

# BURSA HAFİF RAYLI TAŞIMA SİSTEMİ İÇİN AKIM KAYNAKLI AKTİF GÜÇ FİLTRESİ UYGULAMASI

A.Terciyanlı\*, O.Uçak\*, T.Kılınc\*, R.Çınar°, İ.Özkan°

\*TÜBİTAK-UZAY ODTÜ/ANKARA, °BURULAŞ, Nilüfer/BURSA

[alper.terciyanli@uzay.tubitak.gov.tr](mailto:alper.terciyanli@uzay.tubitak.gov.tr)

## Öz

*Bu makalede, Bursa Hafif Raylı Taşıma Sistemi'nin (BURSARAY) Orta Gerilim (OG) yer altı besleme kablolarının kapasitif reaktif güç ihtiyacının karşılanması ile 12 darbeli cer doğrultucularının yaratmış olduğu baskın 11. ve 13. akım harmoniklerinin filtrelenmesi amacıyla Tristör Anahtarlamalı Şönt Reaktör (TAR) ve akım kaynaklı Aktif Güç Filtresi'ne (AGF) dayalı sistemin tasarım, benzetim ve uygulama çalışmaları sunulmaktadır. Sistemlerin devreye alınmasıyla gerek aylık bazda reaktif enerji tüketimlerinin gerekse akım harmoniklerinin yönetmeliklerde ve IEEE Std.519 standardında verilen sınır değerleri karşılaması sağlanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Aktif güç filtresi, akım kaynaklı evirgeç, doğrultucu, akım harmoniği

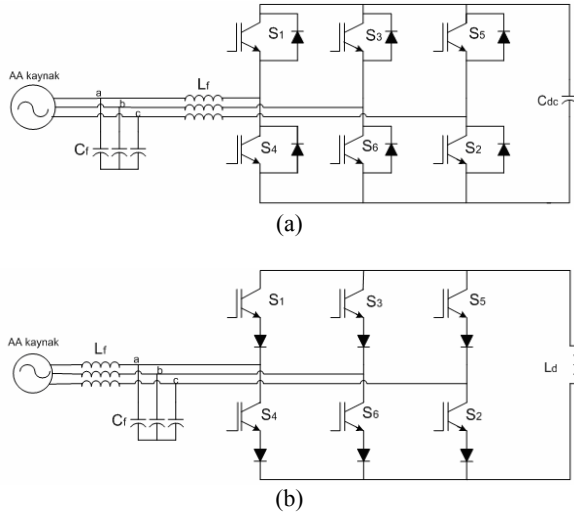
## I. Giriş

Son yıllarda yarı-iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak doğrusal olmayan yüklerin kullanımında yaşanan artış, birtakım problemleri de beraberinde getirmiştir. 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.

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 2007 yılının Ocak ayı itibarıyla bütün Alçak Gerilim (AG) ve OG kullanıcıların aylık bazda endüktif ve kapasitif reaktif enerji tüketimlerinin aktif enerji tüketimlerine oranı sırasıyla % 20 ve % 15 olacak şekilde sınırlandırılmıştır [1]. 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 [2]. Ancak hem AG hem de OG müşterilerin 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 akışının hem de akım harmoniklerinin denetim altında tutulması mümkün olmamaktadır. Özellikle Ortak Bağlantı Noktasında (OBN) birden fazla bozucu etki yaratan kullanıcının olması ya da reaktif güç ihtiyacının görece az ancak şebekeye basılan akım harmoniklerinin fazla olması gibi koşullarda, uygulanagelen 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 imkanı 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 veya gerilim kaynaklı; sisteme bağlantı şekline göre ise seri ya da paralel aktif güç filtreleri olarak adlandırılmaktadır [3,4]. Şekil 1'de paralel bağlı akım ve gerilim kaynaklı aktif güç filtrelerinin prensip devre yapıları gösterilmektedir. Gerilim kaynaklı aktif güç filtresinde evirgecin şebekeye karşı basmaya çalıştığı akım, DA bağda oluşturulan bir gerilim kaynağı (kapasitör) üzerinden; akım kaynaklı aktif güç filtresinde ise bir akım kaynağı (reaktör) üzerinden oluşturulmaktadır. 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 çalışmada, BURSARAY için tesis edilen akım kaynaklı bir aktif güç filtresinin tasarım, benzetim ve uygulama sonuçları verilmektedir. Tasarım çalışmalarının doğruluğu, gerek benzetim çalışmalarının gerekse sahada gerçekleştirilen deneylerin çıktılarıyla gösterilmektedir.



