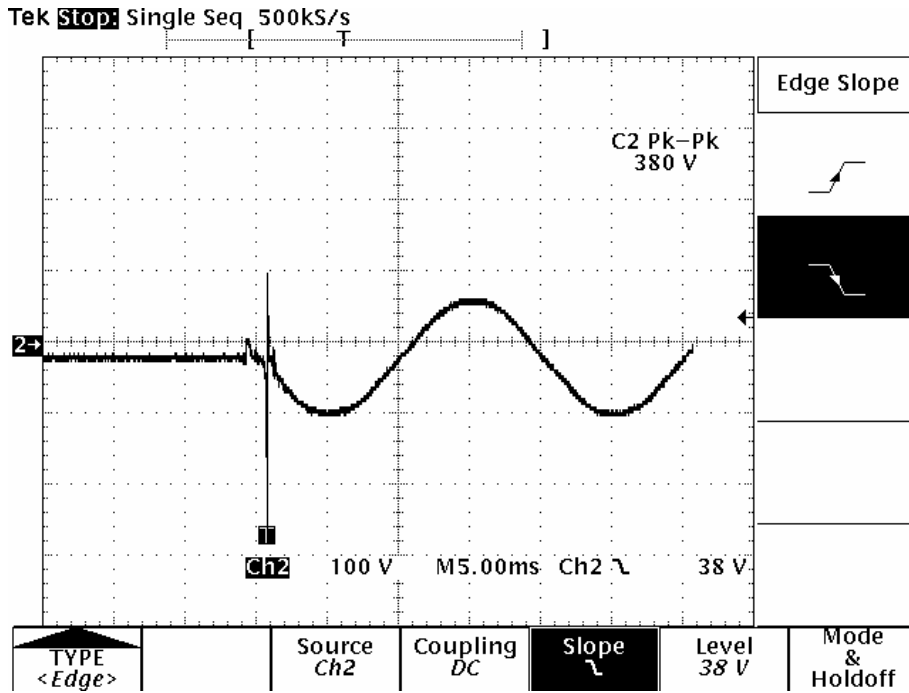


Şekil 2.25 : 3-4: S2 devreye alınırkenki gerilim.

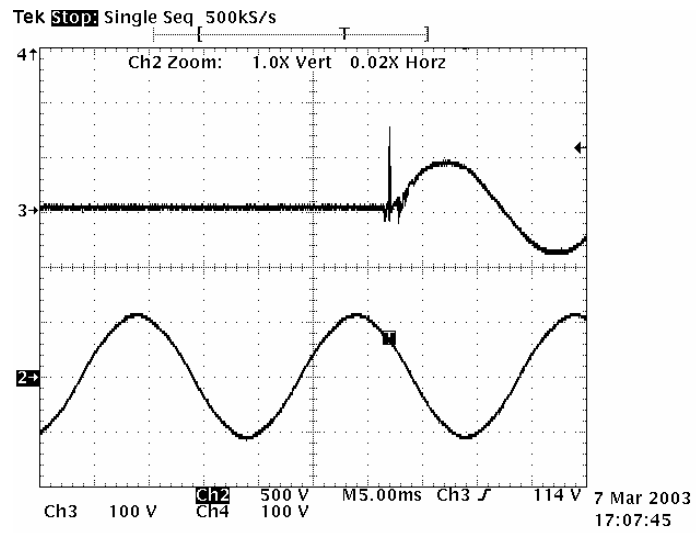
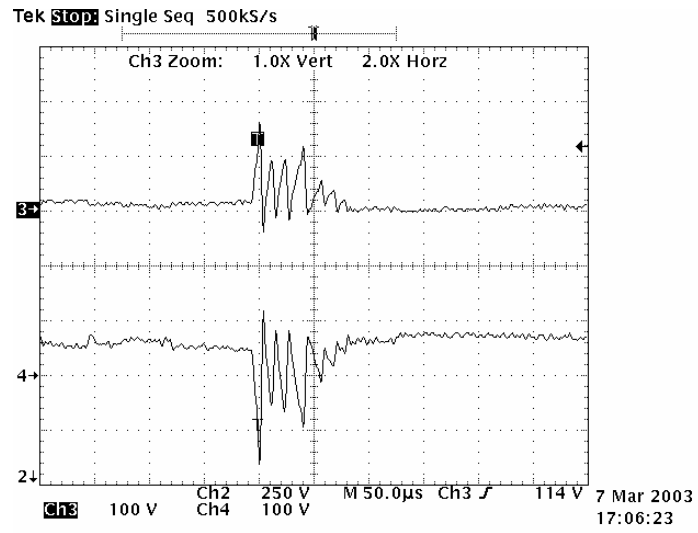
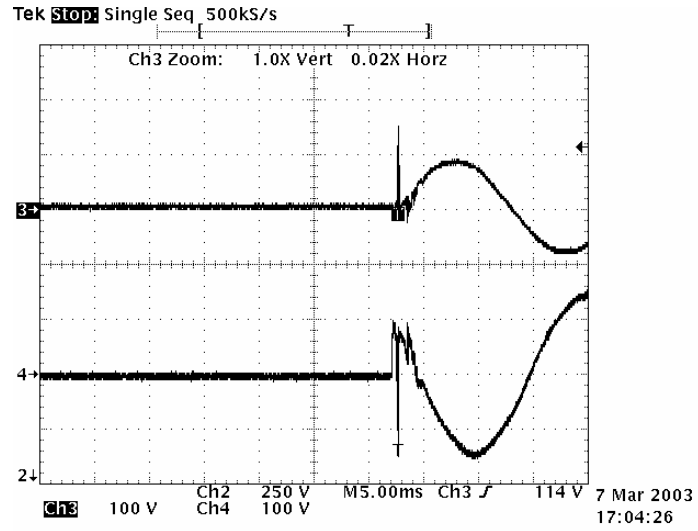
Şekil 2.26 ve 2.27’de S2 kontaktörünün devreye alınıp çıkartılması esnasında 4-3’noktalarında izlenen faz-nötr gerilim değişimi görülmektedir.



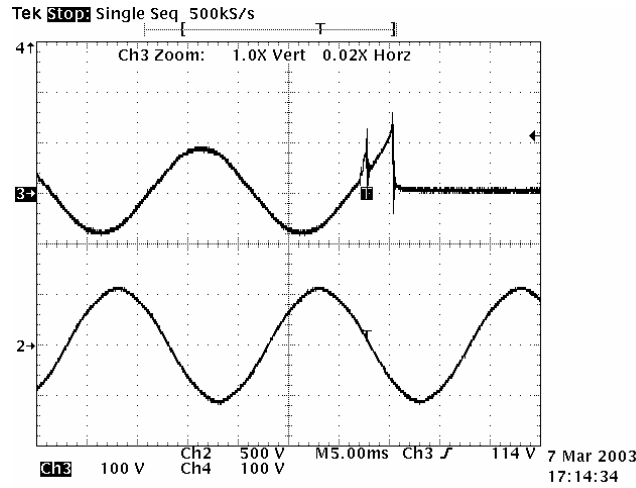
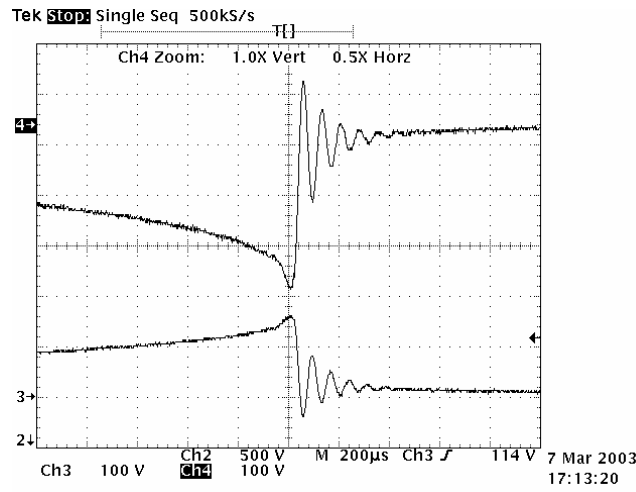
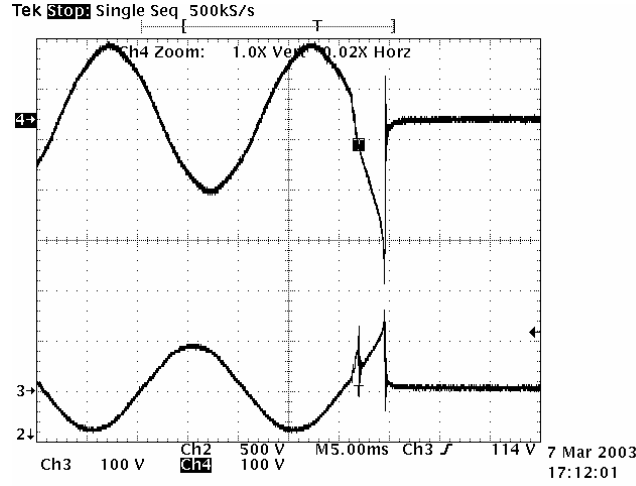
Şekil 2.26 : 4-3': S2 devreden çıkarılırkenki (faz-nötr) gerilim.



Şekil 2.27 : 4-3': S2 devreye alınırkenki (faz-nötr) gerilim.



Şekil 2.28 : S2 devreye alınırken (Ch2: 2-1' arası, Ch3: 4-3' arası, Ch4: 3-3' arası).



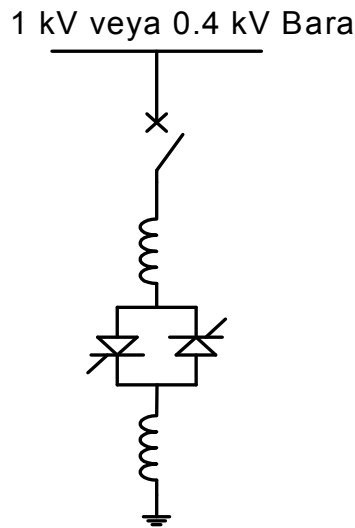
Şekil 2.29 : S2 devreden çıkarken (Ch2: 2-1' arası, Ch3: 4-3' arası, Ch4: 3-3' arası).

10. Şönt reaktörlerin devreye alınıp çıkarılmasında kullanılabilecek en iyi yöntem, ters-koşut (back-to-back) bağlı tristörlü statik anahtar kullanmaktır. Bilinen kesici ve kontaktörlerin kapanma ve açılmaları tamamen kontrolsüz olmasına rağmen, tristörlü bir statik anahtarın kapanma anı tamamen kontrollü olup açılması ise akımın doğal sıfır geçişinde kendiliğinden olmaktadır (line commutation). Bu

nedenlerle tristörlü statik anahtar gerek devreye alınma gerekse de devreden çıkarılma anlarında sıfır geçici akım ve gerilim bileşenleri ile anahtarlama yapabilmektedir (transient-free switching). Tristörlü anahtar kullanımı bu uygulamada en modern teknolojidir. Böyle bir uygulamada tristörlü statik anahtara dayalı çözüm konvansiyonel kontaktör ve kesicilere dayalı çözüme göre ilk yatırım maliyeti açısından biraz daha pahalı olmakla birlikte fiyat farkı çok azdır.

- a. İlk yatırım maliyeti en çok % 20 dolayında yüksektir.
- b. İşletme maliyetleri ve ekonomik ömürleri dikkate alındığında tristörlü statik anahtar çözümünün daha ucuz olduğu anlaşılmaktadır.

Bunlara ek olarak Bursaray-1 sisteminde olabilecek değişimler sonucunda yeni sistemlerin ihtiyacını karşılamaya yönelik olarak tristör anahtarlama reaktörünün tristör kontrollü reaktöre dönüştürülmesi son derece kolay olacaktır. Tristör kontrollü reaktör sıfır ile maksimum endüktif reaktif güç arasında hızlı ve kesintisiz bir kontrol sağlar. Tipik bir tristör anahtarlama şönt reaktör uygulamasına ilişkin tek-faz devre şeması Şekil 2.30'daki gibidir. Şekil 2.30'da kullanılacak şönt reaktör iki eşit parçaya bölünmüş olarak gösterilmektedir. Bunun amacı her tür kısa devre arızasında tristörlerin yanmasına engel olmak ve bu nedenle hızlı yarı iletken sigorta kullanımı zorunluluğunu ortadan kaldırmaktır.



Şekil 2.30 : Tipik bir tristör anahtarlama şönt reaktör uygulamasına ilişkin tek-faz devre şeması.

2.4 Bursaray-2 Fideri Kompanzasyon Öncesi Ölçüm Sonuçları ve Saptamalar

Bursaray-1 fideri için yapılan kayıt ve değerlendirmelerin aynısı Bursaray-2 fideri için de yapılmıştır. Bu kayıtlardan elde edilen değişim ve dalga şekilleri Şekil 2.31, 2.32, 2.33, 34 ve 2.35'te verilmiştir. Bursaray-1 ve Bursaray-2 fideri arasındaki temel farklılık Bursaray-1 fiderinde mevcut olan 34,5 kV/0,4 kV, 2 MVA servis trafosunun Bursaray-2 fiderinde mevcut olmamasıdır. Bu nedenle, Şekil 2.33'ten anlaşılacağı üzere Bursaray-2 fiderinin reaktif güç ihtiyacı tamamen kapasitif bölgede kalmakta ve reaktif güç ihtiyaç düzeyi 600-1450 kVAr gibi daha yüksek değerlerde, seyretmektedir.

24 saatlik zaman diliminde bilgisayarla yapılan ölçüm sonucunda hesaplanan enerji tüketimleri ve faturalandırmaya esas sayaçtan okunan enerji tüketimleri aşağıda verilmiştir:

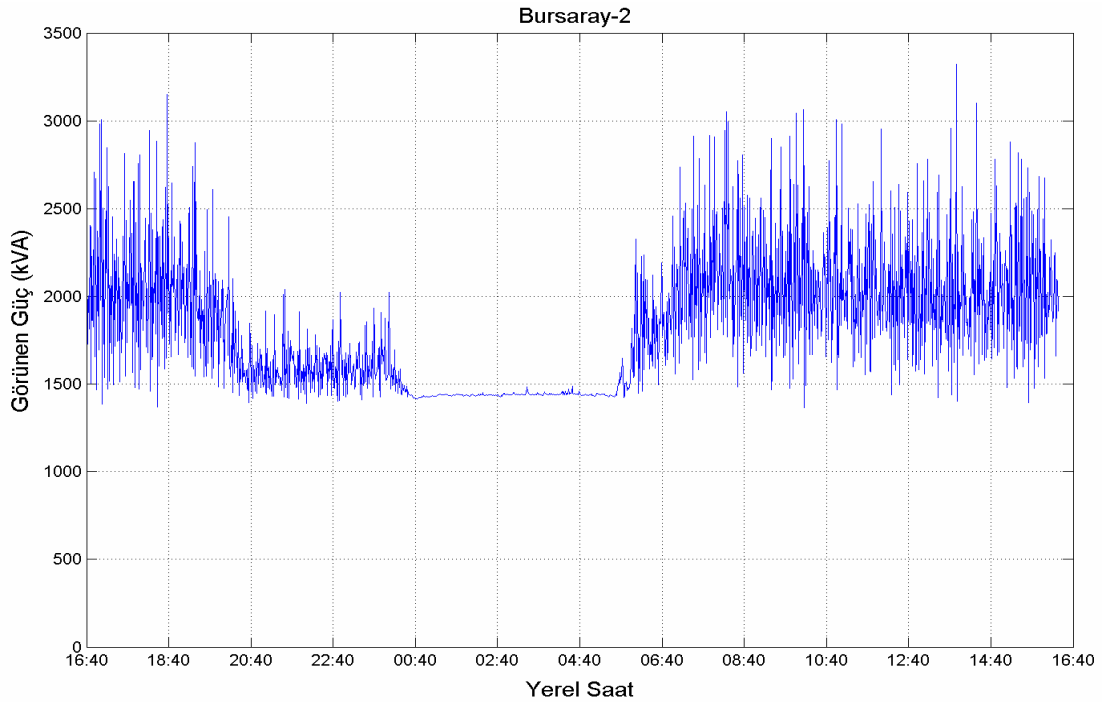
- Bilgisayarla hesaplanan enerji tüketimleri
 - Aktif enerji tüketimi
 $P = 24.580 \text{ kWh}$
 - Endüktif reaktif enerji tüketimi
 $Q_L = 3 \text{ kVArh}$
 - Kapasitif reaktif enerji tüketimi
 $Q_C = 27.890 \text{ kVArh}$
- Sayaçtan okunan enerji tüketimleri
 - Aktif enerji tüketimi
 $P = 25.740 \text{ kWh}$
 - Endüktif reaktif enerji tüketimi
 $Q_L = 0 \text{ kVArh}$
 - Kapasitif reaktif enerji tüketimi
 $Q_C = 29.304 \text{ kVArh}$

24 saatlik sayaç okumalarından ve faturalardan da görüleceği üzere kapasitif reaktif enerji / aktif enerji oranı % 100'ün üzerinde gerçekleşmektedir.

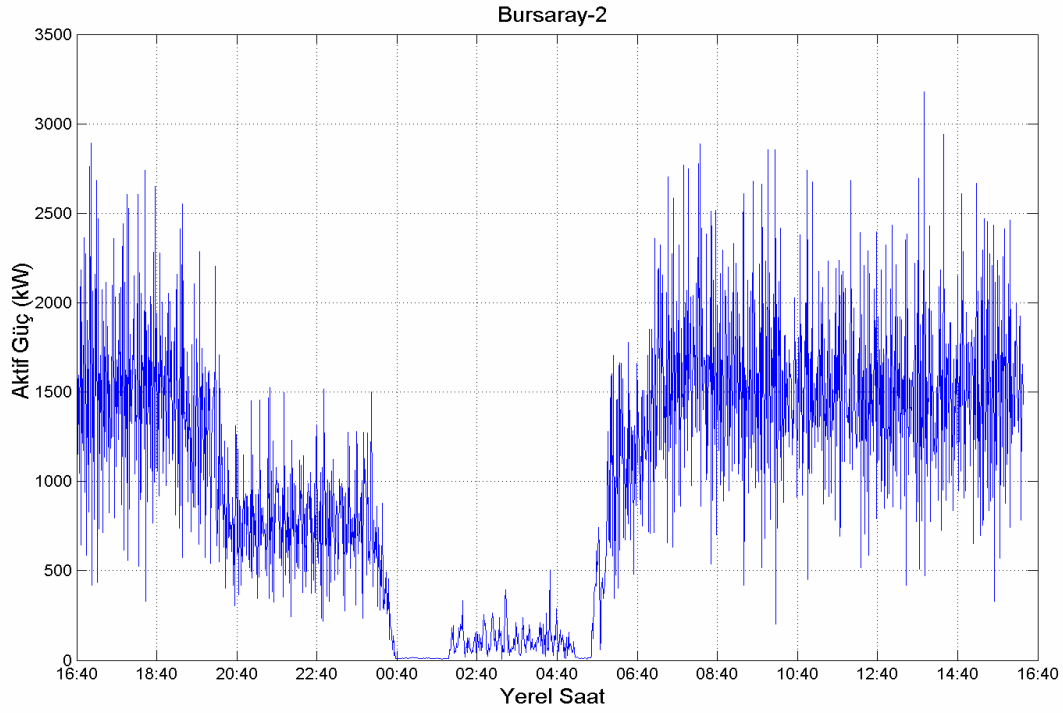
2.4.1 Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

Bursaray-2 fiderine 1,2 MVar endüktif gücünde tek kademeli şönt reaktörün, yapılan benzetim sonucunda, yeterli olacağı anlaşılmıştır [16,17] Bu durumda kapasitif reaktif enerji/aktif enerji ve endüktif reaktif enerji/aktif enerji oranlarının sırasıyla % 9 ve % 11 güvenli değerlerde kalacağı anlaşılmıştır.

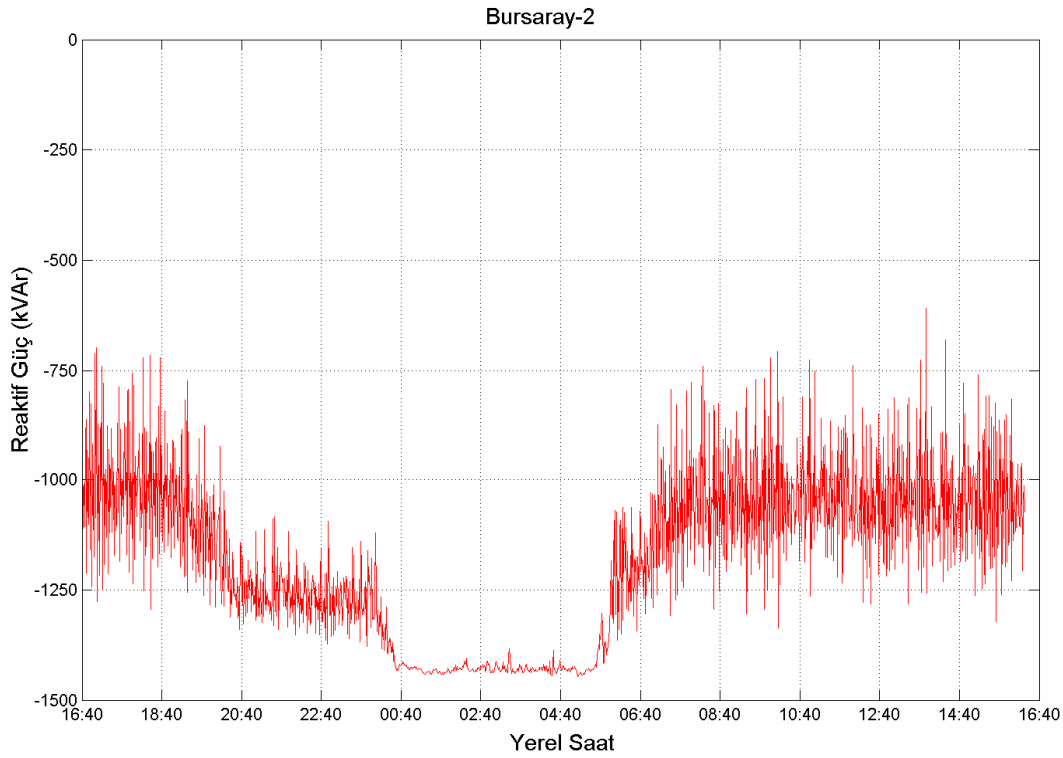
Akım harmonikleri açısından Bursaray-2 fideri Bursaray-1 fideri ile yaklaşık aynı özellikleri göstermektedir (Şekil 2.34 ve 2.35). Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderleri aynı 34,5 kV TEDAŞ barasından beslendikleri için gerilim harmonikleri aynı olup, pasif şönt filtre kullanımı aynı sakıncaları taşımaktadır. Bursaray-2 fiderinin reaktif güç kompanzasyonu ve harmoniklerinin filtrelenmesi probleminin çözülmesinde kullanılacak bağlantı şekilleri 2 MVA'lık servis trafosunun mevcut olmaması sebebiyle iki seçeneğe düşmüştür (Şekil 2.36 (a) ve (b)).



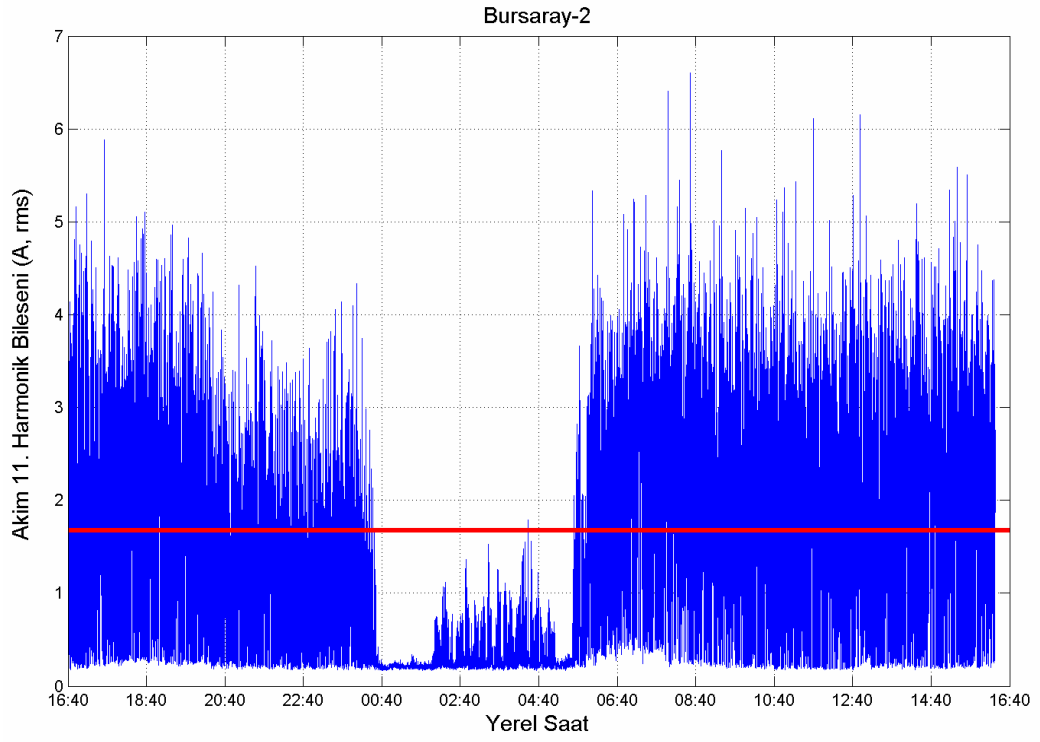
Şekil 2.31 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).



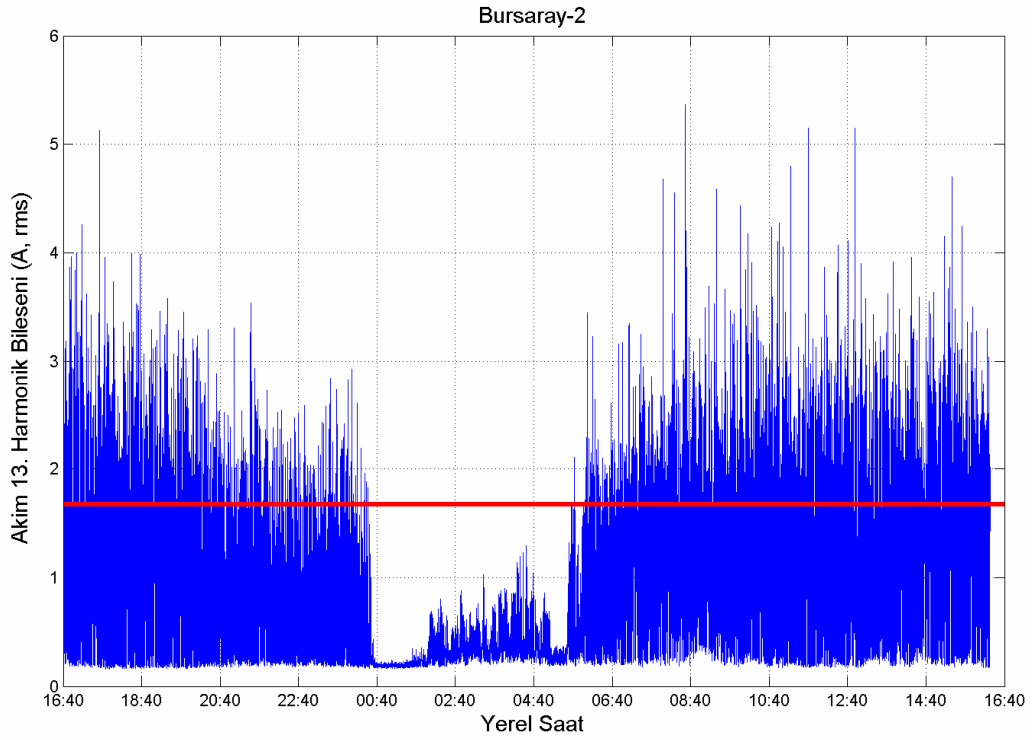
Şekil 2.32 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).



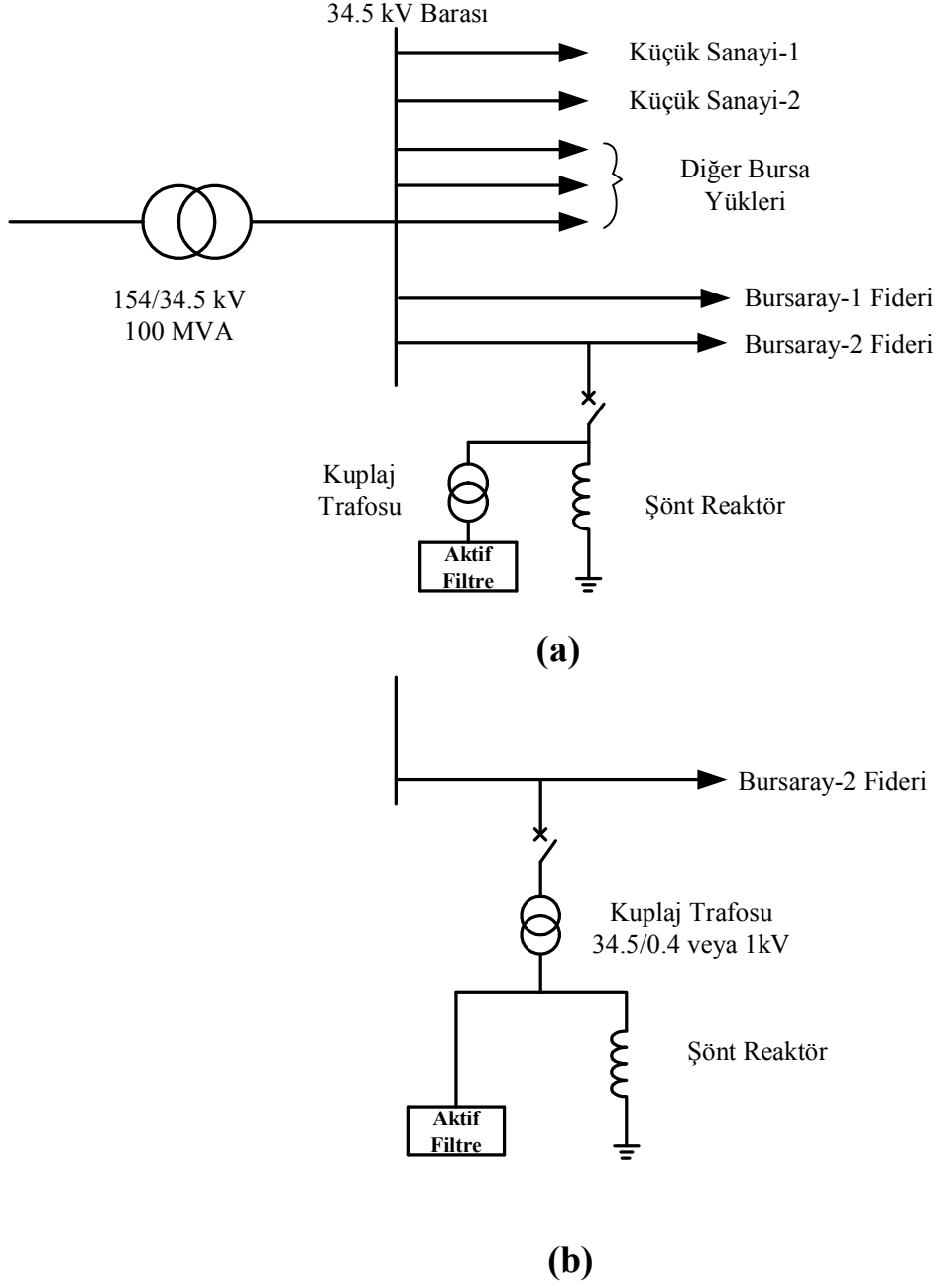
Şekil 2.33 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca reaktif güç (kVar) değişimi (kayıt tarihi: 24-25 Şubat 2003).



Şekil 2.34 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 11. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).



Şekil 2.35 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 13. harmonik bileşeninin değişimi (kırmızı çizgi standartlara göre sınır değeri göstermektedir).



Şekil 2.36 : (a), (b) Tek kademeli şönt reaktörün reaktif güç kompanzasyonu amacıyla mevcut 34,5 kV şebekeye bağlanma seçenekleri.

2.5 Şekil 2.21(a) ve Şekil 2.36(a)'da Verilen Olası Çözüm Tekniklerinin Kullanılan Anahtar Elemanı Tipi Açısından Değerlendirilmesi

Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderleri için kullanılması gereken şönt reaktör güçleri yaklaşık olarak 350 kVAr ve 1200 kVAr'dır. Şönt kompanzasyon uygulamalarında bu güçler çok düşük güçler olup 34,5 kV gerilim seviyesinde statik anahtar kullanımı zorunluluğu nedeniyle çok pahalı bir çözüm olmaktadır. Bu çözümlerde temel

yaklaşım şönt reaktör ve aktif filtrelerin bağlanacağı gerilim seviyesini 0,4 kV veya 1 kV gibi standart düşük gerilim seviyelerinde [13] tutarak statik tristörlü anahtarın maliyetini konvansiyonel anahtarlarla aynı seviyeye getirmektir. Bu amaçla 34,5 kV/0,4 kV veya 34,5/1 kV bir kuplaj transformatorü kullanılabilecektir. Bu çözümler şönt reaktörün ve aktif filtrenin aynı anda tesis edilebilmesini mümkün kıldığı gibi aktif filtrenin gelecekte sisteme eklenmesini de mümkün kılmaktadır. Konvansiyonel anahtar kullanılması durumunda Şekil 2.21 (a)'da verilen Bursaray-1 fideri çözümü ve Şekil 2.36 (a)'da verilen Bursaray-2 fideri çözümü en pahalı çözümler olarak görünmektedir.

2.6 Şönt Reaktörlerin ve Aktif Filtrelerin Fiderlere Bağlanacağı Olası Noktalar

İletim hatları ve kablo kompanzasyonunda en uygun bağlantı noktası bu tür sistemlerin orta noktasıdır. Böylece, havai hat veya kablo boyunca daha uygun bir gerilim dağılımı sağlanmaktadır. Ancak, Bursaray sistemindeki 34,5 kV kabloların boyları göreceli olarak kısadır. PSCAD benzetim sonuçları, şönt reaktörler kabloların şebeke uçlarına bağlansa dahi, kablonun diğer ucunda önemli bir gerilim değişimine neden olmayacağını göstermiştir. Bu nedenle, şönt reaktörlerin ve aktif filtrelerin en uygun bağlantı noktası, uygulama kolaylığı açısından, ilgili kabloların şebekeye en yakın uçlarıdır.

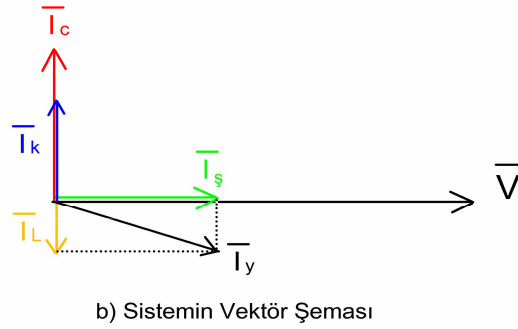
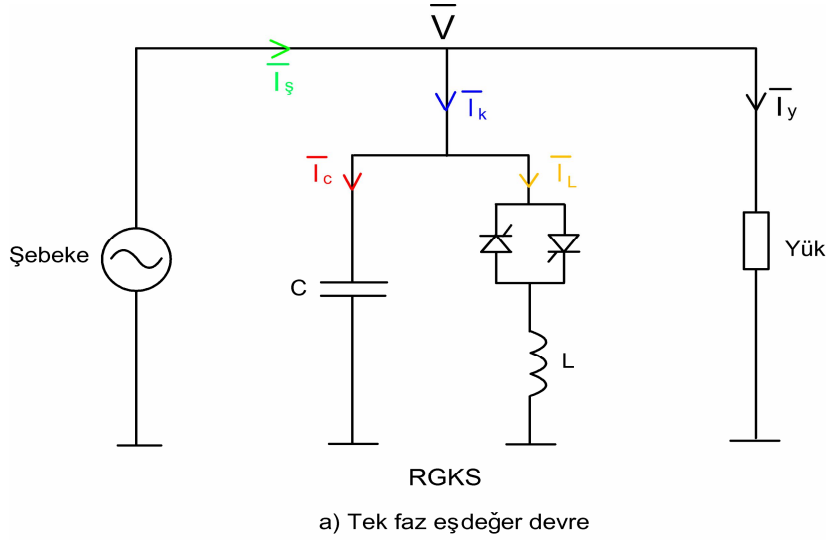
2.7 Reaktör Tasarımında Dikkat Edilecek Konular ve Eşdeğer Devre

Şekil 2.37'de şönt reaktöre ait eşdeğer devre görülmektedir. Reaktör tasarımında şu ölçütler göz önüne alınır:

- Reaktör gücü (kVAr).
- Maksimum devamlı akım ve gerilimler.
- İşletme koşulları.

Reaktör yerleşiminde dikkat edilecek hususlar:

- Minimum uzaklıklar.
- Reaktörlerin oluşturacağı manyetik alanlar etrafında iletken kapalı devre yaratılmaması (loop) (daha çok hava nüveli reaktörler için geçerlidir).



Şekil 2.37 : Şönt reaktör eşdeğer devre ve vektör şeması.

2.8 Bursaray Fiderleri Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemleri Kısa Devre Hesapları

Şalt merkezi maksimum kısa devre gücü: 5000 MVA

Ana besleme trafosu:

Gerilim = 154/34.5 kV

Güç = 100 MVA

Bağlı kısa devre gerilimi (U_k) = %12

2.8.1 Bursaray-1 reaktif güç kompanzasyon sistemi

0.4 kV, 550 kVAR olan bu sistem sistemde mevcut bulunan 2 MVA'lık trafonun sekonderine bağlanacaktır. 2 MVA'lık trafo 154/34.5 kV 100 MVA'lık ana besleme trafosuna 5750 m uzunluğundaki 3 x (1 x 185/25) mm²'lik XLPE güç kabloları ile bağlanmıştır. Trafo ile güç kablolarının özellikleri aşağıda verilmiştir:

2 MVA'lık trafo:

$$\text{Gerilim} = 34.5/0.4 \text{ kV}$$

$$\text{Güç} = 2 \text{ MVA}$$

$$\text{Bağıl kısa devre gerilimi (Uk)} = \%6$$

Güç kabloları:

$$\text{Anma kesit} = 1 \times 185/25$$

$$\text{Birim uzunluk direnci} = 0.0991 \text{ Ohm/km (20°C'de DA)}$$

$$\text{Birim uzunluk indüktansı} = 0.627 \text{ mH/km}$$

$$\text{Hattın uzunluğu} = 5.75 \text{ km}$$

Eşdeğer empedans ve dirençler:

1. Ana besleme trafosu eşdeğer empedansı

$$X_{tr} = \frac{V^2}{S} \times Uk = \frac{(34.5kV)^2}{100MVA} \times 0.12 = 1.42 \text{ Ohm (34.5 kV tarafı)}$$

2. Sistemin eşdeğer empedansı

$$X_{sys} = \frac{V^2}{S} = \frac{(34.5kV)^2}{5000MVA} = 0.238 \text{ } \Omega \text{ (34.5 kV tarafı)}$$

3. 2 MVA trafo eşdeğer empedansı

$$X_{tr1} = \frac{V^2}{S} \times Uk = \frac{(34.5kV)^2}{2MVA} \times 0.06 = 35.70 \text{ Ohm (34.5 kV tarafı)}$$

4. OG kabloları

$$R_{eş} = 5.75 \times 0.0991 \text{ Ohm/km} = 0.57 \text{ Ohm}$$

$$X_{eş} = 2 \times 3.14 \times 50 \times 5.75 \times 0.627 \times 10^{-3} = 1.132 \text{ ohm}$$

$$X_{toplam} = X_{sys} + X_{tr} + X_{eş} + X_{tr1} = 1.42 + 0.23 + 35.70 + 1.13 = 38.48 \text{ } \Omega$$

$$R_{eş} = 0.57 \text{ } \Omega$$

Direnç değeri düşük olduğu için ihmal edilebilir. Buna göre;

$$\text{Kısa devre akımı} = I_{sc} = \frac{34.5kV}{\sqrt{3} \times (38.48)} = 0.51 \text{ kA-rms olur.}$$

Bu değer 0.4 kV tarafında;

$$I_{sc} = 0.51 \times 34.5/0.4 = 44.69 \text{ kA-rms olacaktır.}$$

2.8.2 Bursaray-2 reaktif güç kompanzasyon sistemi

1250 kVAr'lık RGK Sistemi 34.5 kV baraya 1 adet 34.5/1.1 kV; 1600 kVA'lık kuru tip bir transformatör üzerinden bağlanacaktır. SS07 istasyonu yaklaşık 2385 m uzunluğundaki 3x1x185/25 mm²'lik XLPE güç kabloları ile ana besleme trafosuna bağlanmıştır. RGK transformatörü ile g kablolarının özellikleri aşağıda verilmiştir:

Reaktif güç kompanzatörü trafosu:

$$\text{Gerilim} = 34.5/1.1 \text{ kV}$$

$$\text{Güç} = 1.6 \text{ MVA}$$

$$\text{Bağlı kısa devre gerilimi (Uk)} = \%6$$

Güç kabloları:

$$\text{Anma kesit} = 1 \times 185/25$$

$$\text{Birim uzunluk direnci} = 0.0991 \text{ Ohm/km (20}^\circ\text{C'de DA)}$$

$$\text{Birim uzunluk indüktansı} = 0.627 \text{ mH/km}$$

$$\text{Hattın uzunluğu} = 2.385 \text{ km}$$

Eşdeğer empedans ve dirençler:

1. Ana besleme trafosu eşdeğer empedansı

$$X_{tr} = \frac{V^2}{S} \times Uk = \frac{(34.5kV)^2}{100MVA} \times 0.12 = 1,42 \text{ Ohm (34.5 kV tarafı)}$$

2. Sistemin eşdeğer empedansı

$$X_{sys} = \frac{V^2}{S} = \frac{(34.5kV)^2}{5000MVA} = 0.238$$

3. RGK trafosu eşdeğer empedansı

$$X_{rgk} = \frac{V^2}{S} \times Uk = \frac{(34.5kV)^2}{1.6MVA} \times 0.06 = 44.63 \text{ Ohm (34.5 kV tarafı)}$$

4. OG kabloları

$$R_{eş} = 2.385 \times 0.0991 \text{ Ohm/km} = 0.23 \text{ Ohm}$$

$$X_{eş} = 2 \times 3.14 \times 50 \times 2.385 \times 0.627 \times 10^{-3} = 0.469 \text{ Ohm}$$

Bu değerlere göre;

$$X_{total} = X_{sys} + X_{tr} + X_{eş} = 1.42 + 0.23 + 0.47 = 2.12 \text{ Ohm}$$

$$R_{eş} = 0.23 \text{ Ohm}$$

$$\text{Toplam empedans} = \sqrt{(R_{eş})^2 + (X_{total})^2} = \sqrt{(0.23)^2 + (2.12)^2} = 2.13 \text{ Ohm}$$

➤ 34.5 kV tarafı:

Bu verilere göre sistemde reaktif güç kompanzatörü trafosu öncesi herhangi bir yerde olabilecek üç faz kısa devre arızası durumunda oluşacak kısa devre akımı;

$$\text{Kısa devre akımı} = I_{sc} = \frac{34.5kV}{\sqrt{3} \times (2.13)} = 9.36 \text{ kA-rms olur.}$$

➤ 1.1 kV tarafı:

Reaktif güç kompanzatörü trafosunun 1.1 kV tarafı ile reaktör grupları olabilecek üç faz kısa devre akımı (34,5 kV tarafında);

$$X_T = X_{total} + X_{rgk} = 44.63 + 2.12 = 46.75 \Omega$$

$$R_{eş} = 0.23 \Omega$$

$$\text{Toplam empedans} = \sqrt{(R_{eş})^2 + (X_T)^2} = \sqrt{(0.23)^2 + (46.75)^2} = 47 \Omega$$

$$\text{Kısa devre akımı} = I_{sc} = \frac{34.5kV}{\sqrt{3} \times (47)} = 0.424 \text{ kA-rms (34.5 kV tarafı)}$$

1.1 kV tarafında

$$I_{sc} = (0.424 \text{ kA}) \times 34,5/1.1 = 13.27 \text{ kA (rms) olur.}$$

Reaktif güç kompanzasyonu sistemi OG tarafında kullanılan 20.3/35 kV, 1 x 95/16 mm²'lik kablounun çalışma indüktansı 1000 m için yaklaşık 0.435 mH ve 20⁰C'de DA iletken direnci 0.193 ohm'dur. Sistemde bu kablodan faz başına yaklaşık 15m kullanılacak olup bu metraja karşılık gelen empedans değeri 0.00135 ohm ve DA

iletken direnci (20^0C) 0.00386 ohm gibi küçük değerlere karşılık geldiğinden bu hesaplamalara katılmamıştır.

Aynı şekilde AG tarafında kullanılan 0.6/1 kV, 1 x 185 mm²'lik kablonun 20^0C 'deki DA iletken direnci 0.0991 ohm/km'dir. Bu kablodan sistemde faz başına 15 m kullanılacak olup bu metraja karşılık gelen değer 0.0008 ohm olduğundan hesaplamalara katılmamıştır.

2.9 Kompanzasyon Sistemlerinin Devreye Alınmasından Sonra Yapılan Ölçüm ve Değerlendirmeler

Bursaray-1 ve Bursaray-2 reaktif güç kompanzasyonu sistemlerinin devreye alınmasının ardından başlatılan deneme üretimi süresi içinde, sistemlerin performanslarını incelemek amacıyla 24 saat süreyle faturalandırmaya esas sayaçların bulunduğu noktalarda ölçüm gerçekteşirilmıştir. Burada bu ölçümlerin sonuçları verilmektedir.

Sahada yapılan ölçümler şu şekilde özetlenebilir:

Ana baralarda (Bursaray-1 ve Bursaray-2 34,5 kV fiderleri) faturalandırmaya esas sayaçların bulunduğu noktalarda ve gerekli görölen istasyonlarda akım ve gerilim 24 saat kayıt edilmiştir. Sinyal örnekleme hızı 3,2 kS/s seçilmiştir [14]. Analiz için her bir elektriksel büyüklüğün 10 peryotluk çerçevesine bakılır [14]. Harmonik izleme için MATLAB da 5 Hz çözünürlükte (veriler sayısal olduğundan) bir FFT algoritması (fast fourier transform)çalıştırılmıştır [15]. Bu, bir periyot (20 ms) boyunca 64 adet örnek alınması demektir. Her bir fider veya bara için iki faz-faz gerilimi ve iki faz akım bilgisi kaydedilmiştir. şebeke frekansının sabit ve 50 Hz olduğu kabul edilmiştir [14]. Bu veriler daha sonra bilgisayar yardımıyla işlenerek aşağıda verilen büyüklüklerin zamanla değişimleri elde edilmiştir.

