

3-FAZLI 4-TELLİ SİSTEMLERDE BGKD İLE GÜÇ KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Metin KESLER* ve Engin ÖZDEMİR**

*Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Üniversitesi, Gülümbe 11200, Bilecik

**Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Umutepe 41380, Kocaeli

metin.kesler@bilecik.edu.tr, ozdemir@kocaeli.edu.tr

(Geliş/Received: 04.05.2009; Kabul/Accepted: 04.10.2010)

ÖZET

Bu çalışmada, Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (BGKD) ile şebeke gerilim ve yük akım harmoniklerini düzelterek sistemin güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesi açıklanmaktadır. Birleşik güç kalite düzenleyicisi ortak bir DC hattı paylaşan paralel ve seri aktif güç filtre sistemlerinin birlikte kullanılması ile oluşmaktadır. Paralel aktif güç filtresi ile akım harmonikleri, yük akım dengesizlikleri, reaktif güç ve nötr akımı kompensasyonu yapılmakta, seri aktif güç filtresi ile kaynak gerilim harmonikleri, dengesizlikleri ve gerilim çökme-yükselme gibi güç kalitesi problemleri düzeltilmektedir. BGKD için önerilen denetim algoritmasının laboratuvar ortamında uygulaması yapılmaktadır. Ayrıca Matlab/Simulink yazılımı ile önerilen denetim algoritmasının simülasyonu yapılarak sistemin performansı incelenmektedir. Önerilen BGKD denetim algoritması güç dağıtım sistemindeki ortak bağlantı noktasında güç kalitesini iyileştirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Birleşik güç kalite düzenleyicisi, harmonikler, aktif güç filtresi, güç kalitesi.

POWER QUALITY IMPROVEMENT WITH UPQC IN 3-PHASE 4- WIRE SYSTEMS

ABSTRACT

This paper presents a new control method to compensate source voltage and load current harmonics and improvement of power quality problems through a three-phase unified power quality conditioner (UPQC). The UPQC system consists of combined operation of series and shunt active power filters sharing a common DC link. Paralel Active Power Filter (PAF) used for current harmonics, unbalanced and neutral current compensation; Series Active Power Filter (SAF) used for compensation of source voltage harmonics, unbalanced voltage and sag and swell of source voltage. The performance of the proposed control system was analyzed using simulations with Matlab/Simulink program, and experimental results with the hardware prototype. The proposed UPQC control algorithm can improve the power quality at the point of common coupling (PCC) on power distribution system.

Keywords: Unified Power Quality Conditioner (UPQC), harmonics, active power filter, power quality.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi Güç Kalitesi "PQ" (Power Quality) problemleri elektrik enerjisinin yoğun olarak kullanılmaya başlandığı tarihten günümüze kadar güncelliğini korumaktadır. Elektrik enerjisini sağlayan kuruluşlar ve enerjiyi tüketen son kullanıcılar güç sistemlerinde güç kalitesi sorunları ile yakından ilgilenmektedir. Güç kalitesi ifadesi, güç sistemlerinde oluşan problemlerin tamamını kapsayan genel bir ifade olarak kabul edilmektedir. Kelime

manası olarak güç kalitesi, güç sistemlerinde çok geniş miktarda elektromagnetik olaylar olarak tanımlanmaktadır. Aslında farklı sorunları referans olarak çok sayıda çok farklı güç kalitesi tanımı yapılabilmektedir. Örneğin elektrik enerjisini sağlayan kuruluşlar güç kalitesini güvenilirliği ve kararlılığı açısından değerlendirmekte, yük tarafındaki tüketiciler ise elektrik enerjisinin devamlılığı ve elektrik enerjisinden beslenen cihazların sorunsuz çalışması şeklinde güç kalitesi tanımı yapmaktadır. Elektrik enerjisinde güç kalitesini diğer hizmet ve

ürünlerde olduğu gibi bir standart kriter kullanarak tanımlamak oldukça zordur. Ancak son kullanıcı donanım ve cihazlarını sorunsuz ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlayabilmelidir. Eğer elektrik enerjisi bu ihtiyaçları karşılamayacak kadar yetersiz ve sorunlu ise o zaman genel manada güç kalitesinden bahsedilemez [1]. Genel olarak güç kalitesi, elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın kalitesi olarak nitelendirilebilir. Çünkü gerilimdeki sorunlar birçok güç kalitesinin ana sebeplerinden sayılmaktadır. Gerilimdeki anlık yükselmeler, gerilim çökmeleri, uzun ve kısa süreli kesintiler, gerilimdeki harmonikler ve frekans değişimleri gibi sorunları örnek olarak verebiliriz. Aslında gerilim ile akım arasında çok yakın bir ilişki vardır. Doğrusal olmayan bir yükün çektiği doğrusal olmayan akım, gerilim üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Bu bağlamda güç kalitesi, gerilim ve akım dalga şeklinin herhangi bir bozulmaya uğramamış, istenilen frekans ve genlikte olması durumunda temiz enerji olarak tanımlanmaktadır [1,2,3].