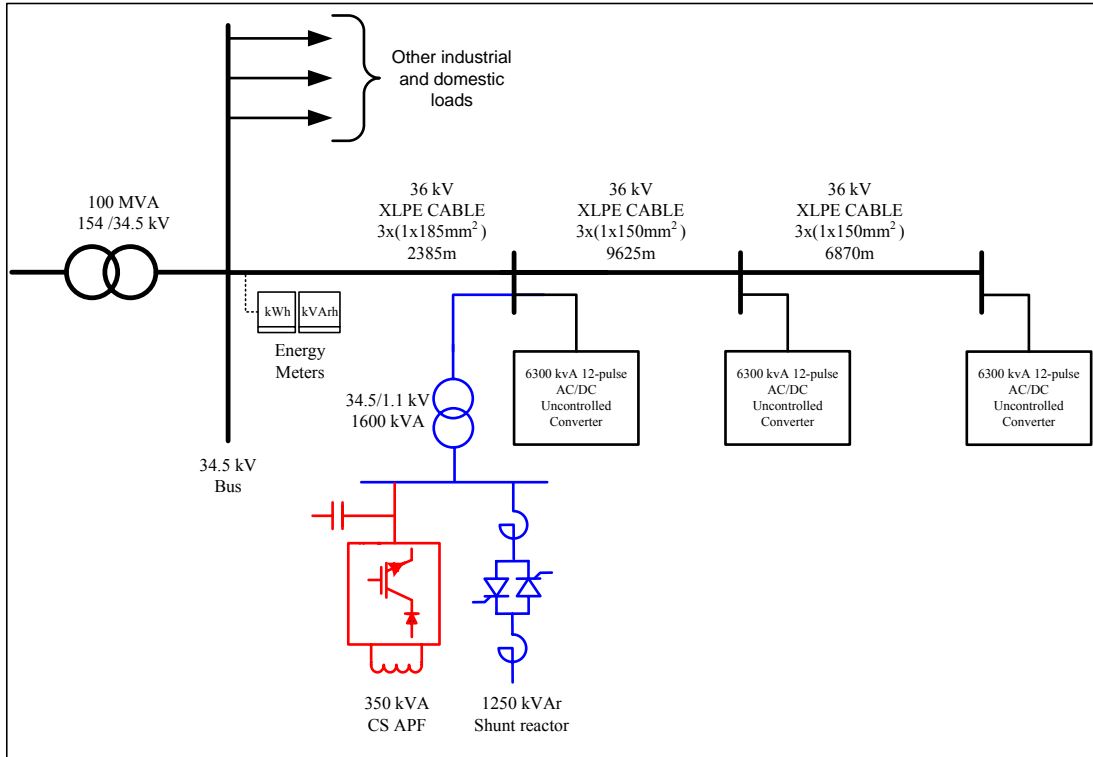
Şekil 1 Gerilim (a) ve akım (b) kaynaklı aktif güç filtresi yapıları

## II. Sistem Tanımı

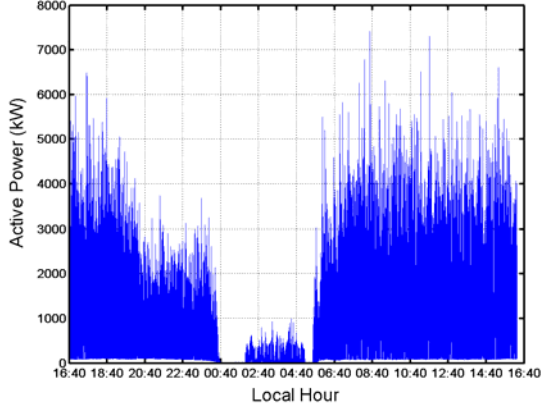
BURSARAY OG dağıtım sistemi, doğrudan TEİAŞ Beşevler İndirici Merkez'in'den 100 MVA, 154 / 34.5 kV trafo çıkışından beslenmektedir (Şekil 2). İndirici merkezden gelen yer altı kablosu ilk istasyon olan, SS07 istasyonuna girmektedir. Şekil 2'de gösterildiği üzere indirici merkez ile SS07 istasyonu arasındaki bağlantı