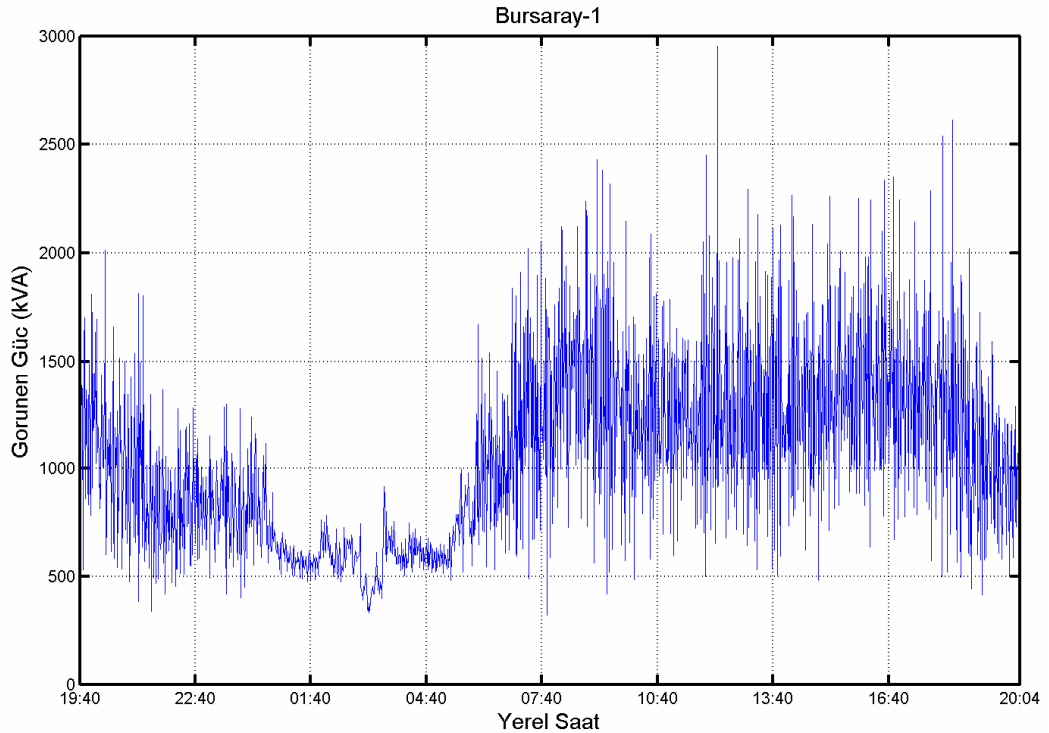
- Görünen güç, kVA
- Aktif güç, kW
- Reaktif güç, kVAr
- Akımın etkin değeri, A
- Gerilimin etkin değeri, kV
- Akım ve gerilim harmonikleri

2.9.1 Bursaray-1 fideri ölçümleri ve değerlendirmeler

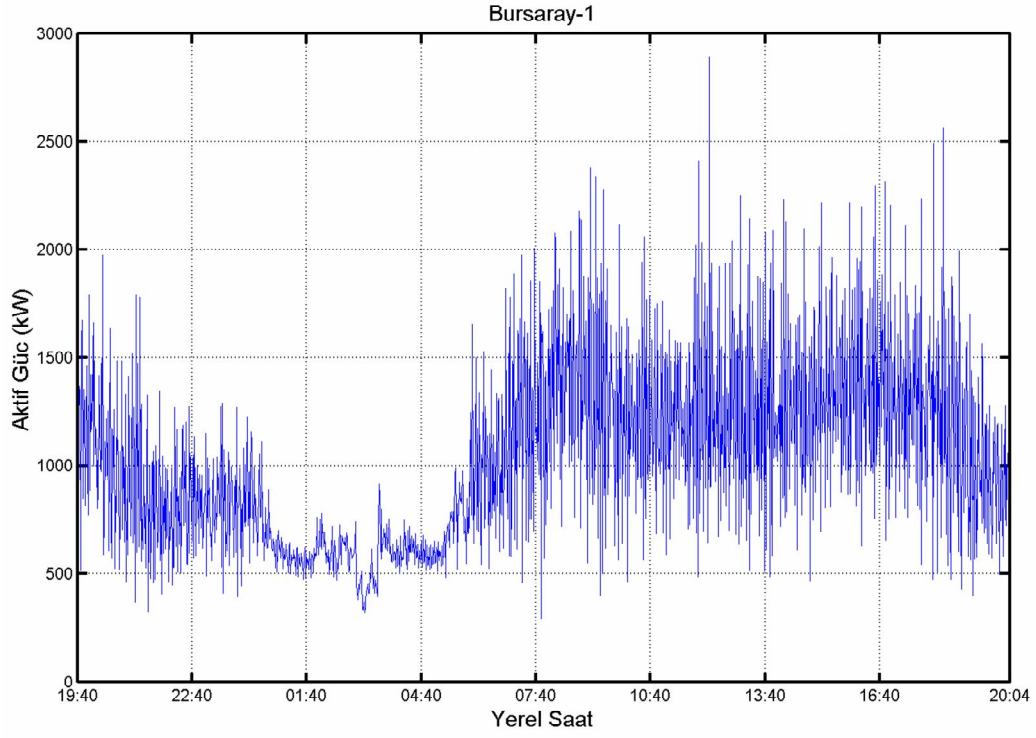
Bursaray-1 fiderinde gerçekleştirilen ölçümler ile aktif ve reaktif güç değişimleri 24 saat süreyle kaydedilmiştir. Ölçüm zaman diliminde gerçekleşen 24 saatlik aktif ve reaktif güç değişimleri Şekil 2.38, 2.39, 2.40, 2.41, 2.42 ve 2.43’de gösterilmektedir. Ayrıca belirtilen zaman diliminde gerçekleşen enerji tüketimleri aşağıdaki Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Bursaray-1 fiderinde ölçülen enerji tüketimleri.

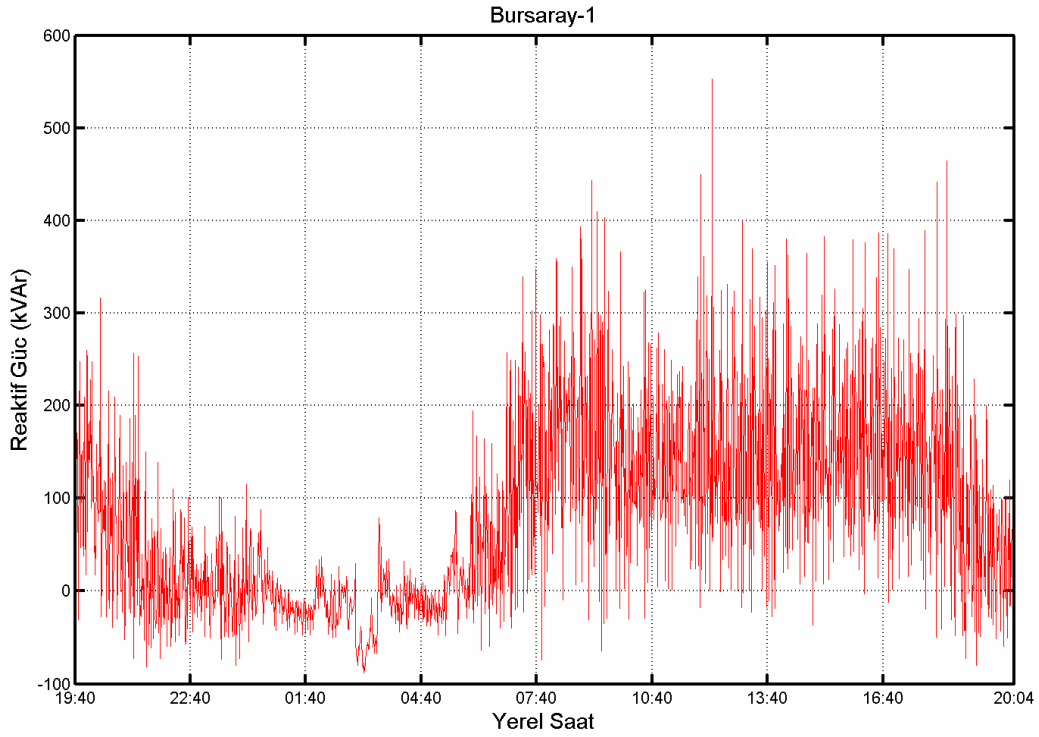
	Aktif Enerji Tüketimi (kWh)	Endüktif Reaktif Enerji Tüketimi (kVArh)	Kapasitif Reaktif Enerji Tüketimi (kVArh)	Endüktif /Aktif Enerji Oranı (%)	Kapasitif /Aktif Enerji Oranı (%)
Ölçülen Enerji Tüketimleri	25.247	2.743	757	10,87	2,99



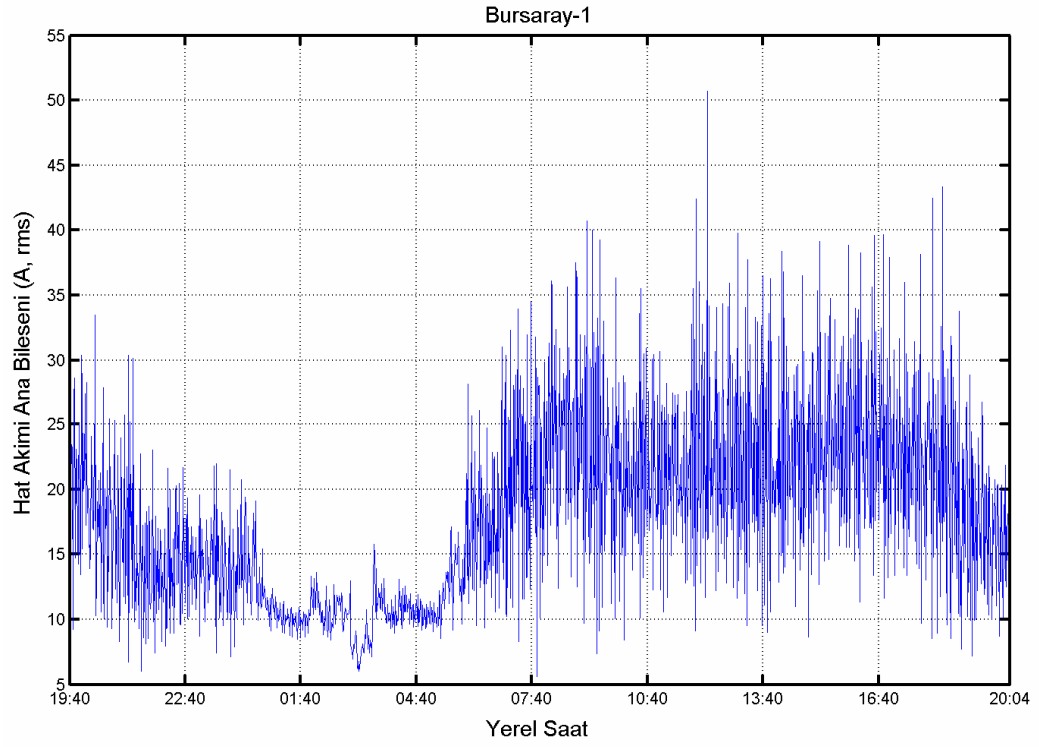
Şekil 2.38 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



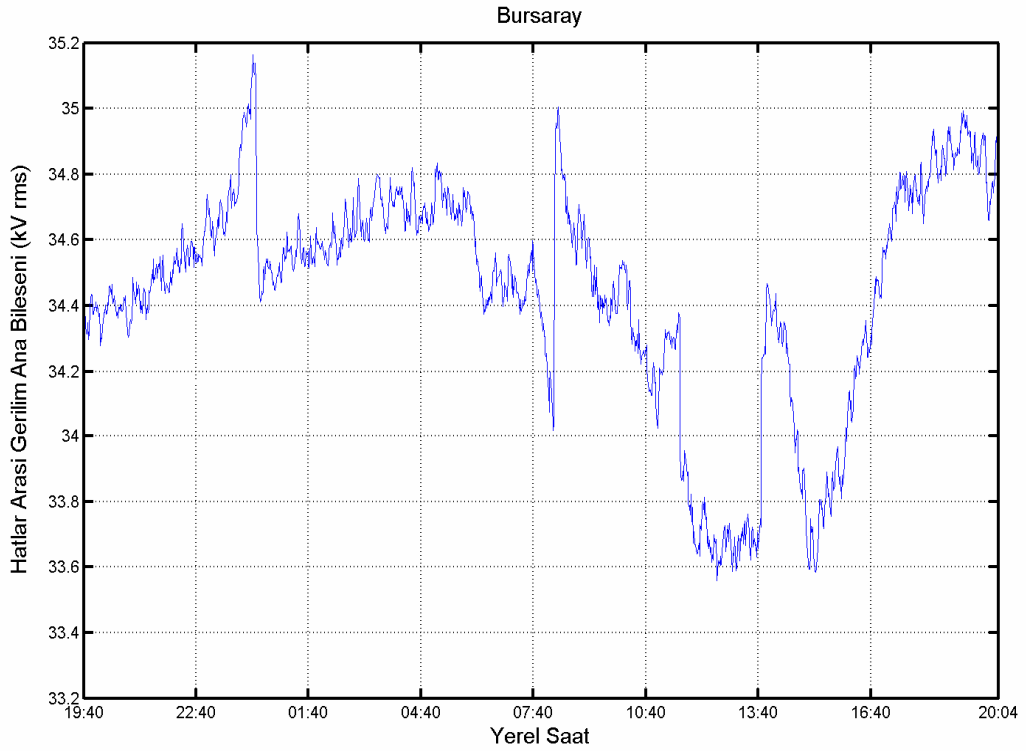
Şekil 2.39 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



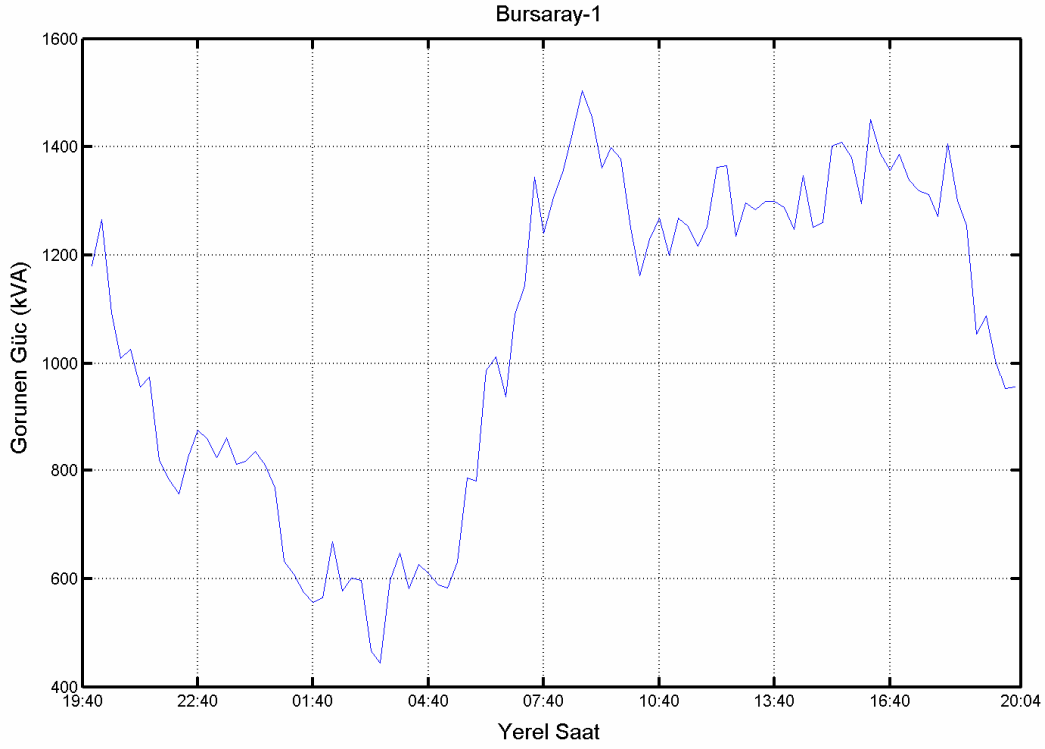
Şekil 2.40 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca reaktif güç (kVar) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.41 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca hat akımının ana bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.42 : Bursaray-1 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca hatlar arası gerilimin ana bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.43 : Bursaray-1 fiderinde 15 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

Çizelge 2.3’de Bursaray-1 fiderinde ölçülen akım harmoniklerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri, etkin değer ve maksimum yük akımının yüzdesi şeklinde verilmektedir. Konu ile ilgili standartlar göz önüne alınarak önemli akım harmoniklerinin zamana karşı değişimi ile akım ve gerilim toplam harmonik bozulumlarının zamana karşı değişimi Şekil 2.44-2.51’de gösterilmektedir.

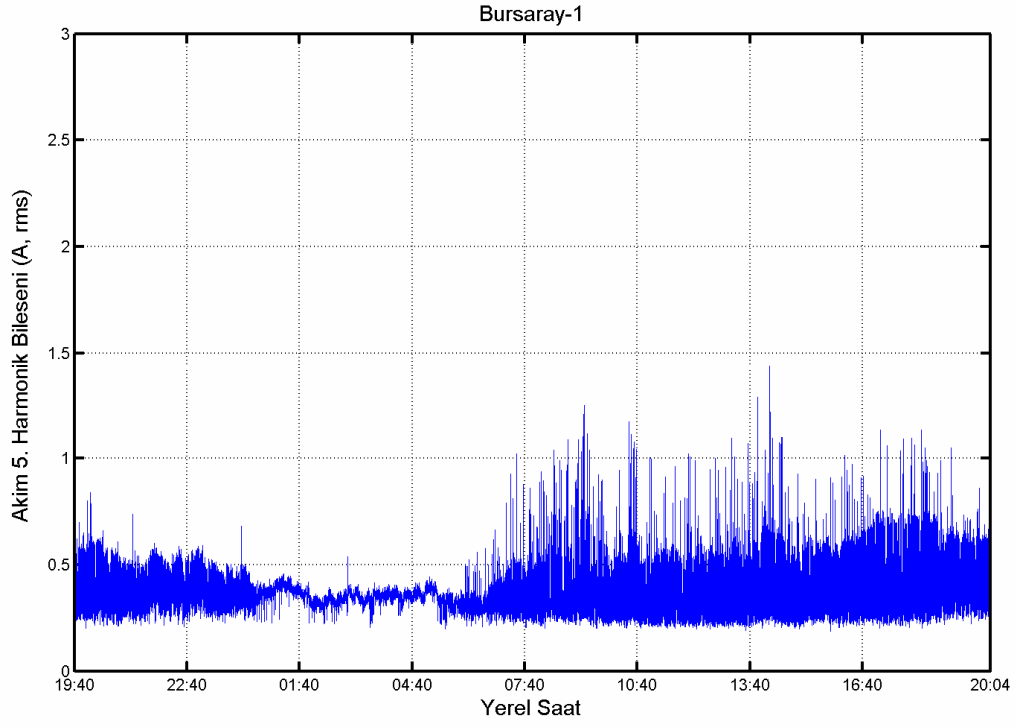
Bu değerlendirmede kullanılan varsayımlar şunlardır:

TEDAŞ yetkilileri tarafından daha önce yapılan incelemelerde verilen raporda I_{SC}/I_n oranı 50-100 arasında belirtilmektedir. Burada standartlarda belirtilen sınır değerleri bulmak amacıyla bu veri kullanılmıştır.

Kompanzasyon öncesi yapılan ölçümler ile karşılaştırıldığında, akım harmoniklerinin genliklerinin neredeyse aynı kaldığı gözlenmektedir. Fakat kompanzasyon sisteminin devreye girmesiyle çekilen maksimum yük akımının düşmesiyle, akım toplam harmonik bozulumu yüzde olarak artmış bulunmaktadır.

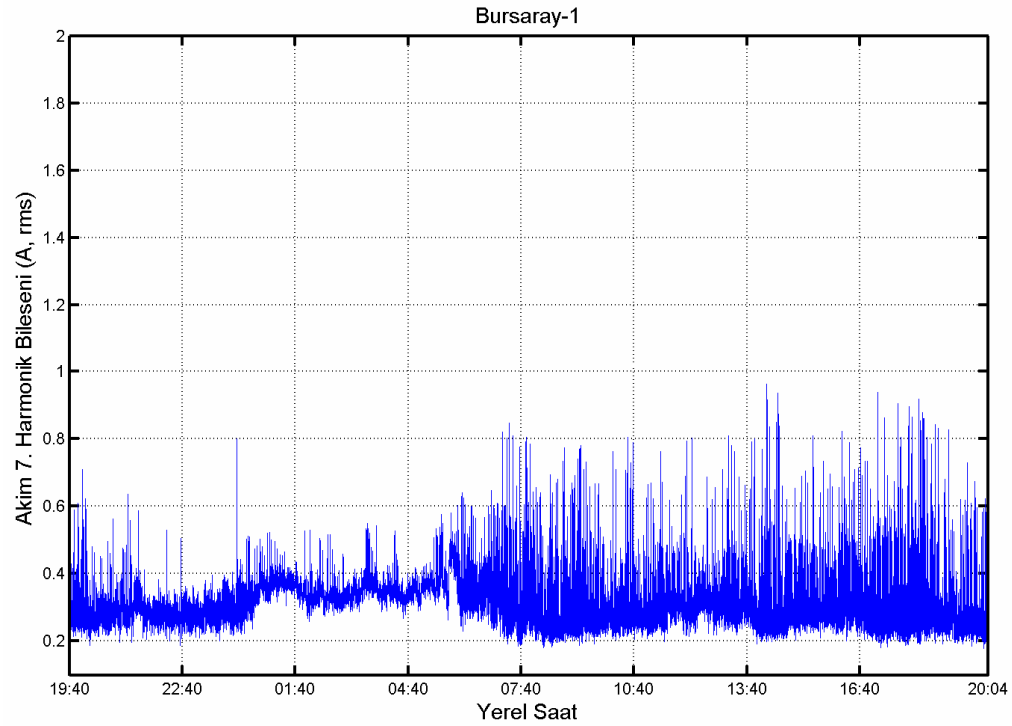
Çizelge 2.3 : Bursaray-1 fideri ölçülen akım harmonikleri (kompanzasyon sistemi devrede).

Harmonik Sırası	Toplam Yük Akımının Yüzdesi Olarak (%)				Etkin Değer (A-rms)		
	Minimum	Ortalama	Maksimum	Sınır Değer	Minimum	Ortalama	Maksimum
2	0.60	0.95	3.77	2,5	0.15	0.24	0.95
3	0.59	0.96	2.31	10	0.15	0.24	0.58
4	0.76	1.07	1.61	2,5	0.19	0.27	0.41
5	0.67	1.51	5.81	10	0.17	0.38	1.46
6	0.56	0.82	1.18	2,5	0.14	0.21	0.30
7	0.60	1.26	4.33	10	0.15	0.32	1.09
8	0.54	0.78	1.09	2,5	0.14	0.20	0.27
9	0.52	0.75	1.29	10	0.13	0.19	0.32
10	0.51	0.74	1.14	1,13	0.13	0.19	0.29
11	0.57	4.71	24.76	4,5	0.14	1.18	6.21
12	0.50	0.75	1.52	1,13	0.13	0.19	0.38
13	0.54	2.56	19.22	4,5	0.14	0.64	4.82
14	0.51	0.71	1.04	1,13	0.13	0.18	0.26
15	0.51	0.77	2.26	4,5	0.13	0.19	0.57
16	0.48	0.71	1.03	1	0.12	0.18	0.26
17	0.54	1.19	5.95	4,0	0.14	0.30	1.49
18	0.48	0.71	1.21	1,0	0.12	0.18	0.30
19	0.50	0.77	2.11	4,0	0.12	0.19	0.53
20	0.49	0.70	0.98	1,0	0.12	0.18	0.25
21	0.52	0.76	1.82	4,0	0.13	0.19	0.46
22	0.49	0.71	1.01	0,38	0.12	0.18	0.25
23	0.57	1.30	9.64	1,5	0.14	0.33	2.42
24	0.49	0.72	1.05	0,38	0.12	0.18	0.26
25	0.50	0.99	6.65	1,5	0.13	0.25	1.67
26	0.47	0.70	0.98	0,38	0.12	0.18	0.25
27	0.51	0.87	4.06	1,5	0.13	0.22	1.02
28	0.48	0.70	1.19	0,38	0.12	0.18	0.30
29	0.52	1.21	6.80	1,5	0.13	0.30	1.71
30	0.49	0.70	1.05	0,38	0.12	0.18	0.26
31	0.50	0.74	1.88	1,5	0.12	0.19	0,47

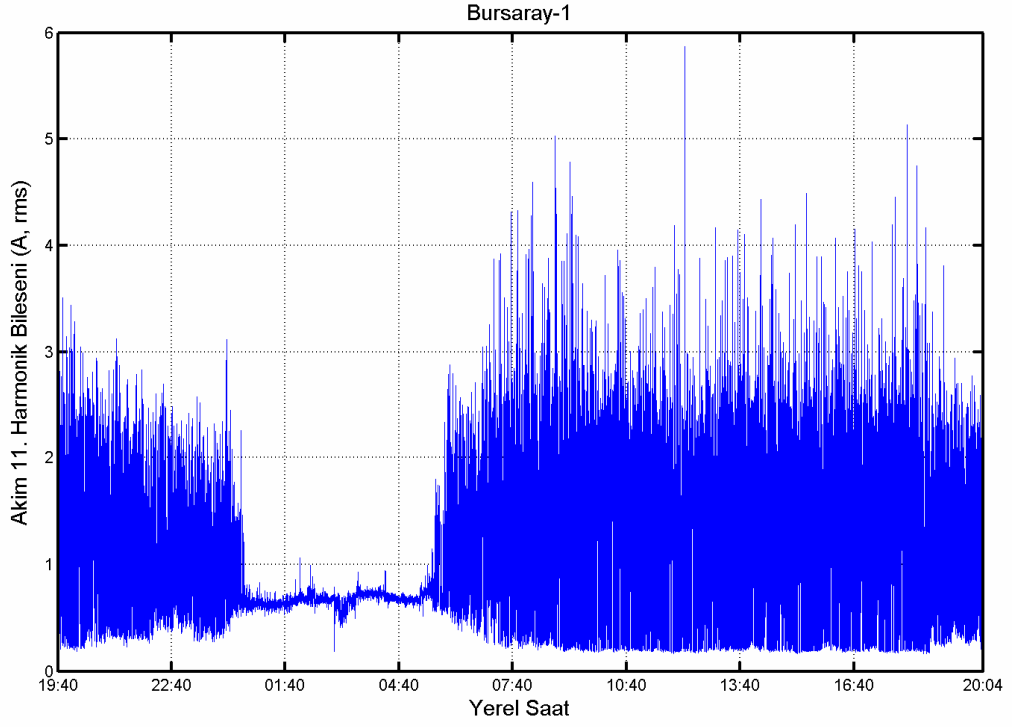


Şekil 2.44 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 5. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

Şekil 2.44-2.51’de Bursaray 1 nolu besleme kolu için, kompanzasyon sisteminin devrede olduğu durumlara ilişkin ölçme sonuçları verilmiştir.

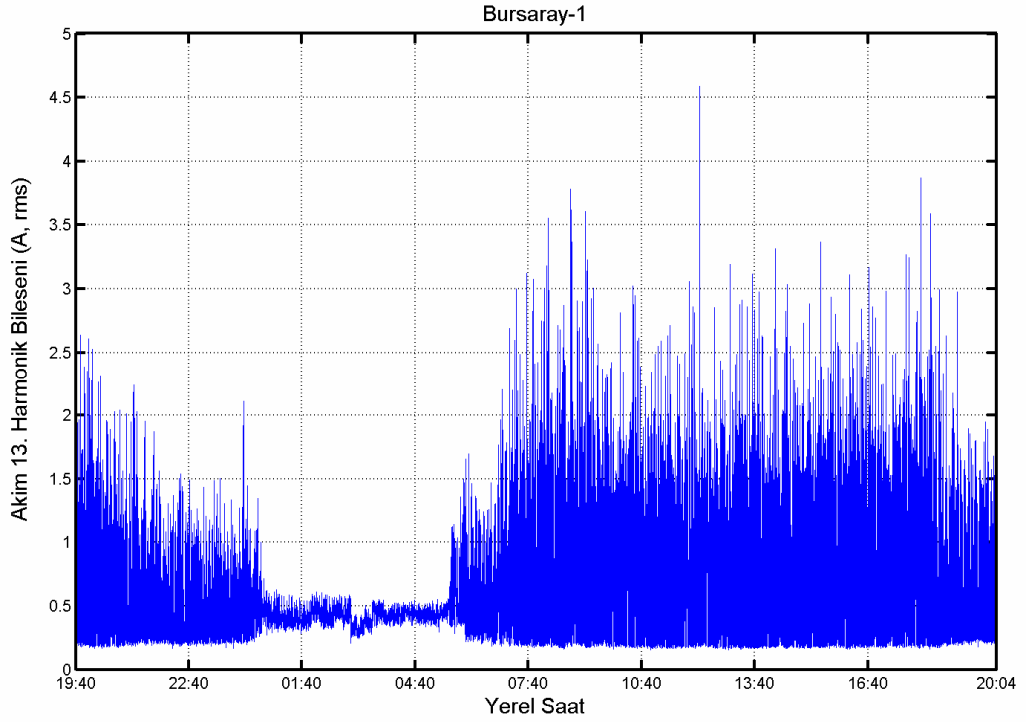


Şekil 2.45 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 7. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



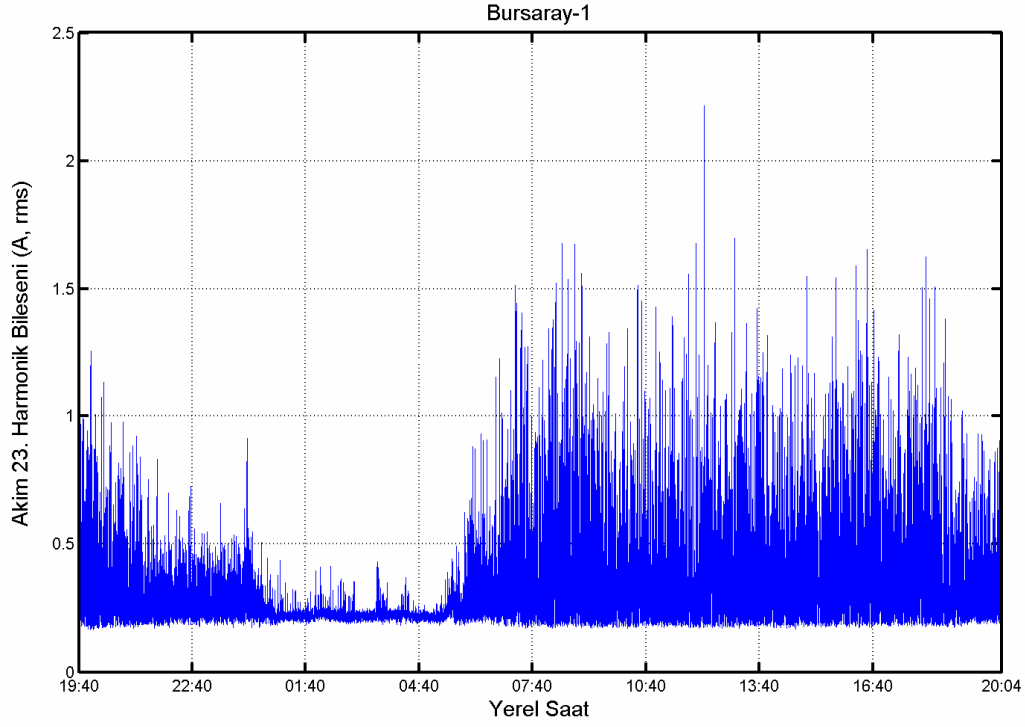
Şekil 2.46 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 11. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

Şekil 2.46-2.50’de trenin çalışmadığı 00:30-05:30 saatleri arasında güç çekilmediği için akımdaki değişimlerin az olduğu görülmektedir.

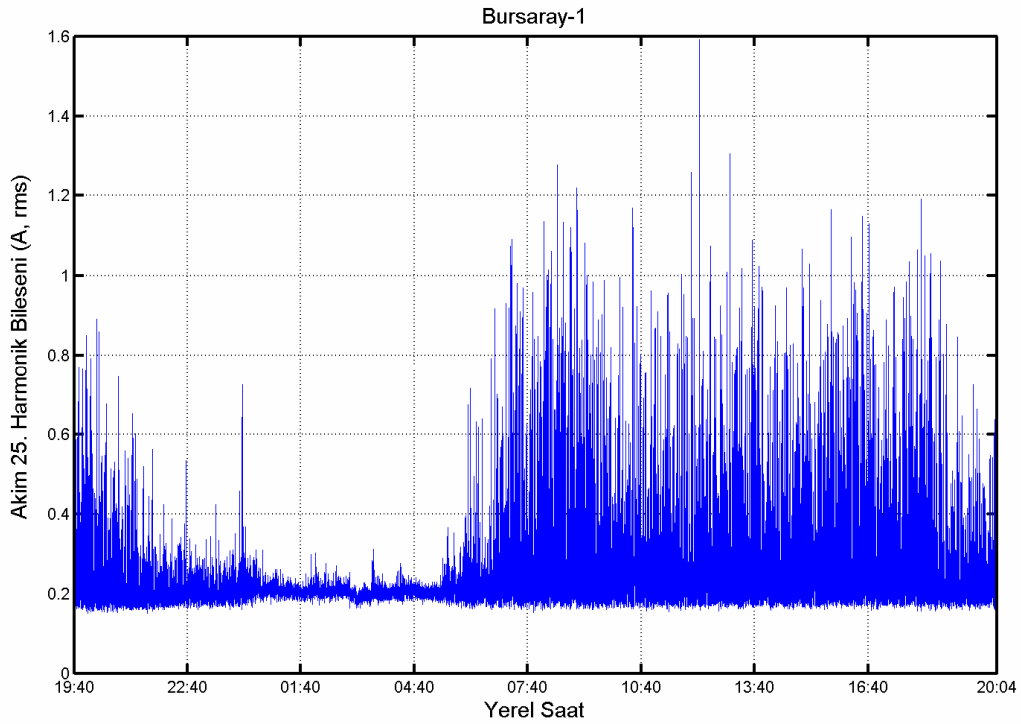


Şekil 2.47 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 13. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

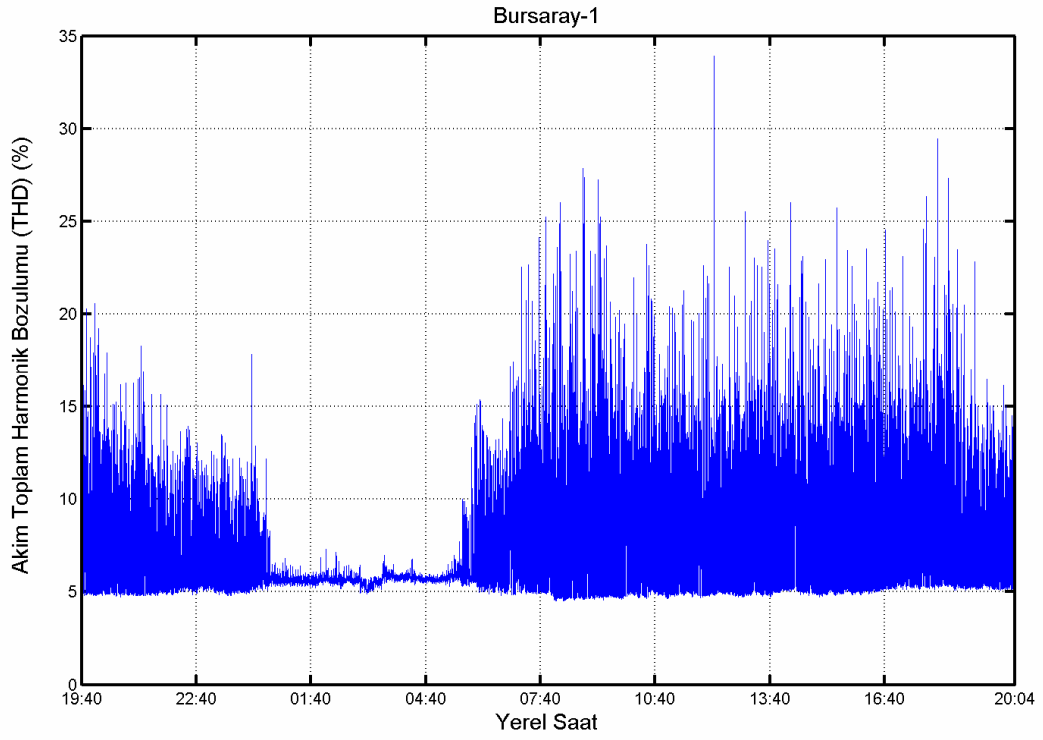
Şekil 2.48-2.49’da RGK devrede iken Bursaray-1 koluna ait akımın 23. ve 25. harmonik bileşenlerinin değişimi görülmektedir.



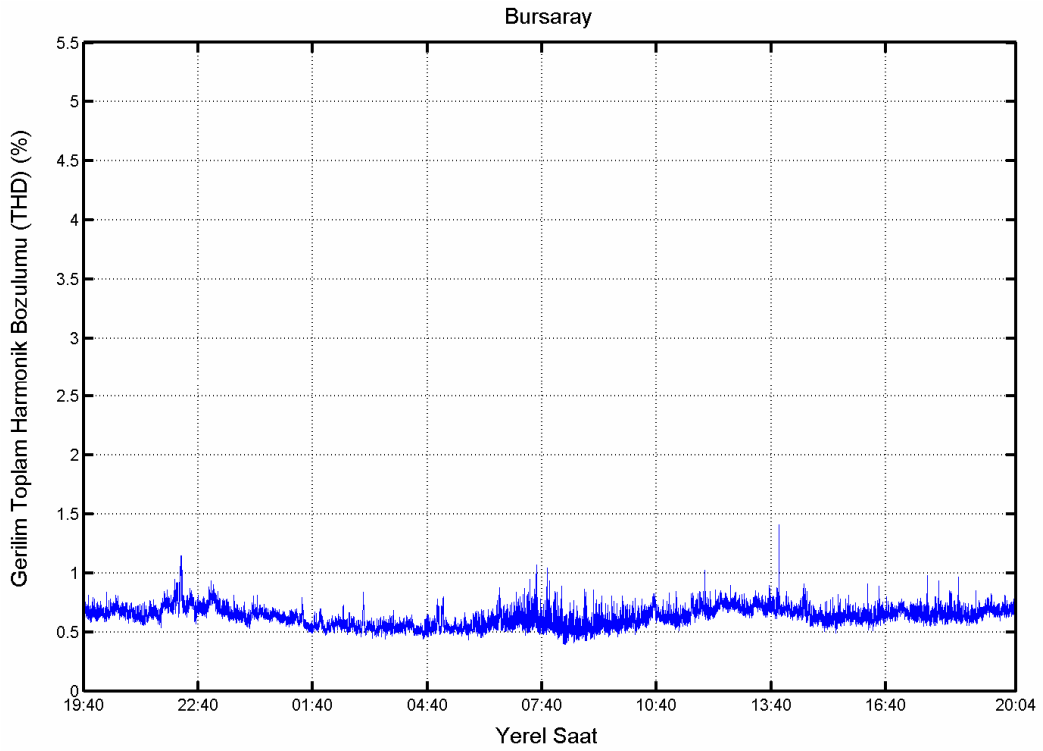
Şekil 2.48 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 23. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.49 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 25. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.50 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın toplam harmonik bozulumu değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



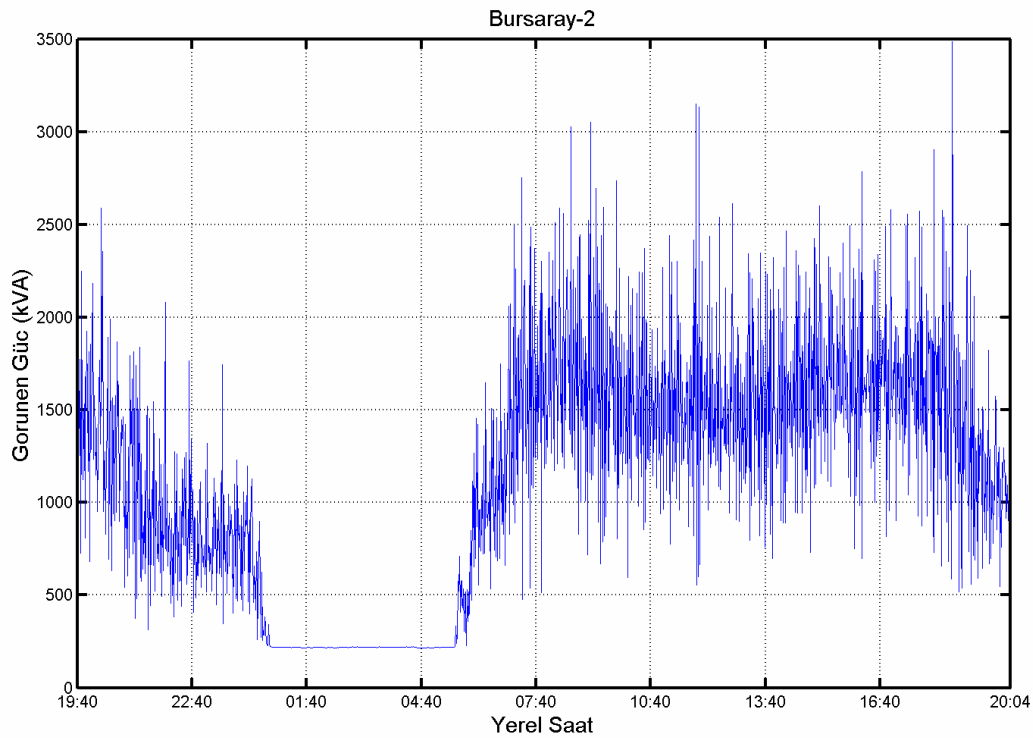
Şekil 2.51 : Bursaray-1 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca gerilimin toplam harmonik bozulumu değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

2.9.2 Bursaray-2 fideri ölçümleri ve değerlendirmeler

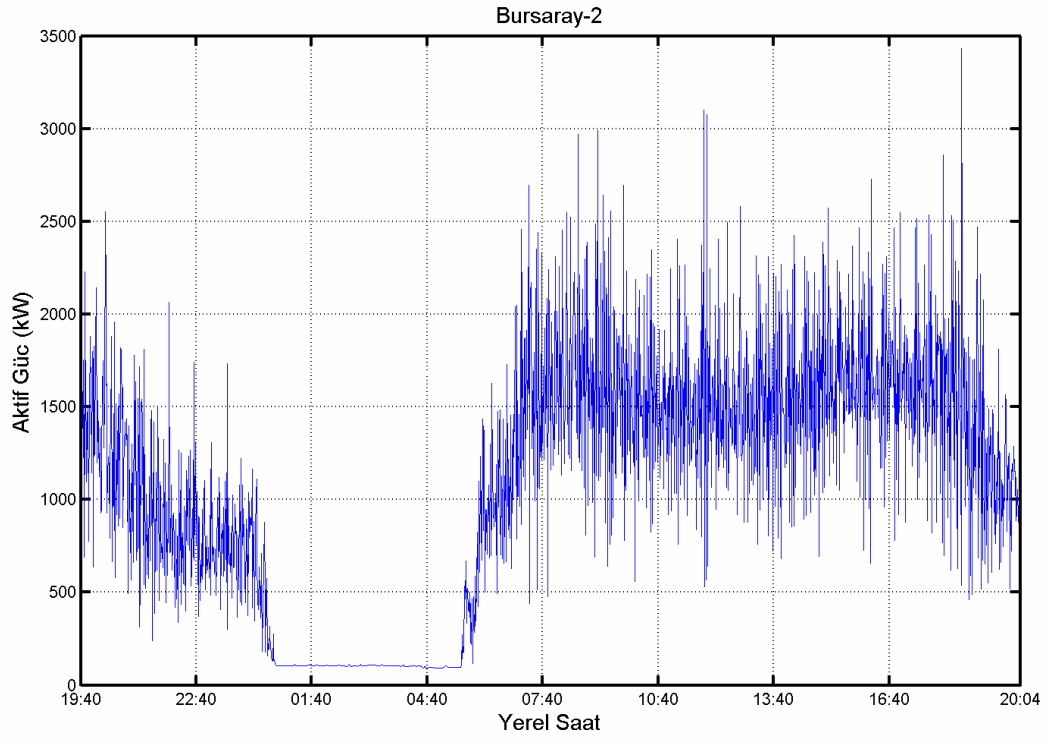
Bursaray-2 fiderinde gerçekleştirilen ölçümler ile aktif ve reaktif güç değişimleri 24 saat süreyle kaydedilmiştir. Ölçüm zaman diliminde gerçekleşen 24 saatlik aktif ve reaktif güç değişimleri Şekil 2.52, 2.53, 2.54, 2.55, 2.56 ve 2.57’de gösterilmektedir. Ayrıca belirtilen zaman diliminde gerçekleşen enerji tüketimleri Çizelge 2.4’teki gibi olmuştur:

Çizelge 2.4 : Bursaray-2 fiderinde ölçülen enerji tüketimleri.