Elektrik enerjisini üreten ve hizmet veren kuruluşların önemli sorumluluklarından birisi, Ortak Bağlantı Noktasında (OBN) enerji tüketen kullanıcılar için üretilen elektrik enerjisinin akım ve gerilimin dalga şekillerinin sinüzoidal formda, istenilen genlik ve frekansta olmasını sağlamaktır. Her ne kadar elektrik enerjisi senkron makineler ile sinüzoidal gerilime yakın biçimde üretilse de bazı istenmeyen ve beklenmeyen geçici gerilim olayları, yıldırım ve kısa devre durumları ve doğrusal olmayan yüklerden dolayı akım bozulmaları gibi durumlar oluşmaktadır.

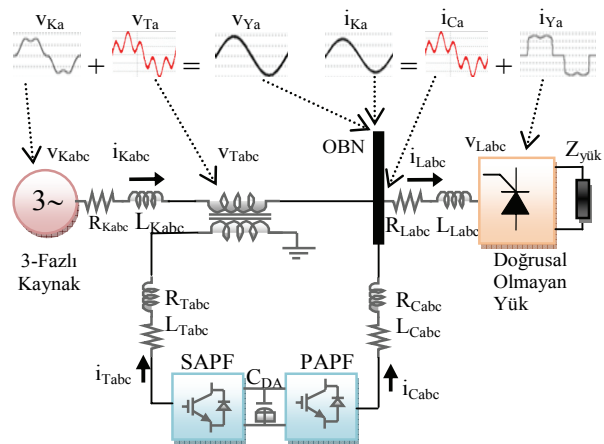
Güç kalite problemlerine çözüm üretmek, güç sistemlerinin performansını ve kararlılığını artırmak için çok sayıda teknik ve cihaz önerilmekte ve uygulanmaktadır. Geleneksel cihazlar, gerilim regülasyonu yapmak ve seri-paralel güç kondansatörleri kullanarak güç faktörü düzeltimi için kullanılmaktadır. Gerilim regülasyonu performansını artırmak, temel frekansta kalıcı durum ve anlık aktif ve reaktif güç kontrolü yapmak için gelişmiş FACTS (Flexible AC Transmission Systems) sistemleri kullanılmaktadır. Ayrıca güç kalitesi problemlerini gidermek, aktif ve reaktif güç kompensasyonu ve gerilim regülasyonu yapmak için özel güç cihazları CPD (Custom Power Devices) kullanılmaktadır. Diğer modern çözüm yöntemi olan ve güç kalitesi problemlerine geniş çaplı çözüm üreten Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (UPQC- Unified Power Quality Conditioner) sistemleri konusunda çalışmalar yapılmaktadır [2].

2. BİRLEŞİK GÜÇ KALİTE DÜZENLEYİCİSİ (UNIFIED POWER QUALITY CONDITIONER)

Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (BGKD), Seri Aktif Güç Filtresi (SAGF) ile Paralel Aktif Güç Filtresinin (PAGF) birlikte kullanılması ile oluşturulmuş en gelişmiş filtre sistemidir. Birleşik Güç Kalite

Düzenleyicisi'nin temel bileşenleri olan SAGF ve PAGF 1976 yılında Gyugyi [4] tarafından ileri sürülmüştür. PAGF, doğrusal olmayan yüklerin kaynaktan çektiği harmonikleri yok etmekte, nötr akımı kompensasyonu, reaktif güç kompanzasyonu ve DA hat gerilim regülasyonu gerçekleştirmektedir. SAGF ise şebeke gerilim harmonik kompensasyonu, gerilim düşme ve yükselmeleri, şebeke geriliminde frekans problemleri, gerilim kesilmeleri, geçici rejim gerilim bileşenleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikler ve hızlı gerilim değişiklikleri parametrelerinin düzeltilmesi işlevini gerçekleştirmektedir [4-7].

Şekil 1'de BGKD genel blok şeması verilmektedir. 3-fazlı 4-telli sistemler için konfigürasyonu yapılan BGKD, ortak bir DA hattına bağlı iki adet Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) ve kaynak gerilimine seri bağlı transformatörlerden oluşmaktadır. OBN'a paralel bağlı GKE doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmoniklerin diğer hassas yükleri etkilenmesini önlemektedir. Kaynak gerilimine seri transformatörler ile bağlı olan GKE kaynak gerilim problemlerini ve bozulmalarını OBN'a bağlı diğer hassas yüklerin etkilenmesini önlemektedir. SAGF denetim algoritmasında, kaynak geriliminin sebep olduğu güç kalitesi problemlerini düzelterek referans filtre gerilimleri v'_{Tabc} hesaplanmaktadır. SAGF filtre hat gerilimleri v_{Tabc} ile hesaplanan referans filtre gerilimleri v'_{Tabc} sinüzoidal DGA yöntemi ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Böylece kaynak gerilim problemleri düzeltilmekte ve hassas yüklere olumsuz etkisi azaltılmaktadır. PAGF denetim algoritmasında doğrusal olmayan yükten kaynaklanan akım harmonik problemlerini düzelterek referans filtre i'_{Cabc} akımları hesaplanmaktadır. PAGF filtre hat akımları i_{Cabc} ile hesaplanan referans filtre i'_{Cabc} akımları histerisiz band (HB) akım denetleyici yöntemi ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmekte ve OBN'da yük akım kaynaklı problemler düzeltilmektedir.