2385 m, 3x(1x185 mm<sup>2</sup>); cer ve servis trafolarının bulunduğu ara istasyonlar arası bağlantı ise toplamda 16495 m, 3x(1x150 mm<sup>2</sup>) yer altı kablosu ile sağlanmaktadır. Yer altı kablolarının kaçak kapasitanslarından kaynaklı olarak yaklaşık 1400 kVAR kapasitif reaktif güç ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. DA katenar hattını besleyen 12 darbeli cer doğrultucuları, normal operasyon esnasında yaklaşık 0.98 güç faktöründe çalışmaktadır. Bu nedenle, yönetmelik hükümlerinin sağlanabilmesi için kablolardan kaynaklı kapasitif reaktif gücün kompanse edilmesi gerekmektedir. 2004 yılında tesis edilen 1250 kVAR kurulu güce sahip TAR sistemi sayesinde reaktif enerji tüketimine ilişkin yönetmelik hükümlerinin karşılanması mümkün olmuştur. TAR sisteminin OG seviyesine bağlantısı ise münferit 1600 kVA, 34.5 / 1.1 kV bir kuplaj transformatörü üzerinden sağlanmaktadır. 2004 yılında yapılan çalışmada, akım harmoniklerinin filtrelenmesi amacıyla, aktif güç filtre sisteminin tesis edilmesi gerekliliği öngörülmüş ve kuplaj transformatörünün gücü ve akı yoğunluğu buna göre seçilmiştir.

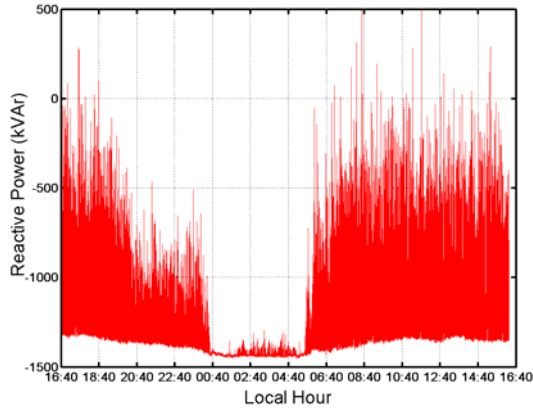
Şekil 3'te indirici merkezdeki çıkış fiderinde bulunan faturalandırmaya esas sayaçlardan gerçekleştirilen ölçüm sonucu elde edilen aktif-reaktif güç değişimi ile 12 darbeli cer doğrultucularından kaynaklı baskın 11. ve 13. akım harmoniklerinin zamana karşı değişimleri verilmektedir.



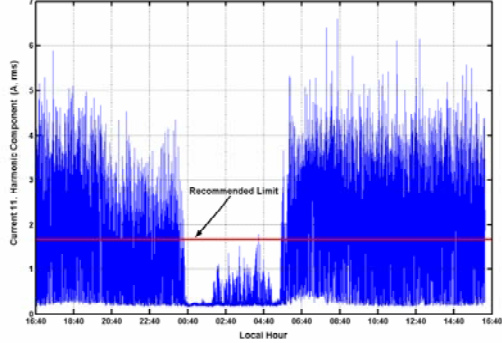
Şekil 2 BURSARAY-2 hattı OG dağıtım sistemi basitleştirilmiş tek hat devre şeması



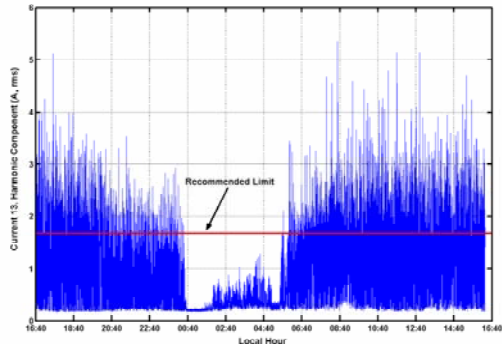
(a)



(b)



(c)



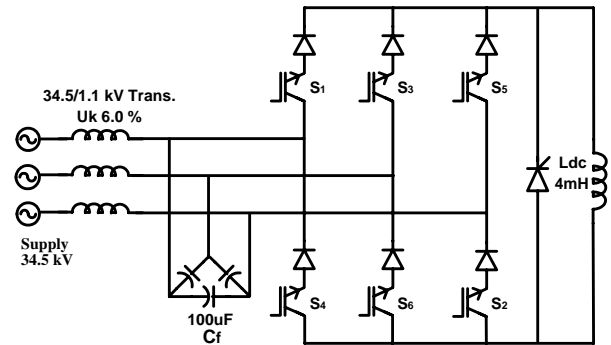
(d)