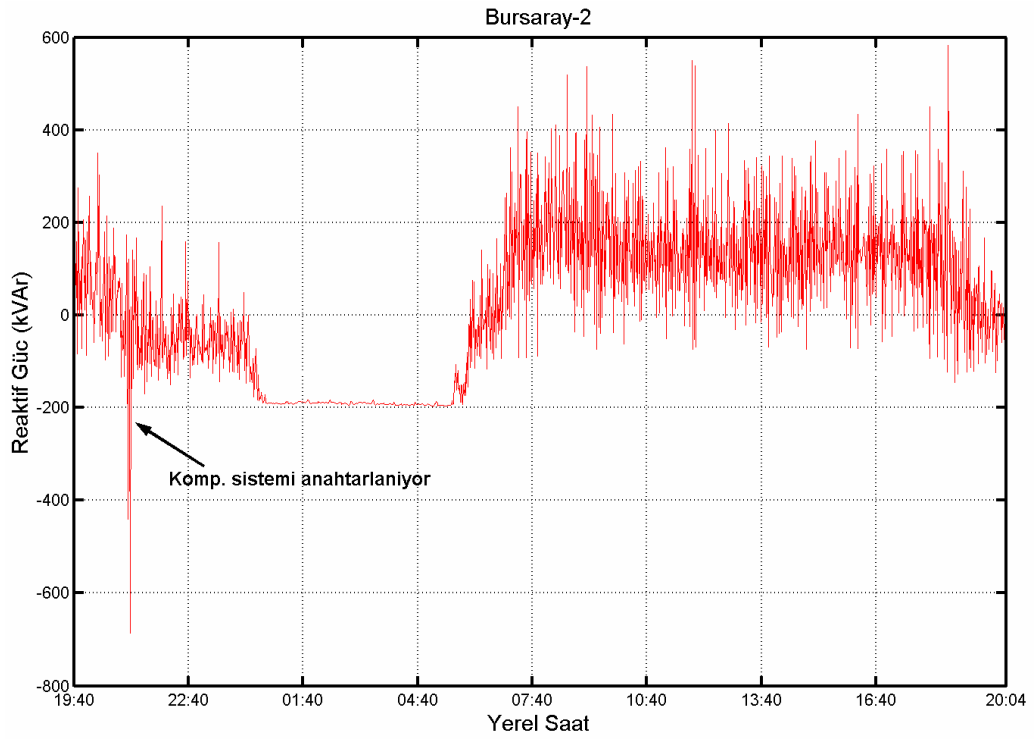
	Aktif Enerji Tüketimi (kWh)	Endüktif Reaktif Enerji Tüketimi (kVArh)	Kapasitif Reaktif Enerji Tüketimi (kVArh)	Endüktif /Aktif Enerji Oranı (%)	Kapasitif / Aktif Enerji Oranı (%)
Ölçülen Enerji Tüketimleri	26.574	2.865	2.226	10,78	8,38



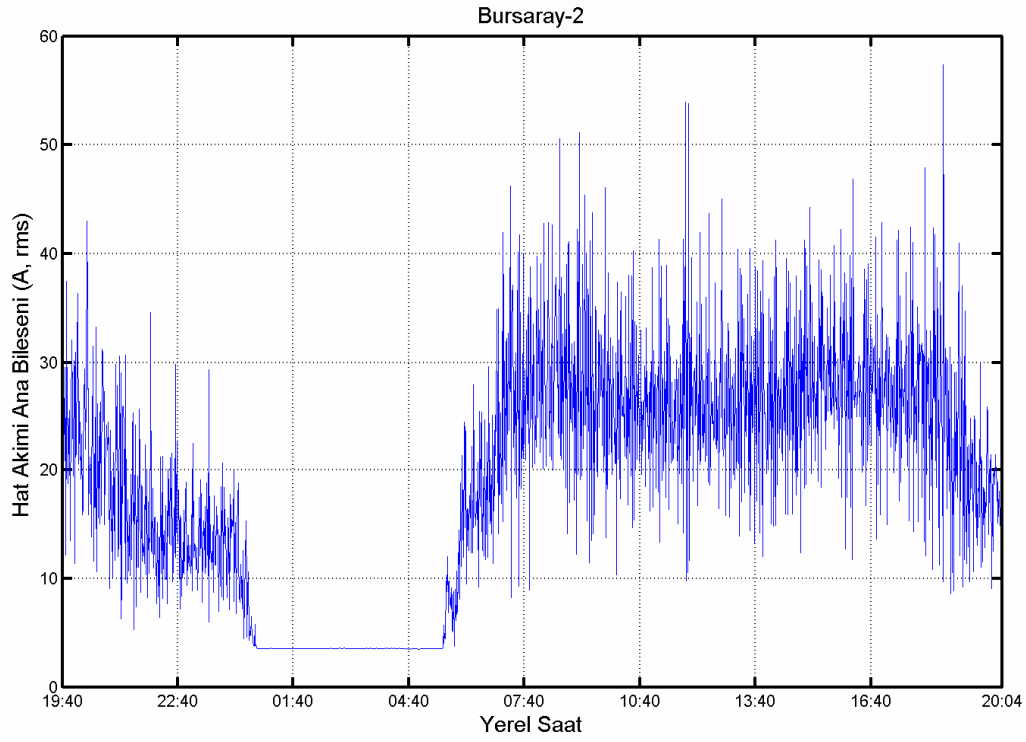
Şekil 2.52 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görünen güç (kVA) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



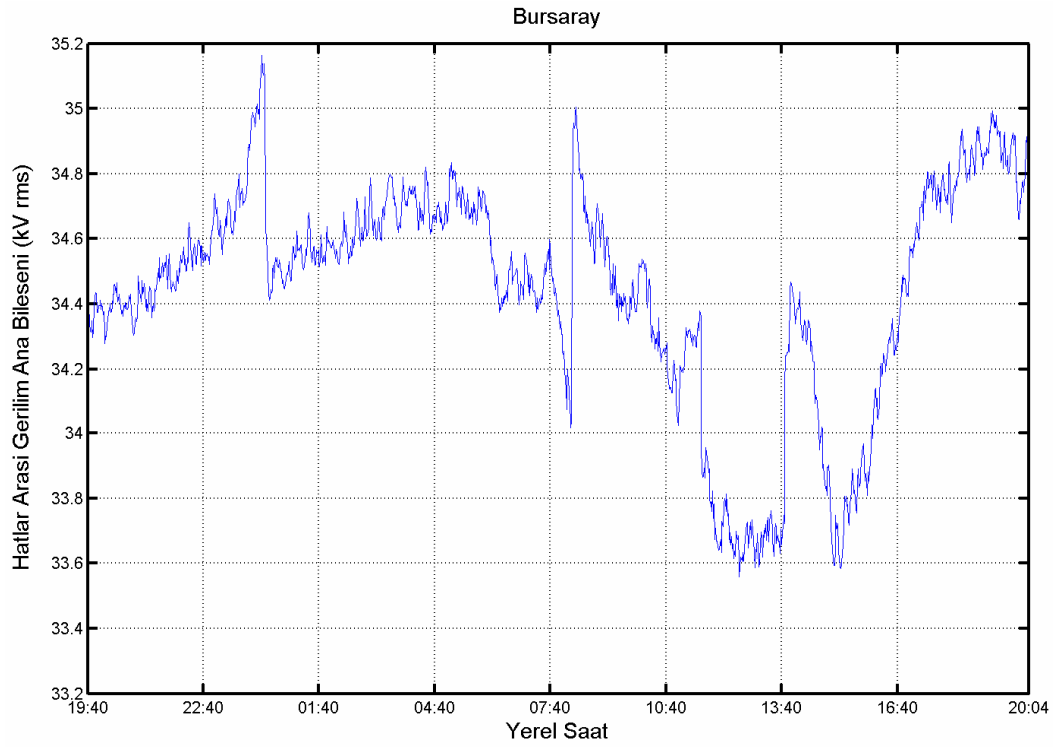
Şekil 2.53 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca aktif güç (kW) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



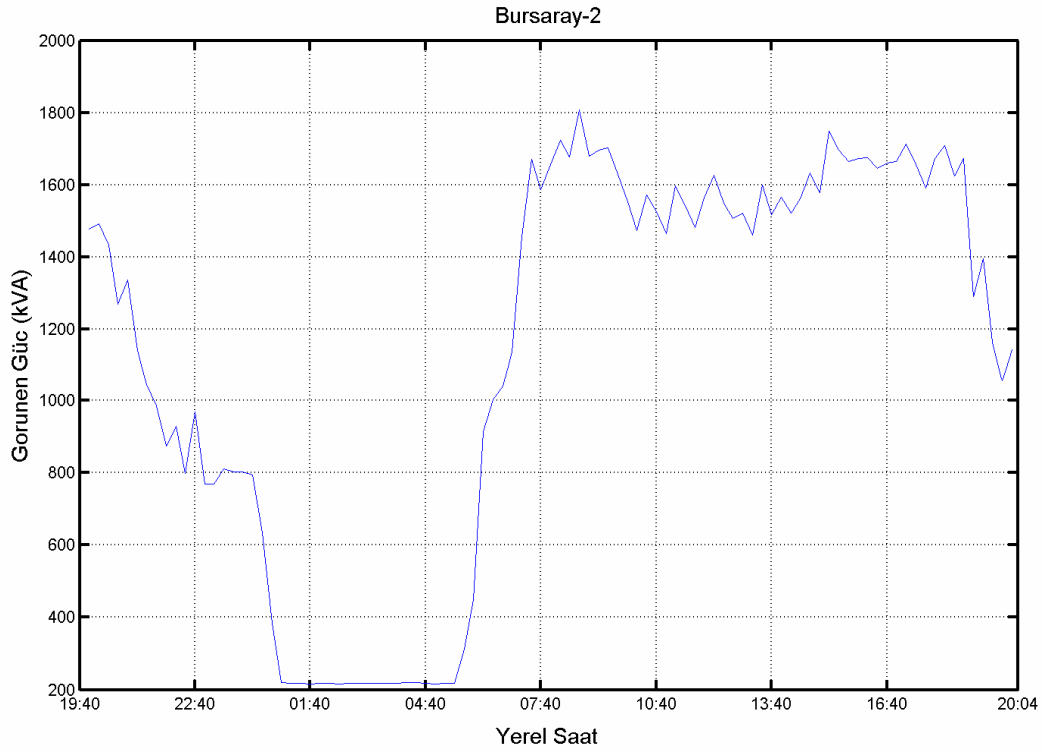
Şekil 2.54 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca reaktif güç (kVar) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.55 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca hat akımı ana bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.56 : Bursaray-2 fiderinde 1 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca hatlar arası gerilimin ana bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.57 : Bursaray-2 fiderinde 15 dakikalık ortalamalarla 1 gün boyunca görülen güç (kVA) değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

Çizelge 2.5’de Bursaray-2 fiderinde ölçülen akım harmoniklerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri, etkin değer (rms) ve maksimum yük akımının yüzdesi şeklinde verilmektedir. Konu ile ilgili standartlar göz önüne alınarak önemli akım harmoniklerinin zamana göre değişimi ile akım ve gerilim toplam harmonik bozulumlarının zamana karşı değişimi Şekil 2.58, 2.59, 2.60, 2.61, 2.62, 2.63, 2.64 ve 2.65’de gösterilmektedir.

Bu değerlendirmede kullanılan varsayımlar şunlardır:

TEDAŞ yetkilileri tarafından daha önce yapılan incelemelerde verilen raporda I_{SC}/I_n oranı 50-100 arasında belirtilmektedir. Burada standartlarda belirtilen sınır değerleri bulmak amacıyla bu veri kullanılmıştır.

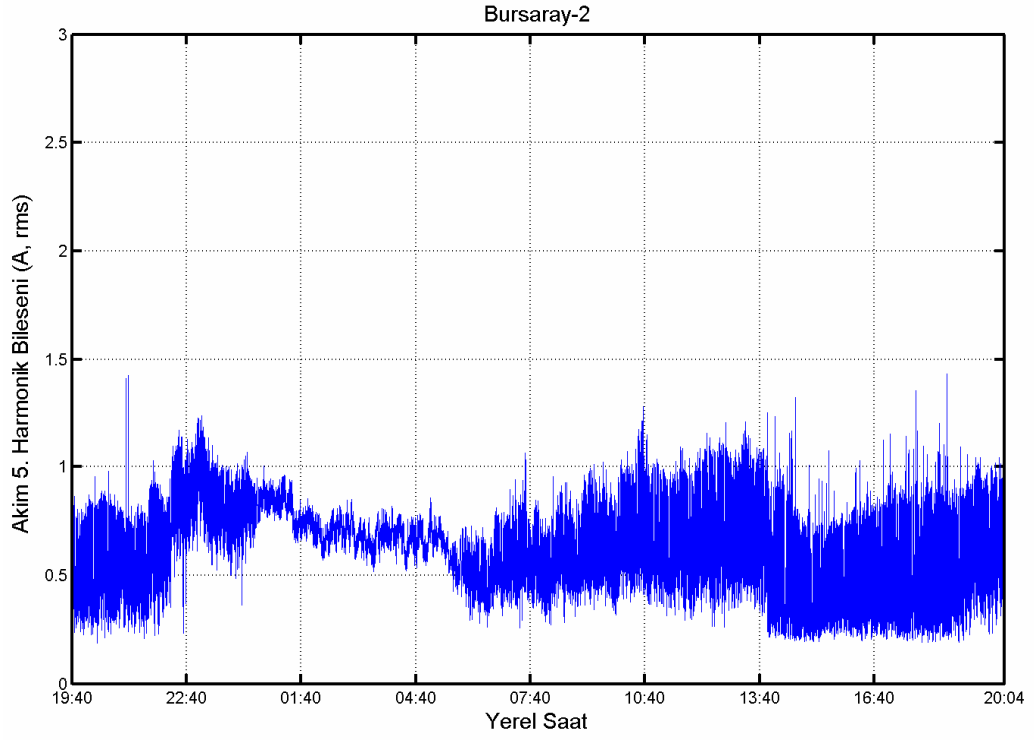
Ayrıca Bursaray-2 fideri için 15 dakikalık maksimum güç talebi Şekil 2.57’de görüldüğü üzere 1,8 MVA olarak bulunmuş ve buna karşılık gelen akım $I_n = 30,3$ A hesaplanmıştır.

Kompanzasyon öncesi yapılan ölçümler ile karşılaştırıldığında, akım harmoniklerinin genliklerinin yaklaşık aynı kaldığı gözlenmektedir. Fakat kompanzasyon sisteminin

devreye girmesiyle çekilen maksimum yük akımının düşmesiyle, akım toplam harmonik bozulumu yüzde olarak artmış bulunmaktadır.

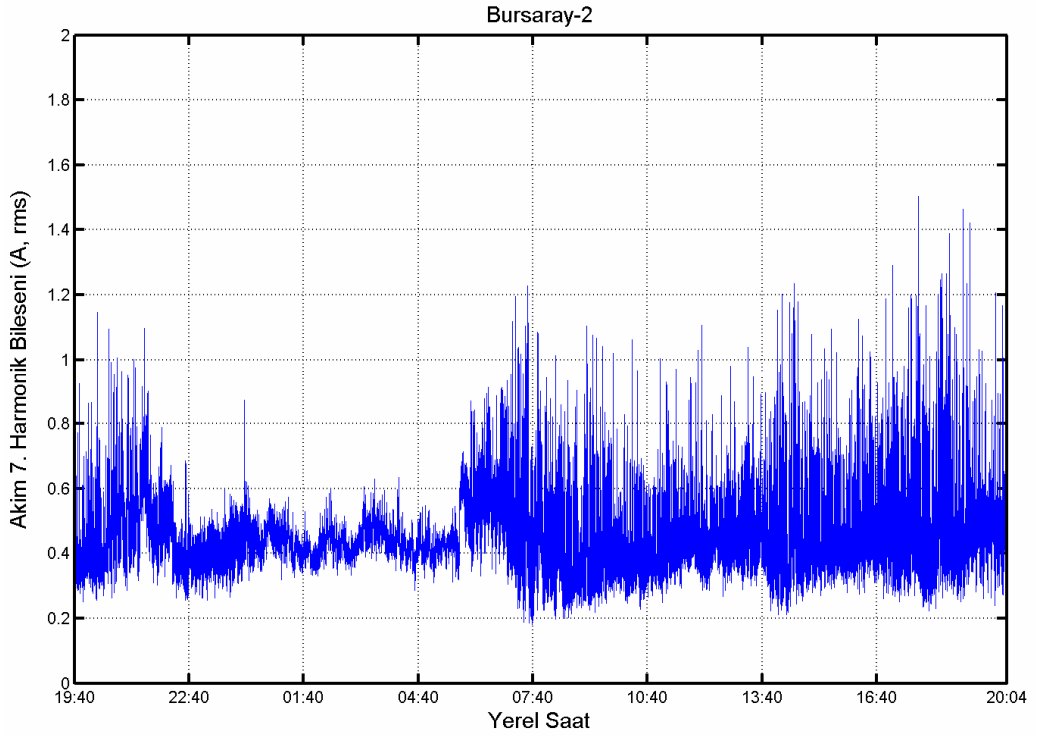
Çizelge 2.5 : Bursaray-2 fideri ölçülen akım harmonikleri (kompanzasyon sistemi devrede).

Harmonik Sırası	Toplam Yük Akımının Yüzdesi Olarak, (%)				Etkin Değer, (A-rms)		
	Minimum	Ortalama	Maksimum	Sınır Değer	Minimum	Ortalama	Maksimum
2	0.45	2.08	4.20	2,5	0.14	0.63	1.27
3	0.44	1.80	7.99	10	0.13	0.55	2.42
4	0.51	1.63	3.11	2,5	0.16	0.49	0.94
5	0.52	2.02	5.71	10	0.16	0.61	1.73
6	0.40	1.06	2.27	2,5	0.12	0.32	0.69
7	0.54	1.50	5.31	10	0.16	0.46	1.61
8	0.41	0.68	1.38	2,5	0.12	0.21	0.42
9	0.42	0.65	1.47	10	0.13	0.20	0.44
10	0.41	0.59	1.08	1,13	0.12	0.18	0.33
11	0.47	4.82	23.44	4,5	0.14	1.46	7.10
12	0.38	0.59	1.29	1,13	0.11	0.18	0.39
13	0.44	3.04	19.12	4,5	0.13	0.92	5.79
14	0.42	0.58	0.88	1,13	0.13	0.18	0.27
15	0.42	0.63	1.74	4,5	0.13	0.19	0.53
16	0.41	0.59	0.82	1	0.12	0.18	0.25
17	0.46	0.91	4.78	4,0	0.14	0.27	1.45
18	0.41	0.59	0.86	1,0	0.12	0.18	0.26
19	0.41	0.74	2.52	4,0	0.12	0.22	0.76
20	0.42	0.59	0.86	1,0	0.13	0.18	0.26
21	0.42	0.64	1.31	4,0	0.13	0.19	0.40
22	0.42	0.60	1.18	0,38	0.13	0.18	0.36
23	0.48	1.78	16.31	1,5	0.14	0.54	4.94
24	0.42	0.60	1.31	0,38	0.13	0.18	0.40
25	0.44	0.91	6.25	1,5	0.13	0.28	1.89
26	0.39	0.58	0.99	0,38	0.12	0.18	0.30
27	0.43	0.67	2.93	1,5	0.13	0.20	0.89
28	0.40	0.58	0.87	0,38	0.12	0.18	0.26
29	0.43	0.88	4.80	1,5	0.13	0.27	1.45
30	0.40	0.58	0.83	0,38	0.12	0.18	0.25
31	0.42	0.61	1.19	1,5	0.13	0.18	0.36

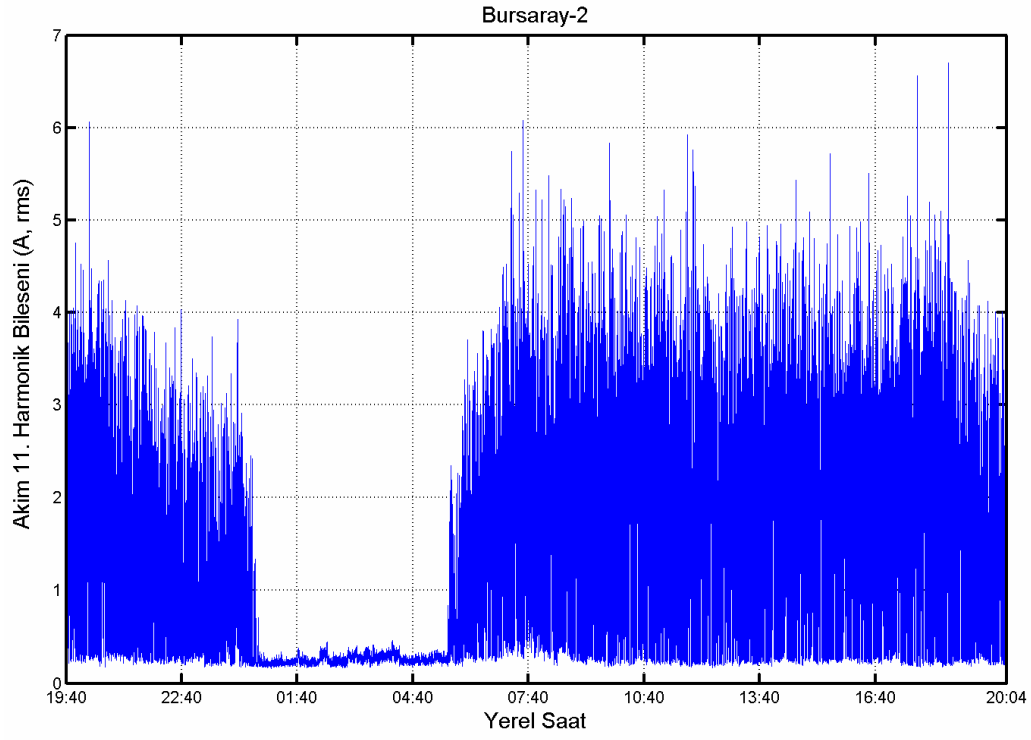


Şekil 2.58 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 5. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

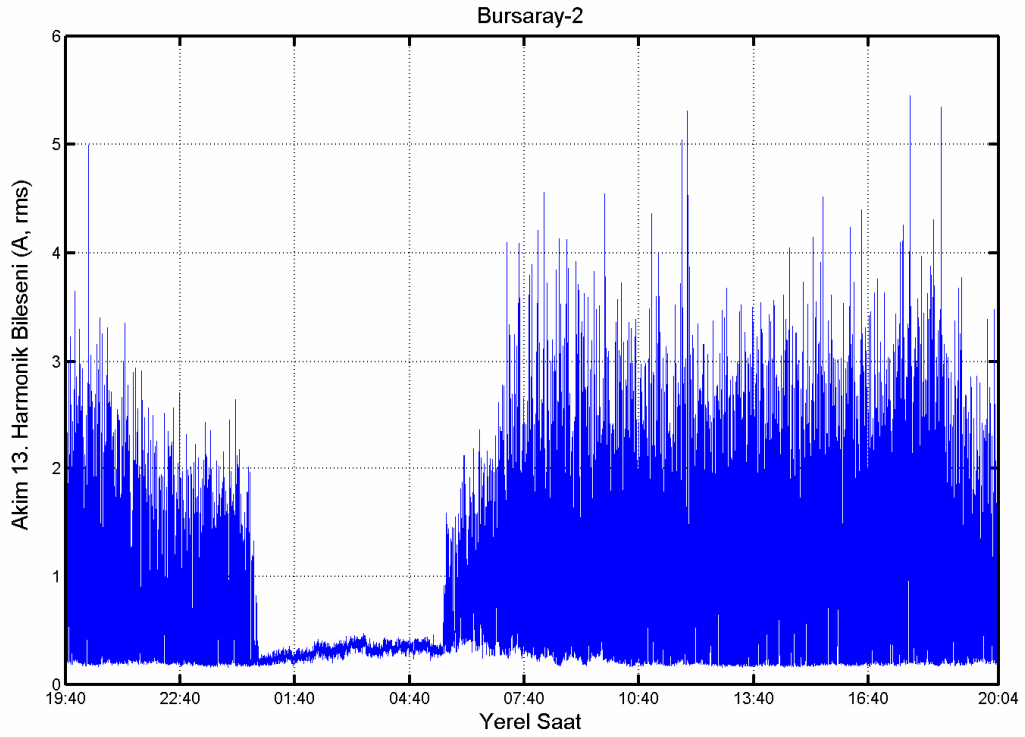
Şekil 2.58-2.65’de Bursaray 2 nolu besleme kolu için, kompanzasyon sisteminin devrede olduğu durumlara ilişkin ölçme sonuçları verilmiştir.



Şekil 2.59 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 7. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

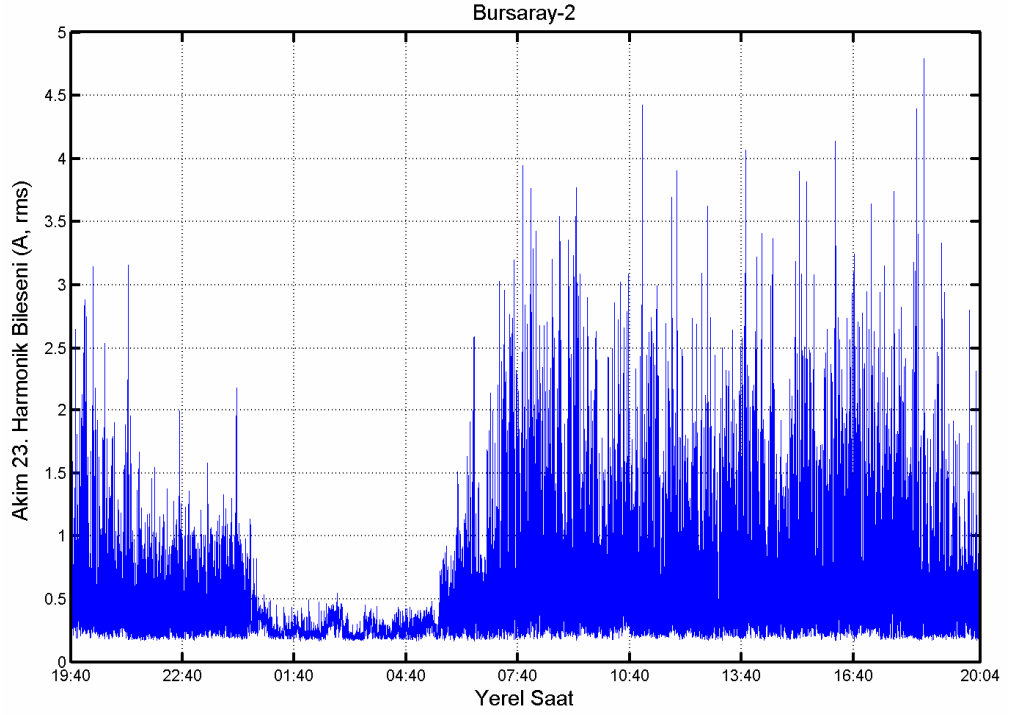


Şekil 2.60 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 11. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

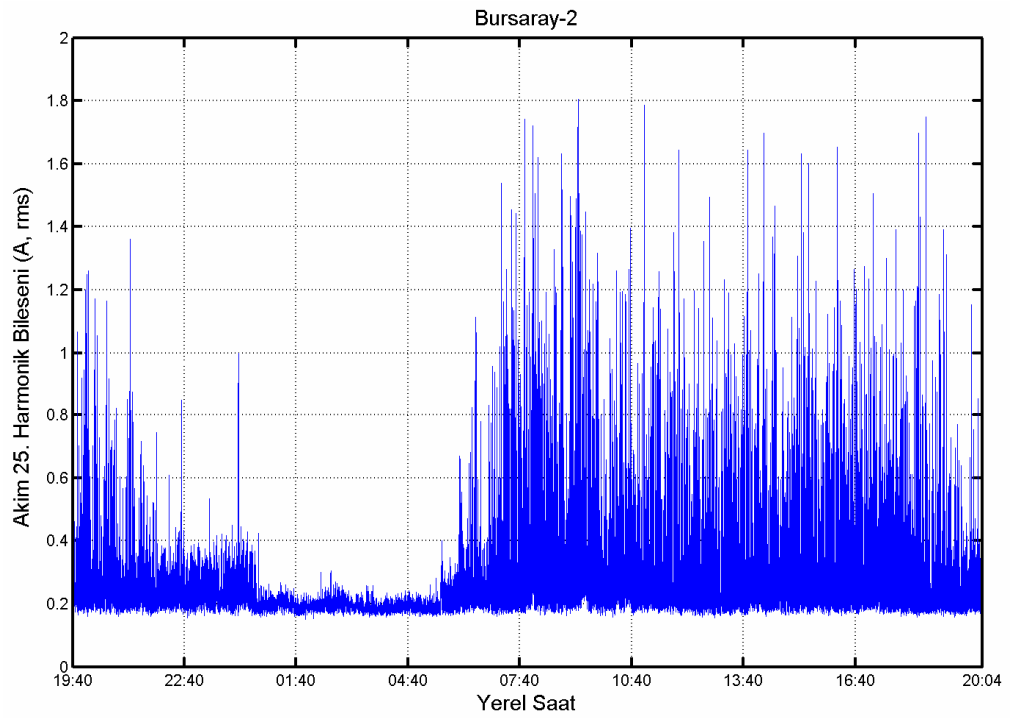


Şekil 2.61 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 13. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

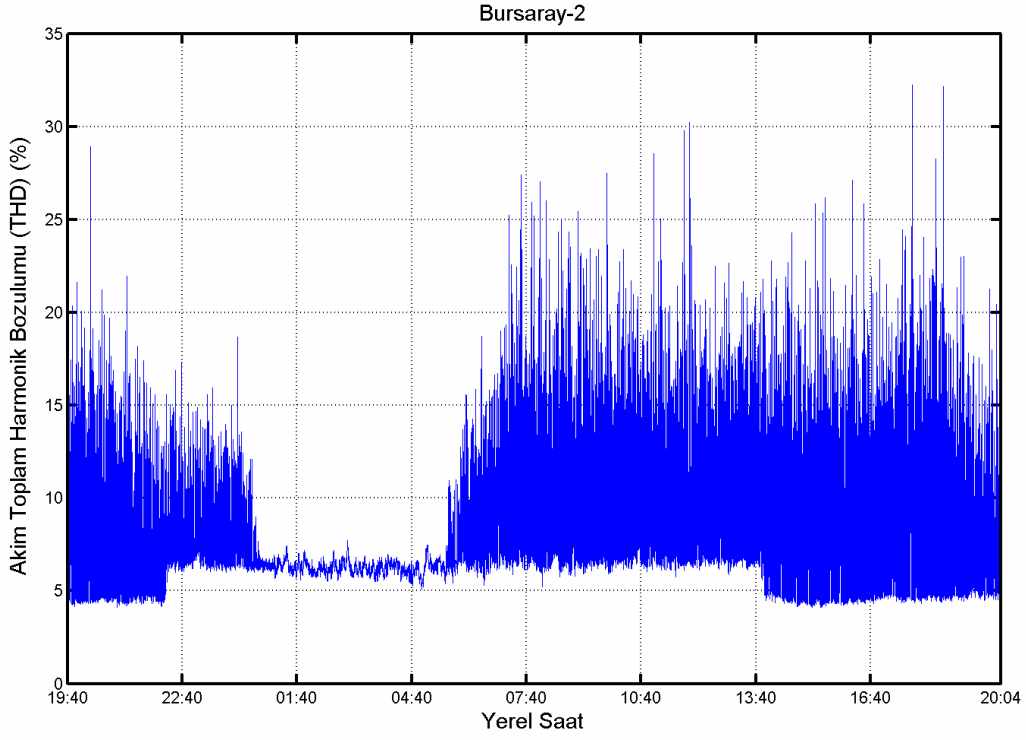
Şekil 2.62-63’de RGK devrede iken Bursaray-2 koluna ait akımın 23. ve 25. harmonik bileşenlerinin değişimi görülmektedir.



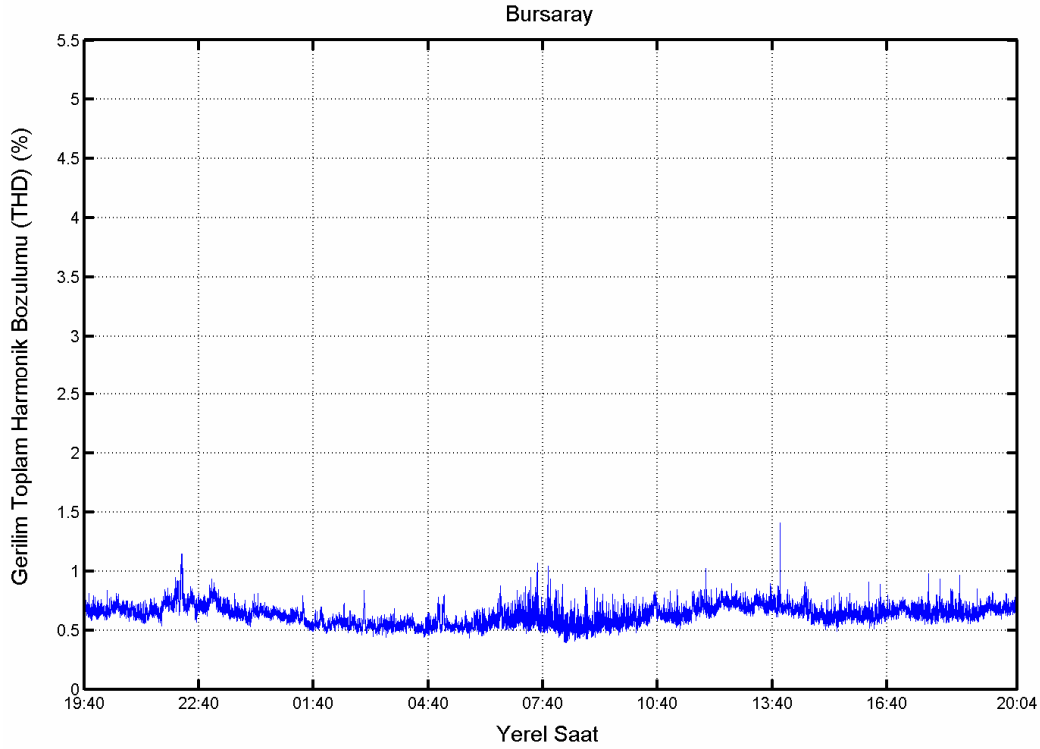
Şekil 2.62 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 23. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.63 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın 25. harmonik bileşeninin değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.64 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca akımın toplam harmonik bozulumu değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).



Şekil 2.65 : Bursaray-2 fiderinde 3 saniyelik ortalamalarla 1 gün boyunca gerilimin toplam harmonik bozulumu değişimi (kompanzasyon sistemi devrede).

2.9.3 Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderleri sayaç okumaları

Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderlerine ait sayaçların okunmasına, kompanzasyon sistemlerinin bir haftalık deneme üretimlerinin başlangıcı olan 24/12/2003 tarihinde saat 14:05'de başlanmıştır. Deneme süresi boyunca sayaçlar yaklaşık olarak aynı saatlerde okunmuştur. Her iki fiderin sayaç okumaları Çizelge 2.6'da verilmektedir.

En sağdaki sütunda (yüzdelere sütunu) her iki fiderin (BR-1: Bursaray-1, BR-2: Bursaray-2), 24/12/2003 tarihinden itibaren endüktif reaktif ve kapasitif reaktif enerji değişimlerinin aktif enerji değişimine olan oranları yüzde olarak verilmiştir.

Çizelge 2.6 : Bursaray-1 ve Bursaray-2 fiderlerinde ölçülen enerji tüketimleri (kompanzasyon sistemi devrede).

		Bursaray-1			Bursaray-2			YÜZDELER (%)			
TARİH	SAAT	AKTİF	END.	KAP.	AKTİF	END.	KAP.	END. BR-1 BR-2	KAP. BR-1 BR-2		
24/12/03	14:05	23,17	0,71	6,2	22,69	0,31	23,40	0	0	0	0
25/12/03	13:25	23,77	0,75	6,25	23,31	0,37	23,46	6,7	9,7	8,3	8,3
26/12/03	14:00	24,44	0,78	6,32	24,00	0,44	23,51	5,5	9,9	9,8	8,4
27/12/03	14:52	25,13	0,83	6,36	24,72	0,52	23,56	6,1	10,3	8,2	7,9
28/12/03	14:00	25,78	0,86	6,38	25,28	0,56	23,61	5,7	9,7	6,9	8,1
29/12/03	14:15	26,46	0,89	6,42	25,91	0,63	23,66	5,5	9,9	6,7	8,1
30/12/03	14:00	27,13	0,93	6,45	26,58	0,69	23,71	5,6	9,8	6,3	8,0
31/12/03	13:55	27,79	0,97	6,48	27,24	0,77	23,76	5,6	10,1	6,1	7,9

Deneme üretimi sonunda aşağıdaki değerleri ulaşılmıştır:

(Sayaç çarpanı = 39600)

Bursaray-1 fideri:

Aktif enerji değişimi = $4,62 \times 39600 = 182952$ kWh

Endüktif reaktif enerji değişimi = $0,26 \times 39600 = 10296$ kVAr-h (% 5,63)

Kapasitif reaktif enerji değişimi = $0,28 \times 39600 = 11088$ kVAr-h (% 6,06)

Bursaray-2 fideri:

Aktif enerji değişimi = $4,55 \times 39600 = 180180$ kWh

Endüktif reaktif enerji değişimi = $0,46 \times 39600 = 18216$ kVAr-h (% 10,11)

Kapasitif reaktif enerji değişimi = $0,36 \times 39600 = 14256$ kVAr-h (% 7,91)

3. BURSARAY HAFİF RAYLI SİSTEMİ TEMEL GÜÇ PROBLEMİ AA/DA DÖNÜŞÜM SİSTEMİ AKIM HARMONİKLERİ PROBLEMLERİ

3.1 Harmonik Nedir?

Gerilim ve frekansın anma değerlerinde sabit ve sürekli olması, gerilim ve akım dalga şekillerinin saf sinüs dalgası olması ideal elektrik şebekesinin basit bir tanımıdır. Şebekeye bağlı, gerilim ve akımı arasında doğrusal bağıntı bulunan doğrusal yükler yanında gerilimi ve akımı arasında doğrusal bağıntı bulunmayan doğrusal olmayan yükler de mevcut olduğu için ideal elektrik şebekesi mümkün değildir. Doğrusal olmayan bir yüke sinüzoidal gerilim uygulandığında bu yük şebekeden sinüzoidal olmayan akım çeker. Doğrusal olmayan yüklerin talep ettikleri akımların temel frekanstaki bileşeni dışında kalan bütün bileşenlerine harmonik denmektedir.

Sinüzoidal olmayan sinyaller, çeşitli frekanslarda sinüzoidal sinyallerin toplamı olarak ifade edilebilirler. Fourier serileri olarak adlandırılan bu toplam şu şekillerde gösterilir:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \sin nt + B_n \cdot \cos nt) \quad (3.2)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin(nt + \phi_n) \quad (3.2)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos(nt + \phi_n) \quad (3.3)$$

Bu bağıntılarda

$n = 1, 2, 3, \dots$ harmonik mertebesi,

t = Bağımsız değişken, elektriksel sistemlerde bu değer ωt 'dir.

A_0 = Fonksiyonun ortalama değerini gösteren sabit terim

A_n, B_n, C_n = Harmoniklerin katsayılarıdır.

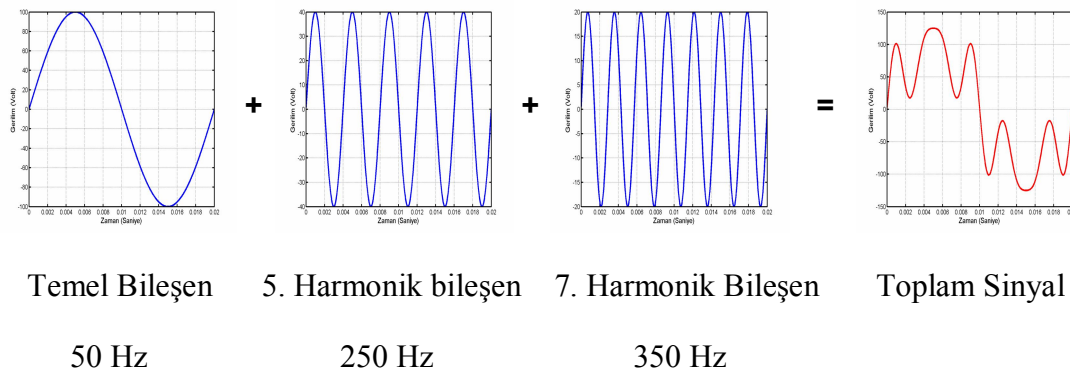
Bir elektrik sistemindeki harmonikli gerilim şu şekilde gösterilebilir:

$$v(t) = V_{m1} \cdot \sin(\omega t + \phi_1) + V_{m2} \cdot \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + V_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (3.4)$$

rnek:

$$v(t) = 100 \cdot \sin((2\pi 50)t) + 40 \cdot \sin(5 \cdot (2\pi 50)t) + 20 \cdot \sin(7 \cdot (2\pi 50)t)$$

şekil 3.1’de harmonikli gerilim dalga şekli görülmektedir.



şekil 3.1 : Harmonikli gerilimin dalga şeklinin oluşumu.

3.1.1 Harmonik üreten yükler

Elektrik sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs biçiminden sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan harmonik kaynakları tarafından üretilmektedir. Bunlar:

- Tek fazlı yükler (TV, bilgisayar, klima, vb.)
- eviriciler (Doğrultucu, evirici)
- Transformatörler
- Motorlar
- Kesintisiz güç kaynakları
- Anahtarlamaalı güç kaynakları
- Fotovoltaik sistemler
- Güç elektroniği elemanları

- Elektronik balastlar
- Frekans dönüştürücüleri
- Statik Var kompanzatörler
- Ark ocakları
- Yüksek gerilimli doğru akım enerji iletim (HVDC) sistemleri
- Elektrikli ulaşım sistemleri
- Pompa ve fan kontrol sistemleri
- DA kaynak makineleri, indüksiyon ocakları, rüzgâr santralleri

3.1.2 Harmoniklerin zararlı etkileri

- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması
- Gerilim düşümünün artması
- Transformatörlerde, baralarda ve kablolarda aşırı ısınma
- Kayıpların artması
- Koruma cihazlarının hatalı devreye girmesi
- Şebekede rezonans olaylarının artması ve rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımların görülmesi
- Motorlarda ve diğer cihazlarda ek gürültülere sebep olması
- Kesici ve şalterlerde açmalar
- Elektronik kart arızaları
- Kesintisiz güç kaynaklarının veriminin düşmesi
- Aydınlatma elemanlarında ve monitörlerde görüntü titreşimi meydana gelmesi
- Elektrik cihazlarının ömrünün kısalması
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarının parazitli ve anormal çalışması

3.2 Harmoniklerin Filtrelenmesi

Harmoniklerin zararlı etkilerinin giderilmesi için filtreleme yapılmalıdır. Harmoniklerin filtrelenmesi iki şekilde yapılmaktadır. Şekil 3.2’de harmonik filtreleme yöntemleri görülmektedir.



Şekil 3.2 : (a) Şönt pasif filtre (b) Aktif filtre.

3.2.1 Pasif filtreler

Bileşenlerini kondansatör, endüktans ve direnç gibi pasif elemanların oluşturduğu filtrelerdir. Günümüze kadar, harmoniklerin süzülmesi ve reaktif güç kompanzasyonunda kullanıla gelen yöntem pasif filtreler olmuştur. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Bu nedenle her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre konulması gereklidir [18,19].

Pasif filtre çeşitleri

- Seri filtreler
- Şönt filtreler
 - Tek ayarlı
 - Çift ayarlı
 - Yüksek geçiren
 - Alçak geçiren geniş bantlı filtreler

3.2.1.1 Seri filtreler

Harmonik kaynağıyla şebeke arasına seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler.

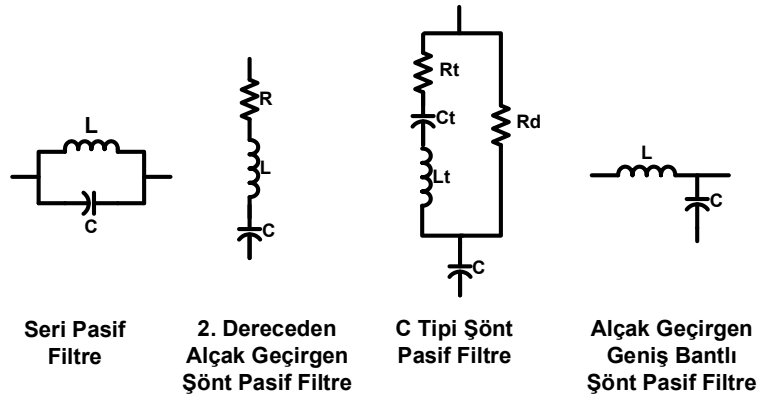
- Sadece ayarlı olduğu frekans için etkindir. En önemli özellikleri rezonans problemlerinin olmamasıdır.
- Şebekeye seri bağlandıkları için tam yük akımını taşımaları ve hat gerilimine göre yalıtılmaları en büyük dezavantajlarıdır.

3.2.1.2 Şönt filtreler

Harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanır ve düşük empedans göstererek harmonik akımları üzerlerine alırlar.

- Seri filtre maliyetinin yüksek olması ve şönt filtreler ile reaktif güç kompanzasyonu ve de güç faktörü iyileştirilmesi yapılabildiğinden şönt filtreler tercih edilirler.
- Şönt filtreler de seri filtreler gibi ayar frekanslarında veya ayar frekansı civarında etkindirler.
- Şönt pasif filtrelerin en büyük dezavantajı şebeke empedansı ile rezonans oluşturmalarıdır.

Şekil 3.3’de pasif filtre çeşitleri görülmektedir.



Şekil 3.3 : Pasif filtre çeşitleri.

3.2.1.3 Pasif filtrelerin üstünlükleri ve dezavantajları

- Ekonomiktir.
- Verimi yüksektir.
- Basit yapılıdır.

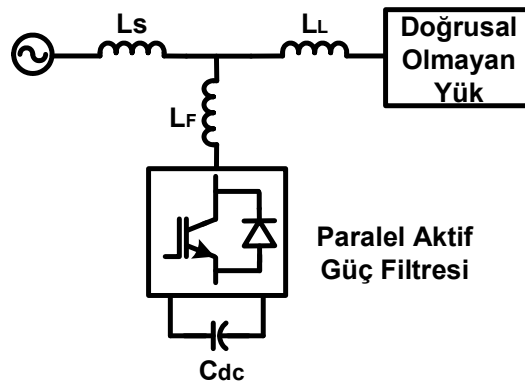
Dezavantajları:

- Rezonans tehlikesi vardır.
- Boyutları büyüktür.
- Sabit kompanzasyon
- Performansı şebekeye bağlıdır.

3.2.2 Aktif güç filtreleri

Aktif güç filtresi geniş kapsamlı bir terim olup, güç-anahtarlamalı cihazlar ile reaktör ve kondansatör gibi enerji depolayan pasif devre elemanlarının birlikte çalıştığı güç elektroniği devrelerini içerir [18,20].

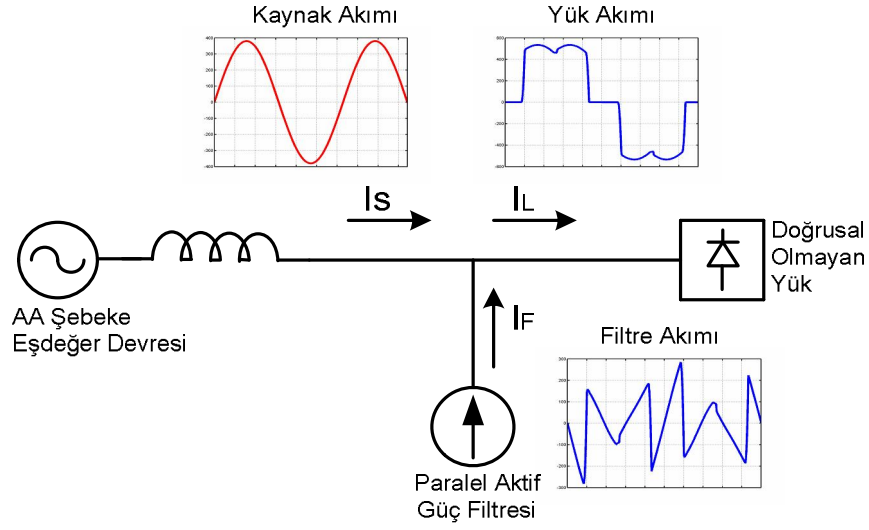
Pasif filtrelerin rezonans riski taşımaları ve yarı-iletken teknolojisindeki gelişmeler, harmonik filtrelemede aktif güç filtrelerinin kullanımını arttırmıştır. Aktif güç filtreleri topolojilerine göre; akım ve gerilim harmoniklerinin süzülmesi, reaktif güç kompanzasyonu, nötr-akımların giderilmesi, terminal geriliminin ayarlanması, gerilim kırışmalarının bastırılması, akım ve gerilim dengesizliklerinin dengelenmesi gibi pek çok güç kalitesi probleminin çözümünde kullanılırlar. Akım harmoniklerinin filtrelenmesi ve reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan aktif güç filtresi topolojisi Şekil 3.4’te görülen “paralel bağlı aktif güç filtresi”dir.