Şekil 1. BGKD blok şeması (UPQC block diagram)

3. DENETİM STRATEJİSİ (CONTROL STRATEGY)

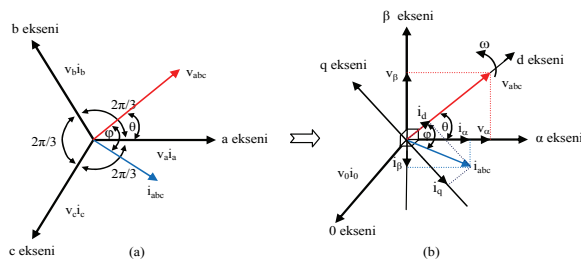
3.1. Faz Kilitlemeli Döngü (Phase Locked Loop)

3-fazlı 4-telli güç sistemlerinde yük gerilimleri genelde temel pozitif sıralı bileşenlerden oluşmaktadır. Fakat dengesiz ve doğrusal olmayan yük durumlarında temel pozitif sıralı bileşenle birlikte negatif ve sıfır sıralı bileşenlerde bulunmaktadır. Aktif güç filtre sistemlerinde yükün harmoniklerini kompanse etmek için gerilimlerin temel pozitif sıralı bileşenlerinin ayırt edilmesi gerekmektedir. Sistem gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenlerini tespit etmek için PLL devreleri kullanılmaktadır [5-6].

3.2. Senkron Referans Yapı (Synchronous Reference Frame: SRF)

Senkron Referans Yapı (SRF) tabanlı denetim ile harmonik kompanzasyon 1991 yılında S. Bhattacharya [8] tarafından önerilmiştir. Literatürde SRF tabanlı birçok aktif güç filtre çalışması yapılmıştır [8-15]. a-b-c koordinatlarından d-q-0 senkron referans koordinatlarına dönüşüm yapabilmek için sistem gerilim senkron bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem gerilimiyle senkron olabilmek için PLL yapısı kullanılmaktadır. PLL girişine kaynak gerilimleri uygulanarak üretilen ωt , sistemin ωt 'ile senkronize olduğunda d-q-0 senkron referans yapı, sistem gerilimiyle senkron dönmektedir. d-q-0 yapıda gerilim vektörünün açılmal konumu aynı zamanda senkron referans yapının da açılmal konumunu göstermektedir [13-15].

SRF tabanlı aktif güç filtre uygulamalarında, 3-fazlı a-b-c koordinatlarında akımlar veya gerilimler, sistem gerilimiyle senkron dönen referans yapıya çevrilmektedir. Doğrusal olmayan yük durumlarında yükün çektiği harmonik ve reaktif akımlar tespit edilmekte ve aktif güç filtre sistemi bu harmonikli akımları yok etmek için sisteme eşit büyüklükte ve ters fazda akımlar üreterek nötr akımı, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu yapmaktadır. Şekil 2(a)'da verilen a-b-c koordinatlarından Şekil 2(b)'de verildiği gibi durağan referans yapı α - β -0 koordinatlarına ve dönen referans yapı d-q-0 koordinatlarına dönüşümü birlikte verilmektedir.

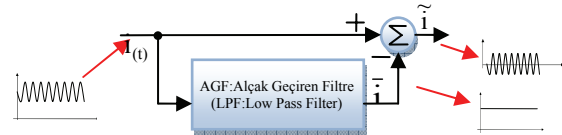


Şekil 2. (a) a-b-c koordinatlarından (b) α - β -0 durağan referans yapıdan d-q-0 senkron referans yapıya dönüşüm (Conversion from α - β -0 to d-q-0 axes)

Durağan referans yapıda α - β -0 eksenleri dönmemektedir. Sistem gerilim ve akım vektörleri yer değiştirdikçe bu vektörlerin α - β -0 eksenlerindeki değerleri değişmektedir. Dönen referans yapı sistem gerilimiyle senkron dönmektedir. Bu nedenle sistem gerilim vektörünün açılmal konumu aynı zamanda senkron referans yapının da açılmal konumunu göstermektedir [9-15].