Şekil 3 Sırasıyla aktif güç, reaktif güç, 11. akım harmoniği ve 13. akım harmoniğinin zamana karşı değişimleri

Şekil 3'ten görüleceği üzere cer doğrultucularının şebekeye bastığı 11. ve 13. akım harmonikleri yönetmeliklerde tanımlanan sınır değerleri aşmaktadır. BURSARAY'ın reaktif güç ihtiyacının genel olarak karşılaşılan endüktif reaktif değil de kapasitif reaktif olması; ve akım harmoniklerinin OG seviyesinde filtrenmesi, tesis edilecek bir harmonik filtre sisteminin konvansiyonel tipte pasif filtre yapısında olmasını engellemektedir. Bu nedenle, alt yapısı 2004 yılında hazırlanmış bir aktif güç filtresi tesis edilerek, 11. ve 13. akım harmoniklerinin yönetmeliklerde verilen sınır değerlerin altında kalması sağlanmıştır.

### III. Sistem Özellikleri

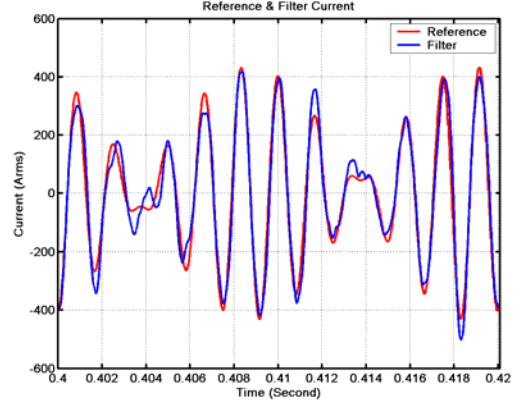
BURSARAY'a tesis edilen aktif güç filtresinin tasarımında, problemin özgünlüğü ve akım kaynaklı yapının öne çıkan olumlu özellikleri dikkate alınmıştır. Tesis edilen sisteme ilişkin basitleştirilmiş bir üç faz gösterim Şekil 4'te verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere akım kaynaklı toplojde yarı iletken anahtarlar (S1-S6) bir adet tek yönlü gerilim tutabilen IGBT ile bir adet diyodun seri bağlanmasıyla oluşturulmaktadır. Böylece, ters yönde gerilimi diyotlar tutmakta ve çift yönde gerilim tutabilen bir yarı-iletken anahtar elde edilmektedir. Sisteme basılan akım harmonikleri, DA bağda oluşturulan akımın, Darbe Genişliği Kiplenimi (PWM) ile anahtarlanmasından elde edilmektedir. Giriş akımında anahtarlama frekansında görülen dalgacıklar (ripple) ise, düşük geçirgenli ikinci dereceden bir giriş filtresi ile süzülmemektedir. BURSARAY'a tesis edilen aktif güç filtresinde kuplaj transformatörünün kaçak empedansından faydalanılarak ekstra bir giriş filtre reaktörü kullanılmamıştır. Bununla birlikte, filtrenmesi gereken harmoniklerinin sadece iki ana bileşende olması, kontrol sisteminde özgün ve yeni denetim tekniklerinin uygulanmasına imkan sağlamıştır. Giriş filtresinin akord frekansı, filtrelenen bu harmonikleri artıracak ve beraberinde anahtarlama frekansında (3 kHz) oluşan dalgacıkları süzecek şekilde seçilmiştir. Bu amaçla, giriş filtresinin frekansı 800 Hz'e akord edilmiştir. Yapılan benzetim çalışmalarında giriş filtresinin 800 Hz'e akord edilmesi durumunda, 11. akım harmoniğinin yaklaşık 2 kat; 13. akım harmoniğinin ise en az 3 kat genlik artışına maruz



Şekil 4 Akım kaynaklı aktif güç filtresi gösterimi

Çizelge 1 Giriş filtesinin akord frekansına göre harmoniklerdeki genlik artışı

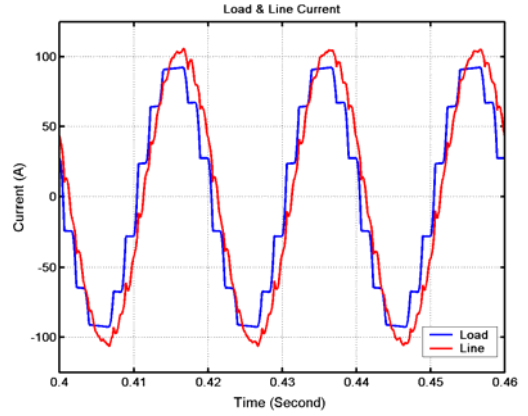
f(Hz)	I (A)		
	800 Hz	1000 Hz	1200 Hz
250	1.11	1.07	1.05
350	1.25	1.14	1.09
550	1.95	1.45	1.28
650	3.13	1.77	1.44
800	29.23	2.95	1.85
850	6.02	3.93	2.07
1000	1.64	30.01	3.52
1050	1.28	7.22	4.77
1200	0.76	2.05	30.60
1250	0.66	1.63	8.28
2000	0.18	0.32	0.54