Şekil 3.4 : Paralel aktif filtre.

Akım harmonikleri doğrusal olmayan yükler tarafından basıldığı için paralel aktif güç filtreleri yük sonuna bağlanırlar. Bu filtreler ortak bağlantı noktasına doğrusal olmayan yüklerin harmoniklerini ve reaktif bileşenlerini yok etmek için harmonik ve reaktif bileşenlerin genlikçe eşit, fazca 180 derece faz farklı kompanzasyon

akımlarını basan akım kaynağı gibi davranırlar. Şekil 3.5'te paralel aktif güç filtresinin çalışma ilkesi görülmektedir.



Şekil 3.5 : Paralel aktif güç filtresinin çalışma ilkesi.

Aktif güç filtreleri doğru akım taraflarında DA kaynağına ihtiyaç duymazlar, çünkü AA taraftan eviricideki kayıpları sağlayarak sabit bir DA bağ akımına veya gerilimine ulaşacak şekilde temel akım bileşeni çekerek kontrol edilirler. Aktif güç filtreleri, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi eviricilerde kullanılan güç devresi yapılarına göre ikiye ayrılmaktadır:



(a) Gerilim Kaynaklı

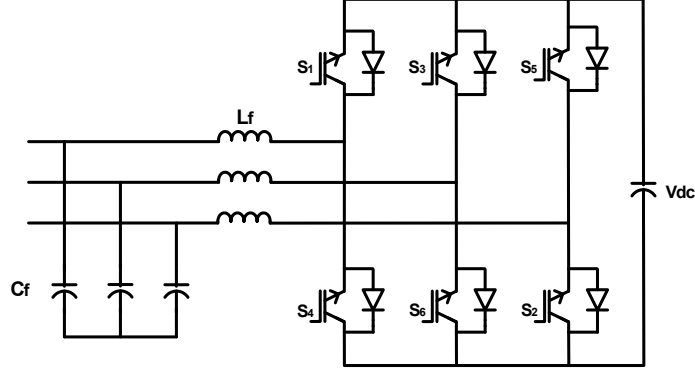
(b) Akım Kaynaklı

Şekil 3.6 : (a) Gerilim kaynaklı. (b) Akım kaynaklı aktif güç filtresi.

3.2.2.1 Gerilim kaynaklı aktif güç filtresi

- DA bağlarında depolama elemanı olarak DA kondansatörü bulunan gerilim kaynaklı aktif güç filtreleri şebekeye L_F reaktörü üzerinden bağlanırlar.

- Şekil 3.7’de yapısı verilen gerilim kaynaklı aktif güç filtresi (GKAGF) altı adet kontrollü yarı iletken anahtar ve bunlara anti-paralel diyotlardan oluşmaktadır.

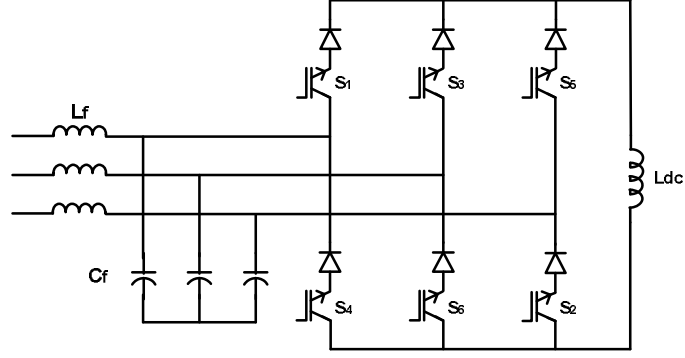


Şekil 3.7 : Gerilim kaynaklı aktif güç filtresi sistem yapısı.

- Yarı iletkenler kompanzasyon akımlarının tepe değerine dayanacak akım ve tek kutuplu DA bağ anahtarlama gerilimine dayanacak gerilim değerlerine sahip olmalıdırlar.
- Aktif filtre girişinde kullanılan L_F reaktörü öncelikle aktif filtre akımlarının kontrol edilebilirliğini sağlar.
- Ayrıca L_F reaktörü, kullanılabilecek C_F kondansatörü vasıtasıyla eviricinin kendisinin ürettiği yüksek frekans bileşenlerin bastırılmasına da yarar.

3.2.2.2 Akım kaynaklı aktif güç filtresi

- DA bağlarında depolama elemanı olarak reaktör bulunan akım kaynaklı aktif güç filtreleri şebekeye C_F kondansatörü üzerinden bağlanırlar.
- Şekil 3.8’de yapısı verilen akım kaynaklı aktif güç filtresi (AKAGF) altı adet kontrollü yarı iletken anahtar ve bunlara seri diyotlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.8 : Akım kaynaklı aktif güç filtresi sistem yapısı.

- Yarı iletkenler DA bağ akımına ve DA bağ akımının anahtarlanmasından oluşan çift kutuplu gerilime dayanacak değerlere sahip olmalıdırlar.
- Aktif filtre girişinde kullanılan C_F kondansatörü ve L_F reaktörü ikinci dereceden alçak geçiren pasif filtre oluştururlar.
- Bu pasif filtre, aktif filtre tarafından üretilen yüksek frekans anahtarlama bileşenlerinin bastırılmasına yarar.

3.2.2.3 Gerilim kaynaklı aktif güç filtresinin üstünlükleri

- Kayıpları azdır.
- İlk kurulum maliyeti daha düşüktür.
- Boyutları daha küçüktür.

3.2.2.4 Akım kaynaklı aktif güç filtresinin üstünlükleri

- Kayıpları fazladır.
- Doğrudan akım kontrolü vardır.
- Hızlı tepki süresine sahiptir.
- Kolay korunur.
- Güvenirliği yüksektir.

3.3 Bursaray Hafif Raylı Sistemi İçin Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresinin Öne Çıkan Özellikleri

- Bursaray sisteminde reaktif kapasitif enerji problemlerinin tesbiti için yapılan ölçümler esnasında fiderlerdeki 11. ve 13. harmoniklerin standartlarda belirtilen sınır değerlerin üstünde olduğunu göstermiştir.
- Ülkemizde, elektrik dağıtım şirketleri “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticaret ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik” hükümleri uyarınca bozucu etki yaratan kullanıcılara cezai yaptırım uygulamakla yükümlüdürler [3].
- Bu nedenle sınır değerleri aşan harmoniklerin filtrelenmesi gerekmektedir.
- Harmoniklerin filtrelenmesinde pasif filtre kullanımı, Bursaray’ın bağlı bulunduğu 34,5 kV baraya bağlı diğer yüklere ait harmoniklerin de filtrelenmesine yol açacağından maliyeti arttıracak ve kurulum amacını aşacaktır.
- Bursaray sistemi harmonik probleminin çözümünde aktif güç filtresi kullanılması ekonomik, genişletilebilir ve uzun ömürlü bir çözüm olacaktır.
- Problemin çözümünde gerilim kaynaklı aktif güç filtresi yerine akım kaynaklı aktif güç filtresinin kullanılması ise akım kaynaklı filtrelerin girişinde kullanılan L-C alçak geçirgen filtrenin rezonansından yaralanılarak sistemin gücünün düşürülmesini sağlamıştır.
- Sistemin gücü düşürüldüğünden akım kaynaklı aktif güç filtresinin kayıplarının fazla olmasından kaynaklanan dezavantajı da bertaraf edilmiştir.
- Ayrıca, akım kaynaklı aktif güç filtresi hızlı tepki süresi sayesinde harmonikleri sürekli değişen Bursaray sistemi için daha uygun olmuştur.
- Akım kaynaklı paralel aktif güç filtreleri, akım kaynaklı çeviricilerin doğrudan akım anahtarlama, kolay korunabilirlik, yüksek güvenilirlik ve hızlı tepki süreleri gibi özellikleri ile paralel aktif filtrelerin harmonik filtreleme ile reaktif güç kompanzasyonunu birarada yapabilme özelliklerini taşıyan, altı adet yarı-iletken anahtar ve bu anahtarlara seri diyotlar yardımı ile tek yönlü akım taşıyan eviricilerdir.

- Evirici, şebekeye karşı basmaya çalıştığı akımı bir akım kaynağı, reaktör, üzerinden oluşturduğu için bu adı almaktadır.
- Yarı-iletken anahtar ve diyot beraber düşünüldüğünde, üç fazlı akım kaynaklı devre yapısı, tek yönlü akım taşıyabilen altı adet anahtardan oluşmaktadır.
- Devrede kullanılan seri diyotlar yardımıyla yarı-iletken anahtarların her iki yönde gerilim tutabilmeleri sağlanmaktadır.
- Akım kaynaklı filtrede DA bağda oluşturulacak akımın sürekliliğinin sağlanması için herhangi bir anda, eviricinin üst kolundaki anahtarlardan yalnızca bir tanesi ve alt kolundaki anahtarlardan yalnızca bir tanesi eş zamanlı olarak devrede olmalıdır.
- Akım kaynaklı aktif güç filtreleri AA şebekeye çevirici girişindeki L_F ve C_F 'nin oluşturduğu ikinci dereceden alçak geçirgen filtre üzerinden bağlanırlar.
- Bu alçak geçirgen filtrenin amacı aktif filtrenin ürettiği bileşenleri etkilemeden anahtarlama frekansında oluşan dalgacıkların bastırılmasıdır.

3.4 Bursaray Hafif Raylı Sistemi 2006 Yılı Harmonik Ölçümleri

3.4.1 Ölçüm yöntemi

Sistemdeki problemlerin belirlenmesi ve bu problemlerin giderilmesine yönelik yapılabilecek çalışmalara temel olacak ölçümün başarılı olabilmesi için mümkün olduğunca çok veriye ihtiyaç vardır. Bursaray sisteminde güç bileşenleri ve akım harmonikleri değişimlerinin gece ve gündüz farklılık göstermesi ve bu süreçlerde de yükün değişken olması bu ihtiyacı daha da arttırmaktadır. Yapılan ölçümler şu şekilde özetlenebilir:

1. Ana bara (Bursaray-2 34,5 kV fideri) akım ve gerilim bilgisi 24 saat kayıt edilmiştir. Sinyal örnekleme hızı 3,2 kS/s seçilmiştir [14]. Analiz için her bir elektriksel büyüklüğün 10 periyotluk çerçevesine bakılır [14] Harmonik izleme için MATLAB da 5 Hz çözünürlükte (veriler digital olduğundan) bir FFT algoritması (fast fourier transform) çalıştırılmıştır [15]. Bu, bir periyot (20 ms) boyunca 64 adet örnek alınması demektir. İki faz-faz gerilimi ve iki faz akımı

bilgisi kaydedilmiştir. Şebeke frekansının sabit ve 50 Hz olduğu kabul edilmiştir [14]. Bu veriler daha sonra bilgisayar yardımıyla işlenerek aşağıda verilen büyüklüklerin zamanla değişimleri elde edilmiştir.

- Görünen güç, kVA
- Reaktif güç, kVAr
- Akımın etkin değeri, A
- Gerilimin etkin değeri, kV
- 3., 5., 7., 11., 13., 23. ve 25. harmoniklerin maksimum yük akımına oranları

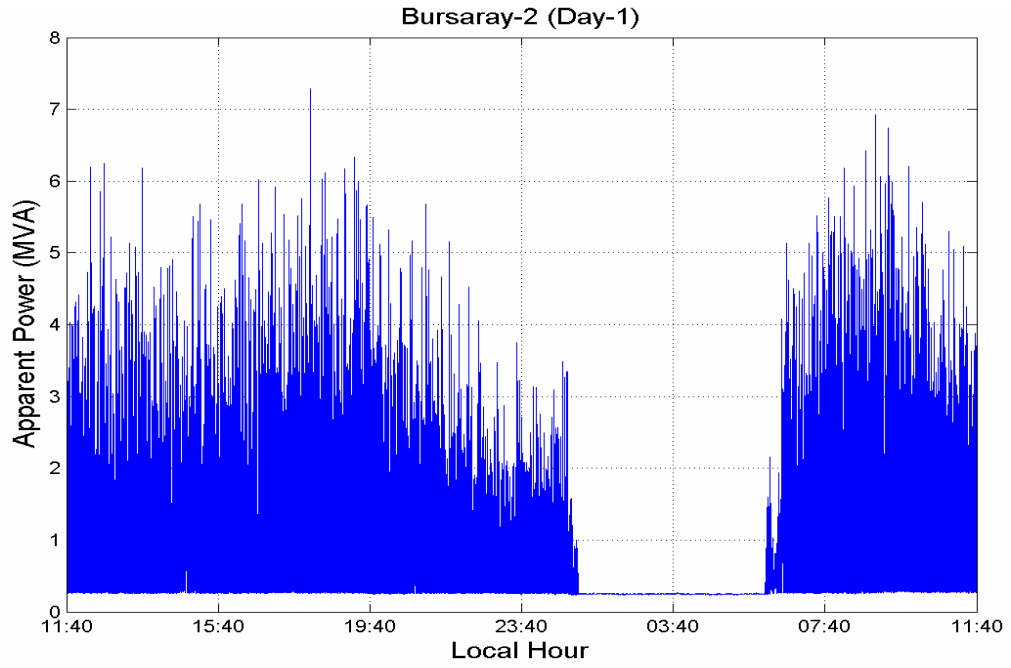
3.4.2 Bursaray-2 fideri harmonik ölçüm sonuçları ve saptamalar

Bursaray-2 fiderinin görünen, aktif ve reaktif güç değişimleri, akım-gerilim ana bileşenlerinin gerçek etkin değerlerinin değişimi dört gün için ayrı ayrı Şekil 3.9 ile 3.24 arasındaki şekillerde verilmiştir.

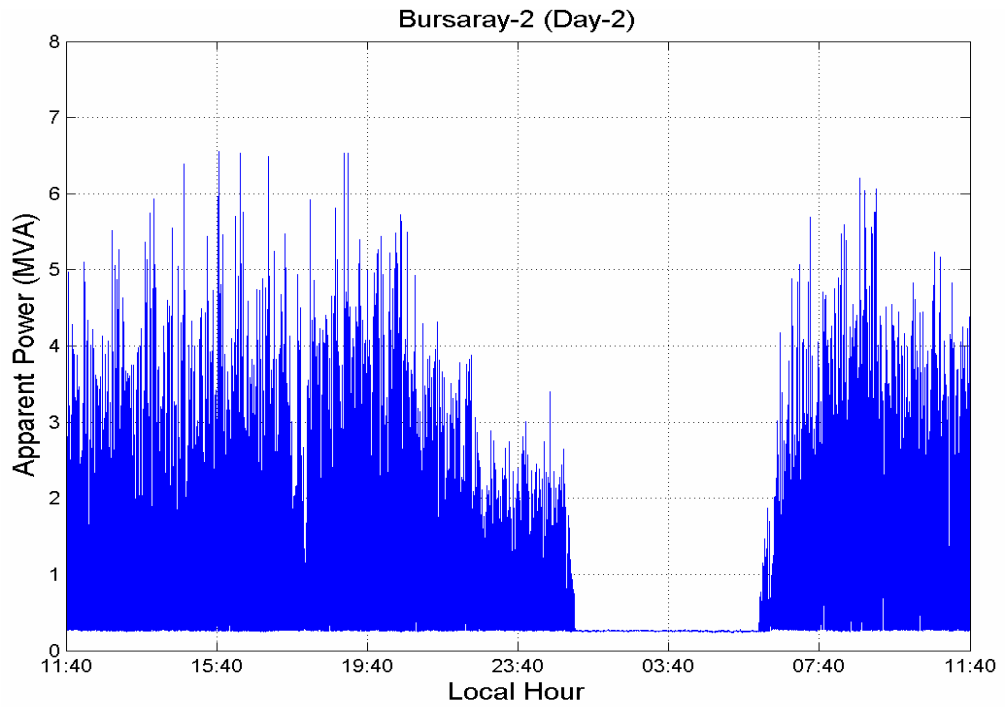
Herbir gün için Bursaray-2’de 24 saatlik zaman diliminde bilgisayarla yapılan ölçüm sonucunda hesaplanan enerji tüketimleri ve endüktif/kapasitif reaktif enerji aktif enerji oranları Çizelge 3.1’de verilmiştir:

Çizelge 3.1 : Bursaray-2 fideri enerji tüketimleri ve endüktif/kapasitif reaktif enerji aktif enerji oranları.

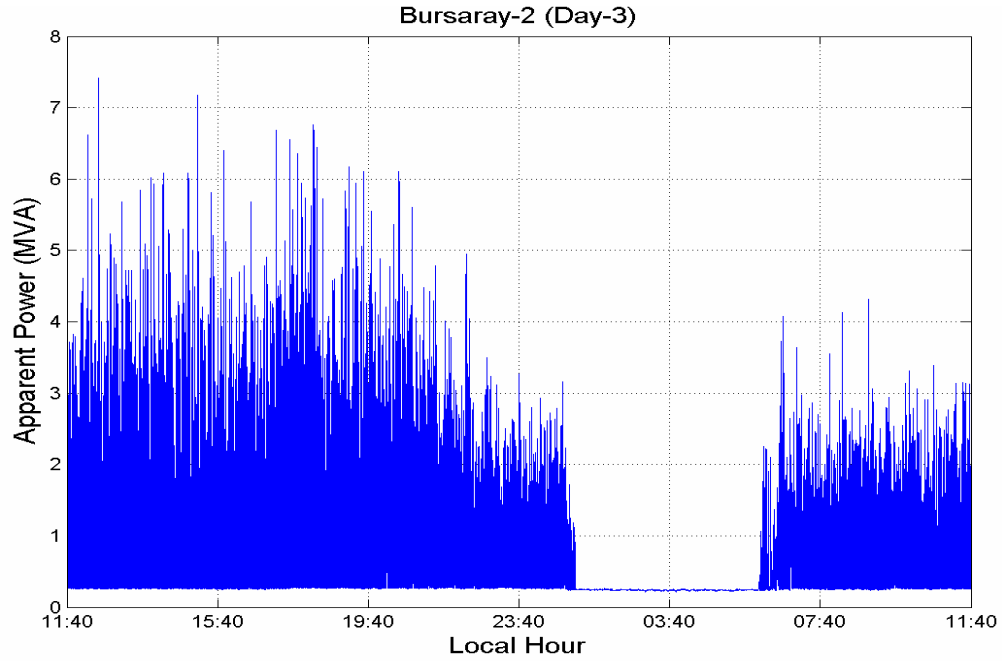
	1. Gün 7-8 Aralık 06	2. Gün 8-9 Aralık 06	3. Gün 9-10 Aralık 06	4. Gün 10-11 Aralık 06
Aktif Enerji (kWh)	24.751	24.031	21.833	22.947
Endüktif Reaktif Enerji (kVArh)	2.159	1.992	1.580	1.930
Kapasitif Reaktif Enerji (kVArh)	2.124	2.208	2.191	1.878
Endüktif Reaktif / Aktif Enerji Oranı	%8,725	%8,291	%7,235	%8,410
Kapasitif Reaktif / Aktif Enerji Oranı	%8,583	%9,188	%10,036	%8,183



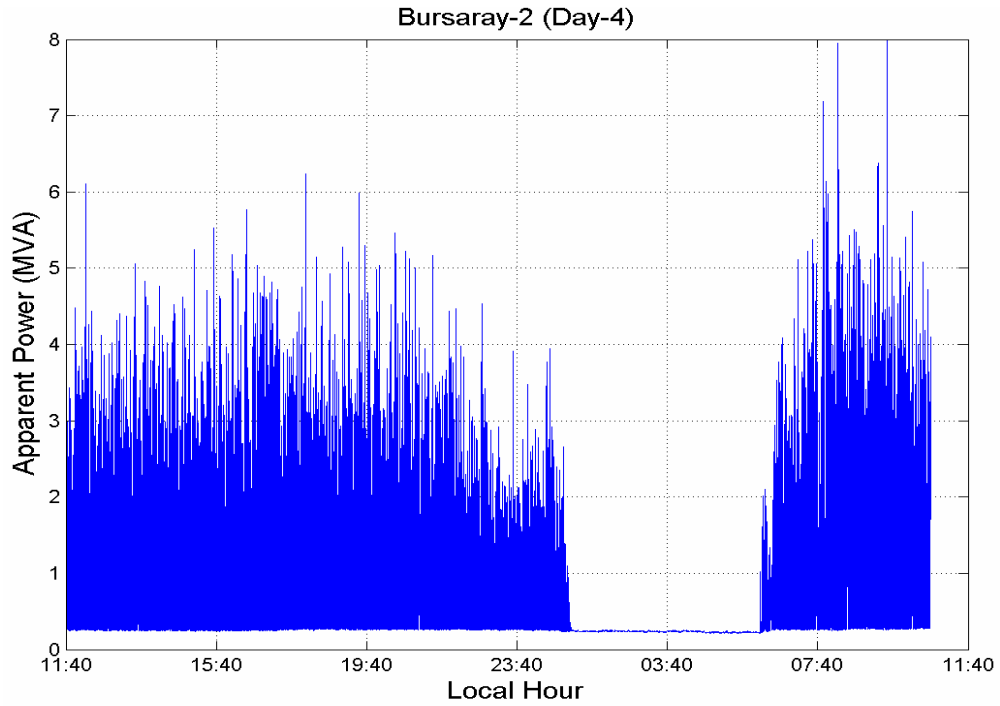
Şekil 3.9 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).



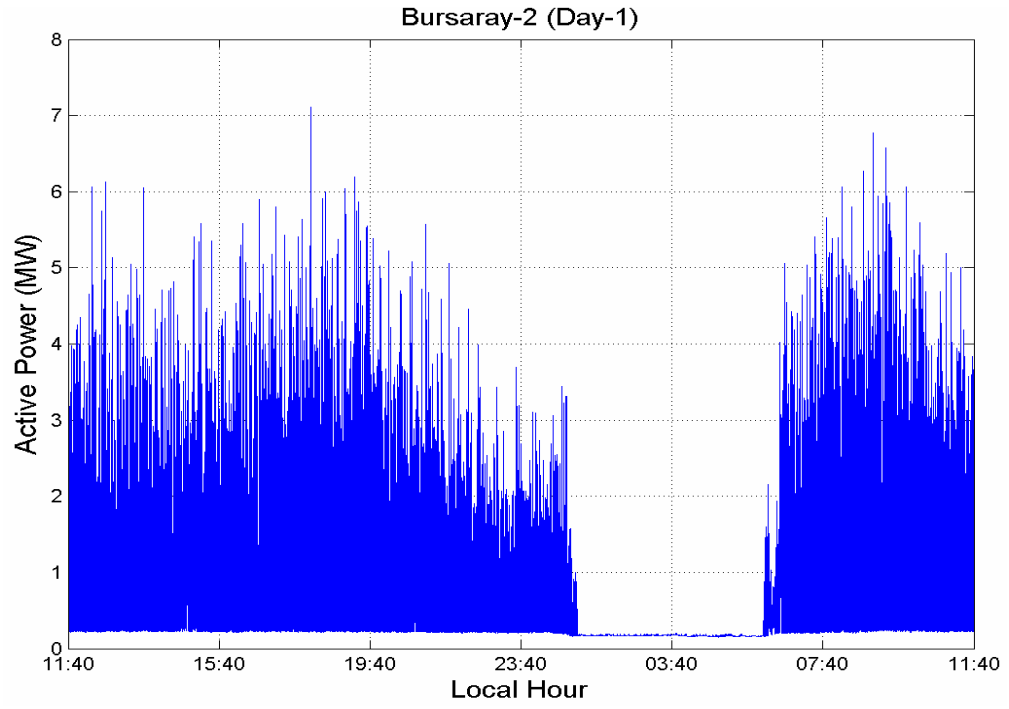
Şekil 3.10 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).



Şekil 3.11 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).

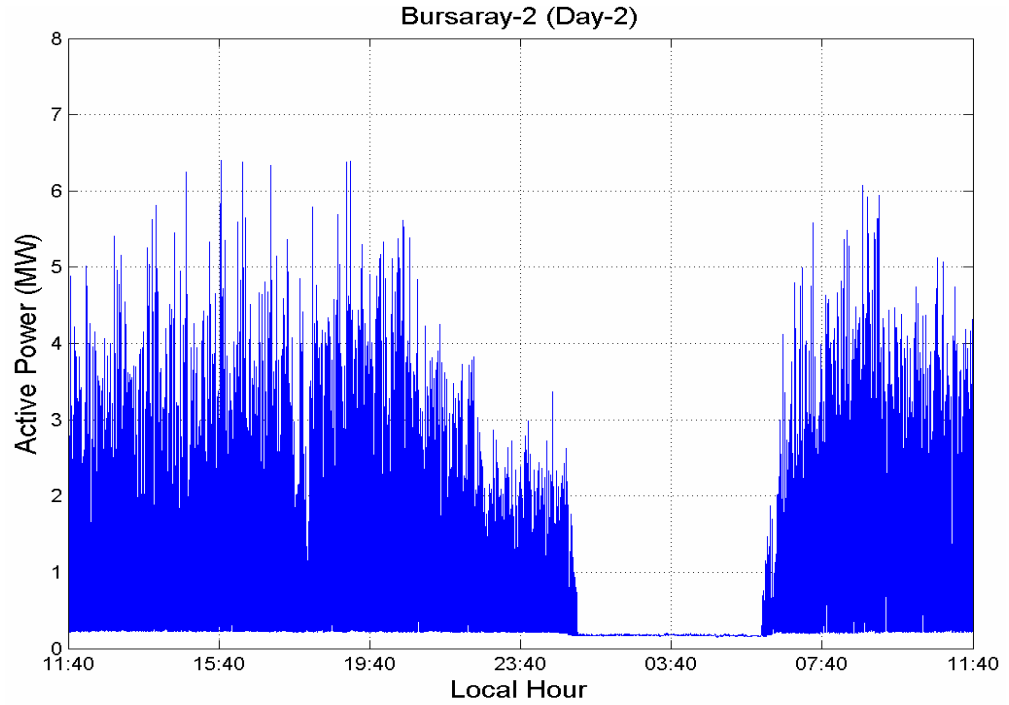


Şekil 3.12 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla görünen güç (kVA) değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).

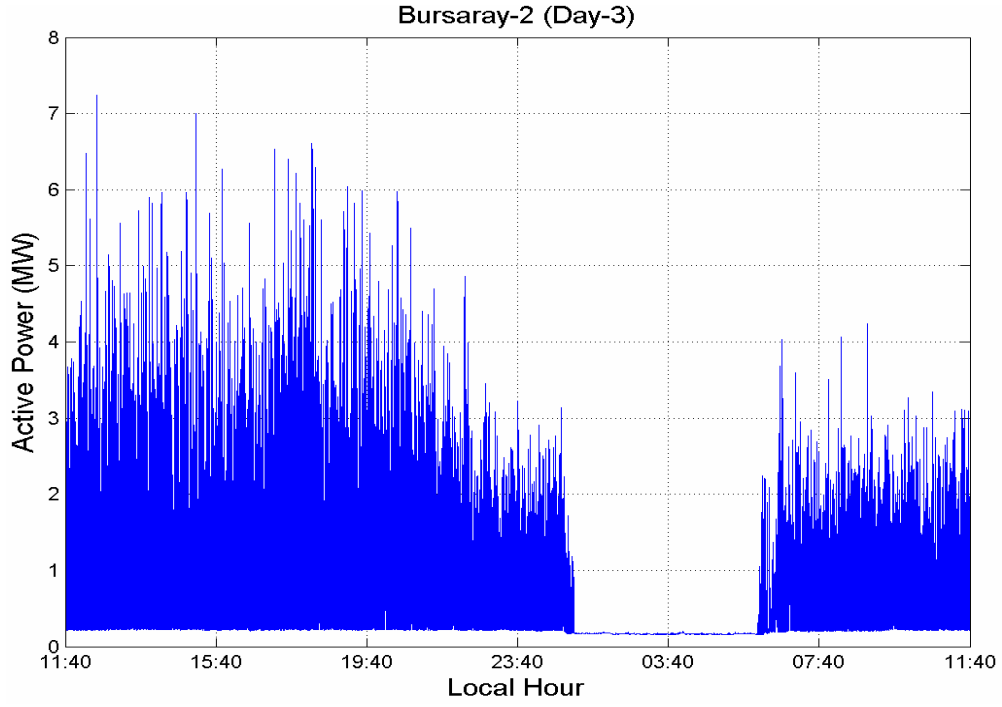


Şekil 3.13 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).

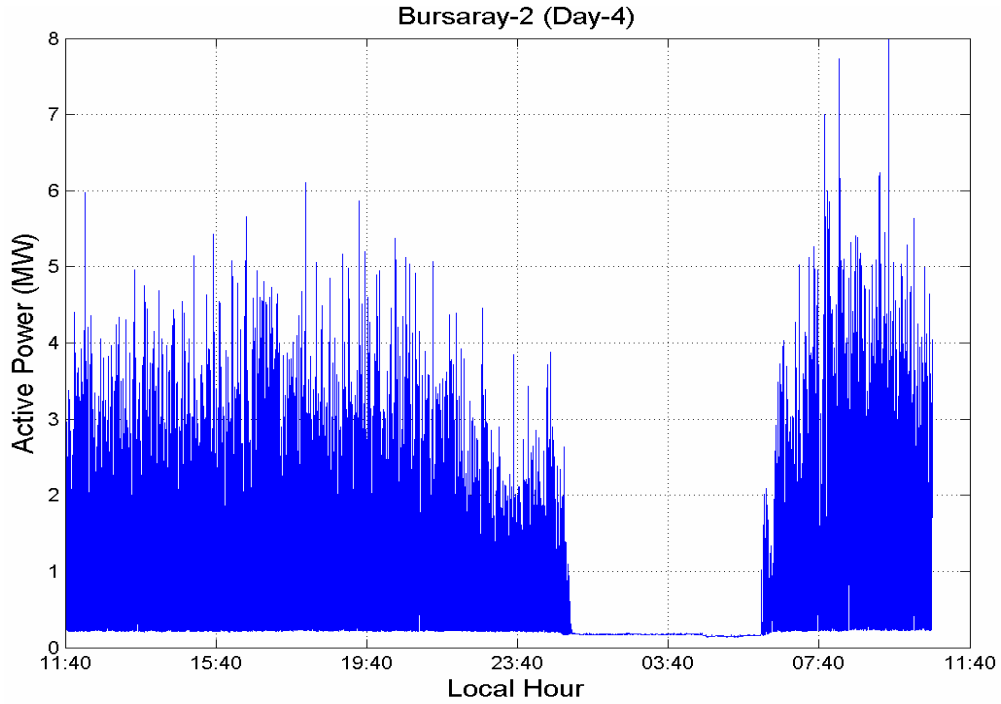
Şekil 3.13 ve 3.14’de Bursaray-2 besleme koluna ait aktif güç değişimleri görülmektedir.



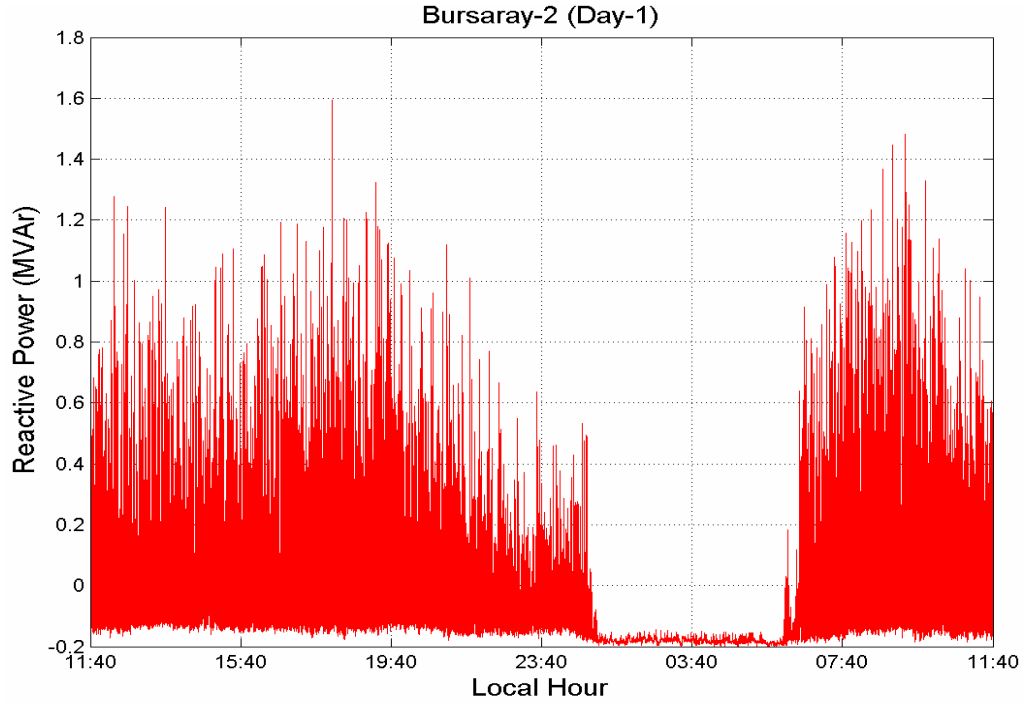
Şekil 3.14 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).



Şekil 3.15 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla aktif güç (kW) değişimi(kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).

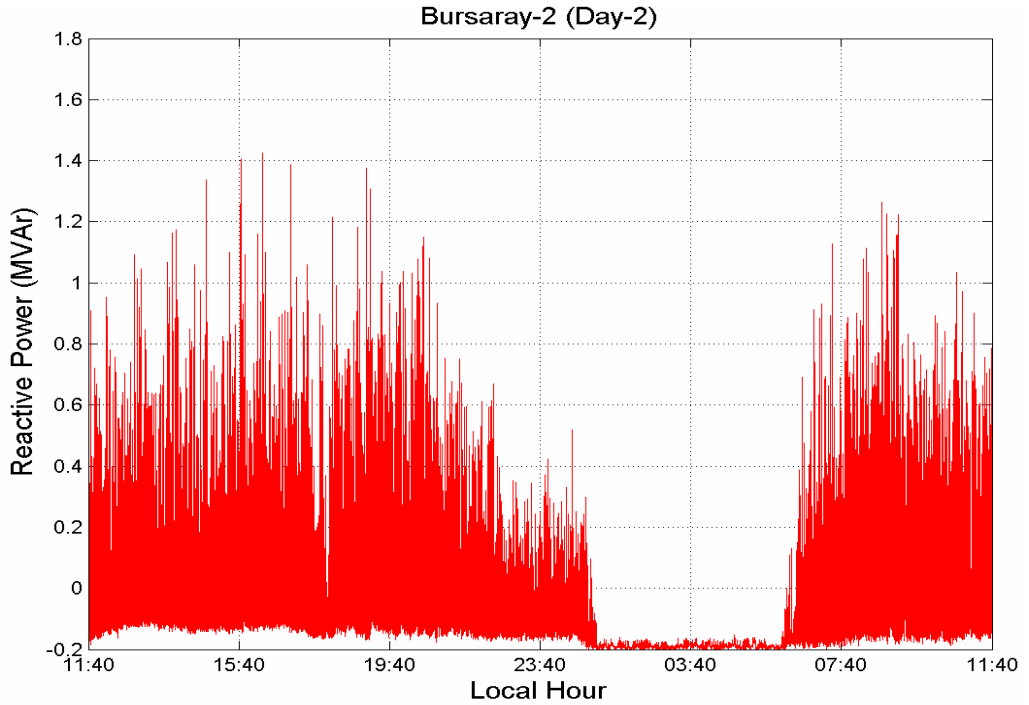


Şekil 3.16 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla aktif güç (kW) değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).

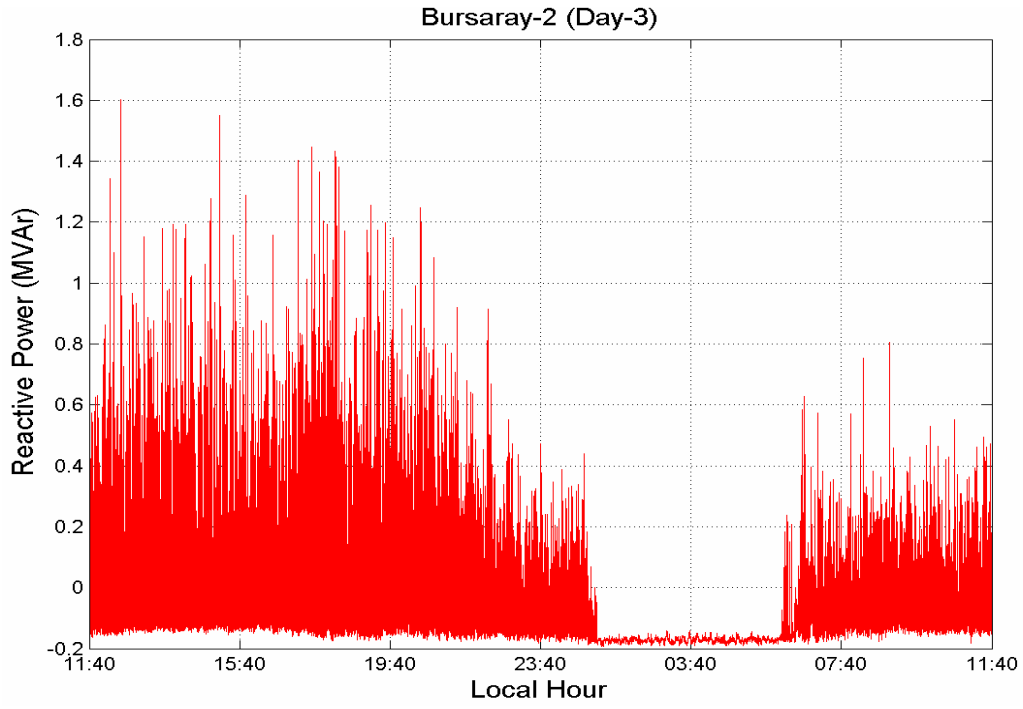


Şekil 3.17 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).

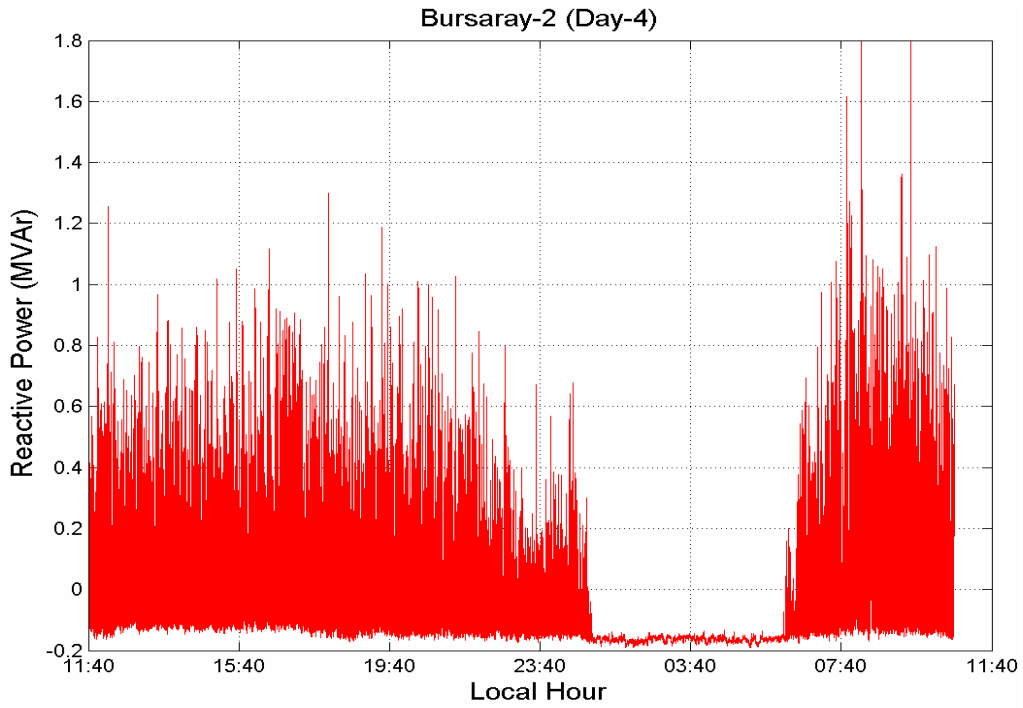
Şekil 3.17 ve 3.18’de Bursaray-2 besleme koluna ait reaktif güç değişimleri görülmektedir.



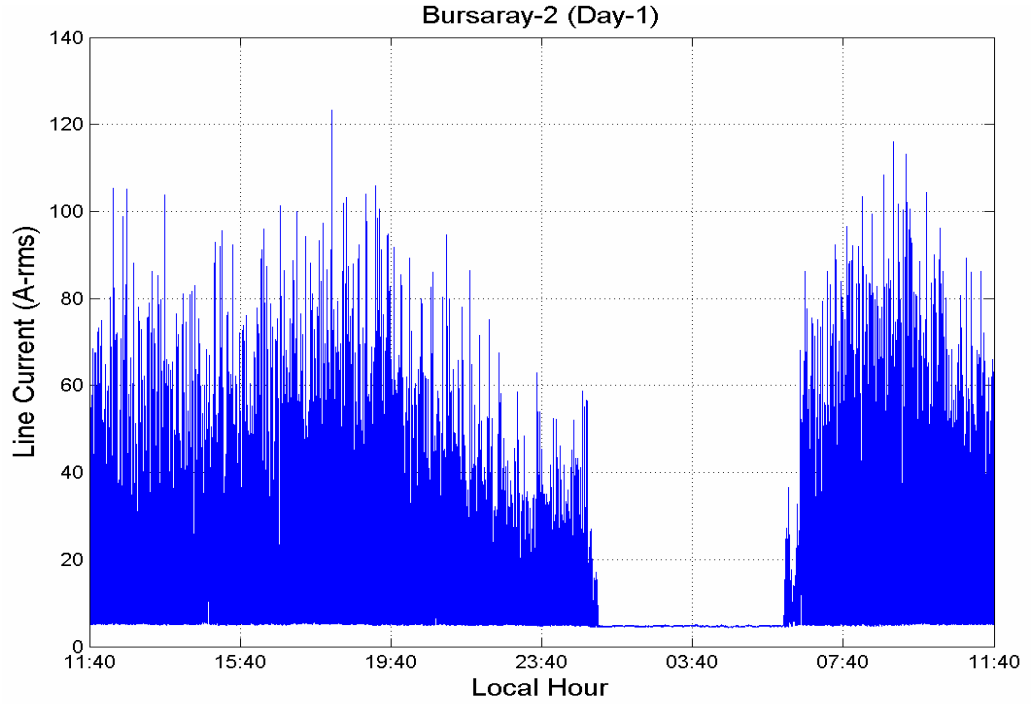
Şekil 3.18 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).



Şekil 3.19 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).

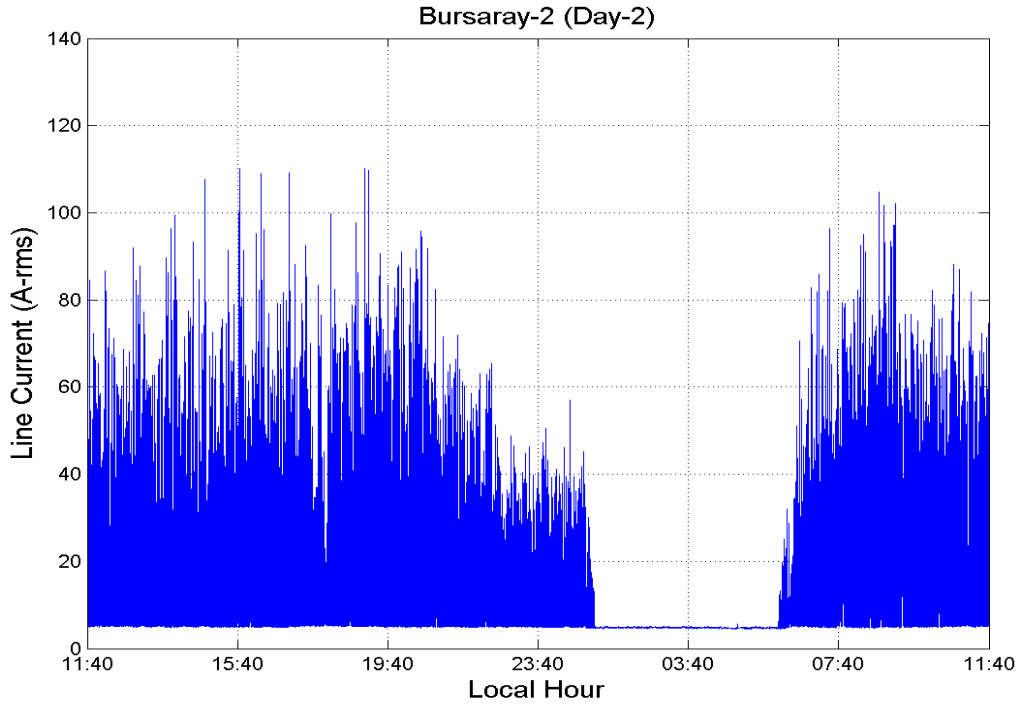


Şekil 3.20 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla reaktif güç (kVAr) değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).

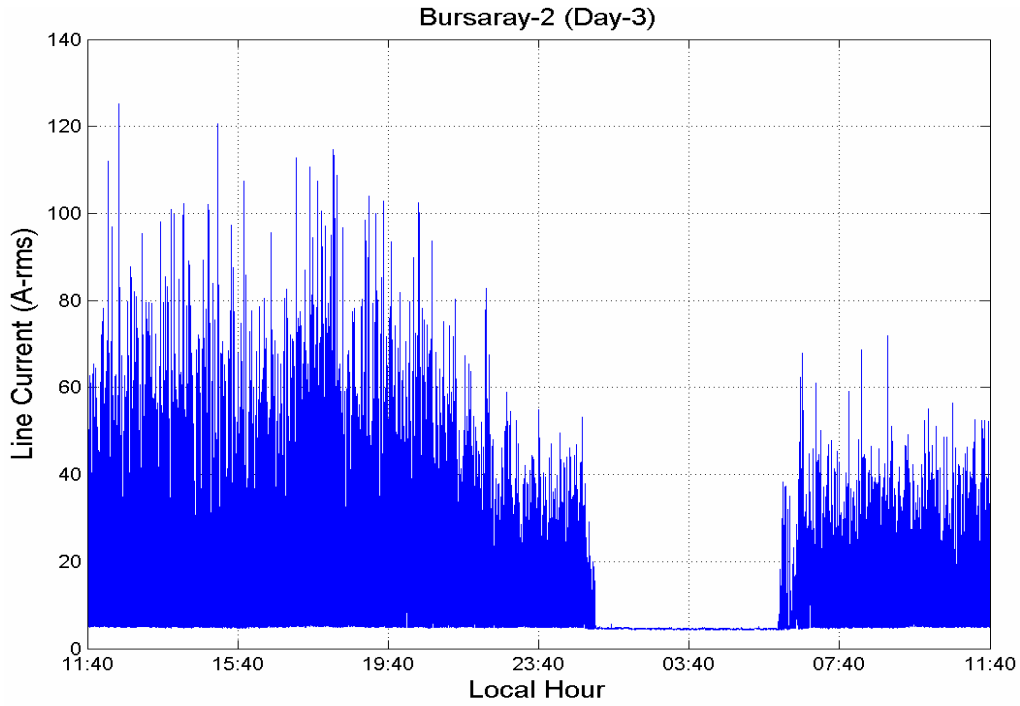


Şekil 3.21 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).