3-fazlı 4-telli sistemlerde, d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan akımın "d" ekseninde bulunan i_d bileşeni gerilimle aynı fazda olduğu için pozitif sıralı aktif akıma karşılık gelmektedir. "q" ekseninde bulunan i_q bileşeni, i_d bileşenine göre dik olduğu için negatif sıralı reaktif akımlara karşılık gelmektedir. i_d ve i_q bileşenlerine dik olan "0" ekseninde bulunan i_0 bileşeni ise akımın sıfır sıralı bileşenine karşılık gelmektedir. Akımın "q" ekseninde bulunan i_q bileşeni negatif ise, yükün endüktif bileşen içerdiğini, pozitif ise, yükün kapasitif bileşen içerdiğini göstermektedir. 3-fazlı doğrusal olmayan yüklerde $i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d$ ve $i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q$ hem AA

(\tilde{i}_d ve \tilde{i}_q) hem de DA (\bar{i}_d ve \bar{i}_q) bileşenlerine sahiptir. i_d ve i_q 'nun AA (\tilde{i}_d ve \tilde{i}_q) bileşenleri harmonik akımlara karşılık gelmektedir. DA bileşenleri ise (\bar{i}_d) aktif ve (\bar{i}_q) reaktif akımlara karşılık gelmektedir [8, 9, 15]. Şekil 3'de i_d ve i_q nun anlık bileşenlerinin elde edilmesi işlemi blok diyagramı verilmektedir. i_d ve i_q nun anlık DA bileşenleri (\bar{i}_d ve \bar{i}_q) alçak geçiren filtreden (AGF) geçirilerek ve AA bileşenleri (\tilde{i}_d ve \tilde{i}_q) yüksek geçiren filtreden (YGF) geçirilerek elde edilmektedir [25].



Şekil 3. i_d ve i_q nun anlık bileşenlerinin elde edilmesi işlemi blok diyagramı (Obtaining instantaneous component of i_d and i_q process block diagram)

SRF tabanlı PAGF ile sadece reaktif güç kompanzasyonu yapılmak isteniyorsa akımın i_q bileşeni, sadece harmonik güç kompanzasyonu yapılmak isteniyorsa akımın \tilde{i}_d ve \tilde{i}_q bileşenleri, reaktif güç ve harmonik güç kompanzasyonu birlikte yapılmak isteniyorsa akımın \tilde{i}_d ve \bar{i}_q bileşenleri referans alınmaktadır. Dengesiz ve doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan nötr akım kompanzasyonu yapılmak istenirse, d-q-0 koordinatında akımın i_0 bileşeni kullanılmaktadır. Tablo 1'de SRF tabanlı PAGF ile yapılacak kompanzasyon tipine göre gerekli akım bileşenleri verilmektedir.

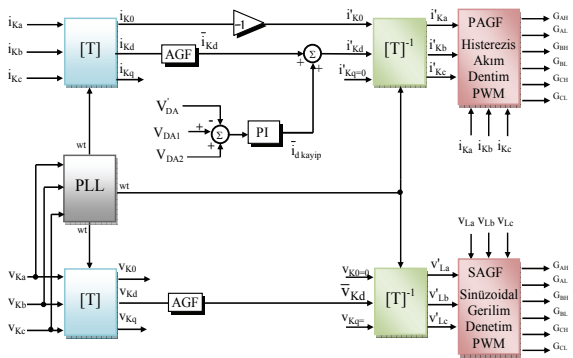
Tablo 1. SRY tabanlı PAGF ile yapılacak kompanzasyon tipine göre gerekli akım bileşenleri (Compensation parameters for PAGF)

Kompanzasyon Tipi	Gerekli Akım Bileşenleri
Reaktif	i_q
Harmonik	\tilde{i}_d, \tilde{i}_q
Reaktif ve Harmonik	\tilde{i}_d, i_q
Nötr akımı	i_0

3.3. SRY Tabanlı BGKD Denetim Algoritması (SRF Based UPQC Control Algorithm)

Önerilen SRY tabanlı Kaynak Akımları ölçüm Yöntemi (KAY) ile BGKD'nin denetim algoritmasında, literatürde [8-11] benzer çalışmaları olan SRY tabanlı PAGF denetim algoritması kullanılmakta ve yeni bir SRY tabanlı SAGF denetim algoritması ise önerilmektedir.

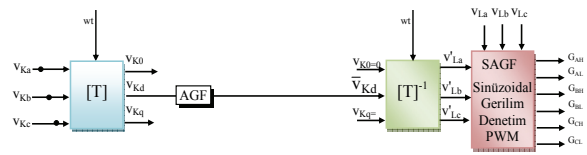
Geleneksel BGKD denetim algoritması yöntemlerinde; kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), filtre gerilimleri (v_{Fabc}), yük akımları (i_{Yabc}), filtre akımları (i_{Cabce}), ve DA bara gerilimi (V_{DA}) olmak üzere toplam altı ayrı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması, kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), yük gerilimleri (v_{Yabc}) ve DA bara gerilimi (V_{DA}) olmak üzere toplam dört ayrı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir. SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması hem ölçüm sayısının az olması hem de denetim algoritmasının daha basit ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle avantajlı görünmektedir. Şekil 4'de önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması görülmektedir. Denetim algoritması blok şemasında görüldüğü gibi SAGF ve PAGF denetim katlarında SRY yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 4. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması (The proposed SRF based UPQC control block diagram)