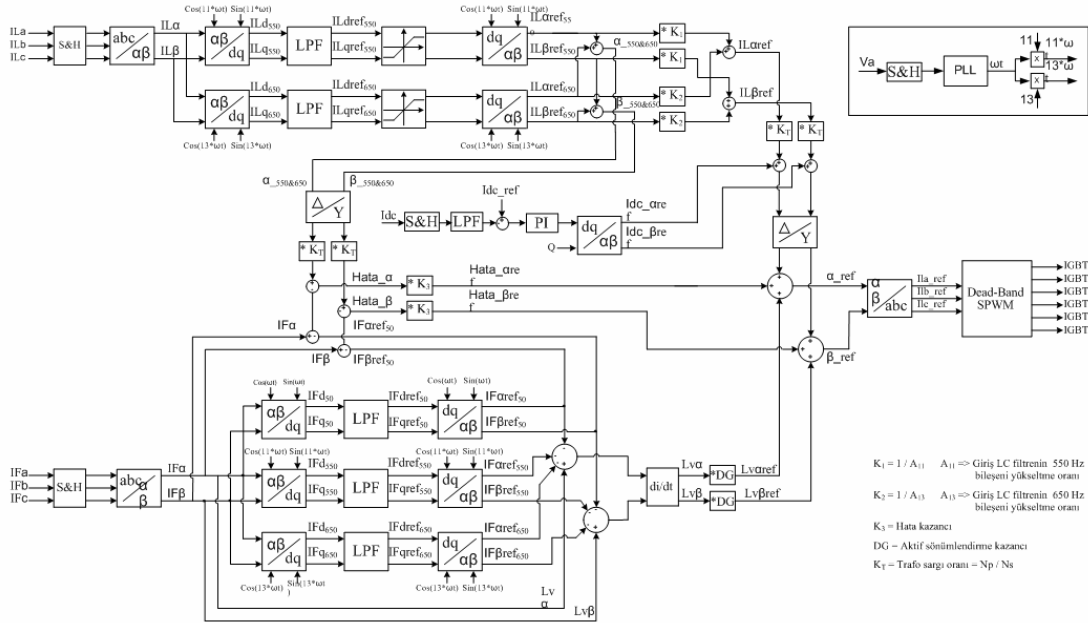
Şekil 5 Referans akım ile giriş hat akımı dalga şekli

kaldığını göstermektedir (Çizelge 1). Bu da aktif filtrenin kurulu gücünün en az 2-3 kat azaltılması anlamına gelmektedir.

Giriş filtesinin yapısal olarak bir paralel rezonans devresi olması sebebiyle, akord frekansı etrafında genlik artışları (amplification) meydana gelmektedir. Bu genlik artışları konvansiyonel bir çözüm olarak, giriş filtesi reaktörüne paralel bir sönümlendirme direncinin bağlanmasıyla çözülmektedir. Ancak burada transformatörün kaçak empedansının giriş filtre reaktörü olarak kullanılması sebebiyle sönümlendirme direnci kullanılamamıştır. Akord frekansı etrafındaki harmoniklerin sönümlendirilmesi için aktif sönümlendirme yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Aktif güç filtesinde kullanılan denetim yöntemlerinin toplamı Şekil 7’te blok şema olarak gösterilmektedir. Gösterilen akım denetim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonuçlarından iki adet çıktı ise Şekil-5 ve Şekil-6’da gösterilmektedir.