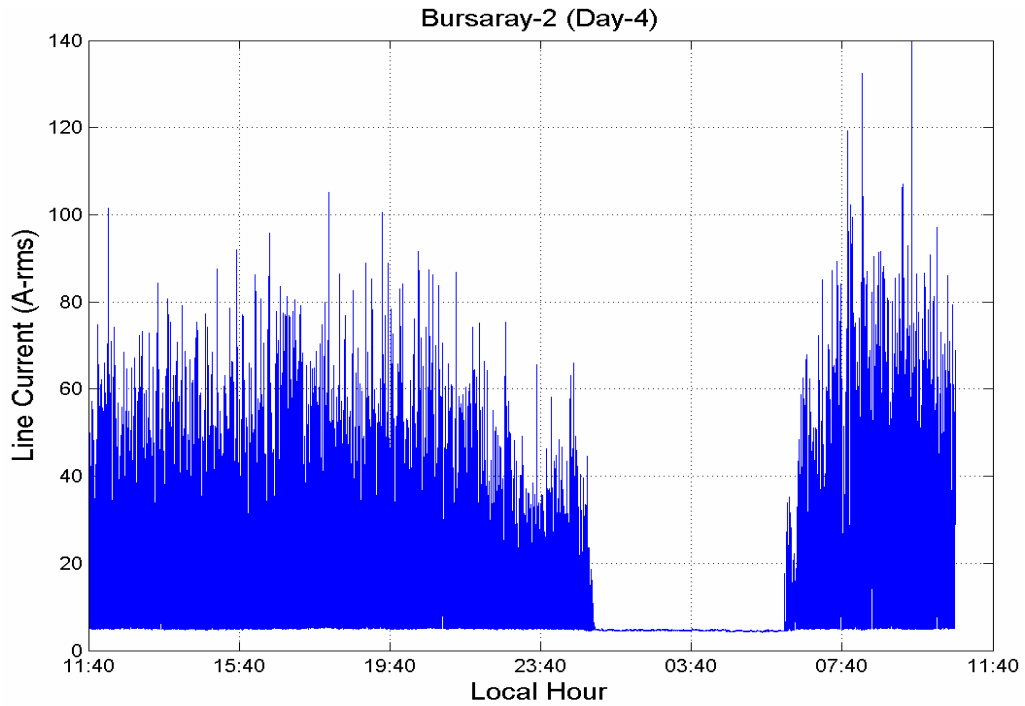
Şekil 3.21 ve 3.22’de Bursaray-2 besleme koluna ait akımın temel bileşeninin değişimi görülmektedir.



Şekil 3.22 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).



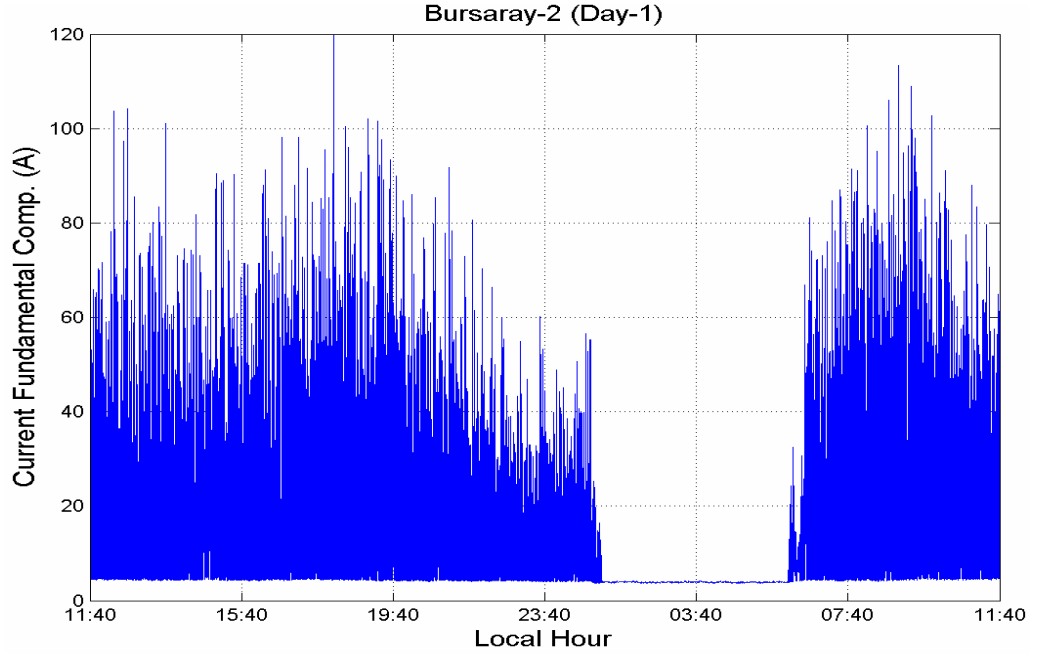
Şekil 3.23 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).



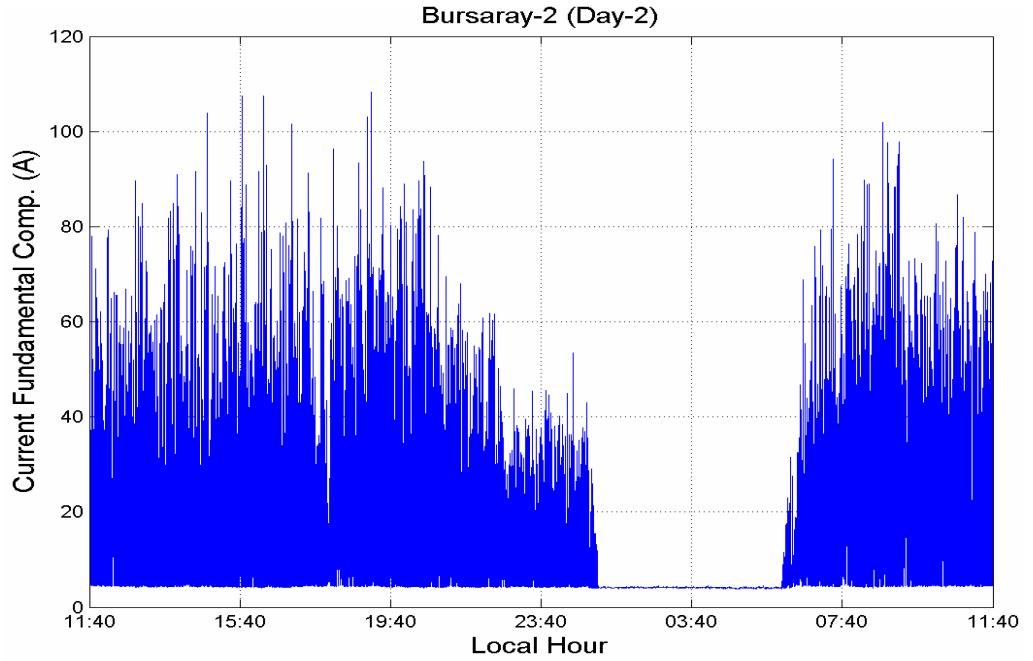
Şekil 3.24 : Bursaray-2 fideri 1 saniyelik ortalamalarla akım ana bileşeninin değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).

Akım harmoniklerinin maksimum yük akımının yüzdesi olarak zamanla değişimi ve standartlarda belirtilen sınır değerleri Şekil 3.25-3.56'da gösterilmektedir.

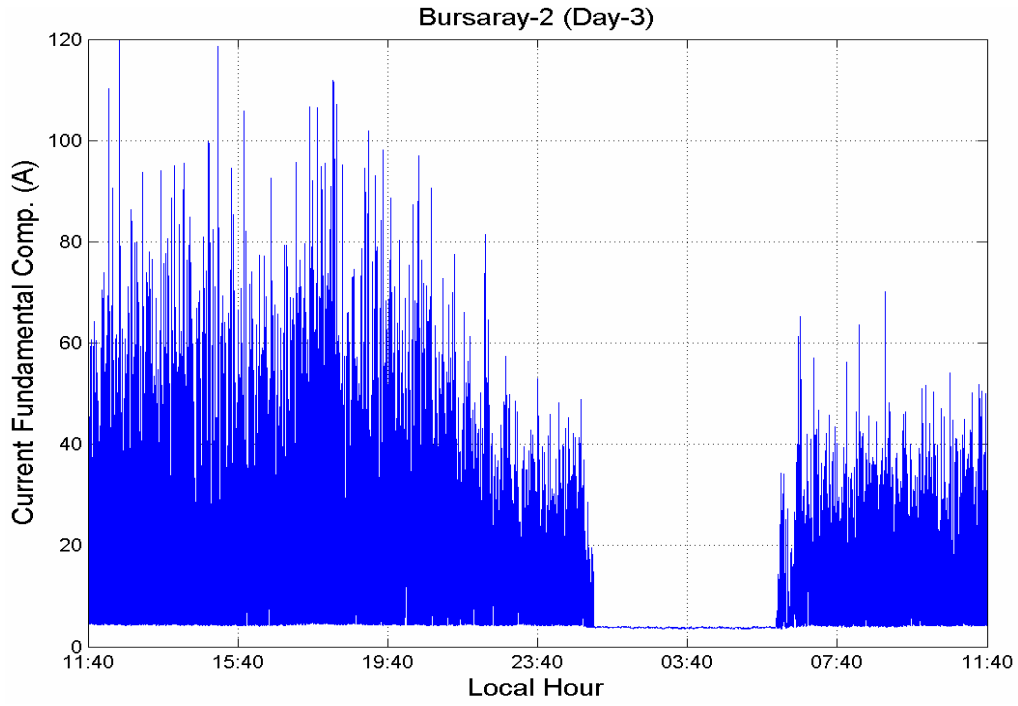
Bursaray-2 fideri için 15 dakikalık maksimum güç talebi 1,86 MVA olarak bulunmuş ve buna karşılık gelen $I_n = 31,08$ A hesaplanmıştır.



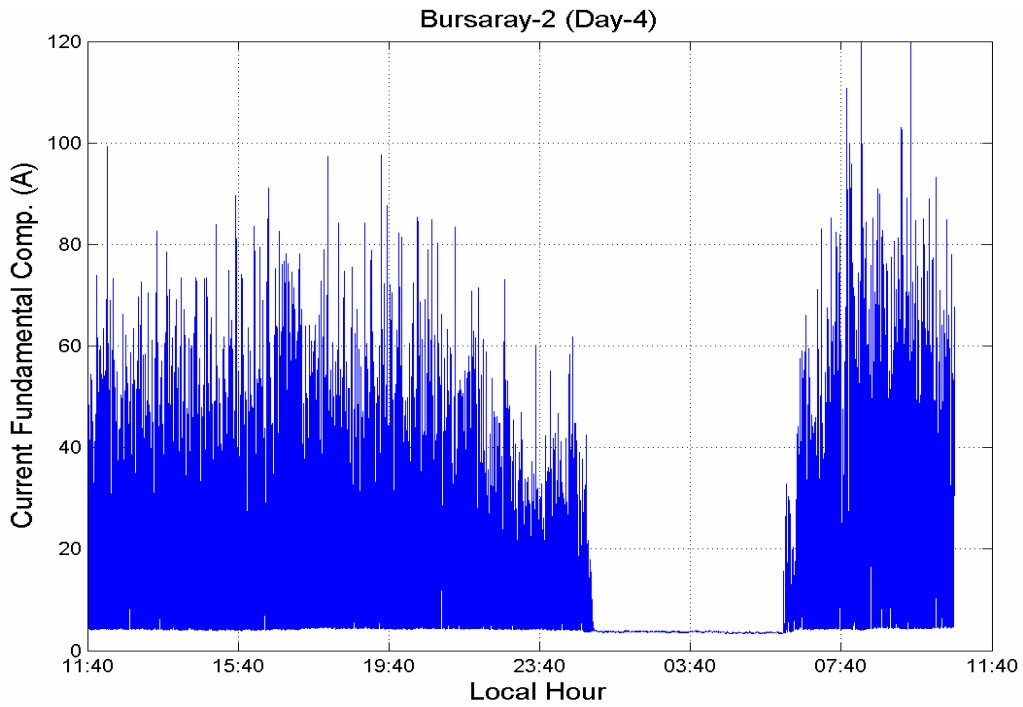
Şekil 3.25 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım temel bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006).



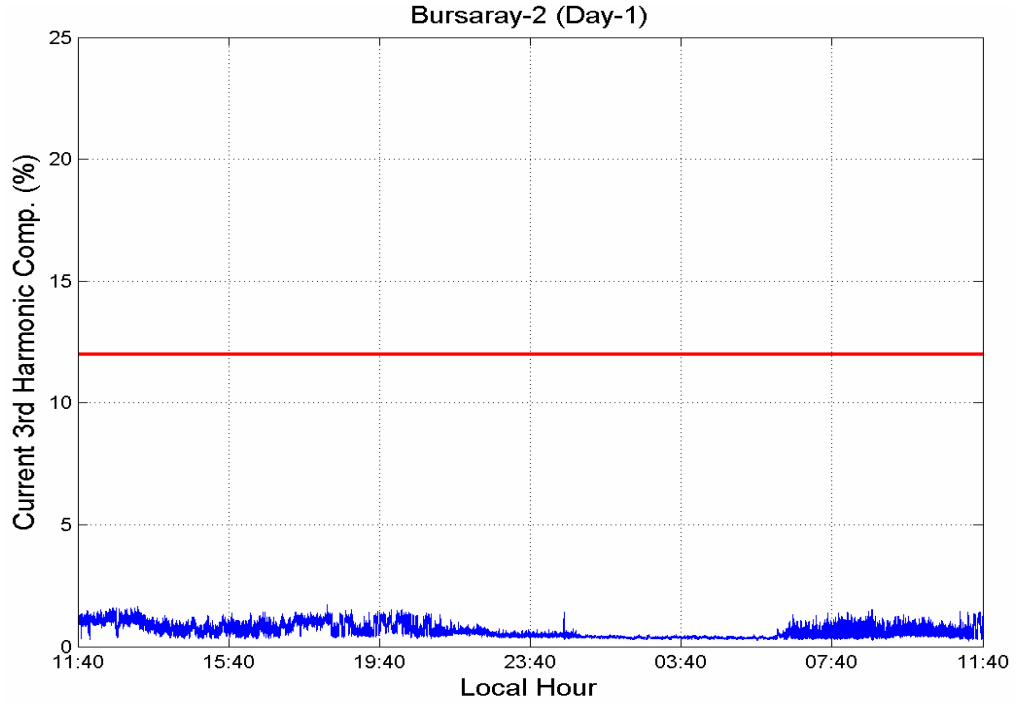
Şekil 3.26 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım temel bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006).



Şekil 3.27 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım temel bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006).

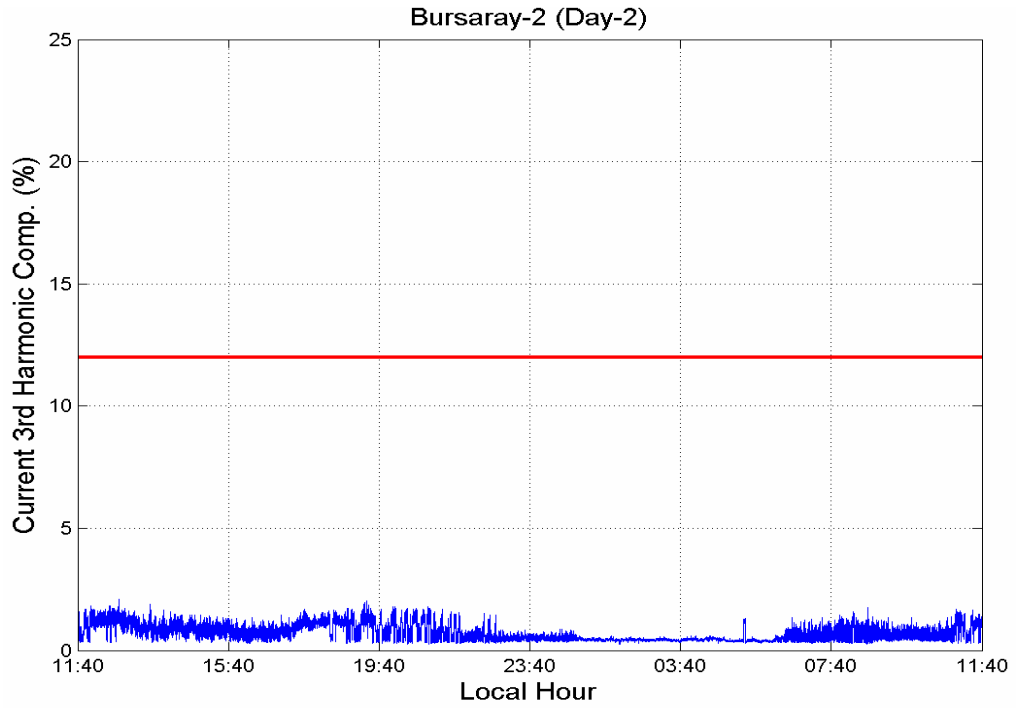


Şekil 3.28 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım temel bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006).

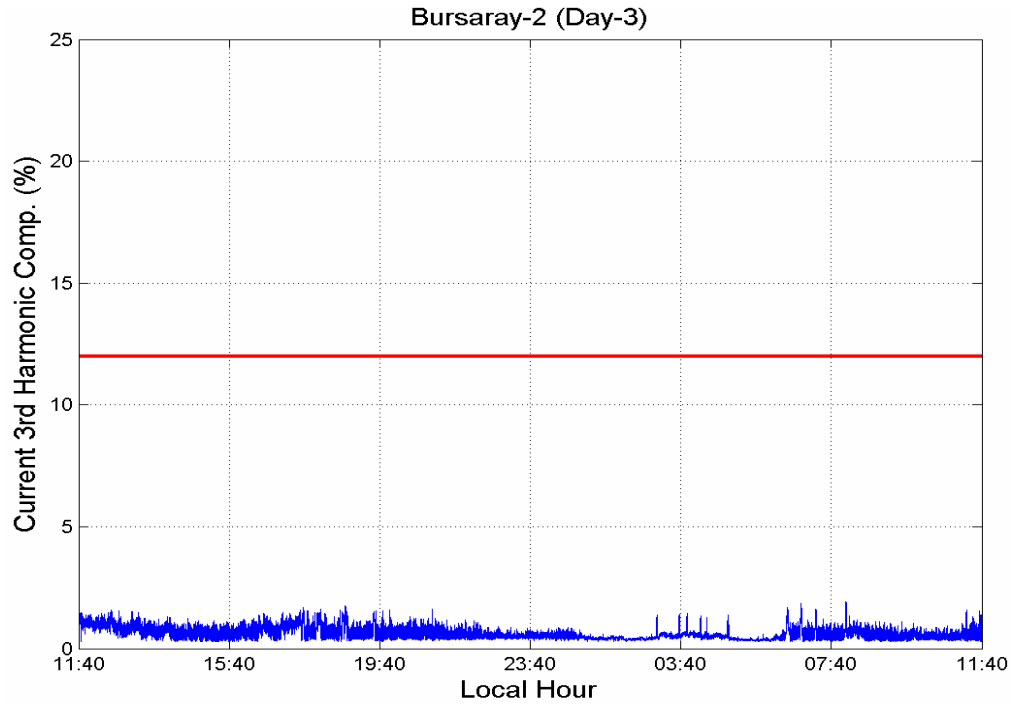


Şekil 3.29 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 3. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

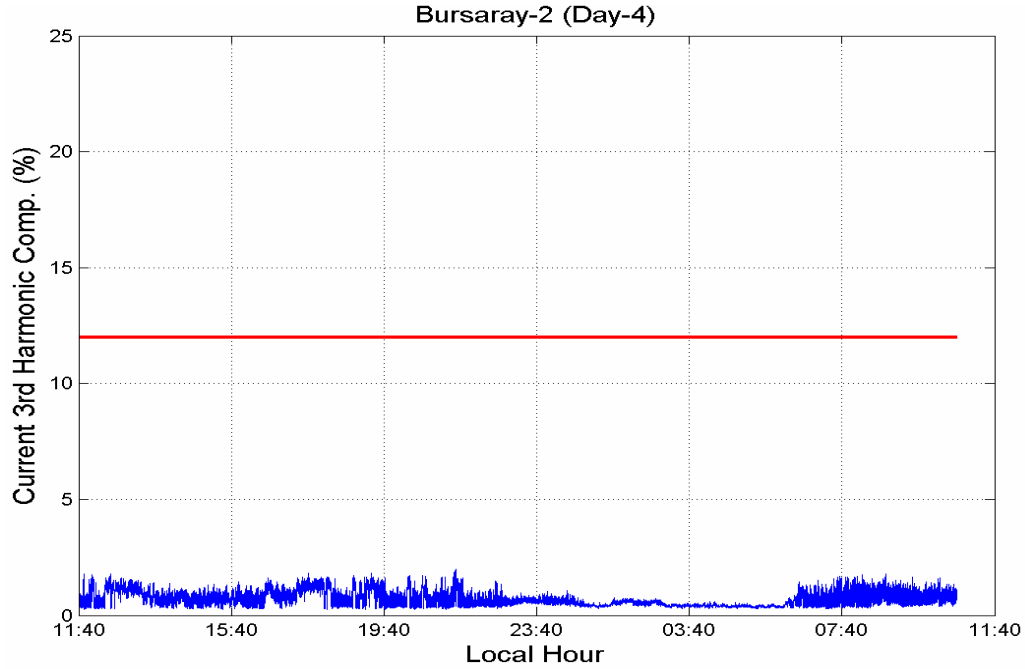
Şekil 3.29 ve 3.30’da Bursaray-2 besleme koluna ait akımın 3. harmonik bileşeninin değişimi görülmektedir.



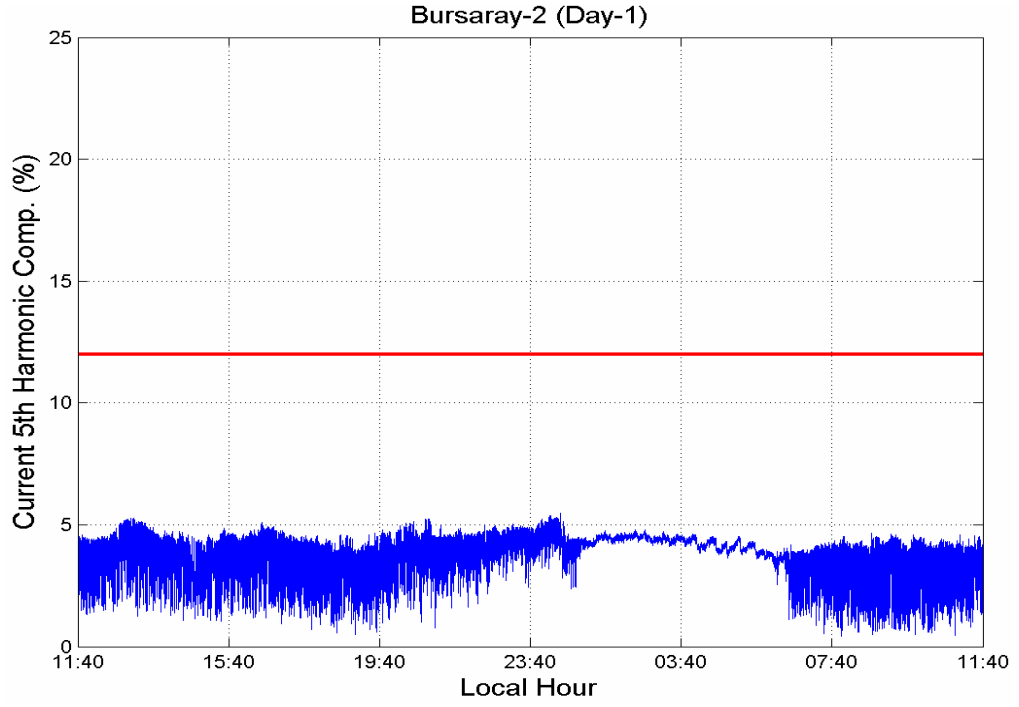
Şekil 3.30 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 3. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).



Şekil 3.31 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 3. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

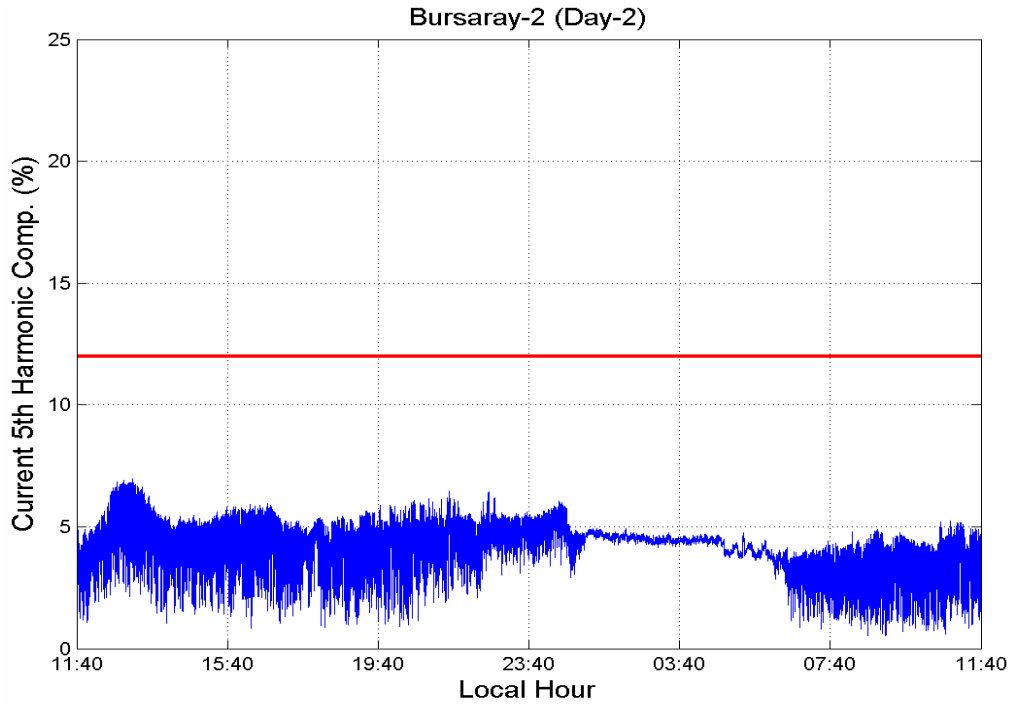


Şekil 3.32 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 3. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

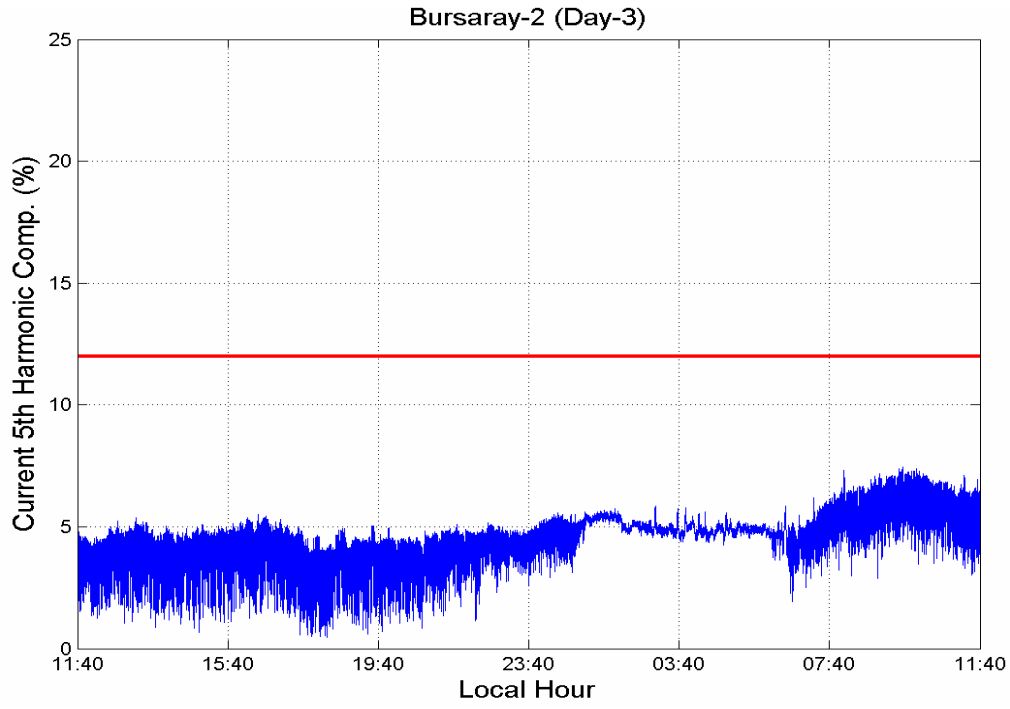


Şekil 3.33 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 5. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

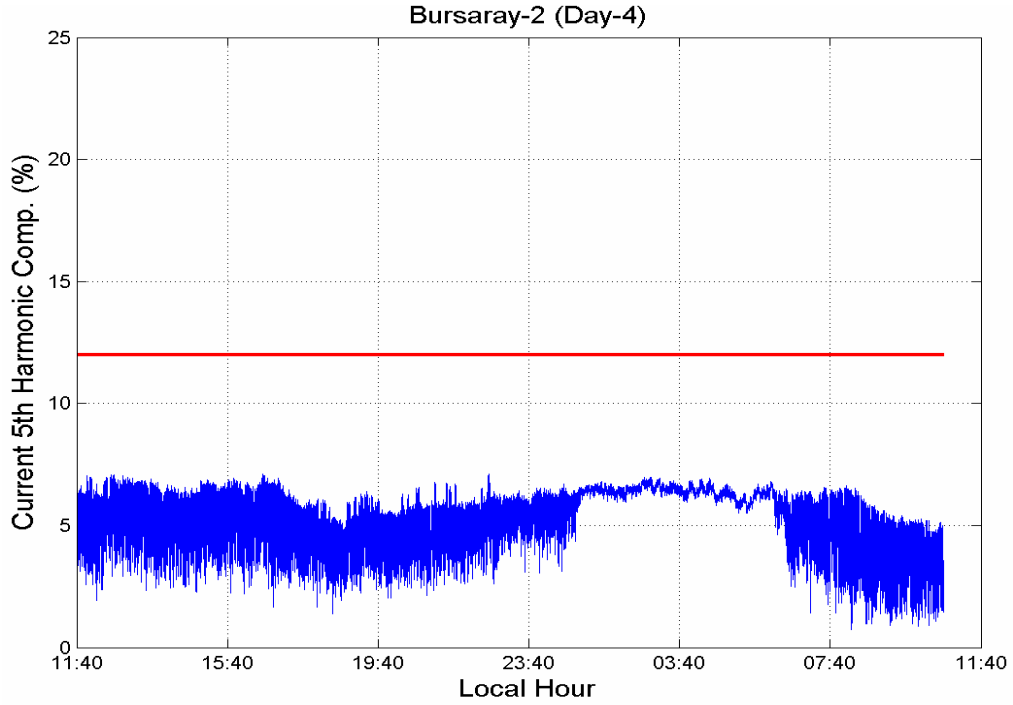
Şekil 3.33 ve 3.34’de Bursaray-2 besleme koluna ait akımın 5. harmonik bileşenin değişimi görülmektedir.



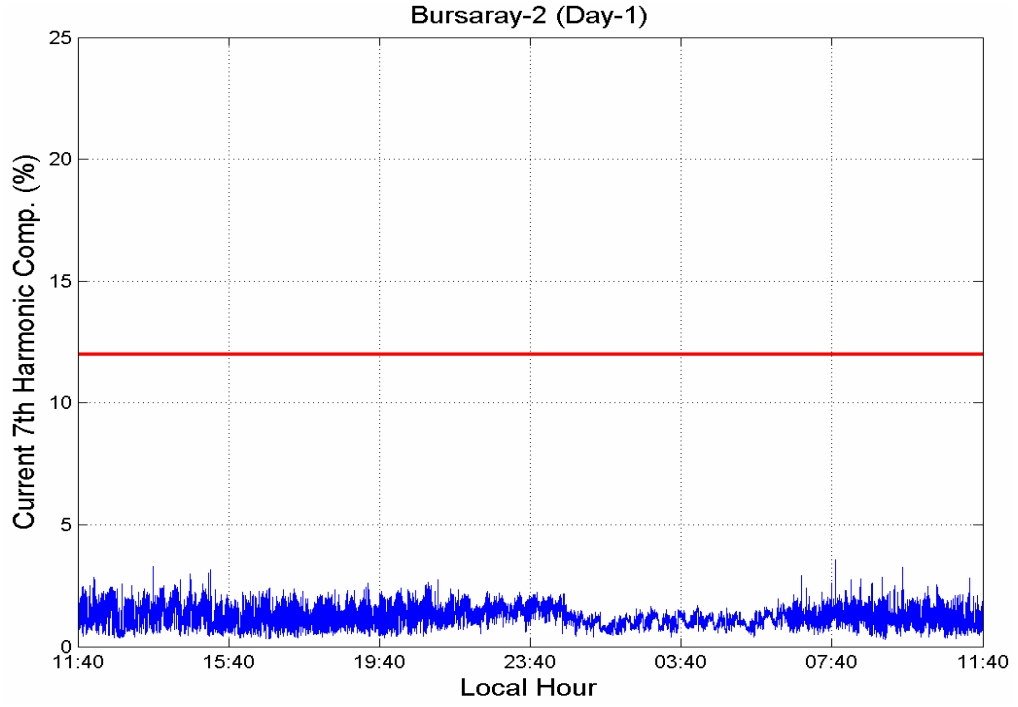
Şekil 3.34 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 5. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).



Şekil 3.35 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 5. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

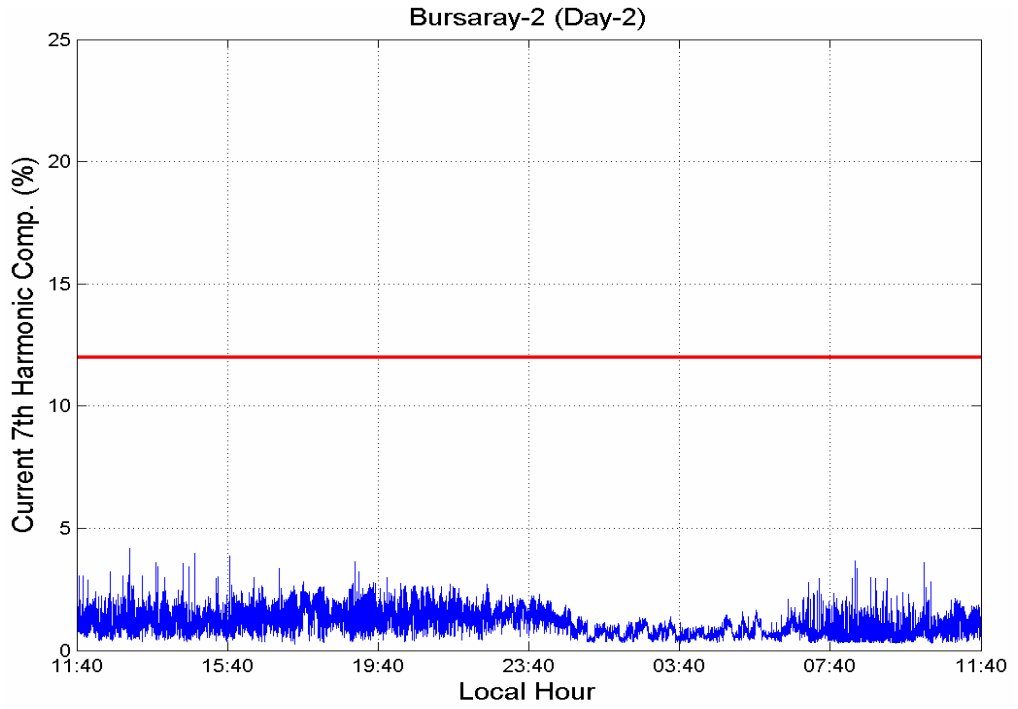


Şekil 3.36 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 5. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

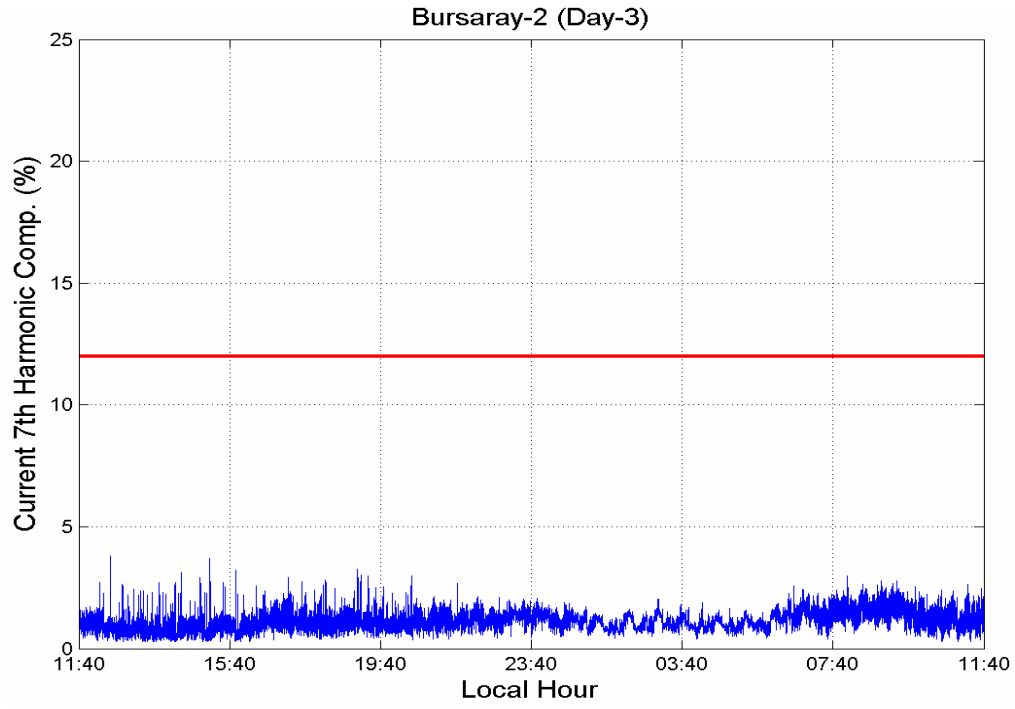


Şekil 3.37 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 7. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

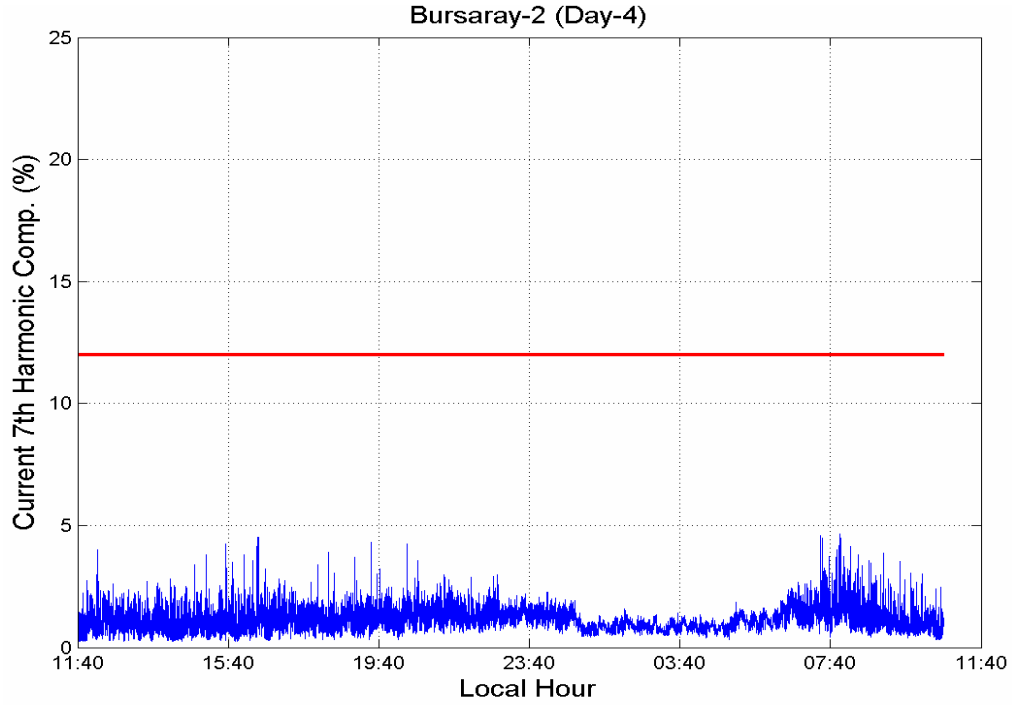
Şekil 3.37 ve 3.38’de Bursaray-2 besleme koluna ait akımın 7. harmonik bileşeninin değişimi görülmektedir.



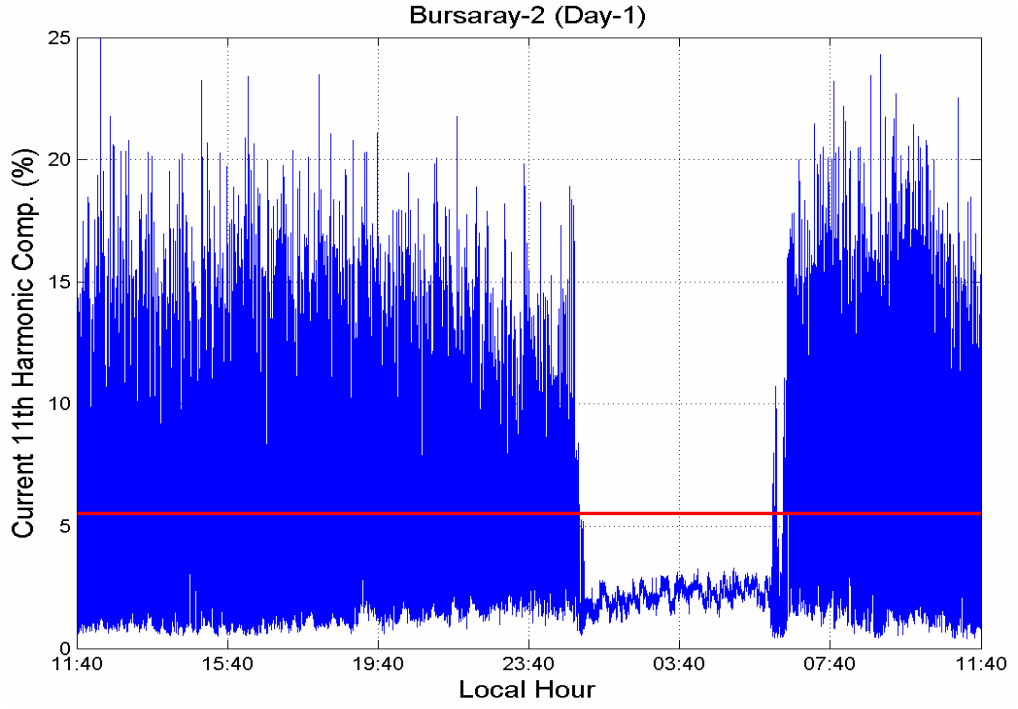
Şekil 3.38 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 7. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).



Şekil 3.39 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla Akım7. Harmonik Bileşen Değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

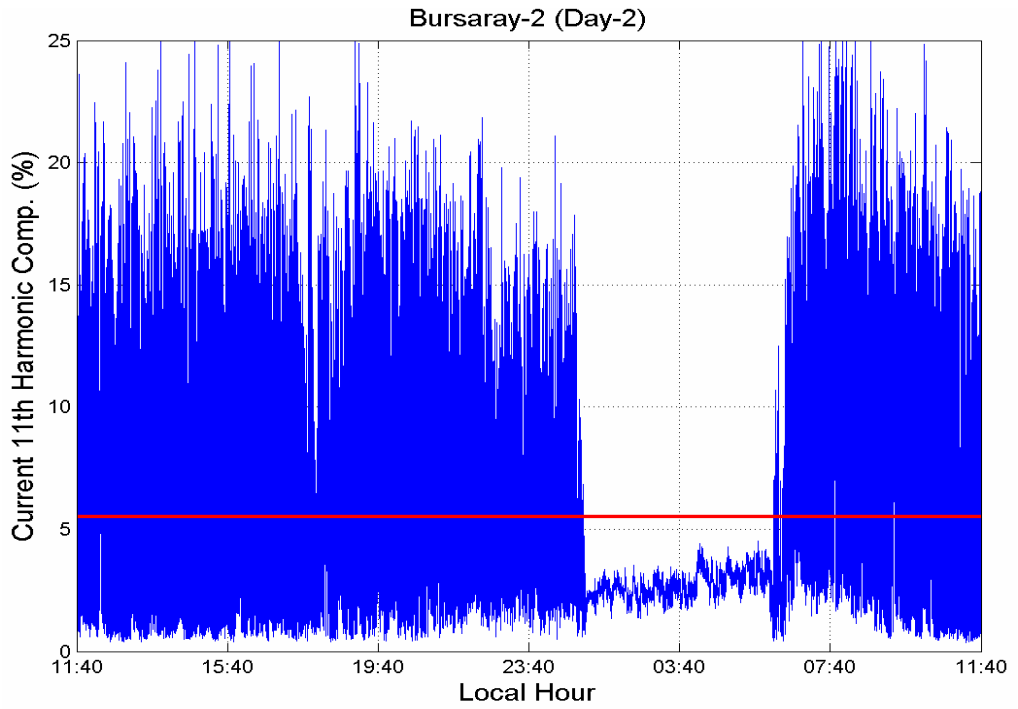


Şekil 3.40 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 7. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

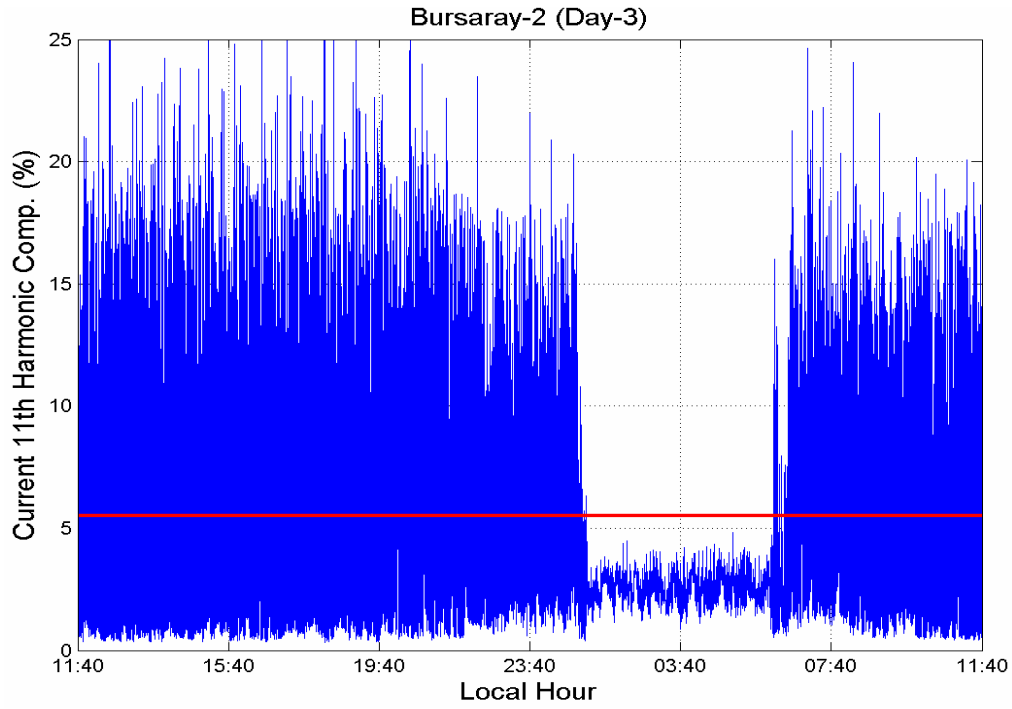


Şekil 3.41 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 11. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

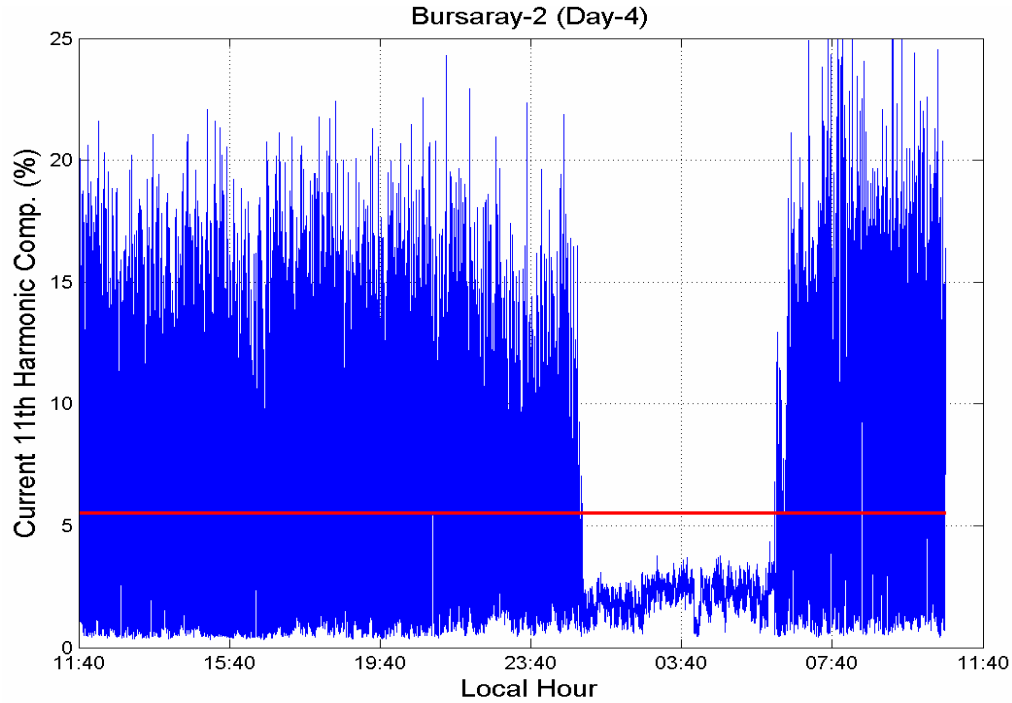
Şekil 3.41 ve 3.42’de Bursaray-2 besleme koluna ait akımın 11. harmonik bileşenin değişimi görülmektedir.