3.3.1. Seri Aktif Güç Filtre Denetim Algoritması (SAFF Control Algorithm)

Şekil 5'de önerilen SRY tabanlı KAY ile SAGF'nin denetim algoritması blok şeması verilmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritmasında, kaynak gerilimleriyle senkron olabilmek için PLL devresi kullanılarak a-b-c koordinatlarında akım ve gerilimler d-q-0 koordinatlarına çevrilmektedir. Denklem 1'de verilen "T" çevrim matrisi ve PLL devresi ile üretilen ot kullanarak kaynak gerilimleri Denklem 3'de, kaynak akımları Denklem 4'de görüldüğü gibi a-b-c koordinatlarından d-q-0 senkron referans koordinatlarına dönüşümü (Park dönüşümü) yapılmaktadır.



Şekil 5. Önerilen SRY tabanlı KAY ile SAGF denetim algoritması blok şeması (The proposed SRF based Series APF control block diagram)

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ 1/\sqrt{2} & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & \sin(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{K0} \\ v_{Kd} \\ v_{Kq} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_{Ka} \\ v_{Kb} \\ v_{Kc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{Kd} \\ i_{Kq} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_{Ka} \\ i_{Kb} \\ i_{Kc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim yönteminde, SAGF denetim algoritması aynı anda kaynak gerilim harmonikleri, gerilim dengesizlikleri, gerilim çökme ve yükselmesi gibi kaynak gerilim problemlerini düzeltmektedir.

3-fazlı harmonikli kaynak gerilimi durumunda, d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan "d" ve "q" eksenlerinde bulunan anlık kaynak gerilimleri v_{Kd} ve v_{Kq} hem AA (\tilde{v}_{Kd} ve \tilde{v}_{Kq}) hem de DA (\bar{v}_{Kd} ve \bar{v}_{Kq}) bileşenleri içermektedir. v_{Kd} ve v_{Kq} 'nin AA

bileşenleri kaynak geriliminin harmonik ve negatif sıralı bileşeninden meydana gelmektedir. DA bileşenleri ise gerilimin pozitif sıralı bileşeninden oluşmaktadır. Kaynak gerilimine ait sıfır sıralı v_{K0} gerilimi ise kaynağın dengesiz olması durumunda meydana gelmektedir.

Önerilen SAGF denetim algoritmasında, kaynak gerilim problemlerinin düzeltilmesi için geliştirilen yöntemde d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan kaynak geriliminin \bar{v}_{Kd} bileşeni kullanılmaktadır. “d” ekseninde v_{Kd} gerilimi AGF yöntemi uygulanarak DA bileşeni \bar{v}_{Kd} elde edilmektedir. Denklem 2’de verilen ters çevrim matrisi “ T^{-1} ” girişine, kaynak geriliminin \bar{v}_{Kd} bileşeni ve PLL ile üretilen ωt kullanarak Denklem 5’de verildiği gibi kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşeni olan referans yük gerilimleri (v'_{Ya} , v'_{Yb} ve v'_{Yc}) üretilmektedir.

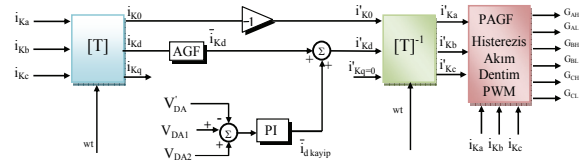
$$\begin{bmatrix} v'_{Ya} \\ v'_{Yb} \\ v'_{Yc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{v}_{Kd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Böylece 3-fazlı 4-telli sistemlerde harmonikli kaynak gerilim kompanseasyonu yapacak referans gerilimleri (v'_{Ya} , v'_{Yb} ve v'_{Yc}) elde edilmektedir. Önerilen SAGF denetim algoritması tarafından üretilen referans yük gerilimleri (v'_{Ya} , v'_{Yb} ve v'_{Yc}) ile yük hat gerilimleri (v_{Ya} , v_{Yb} ve v_{Yc}) sinüzoidal darbe genişlik ayar denetleyici tekniği kullanarak anahtarlar sinyalleri üretilmektedir.

3.3.2. Paralel Aktif Güç Filtre Denetim Algoritması (PAPF Control Algorithm)

Şekil 6’da SRY tabanlı KAY ile PAGF denetim algoritması blok şeması verilmektedir. SRY tabanlı KAY ile PAGF’nin denetim algoritması, kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), ve DA bara gerilimi (V_{DA}) ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir. SRY tabanlı KAY ile PAGF’nin denetim algoritmasında, kaynak gerilimiyle senkron olabilmek için PLL devresi kullanarak a-b-c koordinatlarında akım ve gerilimler d-q-0 koordinatlarına çevrilmektedir. Denklem 1’de verilen “ T ” çevrim matrisi ve PLL devresi ile üretilen ωt kullanarak kaynak gerilimleri Denklem 3’de, kaynak akımları Denklem 4’de görüldüğü gibi a-b-c koordinatlarından d-q-0 senkron referans koordinatlarına dönüşüm (Park dönüşümü) yapılmaktadır.