Şekil 6 Aktif filtre devreye girdikten sonra yük akımı ile şebeke akımı dalga şekli



Şekil 7 Denetim yöntemi blok şeması

$K_1 = 1 / A_1$   $A_{11} \Rightarrow$  Giriş LC filtresinin 550 Hz bileşeni yükseltme oranı  
 $K_2 = 1 / A_1$   $A_{13} \Rightarrow$  Giriş LC filtresinin 650 Hz bileşeni yükseltme oranı  
 $K_3 =$  Hata kazancı  
 $DG =$  Aktif sönümlendirme kazancı  
 $K_T =$  Trafo sargı oranı =  $N_p / N_s$



#### IV. Uygulama Sonuçları

Tasarım ve benzetim çalışmalarının özeti verilen aktif güç filtresi, yukarıda gösterilen kuplaj transformatörünün sekonderine tesis edilmiştir. Uygulama çalışmaları neticesinde tesis edilen sisteme ilişkin örnek fotoğraflar Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmaktadır. Tesis edilen sistemin başarımı, deneysel sonuçlar ile de doğrulanmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen deneylerden bazılarının çıktıları Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmektedir. Sonuçlardan görüleceği üzere aktif güç filtresi devrede iken yükün 11. akım harmoniği yaklaşık % 85, 13. akım harmoniği ise yaklaşık % 70 oranında filtrelenmektedir. Böylece şebeke akımında görülen harmonikler, yönetmeliklerde verilen sınır değerleri sağlamaktadır.

#### V. Sonuç

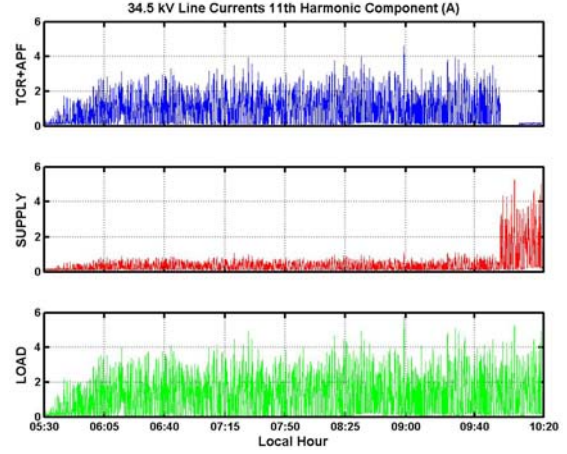
Bu çalışmada, BURSARAY sisteminin cer doğrultucularından kaynaklı akım harmonikleri probleminin çözümü için tesis edilen akım kaynaklı AGF sistemi sunulmuştur. Öncesinde yönetmeliklerde verilen sınır değerleri sağlamayan 11. ve 13. akım harmonikleri, AGF'nin devreye girmesiyle filtrelenmiş ve sınır değerleri sağlar duruma gelmiştir.



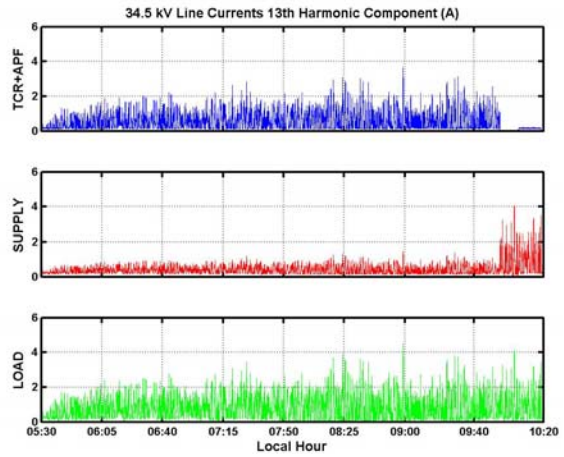
Şekil 8 AGF güç katı ve kontrol panosu



Şekil 9 Çatıya tesis edilen AGF sulu soğutma sistemi



Şekil 10 AGF, şebeke ve yükün hat akımlarında ölçülen 11. akım harmoniğinin değişimi



Şekil 11 AGF, şebeke ve yükün hat akımlarında ölçülen 13. akım harmoniğinin değişimi

#### VI. Kaynakça

- [1]EPDK, "Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliği", 2002
- [2]EPDK, "Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik", 2006
- [3]H. Akagi, "Active Harmonic Filters" Proceedings of the IEEE, Vol. 93, pp 2128-2141, 2005
- [4]L. Benchaïta, S. Saadate, A. Salem nia, "A Comparison of Voltage Source and Current Source Shunt Active Filter by Simulation and Experimentation" IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, pp. 642-647, 1999

#### Teşekkür

Bu makalede sunulan çalışmalar, TÜBİTAK destekli 105G129 nolu "Güç Kalitesi Milli Projei" kapsamında yürütülmektedir. Yazarlar, verdikleri destek için Kamu Araştırmaları Proje Grubu ile BURULAŞ yöneticilerine ve teknik ekibine teşekkürlerini sunarlar.