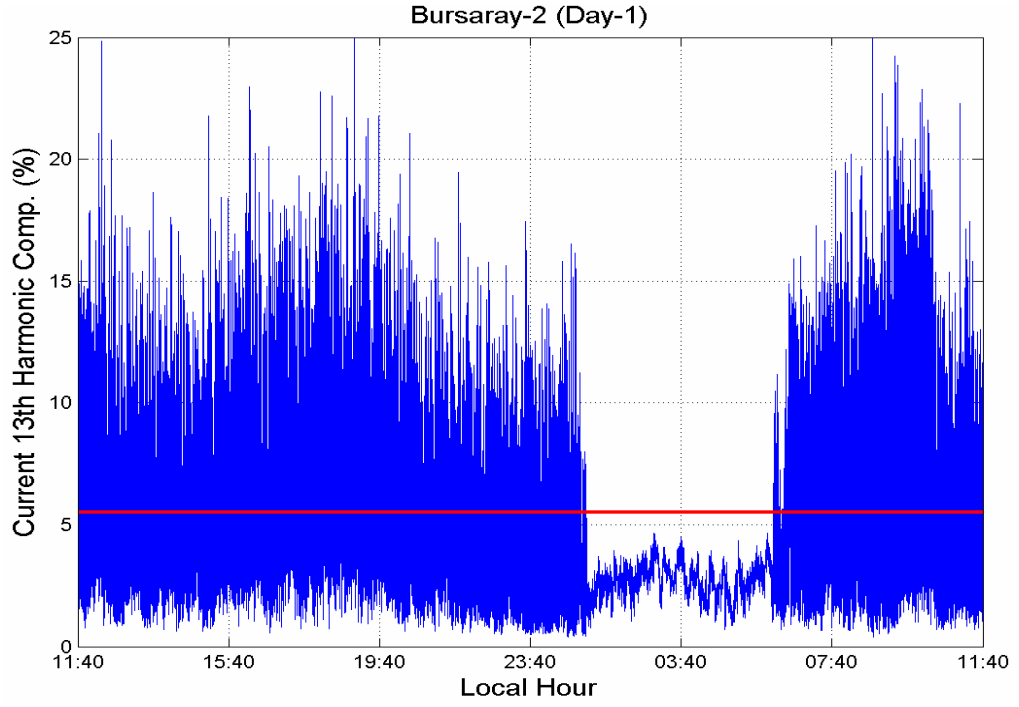
Şekil 3.42 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 11. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).



Şekil 3.43 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 11. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

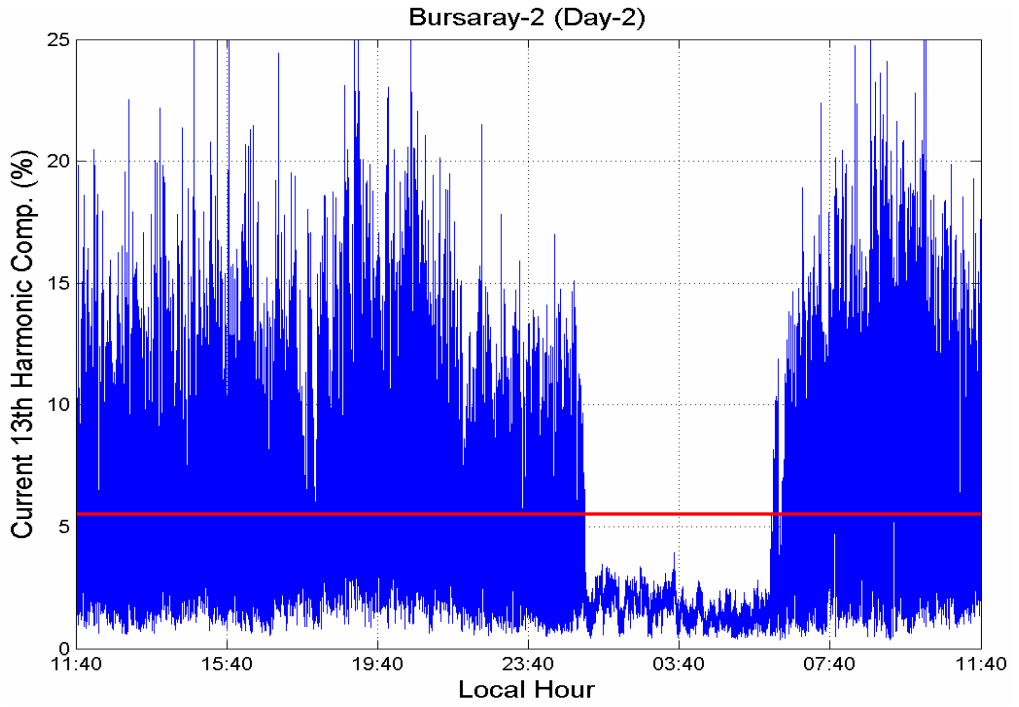


Şekil 3.44 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 11. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

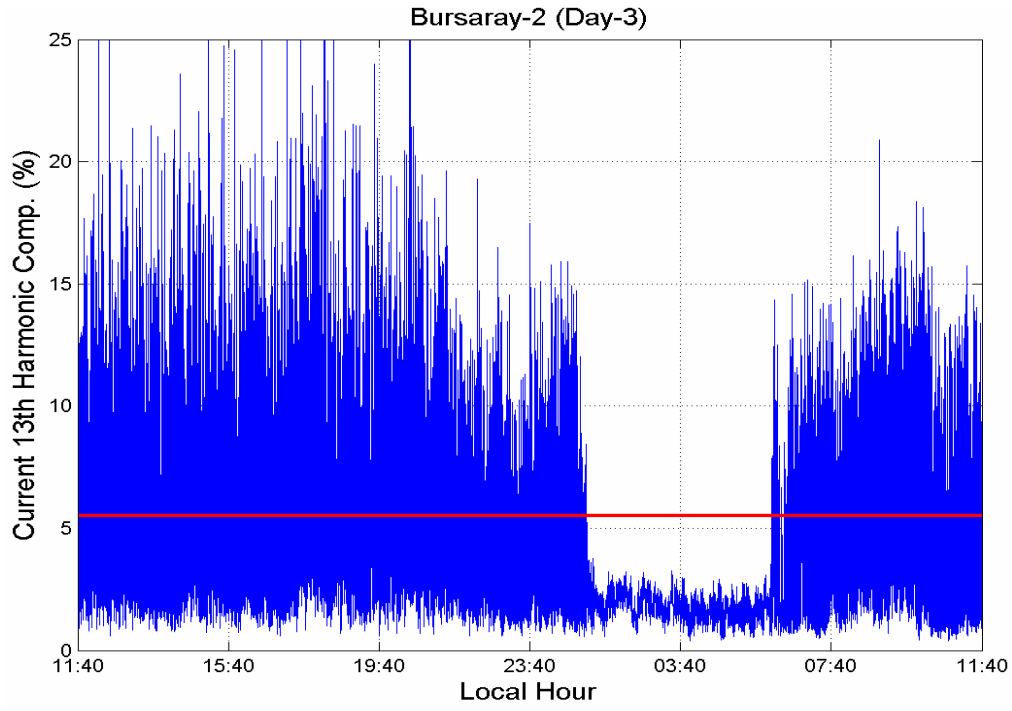


Şekil 3.45 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 13. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

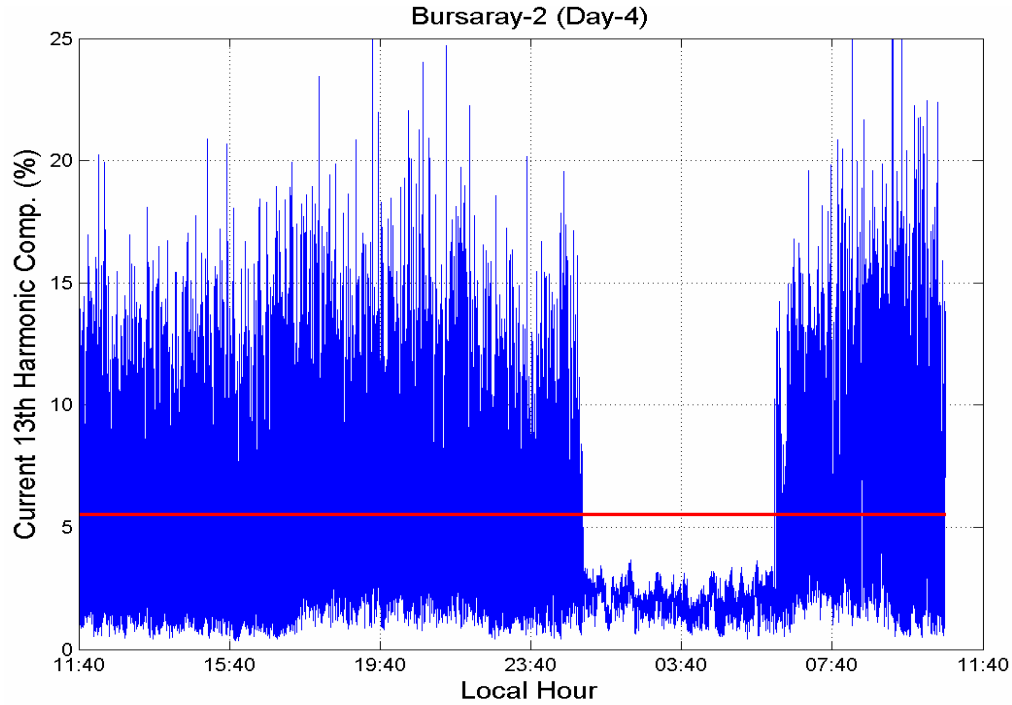
Şekil 3.45 ve 3.46’da Bursaray-2 besleme koluna ait akımın 13. harmonik bileşenin değişimi görülmektedir.



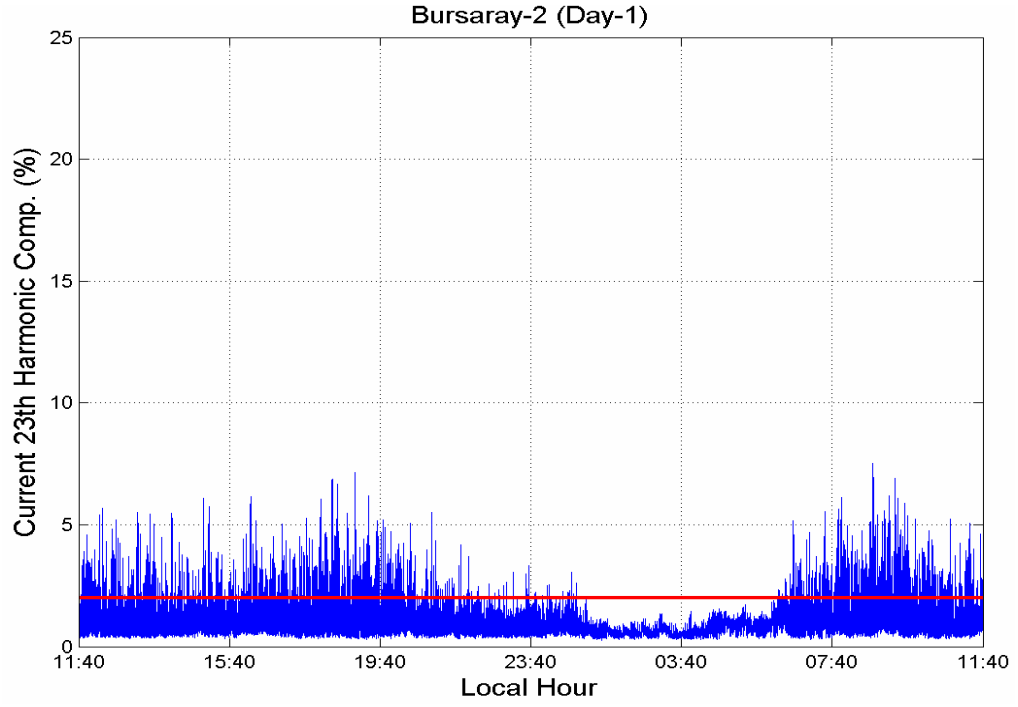
Şekil 3.46 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 13. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).



Şekil 3.47 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 13. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

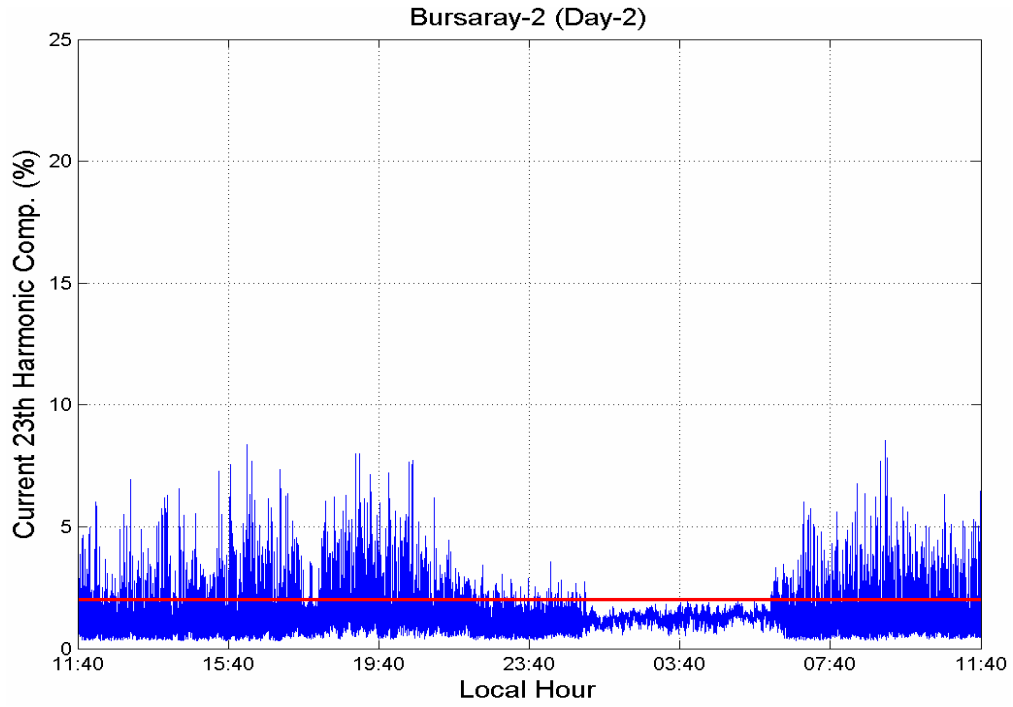


Şekil 3.48 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 13. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

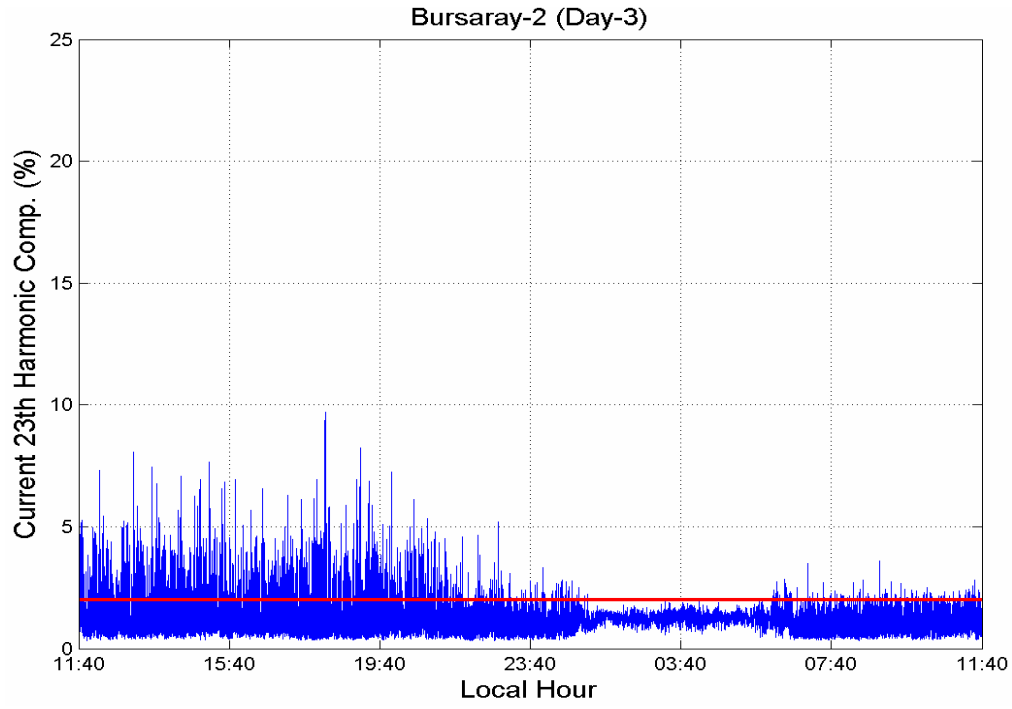


Şekil 3.49 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 23. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

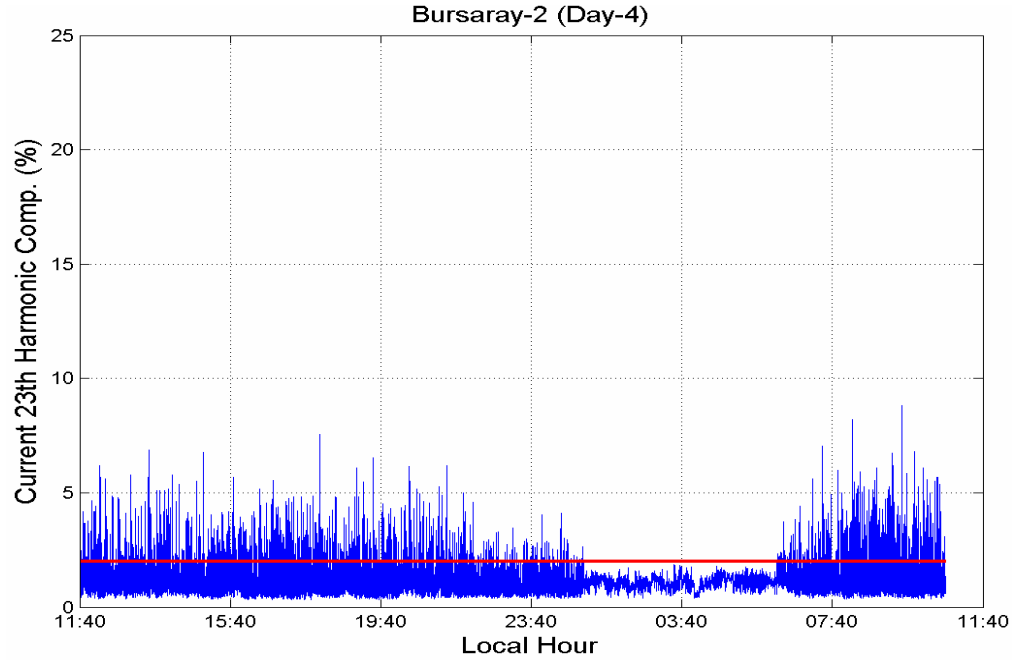
Şekil 3.49 ve 3.50’de Bursaray-2 besleme koluna ait akımın 23. harmonik bileşeninin değişimi görülmektedir.



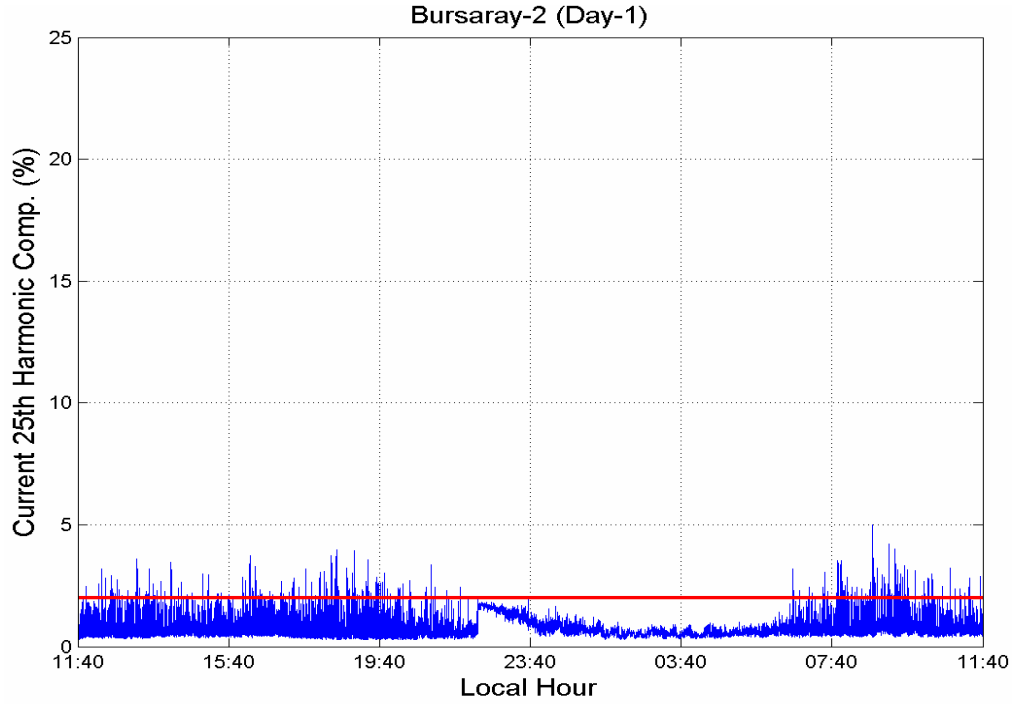
Şekil 3.50 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 23. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).



Şekil 3.51 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 23. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

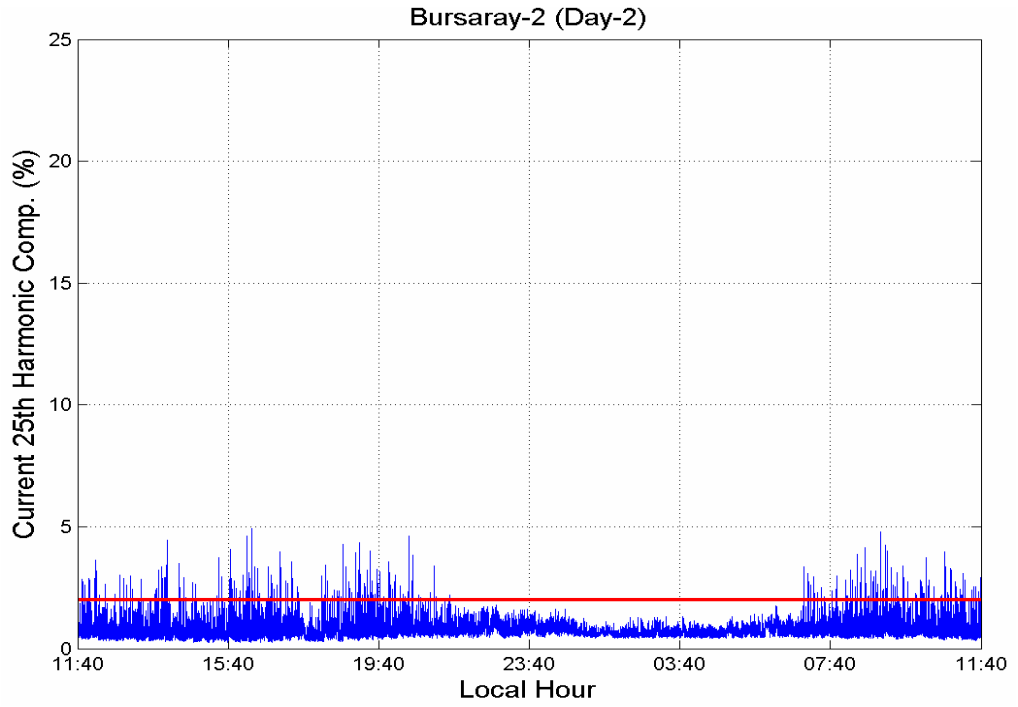


Şekil 3.52 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 23. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

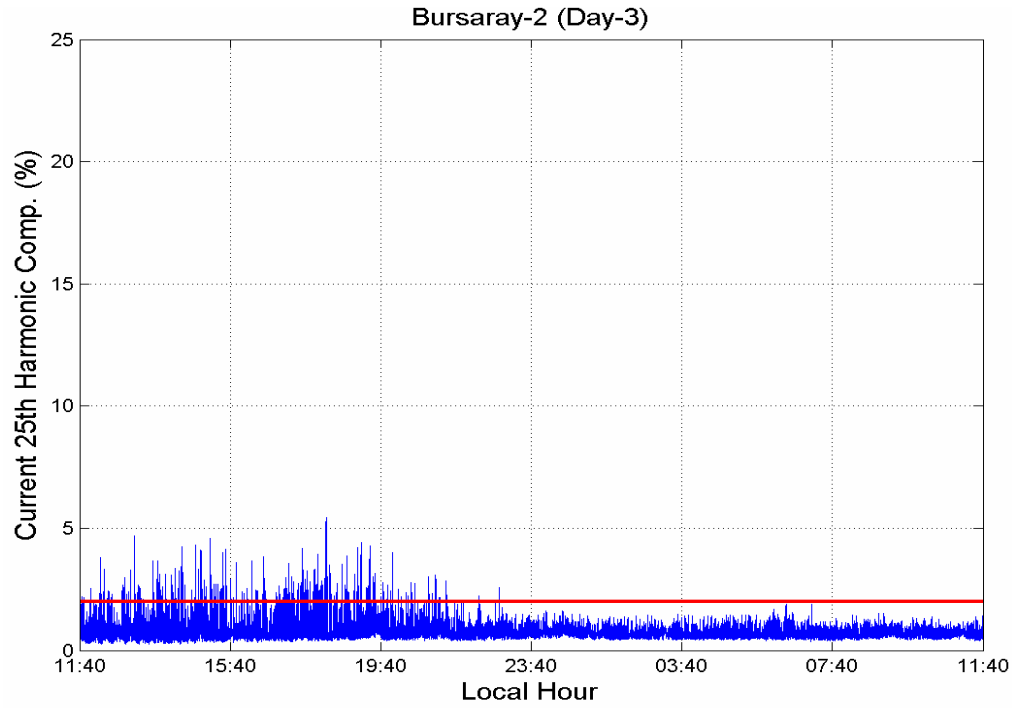


Şekil 3.53 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 25. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 7-8 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

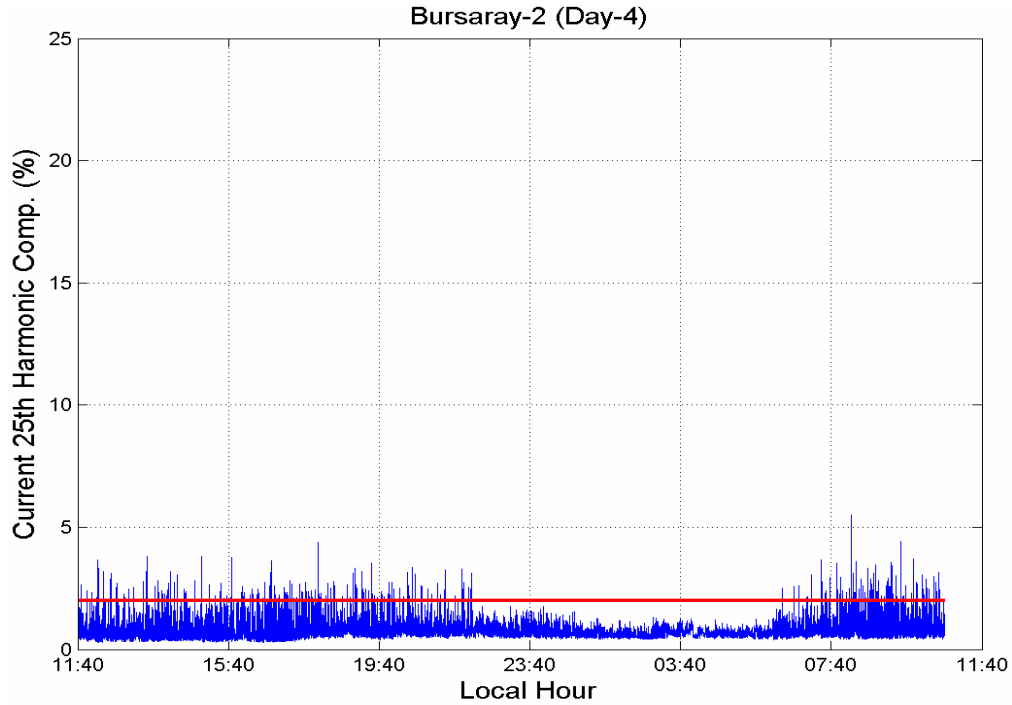
Şekil 3.53 ve 3.54’de Bursaray-2 besleme koluna ait akımın 25. harmonik bileşenin değişimi görülmektedir.



Şekil 3.54 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 25. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 8-9 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).



Şekil 3.55 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 25. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 9-10 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).



Şekil 3.56 : Bursaray-2 fideri 3 saniyelik ortalamalarla akım 25. harmonik bileşen değişimi (kayıt tarihi: 10-11 Aralık 2006) (standartlara göre kırmızı çizgi sınır değeri göstermektedir).

3.4.3 Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

1. Bursaray-2 fiderinin hat akımları, harmonik akım içeriği açısından değerlendirildiğinde 11, 13, 23 ve 25. harmonik bileşenlerinin mevcut standartlarda belirtilen sınır değerlerin üzerinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır [3,4,9,12]. Ülkemizde şu anda, elektrik dağıtım şirketleri “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticaret ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik” hükümleri uyarınca bozucu etki yaratan kullanıcılara cezai müeyyide uygulamakla yükümlüdürler. Çizelge 3.2’de akım harmonikleri için maksimum yük akımına göre verilmiş sınır değerler görülmektedir [3].

Çizelge 3.2 : Akım harmonikleri için maksimum yük akımına (IL) göre sınır değerler.

Tek Harmonikler						
I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TTB
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

2. Bursaray-2 fiderindeki mevcut akım harmoniklerinin sınır değerlerin altına indirilmesinde pasif şönt harmonik filtrelerin kullanılması ekonomik bir çözüm olmamaktadır.

a. Harmonik akımlar 34,5 kV fiderin hatlarında mevcuttur. Bu nedenle pasif şönt filtreler 34,5 kV barasına doğrudan veya dolaylı olarak bağlanmaktadır. Bursaray-2 fideri Bursa TEDAŞ’a ait 34,5 kV barasından beslenmektedir. Burulaş tarafından 34,5 kV baraya doğrudan veya dolaylı olarak bağlanan pasif şönt harmonik filtresi Bursaray’ın harmoniklerini filtre ettiği gibi 34,5 kV barasından beslenen Bursa şehrine ilişkin bazı yüklerin harmoniklerini de filtre edecektir. Böyle bir durum tesis edilecek olan harmonik filtre sisteminin ilk yatırım maliyetini de artıracak ve kurulma amacını aşacaktır.

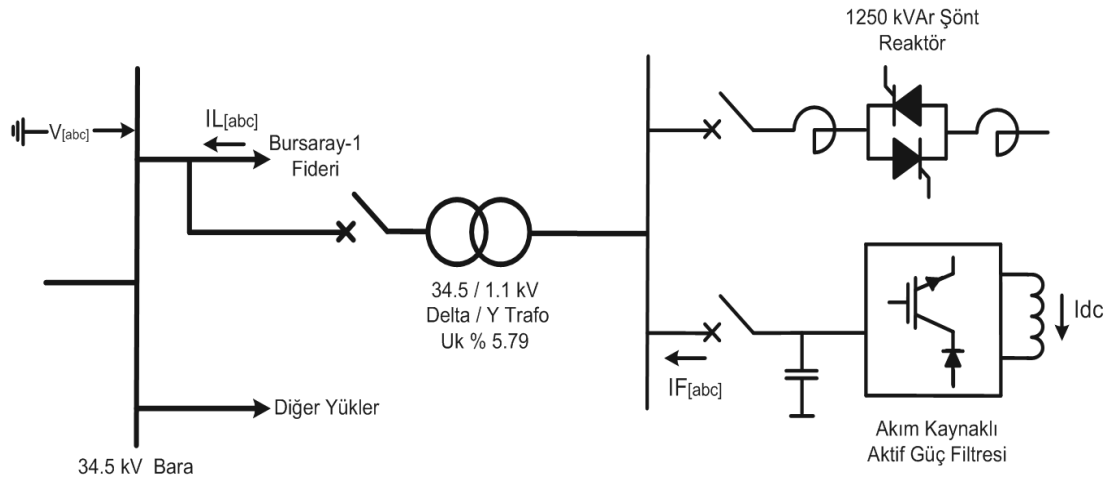
b. Bursaray-2 fiderindeki baskın harmonikler sırasıyla 11. ve 13. harmoniklerdir. Bu amaçla tesis edilecek pasif şönt filtre, akord frekansının (≈ 550 Hz) üzerindeki harmonikleri süzer, altındaki frekanstaki harmonikleri ise büyütür. TEDAŞ’a ait 34,5 kV barasında en baskın gerilim harmonikleri 5 ve 7 olduğuna göre, 11 ve 13’e göre

tasarlanmış pasif şönt bir filtrenin amaca hizmet etmeyeceği ve 34,5 kV barada mevcut 5. ve 7. gerilim harmoniklerinden dolayı aşırı yüke maruz kalacağı anlaşılmaktadır. Bu problemin giderilmesi amacıyla, 11. ve 13. harmonik filtresiyle birlikte 5. ve 7. harmonik filtresinin de tesis edilmesi gerekebilecektir. Bu ise yüksek bir ilk yatırım maliyeti ve amacını aşan bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

3. Bursaray-2 fiderinin harmonik akım problemini çözmek amacıyla aktif güç filtresi topolojisi düşünülebilir. Aktif güç filtresinin kurulu gücünün çok düşük olması nedeniyle 34,5 kV seviyesine bağlanması ekonomik bir çözüm olarak mümkün görülmemektedir. Bu nedenle, aktif güç filtresi, 34,5 kV seviyesine dolaylı olarak bağlanmalıdır. Böyle bir çözüm teknik ve ekonomik olarak yapılabilir, genişletilebilir, kalıcı ve uzun dönemli bir çözüm olacaktır.

3.5 Bursaray-2 Fideri Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresi Sistemi

3.5.1 Tek hat şeması ve temel ölçütler



Şekil 3.57 : Bursaray-2 fideri akım kaynaklı aktif güç filtresi tek hat şeması.

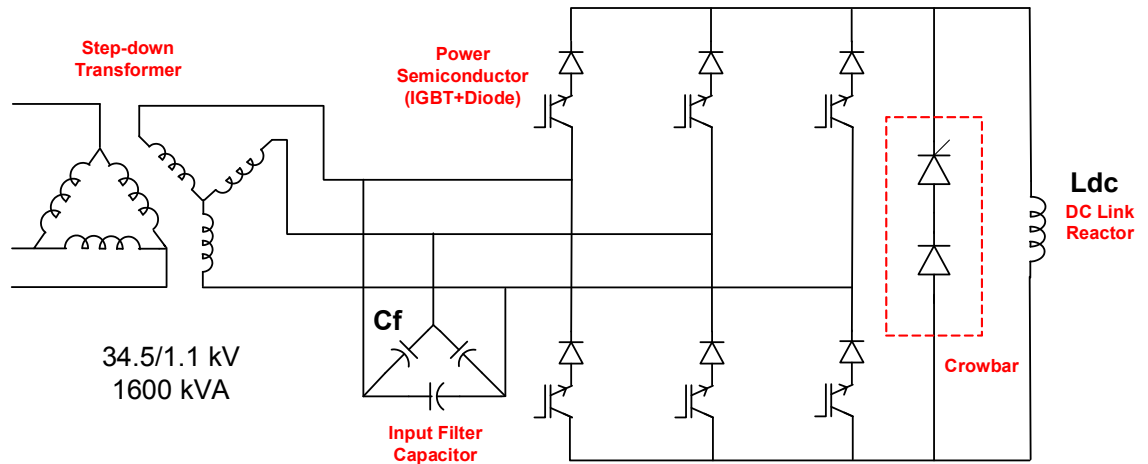
Şekil 3.57’de verilen tek hat şemadan görüleceği üzere AGF sistemi, Bursaray-2 fiderinde mevcut bulunan tristör ateşlemeli şönt reaktör (TAŞR) sistemi ile aynı baraya (1,1 kV gerilim seviyesine) bağlanacaktır [21,22].

AGF sisteminin işlevsel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- AGF sistemi Bursaray-2 fiderinden beslenen cer doğrultucularının ürettiği baskın akım harmoniklerini (temel olarak 11. ve 13. harmonikler) ölçecek ve bu akımların tersini üreterek (180 derece faz farkı ile) yönetmeliklerde verilen sınır değerlerin altına çekilmesini sağlayacaktır.
- AGF filtresi ayrıca trenlerin çalışmadığı gece saatlerinde ise yeraltı kablolarından kaynaklı kapasitif reaktif güç bileşeninin kompanzasyonu amacıyla kompanzasyon sistemi olarak çalışacaktır. Mevcut TAŞR sisteminin kurulu gücü olan 1250 kVAr üzerinde eksik kalan ihtiyaç AGF sistemi tarafından karşılanacaktır.

3.5.2 Sistem donanım yapısı

Şekil 3.57’de tek hat olarak gösterilen AGF sisteminin donanım yapısı aşağıdaki gibi gösterilebilir:



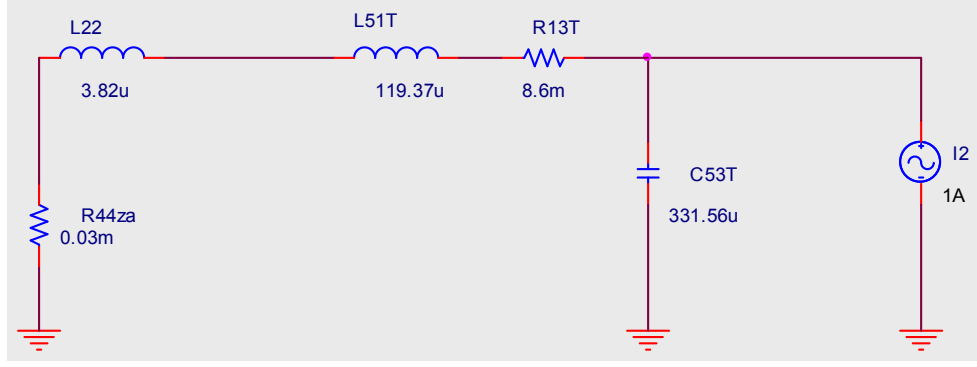
Şekil 3.58 : Bursaray-2 fideri AGF sistemi donanım yapısı.

Şekil 3.58’de gösterildiği gibi AGF sistemi donanımı güç katı (devre kesiciler hariç) temel olarak giriş kuplaj transformatörü (mevcut), giriş filtre kapasitörü (yeni), güç yarı iletkenleri (yeni), crowbar/gerilim koruma devresi (yeni) ve DA bağ reaktöründen (yeni) oluşmaktadır. Bununla birlikte sistem donanımında bulunan diğer temel donanımlar ise şöyledir:

- ❖ AA/DA besleme devresi
 - Kontrol sistemi beslemesi
 - Koruma sistemi beslemesi
 - Çevre birimleri beslemesi
 - IGBT sürücü kartları beslemesi
- ❖ Ölçme devresi
 - Sistem akımı duyargaları
 - Filtre akımı duyargaları
 - Reaktif güç kompanzasyonu ve aktif filtre toplam akım duyargaları
 - DA bağ reaktörü akım duyargaları
 - Şebeke gerilimi duyargaları
- ❖ Kontrol ve izleme sistemi
 - DSP tabanlı kontrol birimi/kartı
 - Koruma birimi/kartı
 - Ateşleme birimi/kartı
 - İzleme birimi/kartı
- ❖ Soğutma sistemi
 - Sulu soğutma sistemi (eşanjör ve pompa)
 - Sulu soğutmaya uygun soğutucular

3.5.2.1 Giriş filtre kondansatörü

Akım kaynaklı çevirici devre yapısında, çevirici girişinde kullanılan pasif filtre yüksek frekansta anahtarlanan akımın oluşturduğu gerilim harmoniklerini süzmek amacıyla kullanılmaktadır. AGF sisteminde anahtarlama frekansı 3 kHz olarak belirlenmiş ve benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır. Girişte kullanılan pasif filtre devresinde giriş kondansatörü ve reaktörü, paralel bir rezonans devresi oluşturmaktadır. Giriş filtre devre yapısı ve tipik bir frekans tepkisi aşağıda verilmektedir.



Şekil 3.59 : Giriş filtresi devre yapısı.

Şekil 3.59'dan görüldüğü üzere, akım kaynaklı çevirici ideal akım kaynağı gibi modellenmiştir. Girişte kullanılan şönt kondansatör ile şebeke + trafonun eşdeğer empedansları paralel rezonans devresi oluşturmaktadır. Bu paralel rezonans devresinin akort frekansı, anahtarlama frekansına ve akım kaynağından basılan akımın değerine göre değişmektedir.

Bursaray-2 için tasarlanan akım kaynaklı uygulamada, girişteki 34.5/1.1 kV, 1600 kVA trafonun kaçak empedansı giriş reaktörü olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple, girişte ayrıca bir reaktöre ihtiyaç bulunmamaktadır. Benzetim çalışmaları sonucunda giriş filtresinin akort frekansı 800 Hz olarak belirlenmiştir. Bu frekans, 3 kHz anahtarlama frekansından kaynaklı bileşenlerin yeterli derecede süzülmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, aktif güç filtresi tarafından üretilen 11. ve 13. akım harmoniklerinin genliklerinin artmasına neden olmaktadır. Kontrol sisteminde kullanılması benimsenen seçili harmonik yok etme yöntemi ile bu genlik artışı aktif filtrenin kurulu gücünün düşürülmesi için bir avantaj olarak kullanılacaktır. Ancak bu durumda, kondansatörlerin akım ve gerilim anma değerlerinin uygun bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Mevcut yük ve dağıtım sistemi modellenerek yapılan benzetim çalışmaları sonucunda kondansatörlerin kapasite ve akım/gerilim anma değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Kapasite: 300 uF (üçgen-bağlı)

Anma akımı: 250 Arms (min.)

Anma gerilimi: 2000 Vrms (min.)

3.5.2.2 Güç yarı iletkenleri (IGBT + Diyot)

AGF sisteminde kullanılacak yarı iletken anahtarların seçiminde öncelikli kriter çalışma geriliminin belirlenmesidir. AGF'nin bağlanacağı noktada sürekli durumda şebeke gerilimi 1,1 kVrms olacaktır. Bu durumda yarı iletken anahtarların maruz kalacağı tepe gerilim en az $1,1 \times 1,4 \text{ kV} = 1.54 \text{ kV}$ olacaktır. Ancak gerek akım harmoniklerinden kaynaklı kapasitörler üzerinde oluşan gerilim bileşenleri, gerekse anahtarlama esnasında bara endüktansından kaynaklı aşırı gerilimler dikkate alındığında yarı iletken anahtarların maruz kalacağı gerilim en az 2,0 kV civarında olacaktır. Bu gerilim seviyesinde güvenli çalışabilmesi amacıyla çalışma gerilimi 3,3 kV olan yarı iletken anahtarlar seçilmelidir.

Yarı iletken anahtarların akım anma değerleri ise ihtiyaçların karşılanması yanı sıra güç artırımına da olanak veren bir yaklaşım benimsenerek 1200 A olarak belirlenmiştir. Böylece, aynı güç katı kullanılarak (DA bağ reaktörü ve giriş filtre kapasitörleri değiştirilerek) güç artırımını yapmak mümkün olacaktır.