3-fazlı doğrusal olmayan yük durumunda, d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan “d” ve “q” eksenlerindeki anlık kaynak akımları, \hat{i}_{Kd} ve \hat{i}_{Kq} hem AA ($\tilde{\hat{i}}_{Kd}$ ve $\tilde{\hat{i}}_{Kq}$) hem de DA ($\bar{\hat{i}}_{Kd}$ ve $\bar{\hat{i}}_{Kq}$) bileşenleri içermektedir. \hat{i}_{Kd} ve \hat{i}_{Kq} ’nun AA bileşenleri, akımın harmonik ve negatif sıralı bileşeninden meydana gelmektedir. DA bileşenleri ise akımın pozitif sıralı bileşeninden oluşmakta aktif ve reaktif akımlara karşılık gelmektedir. Kaynak akımına ait sıfır sıralı akım \hat{i}_{K0} ise yükün dengesiz olması durumunda oluşmaktadır.

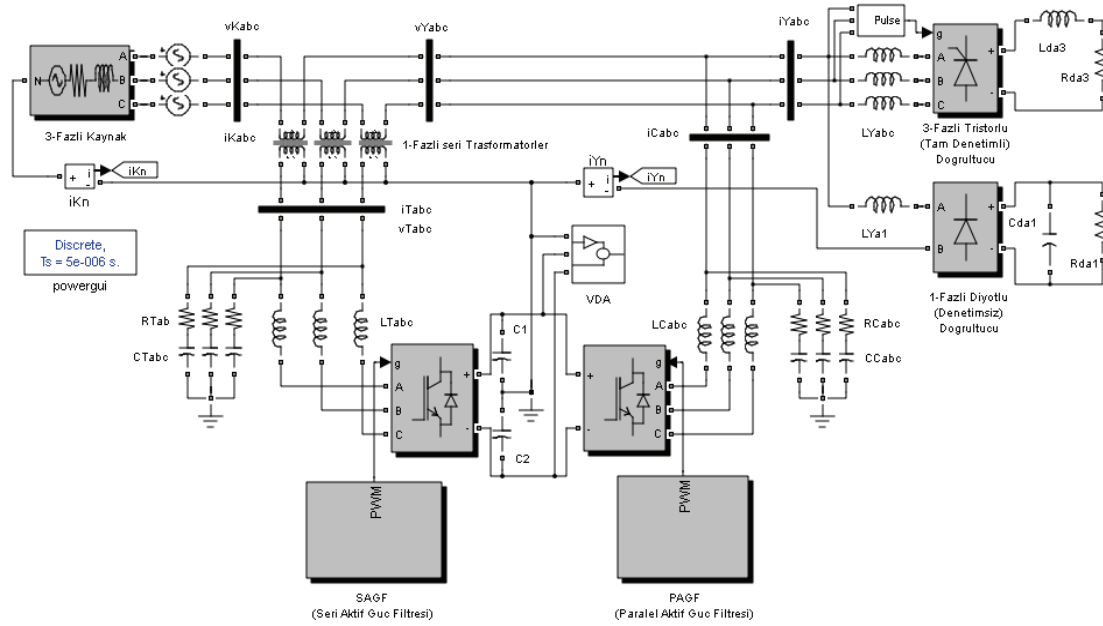


Şekil 6. SRY tabanlı KAY ile PAGF denetim algoritması blok şeması (SRF based Shunt APF control block diagram)

SRY tabanlı KAY ile PAGF’nin denetim yönteminde yük akım harmoniklerinin ve dengesizlerinin yok edilmesi ve reaktif güç kompanseasyonu gerçekleştirmek için kaynak akımına ait \hat{i}_{Kd} ve \hat{i}_{K0} bileşenleri kullanılmakta ve d-q-0 koordinatlarında yük akım harmoniklerini düzelterek referans kaynak akımları (i'_{K0} , i'_{Ka} ve $i'_{K\beta}$) üretilmektedir. $\bar{i}_{dkayıp}$ akımı V_{DA} bara geriliminin PI denetleyici anlık akım çıkışı olup, filtre kayıplarını gidermek ve DA bara gerilim salınım ve değişimleri azaltmak amacıyla anlık \bar{i}_{Kd} akım bileşenine ilave edilmektedir. Denklem 2’de verilen ters çevrim matrisi “ T^{-1} ” ve PLL ile üretilen ωt kullanarak Denklem 6’da verildiği gibi referans filtre akımları i'_{Ka} , i'_{Kb} ve i'_{Kc} üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i'_{Ka} \\ i'_{Kb} \\ i'_{Kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{Kd} \\ i_{Kq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Böylece 3-fazlı 4-telli sistemlerde doğrusal olmayan yükün ürettiği nötr akımını, harmonikleri ve reaktif güç kompanseasyonu yapacak referans kaynak akımları (i'_{K0} , i'_{Ka} ve $i'_{K\beta}$) elde edilmektedir. PAGF denetim algoritması tarafından üretilen referans kaynak akımları (i'_{Ka} , i'_{Kb} ve i'_{Kc}) kaynak hat akımları (i_{Ka} , i_{Kb} ve i_{Kc}) ile karşılaştırılmakta ve hysteresis bant akım denetleyici tekniği kullanılarak anahtarlar sinyalleri üretilmektedir.