3.5.2.3 DA bağ reaktörü

AGF sisteminde kullanılacak ana donanımlardan bir tanesi de DA bağ reaktörüdür. Akım kaynaklı devre yapısında, eviricinin akım kaynağı olarak çalışmasını sağlayan DA bağ reaktörünün tasarım değerleri benzetim çalışmaları kullanılarak belirlenmiştir. Bursaray-2 sisteminde mevcut 11. ve 13. akım harmoniklerinin filtrelenmesi için basılacak akım bileşenlerinin, AGF tarafından üretilebilmesi için en az 300 A DA bağ akımına gerek bulunmaktadır. Bu sebeple, DA bağ reaktörünün akım anma değeri en az 300 A olarak seçilmelidir. Diğer önemli bir konu ise, DA bağ reaktörünün endüktans değeridir. DA bağda oluşturularak akım üzerindeki (DA dışındaki) bileşenlerin genlikleri DA bağ reaktörünün endüktans değerine bağlıdır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda DA bağ reaktörünün endüktans değeri 4 mH olarak belirlenmiştir. DA bağ reaktörünün çalışma gerilimi ise 2 kV olacak şekilde seçilmiştir. DA bağ reaktörüne ilişkin teknik özellikler aşağıdaki gibidir:

- Tek faz, demir çekirdekli
- Dahili tip
- Doğal hava soğutmalı
- Maksimum ortam sıcaklığı: +45°C

- Terminaller arası anma gerilimi (tepe değeri): 2 kV
- Anma akımı: 500 A
- Kısa devre akımları
 - Isıl (1 s): 2.5 kA
 - Mekanik: 6.25 kA
- Anma endüktansı: 4 mH
- Tolerans: +/- 3%
- Çalışma frekansı: DA
- AA yalıtım (1 dak, rms, 50 Hz): 3 kV
- BIL (tepe değeri): 10 kV
- dv/dt (min.): 1000V/μs
- Standard: IEC 60289

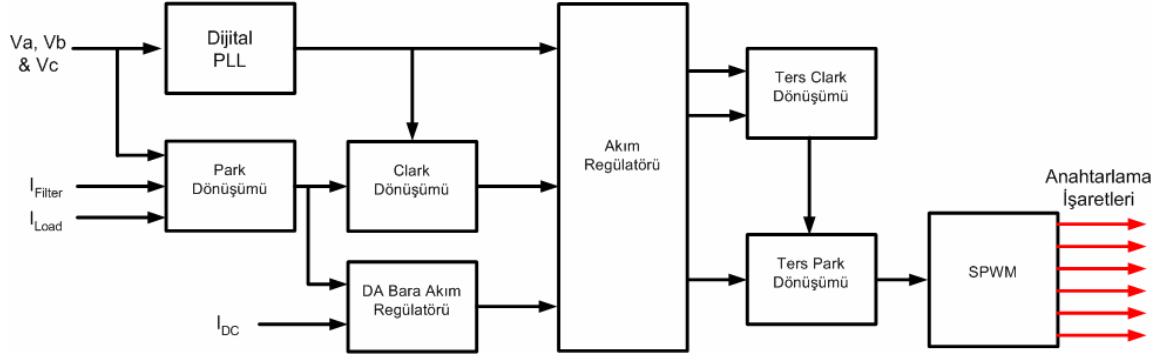
3.5.2.4 Gerilim koruma devresi (Crowbar)

Akım kaynaklı çevirgeç yapısında kullanılan önemli bir birim gerilim koruma devresi ya da crowbar'dır. Crowbar devresi, kontrol dışı çalışma koşullarında (akımın sürekliliğinin sağlanamadığı durumda) gerilimin yükselmesini engellemek amacıyla kullanılan ve tristör + diyot'tan oluşan bir devredir. Akım kaynaklı devre yapısında, her durumda üst gruptan bir tane ve alt gruptan bir tane olmak üzere iki adet yarı iletken anahtar "ON" durumundadır. Böylece akımın sürekli akabileceği bir yol bulunmaktadır. Ancak akımın akabileceği yolun kesilmesi durumunda DA bağ reaktöründe depolanan enerjiden kaynaklı olarak gerilim yükselmesi ($V = L \, di/dt$) meydana gelmektedir. Bunu engellemek amacıyla gerilim yükselmesinden tetiklenen DA bağa ters koştur bağlı tristör devreye girmekte ve DA bağ akımını üzerine almaktadır (Şekil 3.58). Böylece, DA bağ akımı reaktör ve tristör + diyot üzerinden "freewheel" ederek sönmelenmektedir.

3.5.3 Sistem yazılım yapısı

AGF sistemi için tasarlanan yazılımın temel işlevi örneklenen akım ve gerilimlerden evirici anahtarlama sinyallerinin üretilmesidir. Ayrıntıları Şekil 3.61-3.67'de verilen kontrol sisteminin basitleştirilmiş şeması Şekil 3.60'da gösterilmektedir.

Şekil 3.60’da görülen sistem yazılımının yapısı genel olarak örneklenen elektriksel büyüklüklerden aktif güç filtresi referans akımlarının ve bu akımların şebekeye basılabilmesi için gerekli anahtar tetikleme sinyallerinin üretilmesi ve hata sinyallerinin izlenerek gerekli korumaların yapılmasını sağlamaktadır.

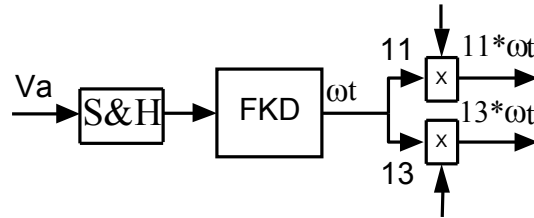


Şekil 3.60 : Bursaray-2 AGF sistemi yazılım prensip şeması.

3.5.4 Kontrol sistemi

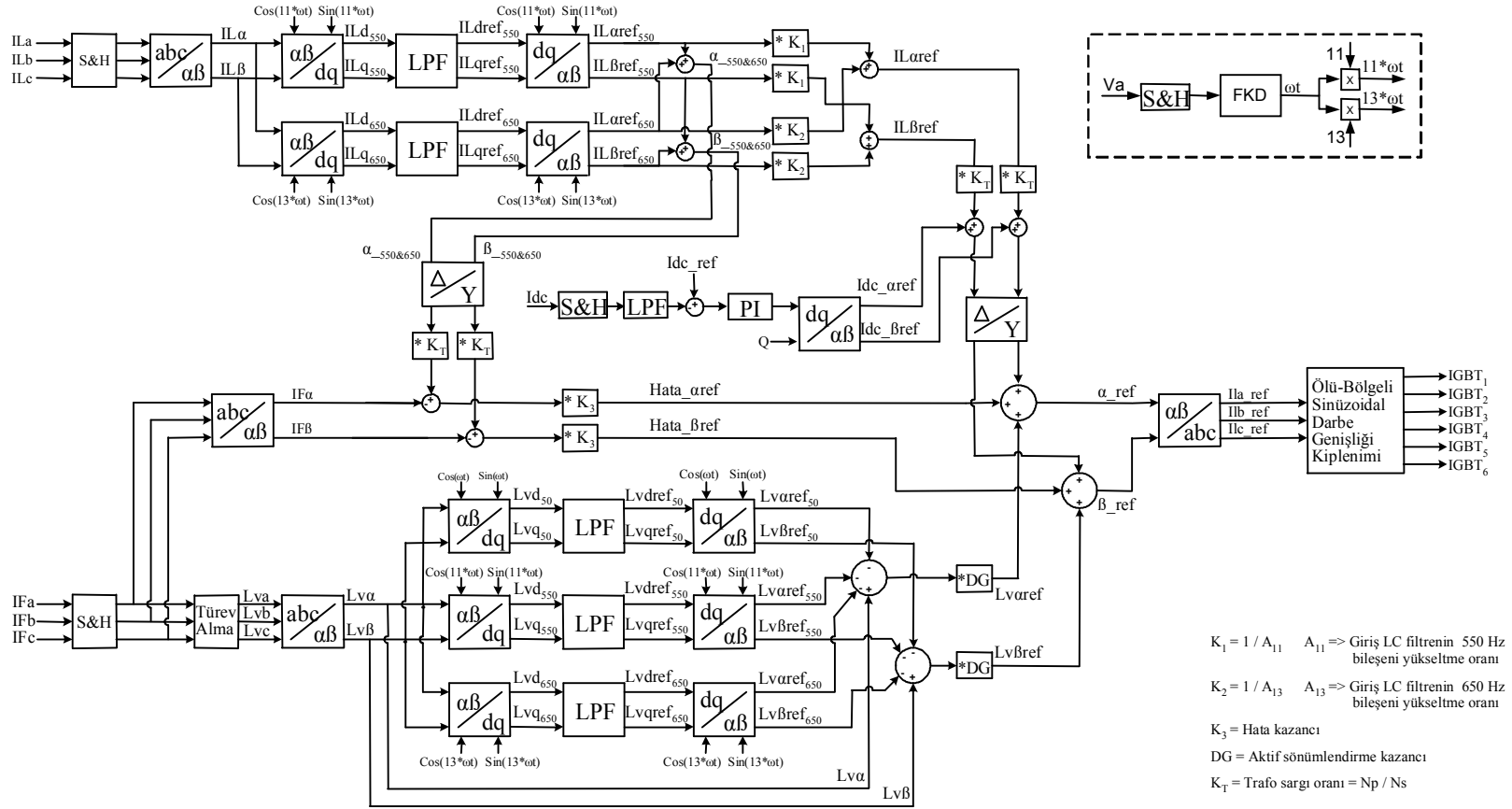
Şekil 3.62’de Bursaray-2 fideri için tasarlanan AKAGF’nin kontrol sistemi blok şeması görülmektedir [22].

3.5.4.1 Faz kilitlemeli döngü



Şekil 3.61 : Faz kilitlemeli döngü.

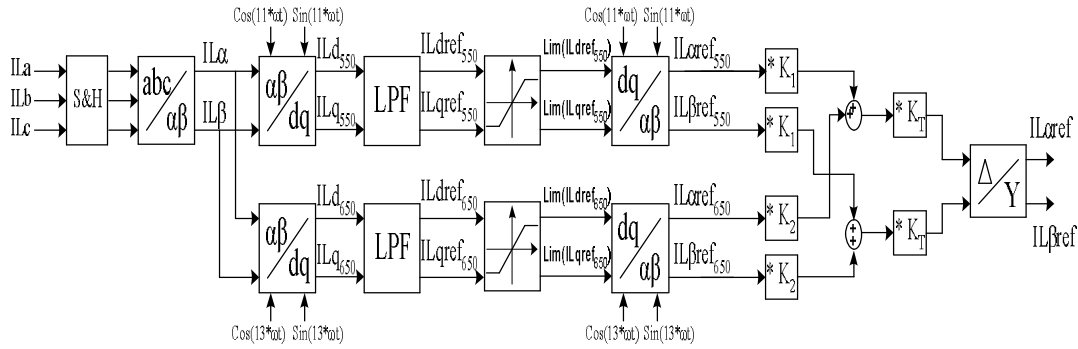
Faz kilitlemeli döngü, giriş gerilimine kilitlenerek “Durağan Referans Alanı”ndan “Senkron Referans Alanı”na geçişte kullanılan faz bilgisini üretir. Şekil 3.61’de faz kilitlemeli döngünün blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.62 : Bursaray-2 AGF kontrol sistemi blok şeması.

3.5.4.2 Referansların üretilmesi

Şekil 3.63'te referans akımların üretildiği blok şema görülmektedir.



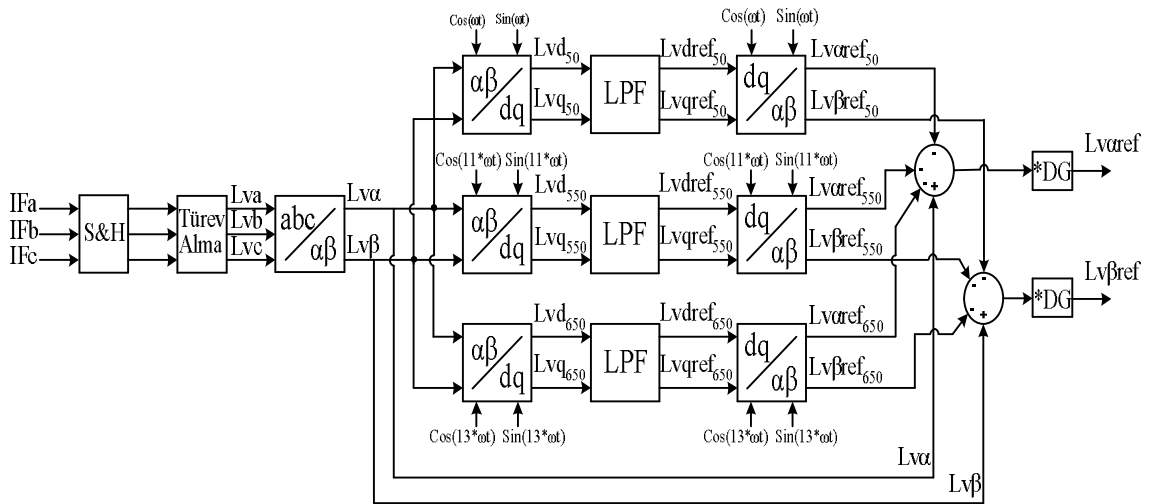
Şekil 3.63 : Senkron referans düzlemi ile referans akımların bulunması.

$K_1 = 1 / A_{11}$ $A_{11} \Rightarrow$ Giriş LC filtrenin 550 Hz bileşeni yükseltme oranı

$K_2 = 1 / A_{13}$ $A_{13} \Rightarrow$ Giriş LC filtrenin 650 Hz bileşeni yükseltme oranı

$K_T =$ Trafo sargı oranı = N_p / N_s

3.5.4.3 Aktif sönümlendirme

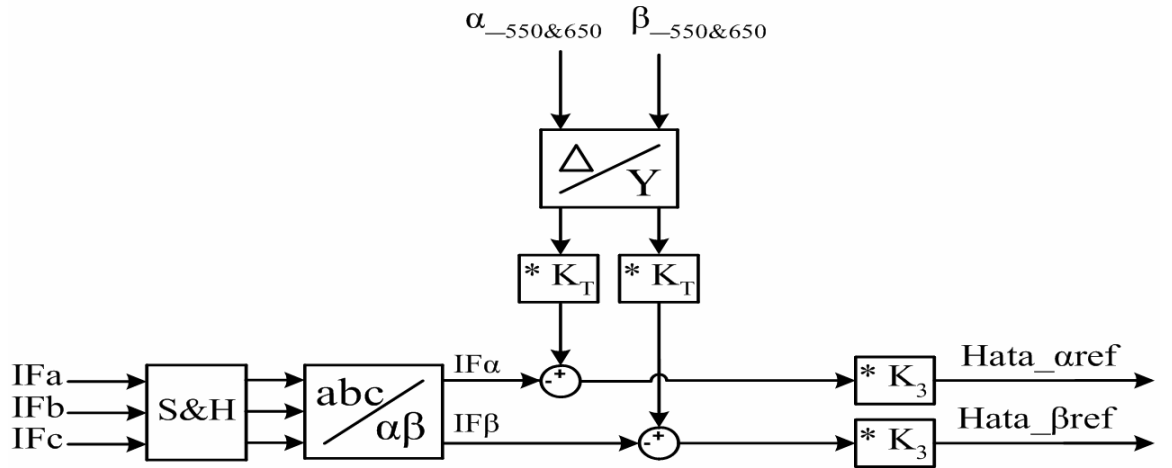


Şekil 3.64 : Bursaray-2 AGF aktif sönümlendirme bloğu.

DG = Aktif sönümlendirme kazancı

- Akım kaynaklı aktif güç filtrelerinde, giriş filtresinin rezonans frekansına yakın harmonik bileşenleri büyürler.
- Bu büyümenin engellenmesi için giriş filtresine sönümlendirme direnci bağlanmalıdır ya da akım kontrol yöntemi büyümeyi göz önüne alarak tasarlanmalıdır.
- Giriş filtresine sönümlendirme direnci bağlanması kayıpları arttıracığından tercih edilen bir yöntem değildir.
- Bunun yerine sönümlendirme direnci giriş filtresine gerçekte bağlanmadığı halde bağlanmış gibi varsayılarak, buradan gelen bileşenlerin katıldığı aktif sönümlendirme yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 3.64'te blok şeması görülmektedir.

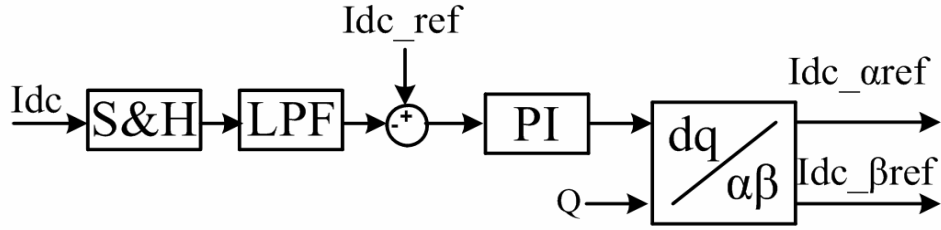
3.5.4.4 Hata kompanzasyonu



Şekil 3.65 : Bursaray-2 AGF referans akım ile gerçekleşen filtre akımı arasındaki hata kompanzasyonu bloğu.

1 kV taraftaki, yük referans akımları ile gerçekleşen filtre akımları arasındaki farkın bir kazanç ile çarpılmasıyla hata kompanzasyon akımları elde edilir. Şekil 3.65'de blok şeması görülmektedir.

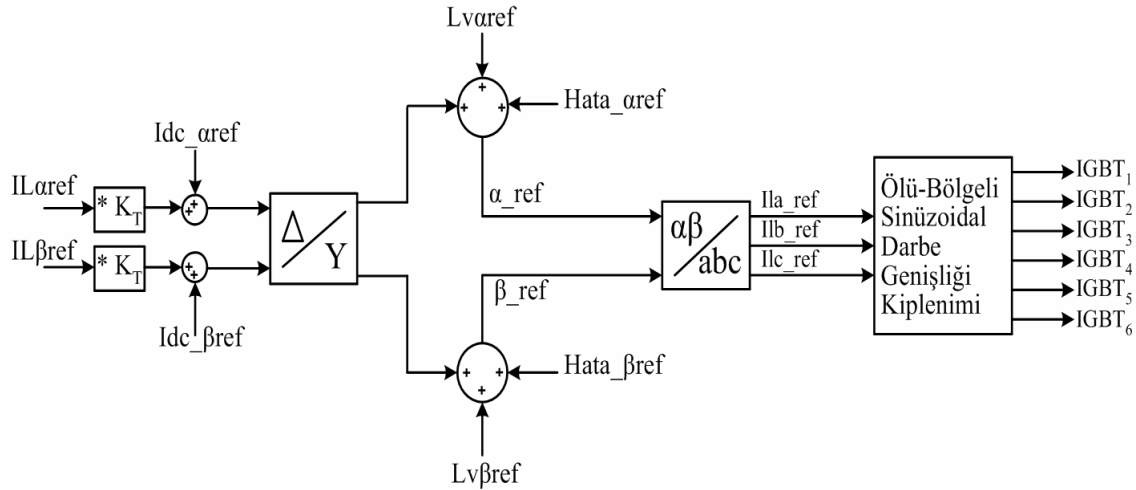
3.5.4.5 DA bağ akımı ve reaktif güç kontrolü



Şekil 3.66 : Bursaray-2 AGF DA-bağ akımı ve reaktif güç kontrolü blok şeması.

- DA bağ akımı, gerçekleşen DA bağ akımı ile referans akım arasındaki farkın “integral ve orantısal kazanç” ile kontrol edilmesiyle belirlenen referans akım seviyesinde tutulur. Şekil 3.66’da blok şeması görülmektedir.
- Reaktif güç kontrolü, Q ifadesine verilen değer ile yapılır.

3.5.4.6 Referansların toplanması ve ateşleme sinyallerinin üretilmesi

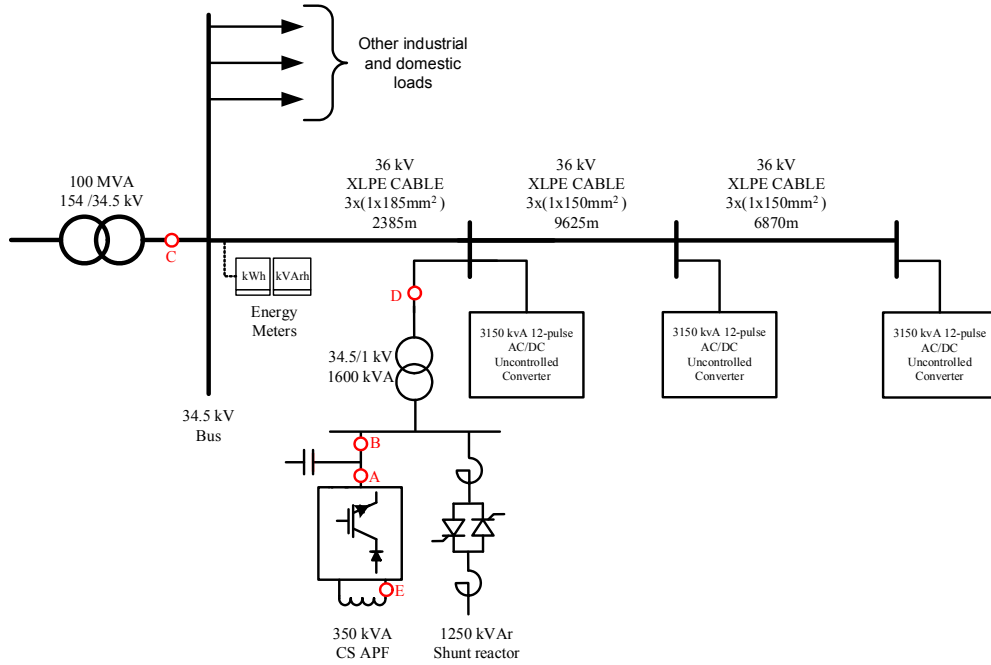


Şekil 3.67 : Bursaray-2 AGF IGBT’ler için ateşleme sinyallerinin üretildiği blok şema.

- 1 kV tarafına aktarılan yük referans akımları, DA bağ akımları, aktif sönümlendirme akımları ve hata kompanzasyon akımları “Durağan Referans Alanı”nda (α - β) toplanılarak abc düzlemine çevrilirler.
- Abc düzlemindeki referans akımları, “Ölü-Bölge Sinüzoidal Darbe Genişliği Kiplenimi” yönteminde 3 kHz üçgen taşıyıcı ile karşılaştırılarak yarı-iletken anahtarların ateşleme sinyallerinin üretilmesi sağlanır. Şekil 3.67’de blok şeması görülmektedir.

3.6 Bursaray-2 Fideri Aktif Güç Filtresi Devreye Alma Sonrası Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bursaray-2 fiderine tesis edilen ve temel görevi 12 darbeli doğrultuculardan kaynaklı baskın akım harmoniklerinin filtrelenmesi olan, 350 kVA kurulu güçteki aktif güç filtresinin sahaya montajının ardından devreye alma çalışmaları yapılmıştır. Devreye alma çalışmalarında öncelikle açık çevrim kipinde sistem denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle önceden tanımlı 11. ve 13. akım harmonik akımlarının şebekeye basılarak, tasarım çalışmalarında öngörülen performansların yakalanıp yakalanamadığı incelenmiştir. Ölçüm sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için sistemin basitleştirilmiş bir tek hat şeması aşağıda verilmektedir. Şekil 3.68’de verilen tek hat şemada, A ile gösterilen ölçüm noktası, çevirici çıkışı, sonuçlarda “Converter” olarak adlandırılmaktadır. B ile gösterilen ise “APF Measurements” başlıklı ölçüm sonuçlarında “Line Current” olarak gösterilmektedir. C noktası (34,5 kV gerilim seviyesinde şebeke akımı) “Supply”, D noktası ise “APF+TCR” olarak adlandırılmaktadır. Ölçüm sonuçlarında gösterilen 34,5 kV yük akımı (“Load”) ise alınan ölçümlerden ‘C-D’ işlemi ile elde edilmiştir.

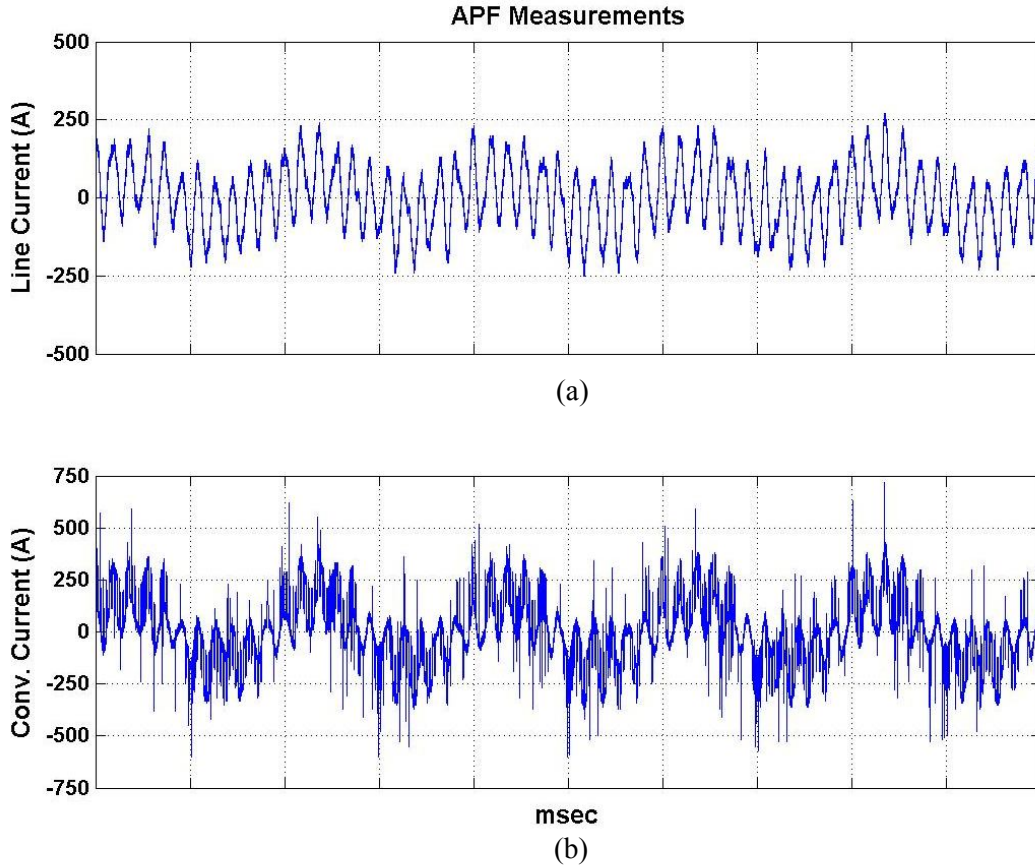


Şekil 3.68 : Bursaray-2 AGF’ne ilişkin basitleştirilmiş tek hat şema.

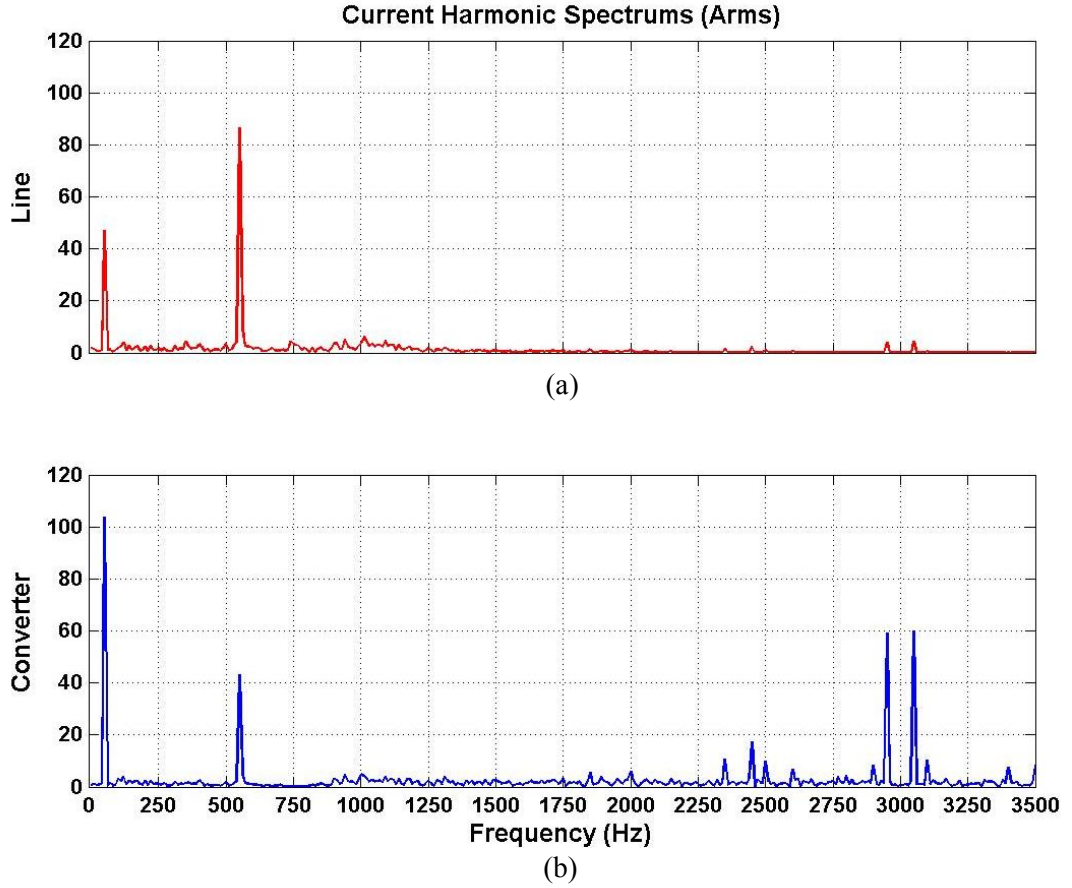
Yukarıda belirtildiği üzere sistemlerin devreye alma çalışmalarında öncelikle aktif güç filtresi, kontrollü bir şekilde ve açık çevrim kipinde çalıştırılmıştır. Bu amaçla ilk

olarak, genliği sabit ve tarafımızca belirlenen 11. akım harmoniğinin aktif filtre tarafından basılması esnasında birtakım gerekli elektriksel büyüklükler kaydedilmiştir. Giriş filtresi tasarımında geliştirilen yaklaşım sayesinde aktif filtre tarafından basılan 11. ve 13. akım harmonikleri giriş filtresinden genliği artarak geçmektedir. Böylece tesis edilen aktif güç filtresinin anma değeri ve kurulu gücü aşağıya çekilmiş olmaktadır.

Sadece 11. akım harmoniği basılırken A ve B noktalarından ölçülen akım dalga şekilleri Şekil 3.69’da verilmektedir. Buradan görüleceği üzere giriş filtresinde, hem anahtarlama frekansında görülen dalgacıklar süzölmekte hem de 11. akım harmoniğinin genliği artırılmaktadır. Şekil 3.69’da verilen dalga şekillerinin harmonik spektrumları ise Şekil 3.70’de gösterilmektedir.

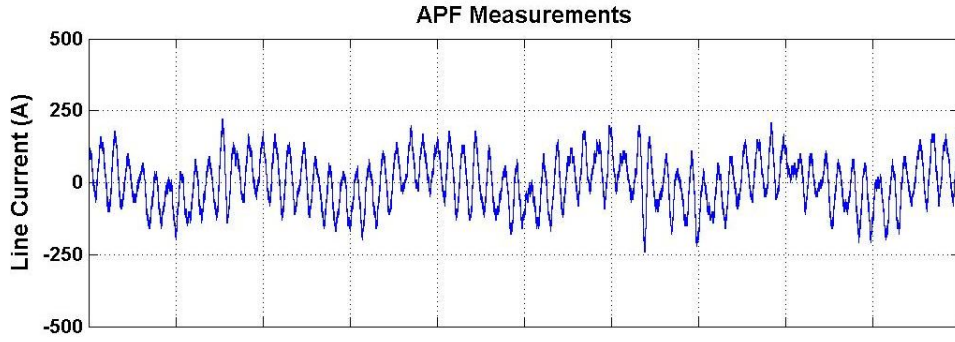


Şekil 3.69 : Sadece 11. harmonik basılırken A ve B noktasından ölçölen akımlar (a) Hat akımının (b) Çevirici akımının zamanla değışimi.

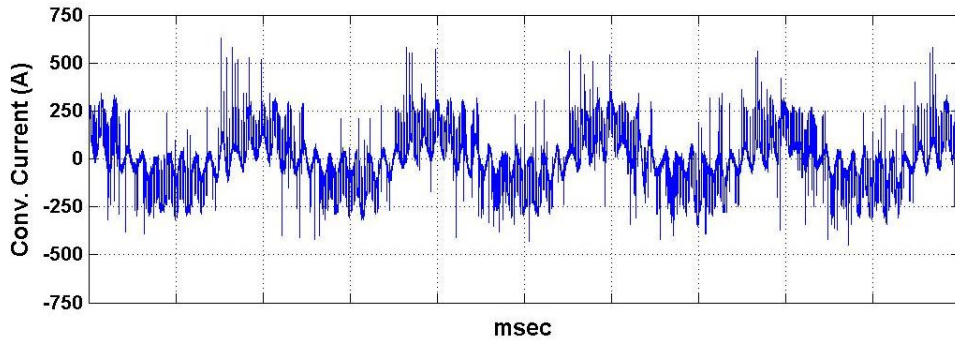


Şekil 3.70 : Sadece 11. harmonik basılırken A ve B noktasından ölçülen akımların frekans spektrumları (a) Hat akımının (b) Çevirici akımının frekans spektrumu.

Yukarıda sözü edilen genlik artışı ve yüksek frekans bileşenlerin süzülmesi Şekil 3.70’de oldukça net bir biçimde görülmektedir. Şekil 3.70 (b)’de “Converter” olarak gösterilen akım üzerinde sadece 50 Hz ve 550 Hz değil, oldukça yüksek genlikte 3.0 kHz bileşen bulunmaktadır. Bu bileşen, DA bağ akımının 3.0 kHz’de anahtarlanmasından kaynaklı meydana gelmektedir. Burada 50 Hz’in oldukça yüksek olması, girişteki filtre kapasitörlerinin şebekeye bastığı kapasitif reaktif gücün kompanze edilmesi için aktif filtre tarafından basılan endüktif reaktif güç bileşeninden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.70 (a)’da gösterilen ve “Line” (hat) akımı olarak adlandırılan akımda ise, görüldüğü üzere, 3.0 kHz civarındaki harmonikler yok olmuş ve beraberinde 550 Hz (11. harmonik) bileşenin genliği yaklaşık 2.05 kat artmıştır. Bu sonuç, performans isterleri ile neredeyse tam anlamıyla örtüşmektedir. Böylece, sadece 11. harmonik basarken, aktif filtrenin akım anma değeri % 50 azaltılabilmektedir. Şekil 3.71 ve Şekil 3.72’de ise sadece 13. harmonik basarken ölçülen akımların dalga şekilleri ve harmonik spektrumları verilmektedir. Bu durumda da 13. akım harmoniği yaklaşık olarak 3.30 kat artmaktadır.

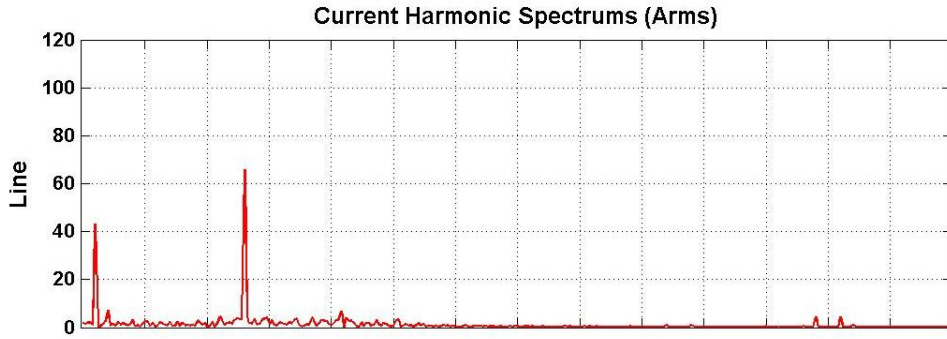


(a)

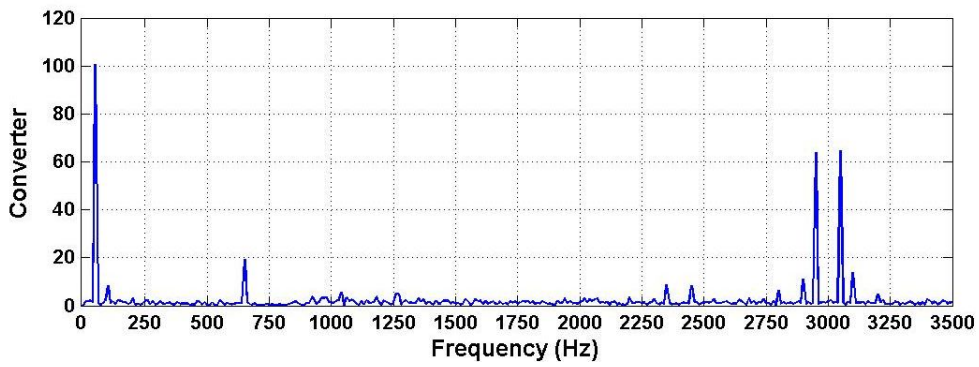


(b)

Şekil 3.71 : Sadece 13. harmonik basılırken A ve B noktasından ölçülen akımlar (a) Hat akımının (b) Çevirici akımının zamanla değişimi.



(a)

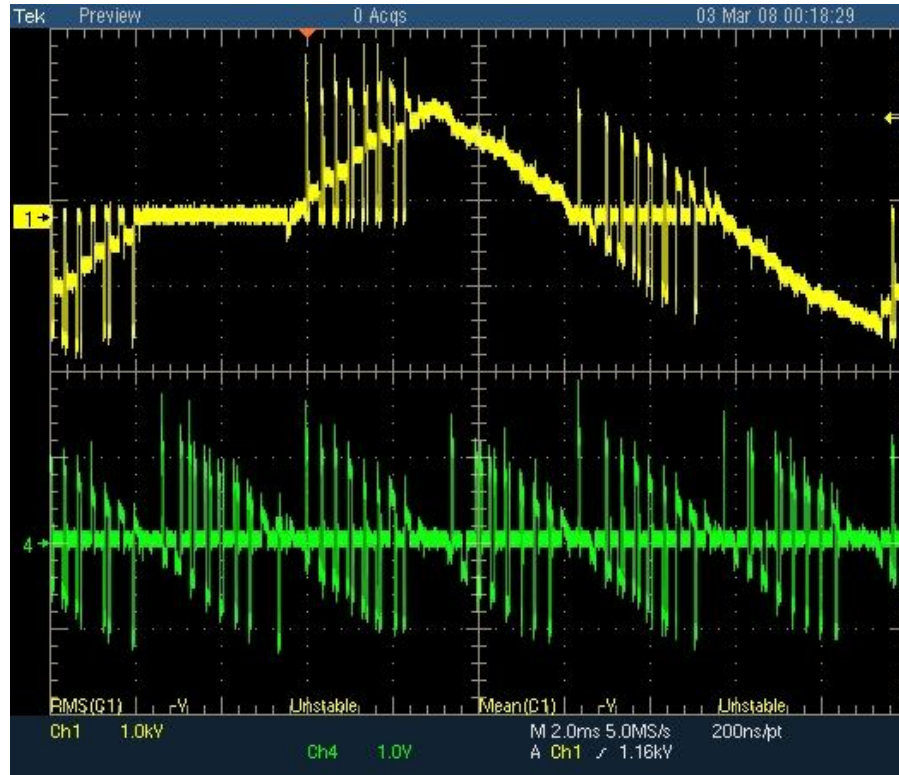


(b)

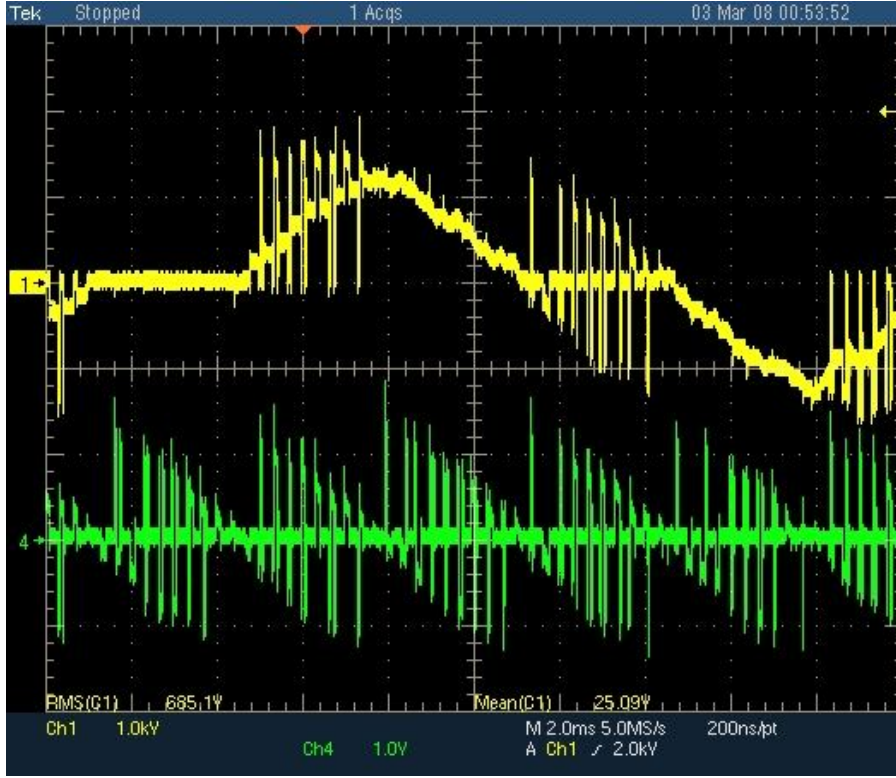
Şekil 3.72 : Sadece 13. harmonik basılırken A ve B noktasından ölçülen akımların frekans spektrumları (a) Hat akımının (b) Çevirici akımının frekans spektrumu.

Uygulamanın tam anlamıyla ve tüm fonksiyonlarıyla devreye alınmasından önce yarı-iletken anahtarların (IGBT ve diyot) üzerindeki gerilimler osiloskop ile ölçülmüş; yarı-iletkenlerin anma değerlerinde ve güvenilir bir biçimde çalıştığı teyit edilmiştir. Şekil 3.73 ve Şekil 3.74’de sadece DA-bağ akımı tutulurken (300A) IGBT-4 ile IGBT-6 üzerindeki ve DA-bağda görülen gerilimler gösterilmektedir. Osiloskobun “single shot” özelliği kullanılarak bu çalışma kipinde herhangi bir IGBT’nin göreceği en yüksek gerilim ölçülmeye çalışılmıştır. Yapılan bu ölçümler sonucunda IGBT’lerin (fiziksel olarak konumlarıyla fark etmesine karşın) en fazla 1980 V-tepe gerilime maruz kaldığı tespit edilmiştir. Kullanılan yarı iletkenlerin anma geriliminin 3300V olması sebebiyle bu çalışma noktasının güvenli olduğu anlaşılmaktadır.

Bu testlerin akabinde aktif güç filtresi kapalı çevrim kipinde çalıştırılmıştır. Bu çalışma kipinde, şebeke akımı (C noktası) ile TCR+APF akımları (D noktası) ölçülmekte ve bu akımlardan elde edilen yük akımından (C-D) aktif güç filtresinin şebekeye enjekte etmesi gereken akım harmoniğinin genliği bulunmaktadır. Yük akımında bulunan 11. ve 13. akım harmonikleri ile aynı genlikte ve 180 derece faz farklı bir akım basılarak şebekedeki akım harmonikleri sıfırlanmaya çalışılmaktadır.

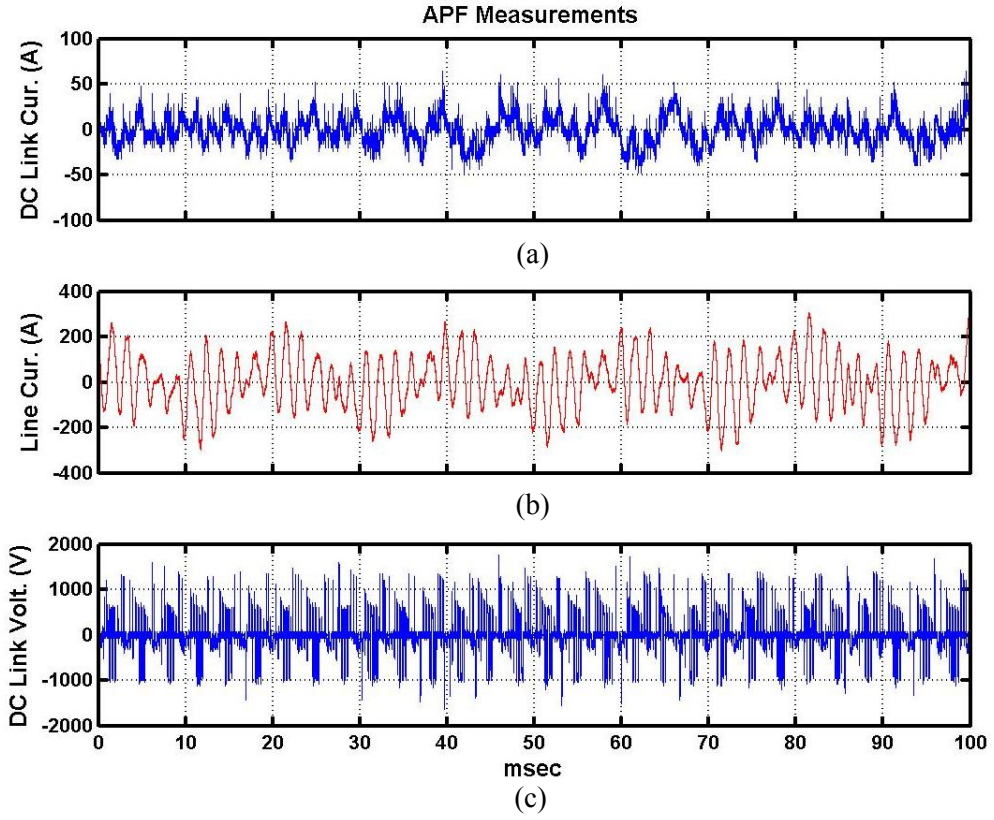


Şekil 3.73 : Sadece DA-bağ akımı tutulurken IGBT-4 ve DA-bağ gerilimi (1.0 kV / div).