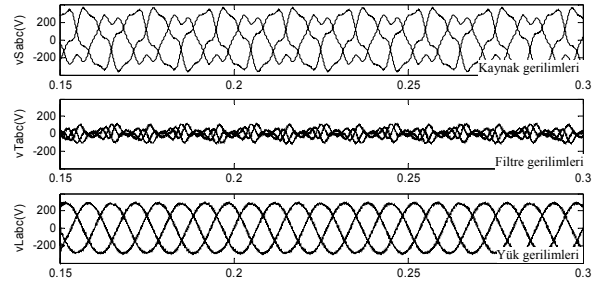


Şekil 7. SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması simülasyon blok şeması
(The proposed SRF based UPQC control algorithm simulation block diagram)

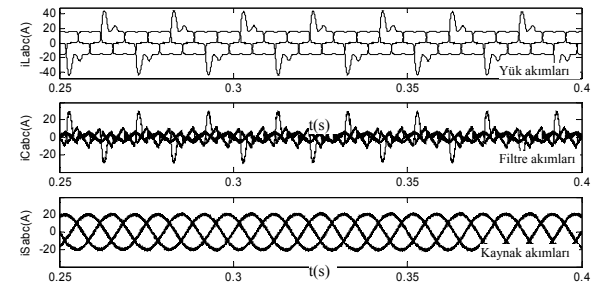
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Bu bölümde, geliştirilen BGKD denetim algoritmasının simülasyon çalışmaları verilmektedir. Tablo 2'de simülasyonu yapılan sistem parametreleri verilmektedir. Simülasyon, BGKD öncesi ve sonrası olmak üzere iki aşamalı gerçekleştirilmektedir. Ayrıca sistemin dinamik cevabını test etmek üzere %100 yük artışı da yapılmaktadır. BGKD devrede iken yük değişimi yapılarak sistemin dinamik cevabı test edilmektedir. Dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz yük akımı durumu ayrı olarak test edilmektedir. Simülasyonlarda geliştirilen ve Şekil 7'de verilen BGKD denetim algoritması ile kabul edilebilir seviyede sonuçlar elde edilmiştir. BGKD denetim algoritması Matlab/Simulink ortamında simülasyonu yapılan, dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimi düzeltimi simülasyon sonucu Şekil 8'da, dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımları düzeltimi simülasyon sonucu Şekil 9'da, nötr akımı kompanzasyonu simülasyon sonucu Şekil 10'de ve reaktif güç kompanzasyonu simülasyon sonucu Şekil 11'de görülmektedir. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisinin dinamik cevabına ait simülasyon sonuçları Şekil 12'de (a) Yük gerilimleri, (b) trafo gerilimleri, (c) yük akımları, (d) kaynak akımları, (e) filtre akımları, (f) kaynak nötr akımı, (g) aktif güç, (h) reaktif güç, (i) kaynak akımı ve yük gerilimi, (k) V_{DA} bara gerilimi değişimi görülmektedir. BGKD devreye girmeden önceki, devreye girdikten sonraki durum ve % 50 yük değişiminde elde edilen dinamik cevap oldukça iyi görülmektedir.

Simülasyon sonuçlarında da görüldüğü gibi BGKD ile harmonikli yük akımları kaynak tarafına sinüsoidal olarak iletilmekte, yük tarafında görülen gerilim harmonikleri ve nötr akımı yok edilmekte ve reaktif güç kompanzasyonu başarılı biçimde gerçekleştirilmektedir.