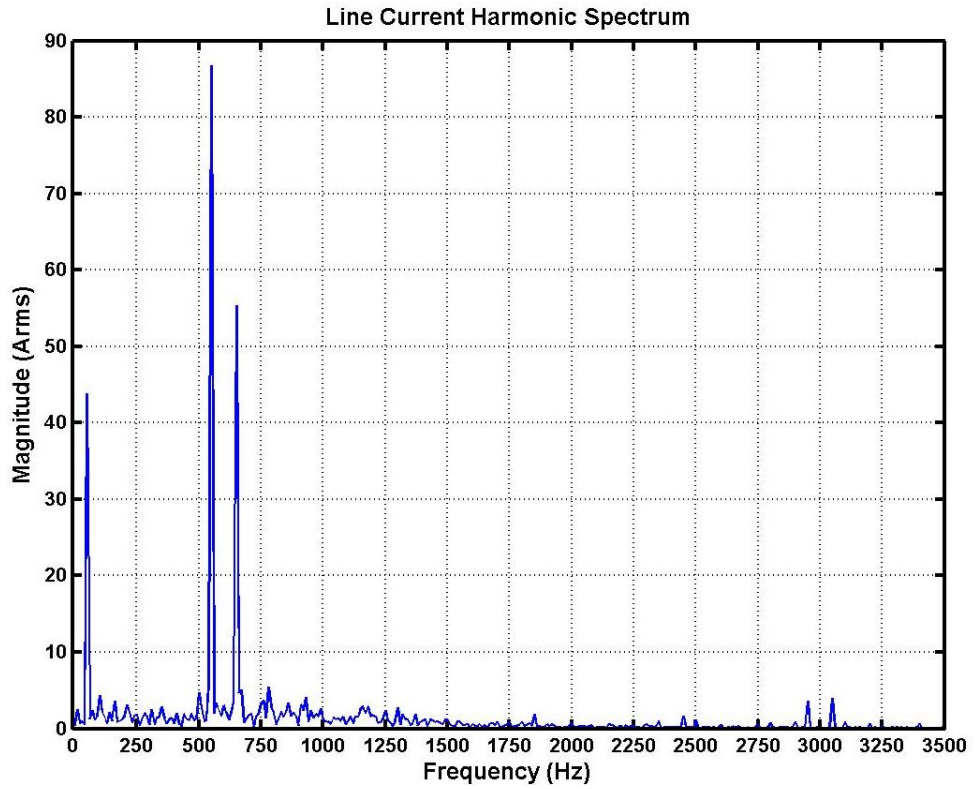


Şekil 3.74 : Sadece DA-bağ akımı tutulurken IGBT-6 ve DA-bağ gerilimi (1.0 kV / div).

Normal işletme sırasında aktif filtrenin girişindeki akım ile DA-bağ akımı ve gerilim dalga şekilleri Şekil 3.75’de gösterilmektedir. Normal işletimde aktif güç filtresi 12 darbeli doğrultuculardan kaynaklı 11. ve 13. akım harmoniklerini şebekeye basmaktadır. Şekil 3.75 (a)’da verilen DA-bağ akımı, kullanılan akım duyargasından kaynaklı olarak sadece DA-bağ akımının üzerindeki AA bileşeni göstermektedir. DA-bağ akımının DA değeri Şekil 3.75 (b)’de görüldüğü gibi 300 A olacak şekilde kontrol edilmektedir. Aktif filtre girişinden ölçülen, normal işletme esnasında, 1.0 kV hat akımının harmonik spektrumu ise Şekil 3.76’da verilmektedir. Bu şekilden görüleceği üzere, aktif güç filtresi şebekeye sadece 50 Hz ana bileşen ile birlikte 11. ve 13. akım harmoniklerini basmaktadır. 50 Hz bileşenin bir kısmı aktif filtredeki güç kayıplarından gelmekle birlikte baskın olarak şebekeye basılan endüktif reaktif güçten kaynaklanmaktadır. Bu güç bileşeni yeraltı kablolarının kompanzasyonu için mevcut tristör tabanlı kompanzasyon sistemine takviye olması istemiyle şebekeye basılmaktadır.



Şekil 3.75 : Normal işletme sırasında B ve E noktasından yapılan ölçümler (a) DA-bağ akımının AA bileşeninin (b) Hat akımının (c) DA-bağ geriliminin zamanla değişimi.



Şekil 3.76 : Normal işletme sırasında B noktasından ölçülen hat akımının harmonik spektrumu.

Çizelge 3.3 : Aktif filtre devrede ve devre dışı iken şebeke akımı 11. ve 13. harmonik yüzde değerleri.

Harmonik Sırası	“DEVREDE” iken (%)	“DEVRE DIŞI” iken (%)	Sınır Değer (%)
11	3.67	16.70	5.50
13	3.99	13.30	5.50

Sistem tam olarak devreye alındıktan sonra şebeke ve TCR+Aktif filtre akımları 5 saatlik bir zaman diliminde Mobil Güç Kalitesi Monitörleri kullanılarak kaydedilmiştir. Bu kaydın sonuçları Şekil 3.77 ve Şekil 3.78’de verilmektedir. Bu şekillerden görüleceği üzere aktif güç filtresinin devrede olduğu zaman diliminde (05:30-10:00) yükün şebekeye bastığı (yeşil ile gösterilen) 11. ve 13. akım harmonikleri büyük oranda filtrelenerek standartlarda verilen sınır değerlerin altında kalması sağlanmıştır.

Aktif filtrenin devreden çıkması ile birlikte şebeke akımındaki (kırmızı ile gösterilen) 11. ve 13. akım harmonikleri sınır değerlerin üzerine çıkmaktadır. Çizelge 3.3’te aktif filtre devrede ve devre dışı iken şebekede görülen 11. ve 13. akım harmoniklerinin oransal değerleri ile standartlarda verilen sınır değerler gösterilmektedir.

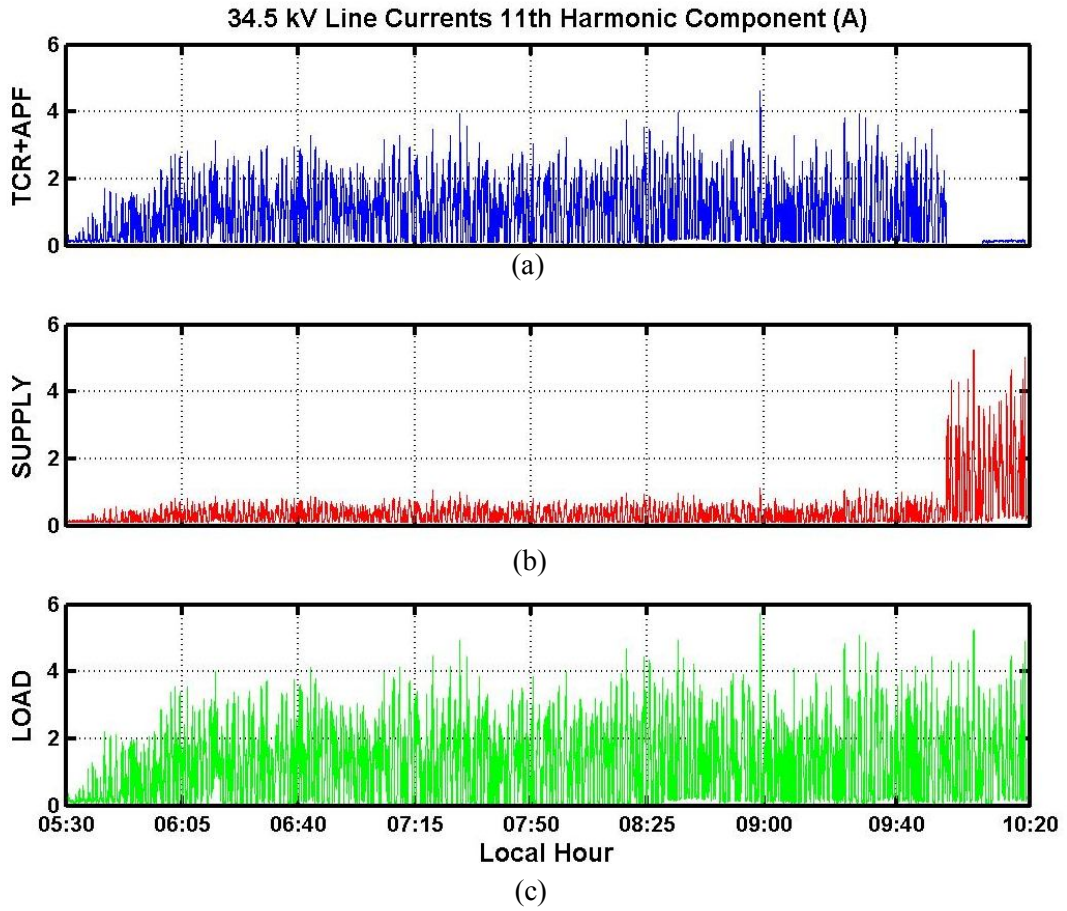
Şekil 3.79’da ise bir IGBT üzerinden 40 ms boyunca ölçülen akım ve gerilim dalga şekli gösterilmektedir. Bu dalga şekli yardımı ile IGBT’nin iletim ve anahtarlama kayıpları hesaplanabilmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda en kötü koşullar için iletim ve anahtarlama kayıplarının toplamının 8 kW civarında olduğu ortaya çıkmaktadır.

Bu değer sistemin tasarım çalışmalarında hesaplanan değerlere oldukça yakındır. Ancak bu hesaplamalarda IGBT’nin özgün test koşullarında verilen kayıplarından faydalanılarak ve enterpolasyon yöntemi kullanılarak belirli bir akım-gerilim değerinde kayıplar bulunmaktadır. Bu sebeple, gerçekleşen kayıpların hesaplananlardan daha düşük olması beklenmektedir. Bu kabulün geçerli olduğunu ise Şekil 3.80’de verilen dalga şekillerinden görmek mümkündür.

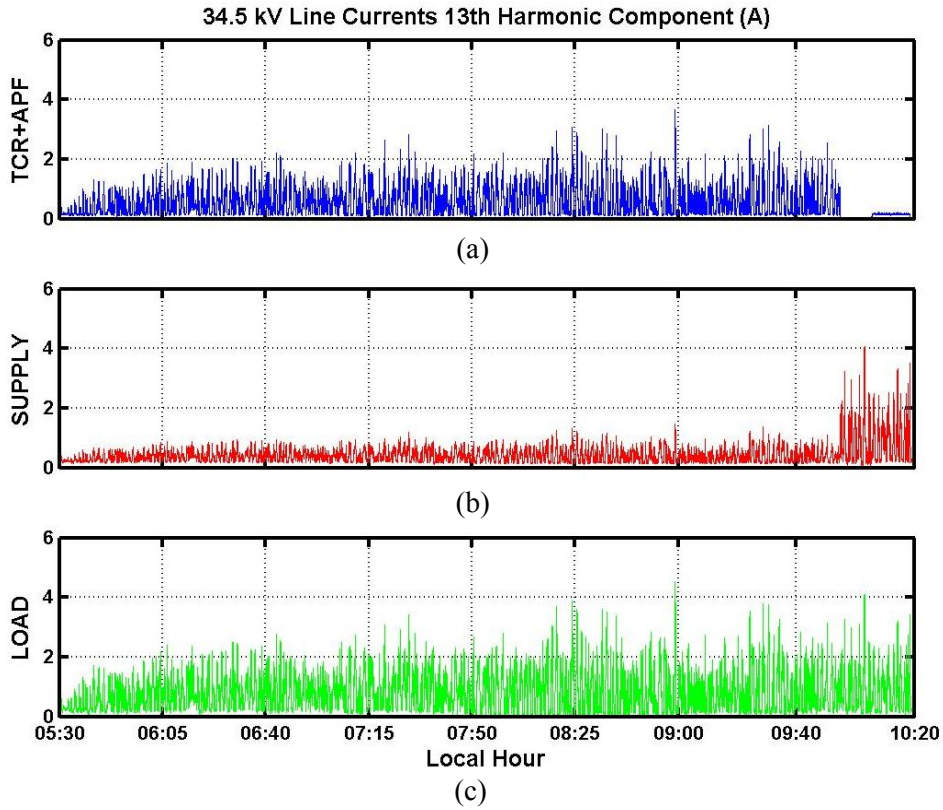
Aktif filtrenin girişinden yapılan ölçüm sonucunda normal işletme sırasında “aktif güç” kayıplarının 8-9 kW civarında olduğu görülmektedir. Bu kaybın yaklaşık 1.0 kW’lık kısmı DA-bağ reaktöründen kaynaklanmaktadır. Aynı zaman diliminde ölçülen

reaktif güç ise sabit ve bizim şebekeye basmak istediğimiz 75-80 kVAr değeri civarındadır (Şekil 3.81).

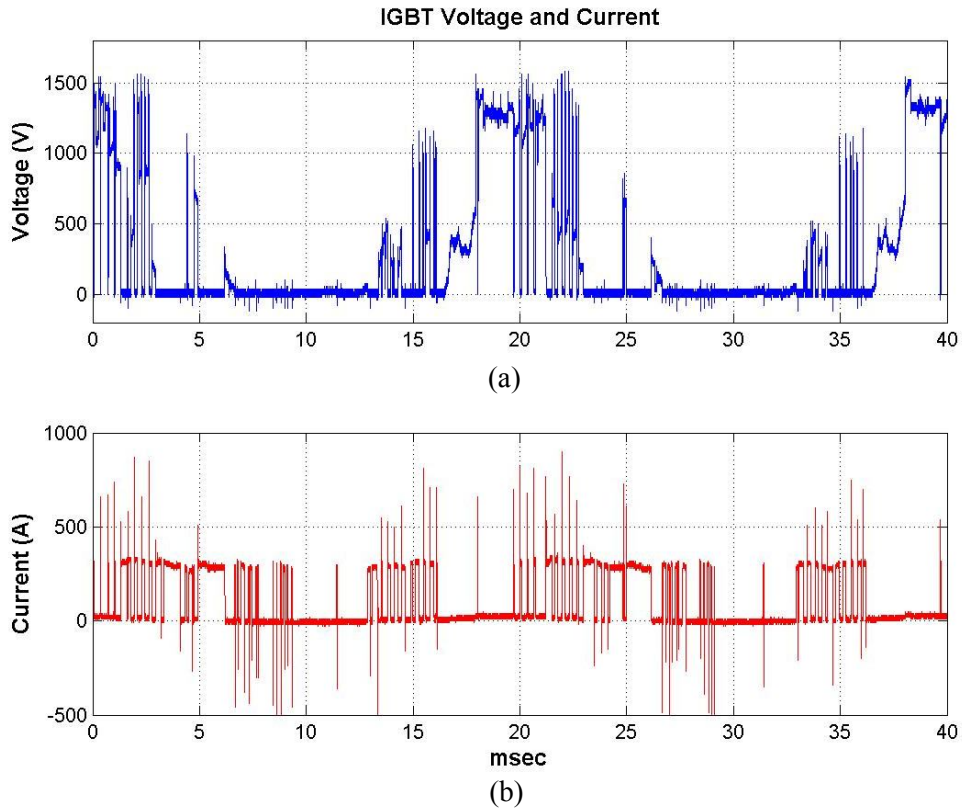
Şekil 3.82’de ise normal işletme esnasında aktif filtre izleme ekranının bir görünümü verilmektedir. Ekranda DA-bağ akımı ve aktif filtre giriş akımları ile 1.0 kV gerilimi saniyede bir örneklenerek gösterilmektedir.



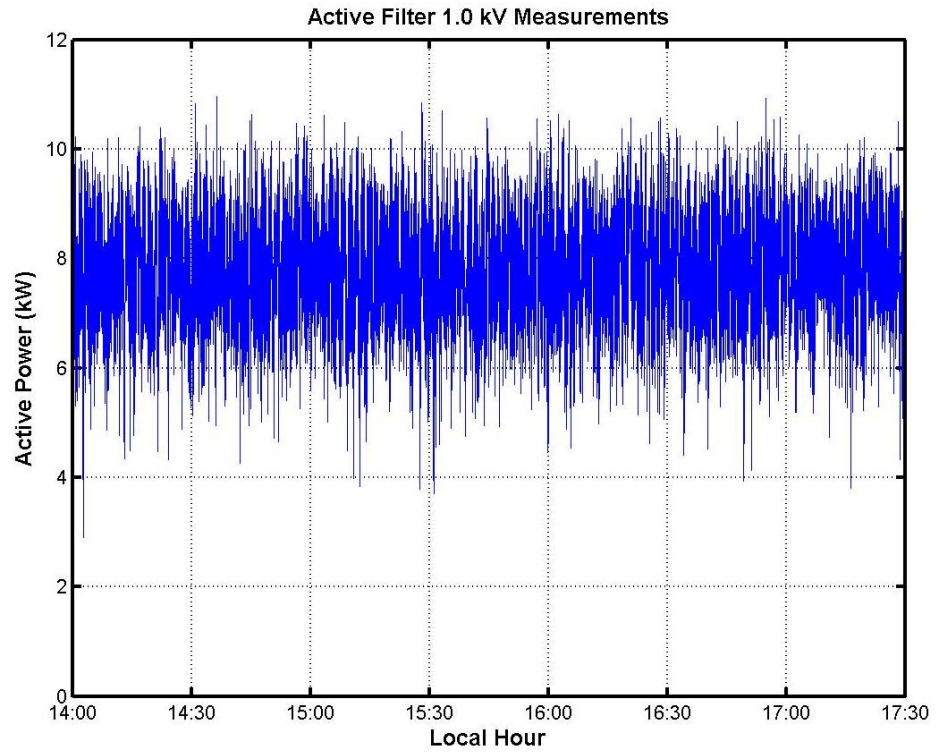
Şekil 3.77 : Normal işletme sırasında C ve D noktalarından ölçülen akımların 11. harmonik dalga şekilleri (a) TCR+APF akımı 11.harmonik dalga şekli (b) Şebeke akımı 11. harmonik dalga şekli (c) Doğrusal olmayan yük akımı 11.harmonik dalga şekli.



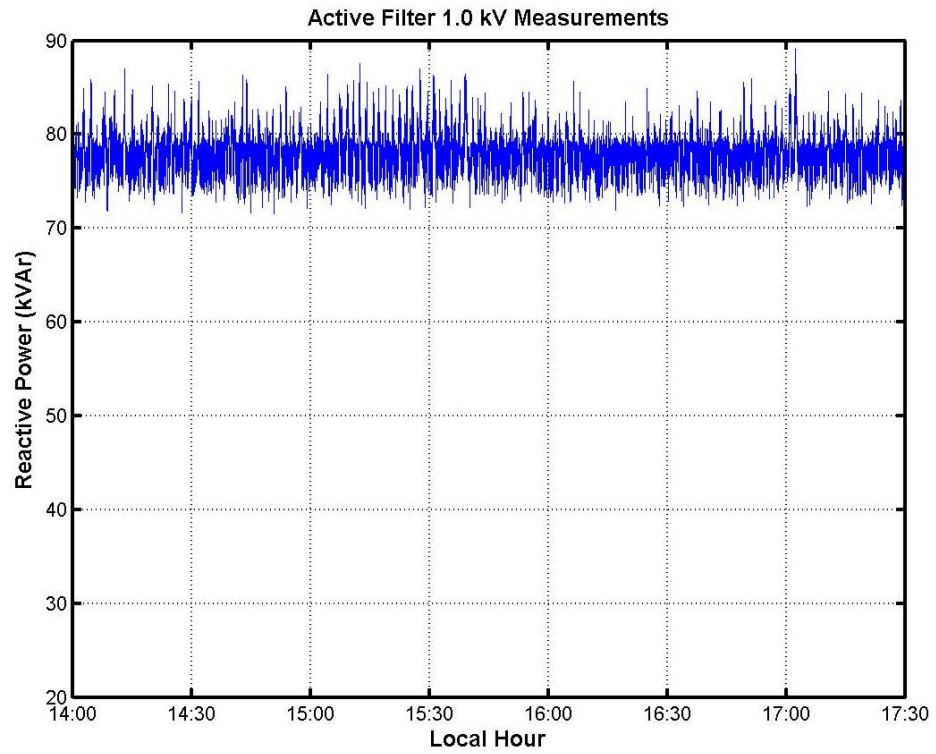
Şekil 3.78 : Normal işletme sırasında C ve D noktalarından ölçülen akımların 13. harmonik dalga şekilleri (a) TCR+APF akımı (b) Şebeke akımı (c) Doğrusal olmayan yük akımı 13.harmonik dalga şekli.



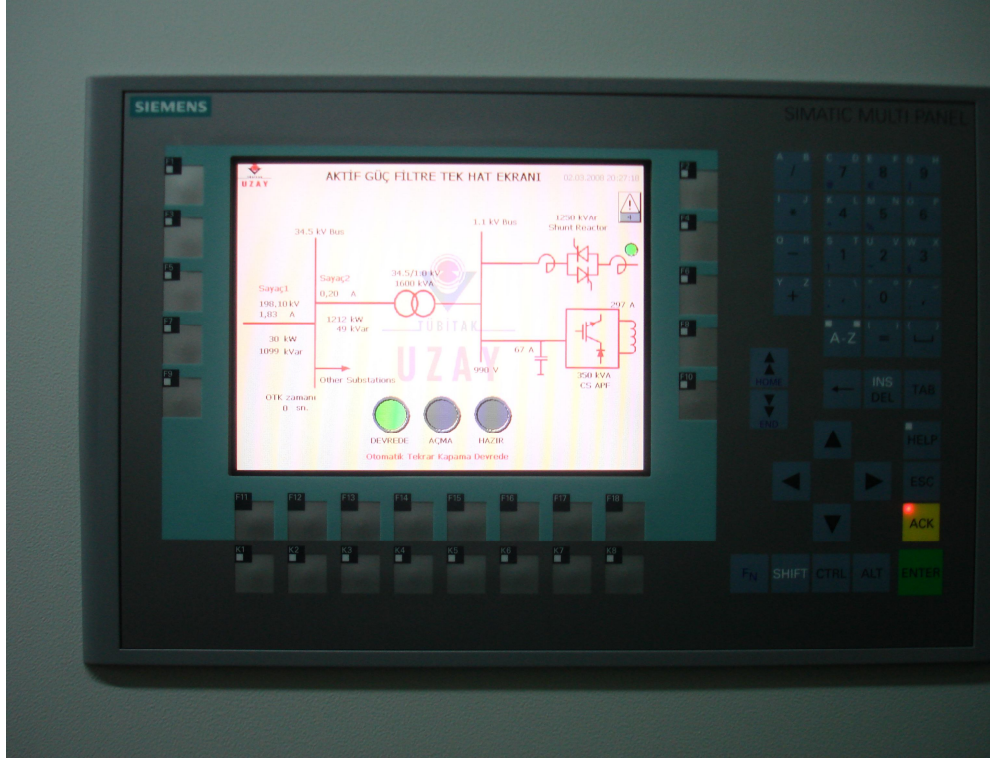
Şekil 3.79 : IGBT üzerinden ölçülen (a) gerilim ve (b) akım dalga şekilleri.



Şekil 3.80 : Normal işletme sırasında B noktasından ölçülen aktif güç değişimi.



Şekil 3.81 : Normal işletme sırasında B noktasından ölçülen reaktif güç değişimi.



Şekil 3.82 : Normal işletme sırasında aktif filtre izleme ekranı.

Şekil 3.82’de normal işletme esnasında aktif filtre izleme monitörüne ait bir ekran görüntüsü görülmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, hafif raylı toplu taşıma sistemlerinin ve özel olarak Bursa Hafif Raylı Toplu Taşıma Sistemi'nin (Bursaray)'ın OG ringinde mevcut Bursaray-1 ve Bursaray-2 besleme kollarında enerji kalitesine etki eden temel güç problemleri irdelenmiştir.

Hafif raylı sistemlerde kullanılan trenler doğru gerilime gereksinim duyarlar. Bu doğru gerilim genelde 2-3 km aralıklarla tesis edilen cer trafo istasyonları tarafından sağlanır. Cer trafo istasyonları arasında OG yeraltı kabloları ile elektrik enerjisi taşınır. Her bir cer trafo istasyonunda 12 darbeli doğrultucu bulunur.

Bursaray-1 ve Bursaray-2 besleme kollarında yapılan ölçümler sonucunda hafif raylı sistemler için söz ettiğimiz temel karakteristiklere ait problemler saptanmıştır. Her iki koldada mevcut uzun OG yeraltı kabloları, kendi kaçak kapasitanslarından dolayı baskın kapasitif reaktif yük gibi davranmaktadır. TEİAŞ tarafındaki ana baralarda yapılan ölçümlerde her iki koldan geçen akımların baskın 11. ve 13. harmonik bileşenleri içerdiği görülmüştür. Akımların 23.ve 25. harmonik bileşenlerinin de sınır değerleri aştığı görülmüş, bunlar için, ölçüm yapılan akım trafolarının yüksek frekanslardaki çalışma karakteristiği bilinmediğinden ve ölçüm cihazlarının çalışma sınırlarından dolayı doğru ölçümleri yansıtmadığı yorumu yapılmıştır.

Bursaray'ın iki numaralı besleme kolu için 1250 kVAr'lık reaktif güç kompanzasyon sistemi (RGK) kurulmuştur. Reaktörleri anahtarlamak için tristör kontrollü anahtarlama yöntemi (TAŞR) seçilmiştir. Bu kolun mevcut baskın 11. ve 13. akım harmoniklerini filtrelemek için akım kaynaklı aktif güç filtresi (AKAGF), TAŞR'nin bağlı olduğu baraya tesis edilmiştir. Bursaray'ın bir numaralı besleme kolunun kapasitif reaktif güç problemi için 550 kVAr'lık, sönümlendirme devresi içeren tek kademeli şönt reaktör, atölyede mevcut 2 MVA'lık servis trafosunun 0,4 kV barasına bağlanmıştır.

RGK sistemleri öncesinde Bursaray'ın faturalandırmaya esas 2 adet sayacında büyük oranda kapasitif reaktif enerjiden ceza ödenirken, sonrasında kapasitif enerji/aktif enerji oranları yönetmeliklerde belirtilen sınırların altına çekilmiştir.

AKAGF sistemi öncesinde Bursaray'ın 2 numaralı besleme kolunda sınır değerleri sağlamayan 11. ve 13. akım harmonikleri, AKAGF'nin devreye girmesiyle filtrelenmiş ve sınır değerleri sağlar duruma gelmiştir.

Bu alışma sonucunda elde edilen veriler ışığı altında hafif raylı toplu taşıma sistemleri daha proje aşamasında iken problemlerin varlığı göz önünde bulundurulup, finansal kaynaklar ve projeler planlanabilir. Var olan benzer işletmeci firmaların elektrik faturalarındaki olan ve/veya olabilecek ceza yükünün önüne geçilebilir. Endüstride bir veya birkaç harmoniği ele alan seçilmiş harmonik filtreleme çalışmalarında AKAGF sistemleri uygulanabilir ve geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Singh, B., Al-Haddad, K., Chandra, A.**, 1999: A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5.
- [2] **IEEE Standards 1159**, 1995: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, *IEEE*.
- [3] **T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu**, 2006: Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, *Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik*, 12.09.2006.
- [4] **T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu**, 2004: *Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği*, 10.11.2004.
- [5] **IEEE Standards 519**, 1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE*.
- [6] **TEK**, 1993: Bozucu Etki Yaratan Müşterilerin Uymak Zorunda Olduğu Koşullar.
- [7] **Resmi Gazete**, 2000: Elektrik Projelerinin Hazırlanması ve Elektrik Tesislerinin Gerçekleştirilmesi Sürecinde Güç Faktörünün İyileştirilmesi ile İlgili Tebliğ’de Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Resmi Gazete*, 17.02.2000, Perşembe, Sayı: 23967 (Asıl).
- [8] **IEC 61642**, 1997: Industrial AC Networks Affected by Harmonics, *Application of Filters and Shunt Capacitors*.
- [9] **IEEE Standards 519**, 1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE*.
- [10] **IEEE Standards 141**, 1993: IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Redbook), *IEEE*.
- [11] **IEC 289**, 1998. Reactors, *Second Edition*
- [12] **IEC 61000-2-4**, EMC-Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances, *Second Edition*
- [13] **IEC 38**, 1983: Standard Voltages, *Sixth Edition*.
- [14] **IEC 61000-4-30**: Testing and Measurement Techniques, *Power Quality Measurement Methods*.
- [15] **IEC 61000-4-7**: Testing and Measurement Techniques, *General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto*.
- [16] **Acik ve diğ.**, 2004: A Fully Static Solution to Power Quality Problem of Light Rail Transportation System in Bursa, Turkey, *ACEMP’04 Conference Proc.*, 26-28 Mayıs 2004 , İstanbul, pp. 446-452.

- [17] **Terciyanli ve diğ.**, 2007: Thyristor Switched Reactor – Active Power Filter Combination for Power Quality Solution of a Light Rail Transportation System, *PCIM*, 21-24 Mayıs 2007, Nürnberg, Germany.
- [18] **Avcı, T.**, 2008: Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresi İçin Çeşitli Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- [19] **Das, J. C.**, 2004: Passive Filters Potentialities and Limitations, *IEEE Trans. on Indst. Appl.*, Vol:40, No:1, pp. 232-241.
- [20] **Akagi**, 2007: *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, 2007, John Wiley & Sons, IEEE press.
- [21] **Terciyanli ve diğ.**, 2008: Bursa Hafif Raylı Taşıma Sistemi İçin Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresi Uygulaması, *Eleco'08 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Müh. Sempozyumu*, Bursa, 26-30 Kasım 2008, pp. 316-320.
- [22] **Terciyanli ve diğ.**, Submitted, A Selective Harmonic Amplification Method for Reduction of kVA Rating of Current Source Converters in Shunt Active Power Filters, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Underreview.

EKLER

- EK A.1 :** Bursaray-1 fideri uygulaması
- EK A.2 :** Bursaray-2 fideri uygulaması
- EK A.3 :** Grafik çizimler için MATLAB kodları
- EK A.4 :** Bursaray OG ring hattı tek hat şeması
- EK A.5 :** Bursaray-1 RGK tek hat şeması
- EK A.6 :** Bursaray-2 RGK+Aktif Filtre tek hat şeması

EK A.1

BURSARAY-1 FİDERİ UYGULAMASI



Şekil A.1 : Bursaray-1 fiderine tesis edilen tek kademe şönt reaktörlü RGK.

EK A.2

BURSARAY-2 FİDERİ UYGULAMASI



Şekil A.2 : Bursaray-2 fiderine tesis edilen TAŞR+AKAGF sistemi.

EK A.3

MATLAB KODLARI

A. Labview tarafından kaydedilen ham (binary formatındaki) dosyayı açan ve hesap kodunu çağıran kod:

```
clear;

k=[8290 8290 15 15 8290 15 0 0];

% okunan kanalların akım ve gerilim trafo oranları burada giriliyor.
Ornek:
% 75/5 A akım trafosu için 15 yazmışız.

k=diag(k);
counter=0;

for index=0:120
    fclose('all');
    if fopen(int2str(index),'r','b') ~= -1
        cal
        % aşağıda B bölümünde verilen kod "cal.m" olarak kaydediliyor.
        Bu kod
        % kaydedilen dosyayı açıyor ve hesap için diğer kodu
        çağırıyor.
        index
        fclose('all');
        % dosyanın ismi bittikten sonra da geri kapatıyor.
    end
end
```

B. Labview tarafından kaydedilen ham (binary formatındaki) dosyayı okuyan ve gerekli hesaplamalar bittikten sonra değişkenleri kaydeden kod:

```
counter=counter+1;

if mod(counter,60)==1

    if floor(counter/60)~=0

        save
        ([int2str(floor(counter/60))], 'vfft', 'ifft_b1', 'q_b1', 'p_b1');

        % bu kod her çağırıldığında bir dakikalık bir dosyayı okuyor.
        % 60 dakikada boyunca hesaplanan akım-gerilim harmonikleri ile
        % aktif reaktif gücü bir dosyaya kaydediyor.

    end

end

a=fread(3,[8 inf],'int16');
a=k*a/3276.8;
```

```

% dosyayi okuyor. 8 kanal. Binary'den integer'a cevirmek icin
% 3276.8'e boluyor.

val=a(1,:)-mean(a(1,:));
vbl=a(2,:)-mean(a(2,:));
ial=a(3,:)-mean(a(3,:));
ibl=a(4,:)-mean(a(4,:));
vcl=a(5,:)-mean(a(5,:));
icl=a(6,:)-mean(a(6,:));

% Kanallara isim atiyor, ve AC signal oldugu icin DC bileşenlerini
atıyor.

clear a;

% Buradan sonra hesaplamalara basliyor.

vab=val-vbl;
vcb=vcl-vbl;

pl_b1=vab.*ial+vcb.*icl;
ql_b1=sqrt(3)*vab.*icl/2-sqrt(3)*vcb.*ial/2;

iarmsl_b1=zeros(1,60);
vafft1=zeros(60,32);
iafft1_b1=zeros(60,32);

% her dosya bir dakika. asagida oldugu gibi aktif-reaktif gucu
saniyede bir
% hesapliyor. Bu sebeple dongunun biri 60 kere donuyor. Harmonik ve
rms'leri
% ise her cycle'da bir yapiyor. Bu sebeple her saniyenin icinde 50
kezde bunun
% icin dongu var.

for j=0:59

    for i=0:49

        irrms_b1=sqrt(mean(ibl(1+i*128+j*6400:128+i*128+j*6400).^2));
        iarmsl_b1(j+1)= irrms_b1/50 + iarmsl_b1(j+1);

        vafft=abs(fft(vab(1+i*128+j*6400:128+i*128+j*6400))/64);
        iafft_b1=abs(fft(ial(1+i*128+j*6400:128+i*128+j*6400))/64);

        vafft1(j+1,:)=vafft(1,1:32)/50/sqrt(2)+vafft1(j+1,:);
        iafft1_b1(j+1,:)=iafft_b1(1,1:32)/50/sqrt(2)+
        iafft1_b1(j+1,:);

    end

% saniyede 6400 ornek aliyor. Bu ayarlanabilen birsey. Genelde 3200
% aliyoruz.

```

```

% harmonikleri 32. Harmonige kadar hesapliyoruz. Ancak saniyede 6400
ornek ile
% 64. Harmonige kadar da hesap yapılabilir.

    p11_b1(j+1)=mean(p1_b1(1+j*6400:6400+j*6400));
    q11_b1(j+1)=mean(q1_b1(1+j*6400:6400+j*6400));

end

% asagidaki kisimda ise saniyelik hesaplanan bir dakikalik verilerin
60 tanesi
% ekleniyor. Boylece hesaplanan veriler saatlik olarak bir dosyaya
% kaydediliyor.

if mod(counter,60)==1

    q_b1=q11_b1;
    p_b1=p11_b1;
    vfft=vafft1';
    ifft_b1=iafft1_b1';
    irms_b1=iarms1_b1;

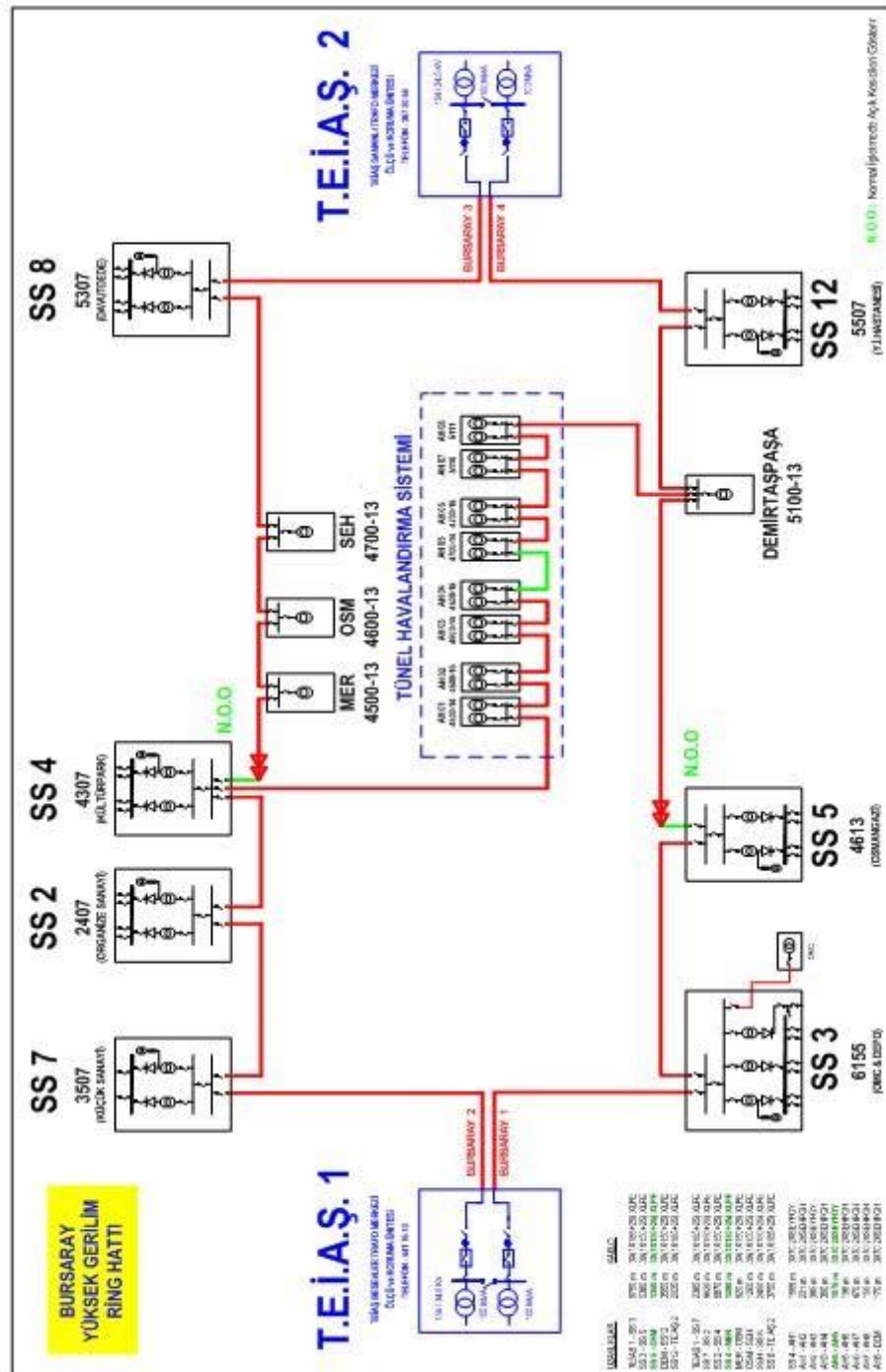
else
    syze=size(p_b1);

    q_b1(1,syze(2)+1:syze(2)+60)=q11_b1;
    p_b1(1,syze(2)+1:syze(2)+60)=p11_b1;
    vfft(:,syze(2)+1:syze(2)+60)=vafft1';
    ifft_b1(:,syze(2)+1:syze(2)+60)=iafft1_b1';
    irms_b1(1,syze(2)+1:syze(2)+60)=iarms1_b1;

end

```

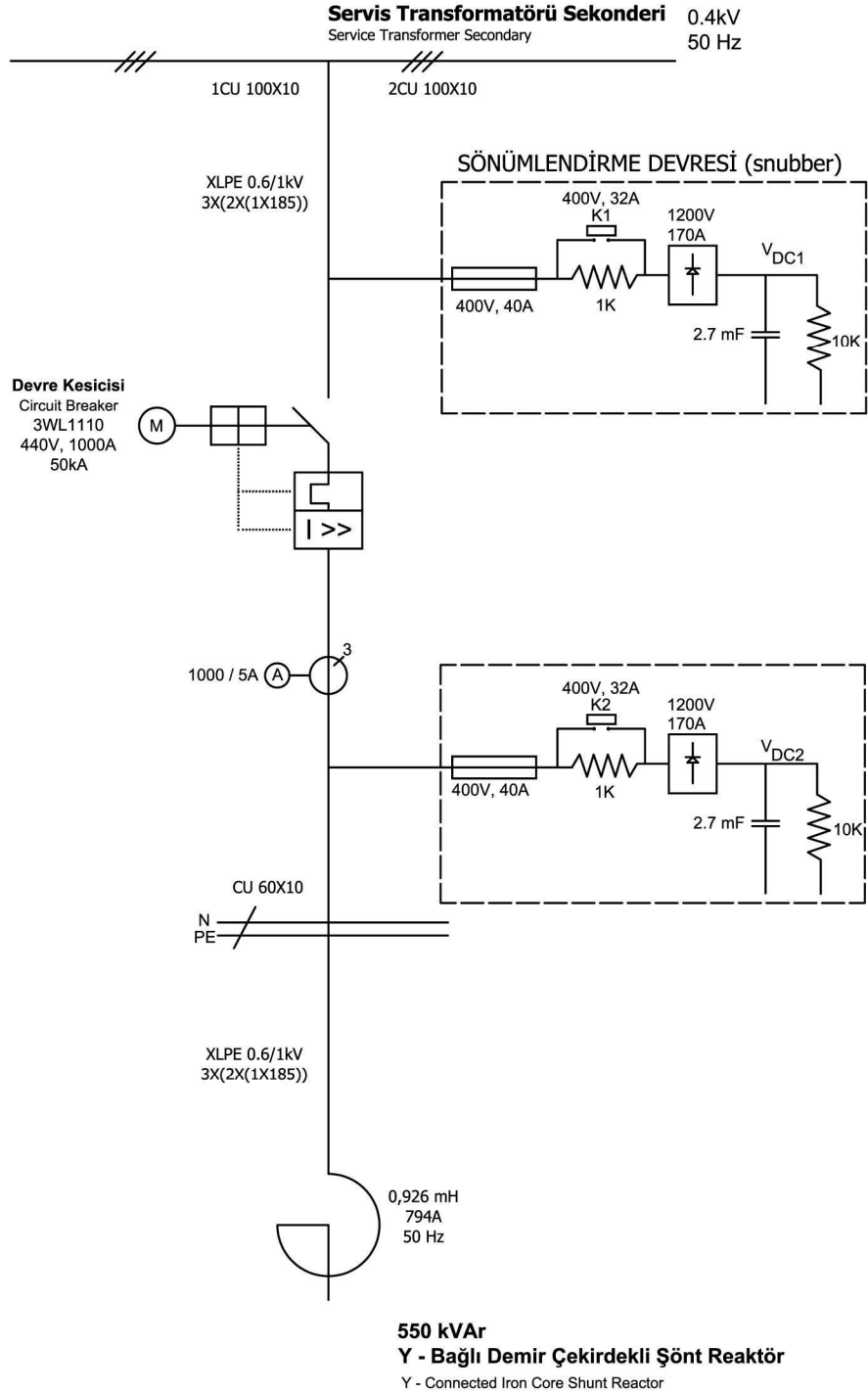
BURSARAY OG RİNG HATTI TEK HAT ŞEMASI



Şekil A.3 : Bursaray OG ring hattı.

EK A.5

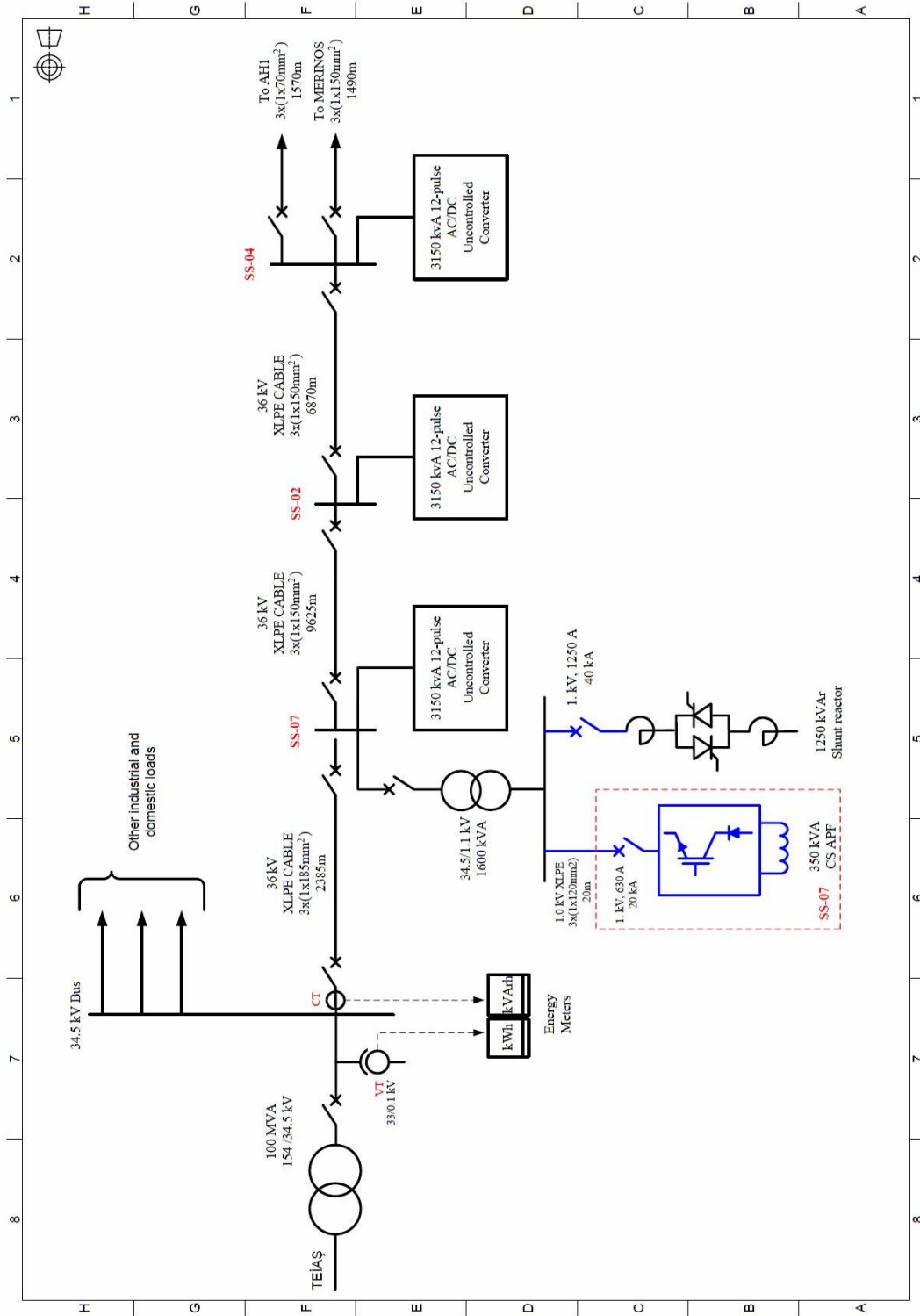
BURSARAY-1 RGK TEK HAT ŞEMASI



Şekil A.4 : Bursaray-1 fiderine tesis edilen tek kademeli şönt reaktörün tek hat şeması.

EK A.6

BURSARAY-2 RGK+AKTİF FİLTRE TEK HAT ŞEMASI



Şekil A.5 : Bursaray-2 fiderine tesis edilen TAŞR+AKAGF sistemi tek hat şeması.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: İbrahim ÖZKAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Bursa, 09/04/1972

Adres: Musababa Mah. Isıl-Aydın Sitesi B Blok Kat 5 D: 9 Yıldırım/BURSA

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- Terciyanlı, A., Uçak, O., Kılınç, T., Çınar, R., Özkan, İ., 2008: Bursa Hafif Raylı Taşıma Sistemi İçin Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresi Uygulaması. *ELECO 2008 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 26-30 Kasım 2008, pp. 316-320.*