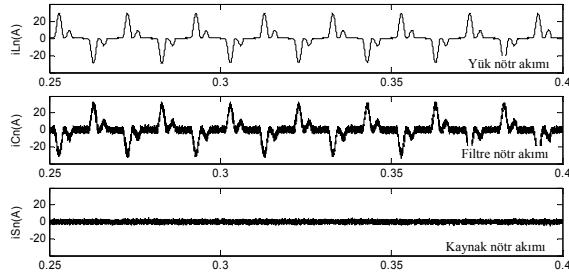


Şekil 8. Dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimi düzeltimi simülasyon sonucu (The simulation result for unbalanced and harmonic source voltages)

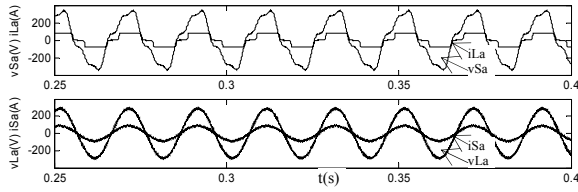


Şekil 9. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımları düzeltimi simülasyon sonucu (The simulation result for unbalanced and nonlinear load currents)

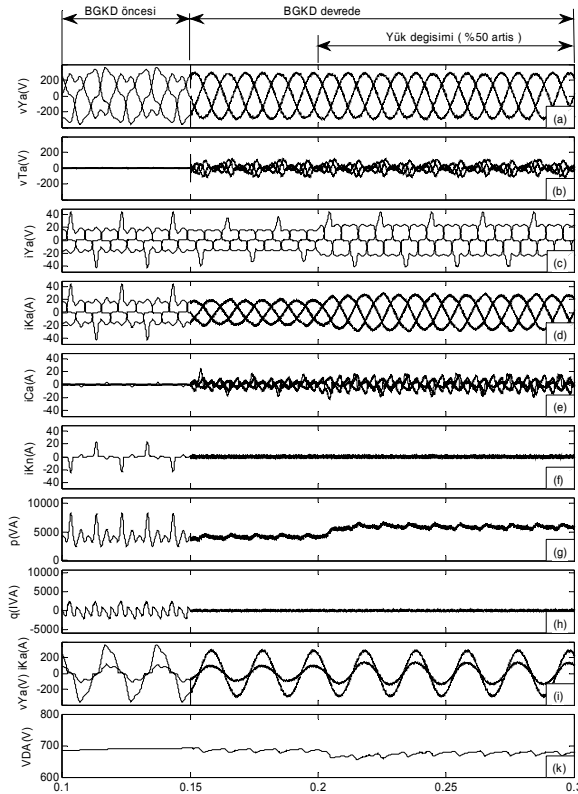
Dengesiz yük akımı durumunda sistem oldukça hızlı cevap vermekte, yük akımlarındaki dengesizlik ve harmonikler başarıyla giderilmektedir.



Şekil 10. Nötr akımı kompanzasyonu simülasyon sonucu (Neutral current compensation simulation results)



Şekil 11. Reaktif güç kompanzasyonu simülasyon sonucu (Reactive power compensation simulation results)



Şekil 12. (a) Yük gerilimleri, (b) trafo gerilimleri, (c) yük akımları, (d) kaynak akımları, (e) filtre akımları, (f) kaynak nötr akımı, (g) aktif güç, (h) reaktif güç, (i) kaynak akımı ve yük gerilimi, (k) V_{DA} bara gerilimi değişimleri ((a) load voltages, (b) transformer voltages, (c) load currents, (d) source currents, (e) filter currents, (f) source neutral current, (g) active power, (h) reactive power, (i) source current and load voltage, (k) V_{DC} link voltage)

Tablo 2. BGKD Simülasyon sistem parametreleri (UPQC simulation system parameters)

Parametreler		Değeri	
Kaynak	Gerilimi	V_{Kabc}	380V _{rms}
	Frekans	f	50 Hz
	Direnci	R_{Kabc}	10 mΩ
	Empedansı	L_{Kabc}	0,1 mH
Yük	3-Fazlı Hat Reaktörü	L_{Yabc}	2 mH
	1-Fazlı Hat Reaktörü	L_{Ya1}	1 mH
	3-Fazlı DA Endüktansı	L_{da3}	10 mH
	3-Fazlı DA Direnci	R_{da3}	30 Ω
	1-Fazlı DA Direnci	R_{da1}	87,5 Ω
	1-Fazlı DA Kondansatörü	C_{da1}	240 μF
DA Bara	Gerilimi	V_{DA}	700 V
	Kondansatör1	C_1	2200 μF
	Kondansatör2	C_2	2200 μF
PAGF	AA Hat Endüktansı	L_{Cabc}	3,5 mH
	Filtre Direnci	R_{Cabc}	5 Ω
	Filtre Kondansatörü	C_{Cabc}	10 μF
	Anahtarlama Frekansı	f_{pwm}	~15 kHz
	Ön Şarj Dirençleri	R_{sarj}	10 Ω
	Histerisiz Bant	HB	1 A
SAGF	AA Hat Endüktansı	L_{Tabc}	1,5 mH
	Filtre Direnci	R_{Tabc}	5 Ω
	Filtre Kondansatörü	C_{Tabc}	18 μF
	Anahtarlama Frekansı	f_{pwm}	~18 kHz
	1-Fazlı Seri Transformatörler	S	5,4 kVA
		Oran	1/3

Tablo 3. Ortak bağlantı noktasında akım ve gerilimlerin THD seviyeleri simülasyon sonuçları (Simulation results and THD levels of voltage and current waveforms at the PCC)

		BGKD Öncesi		BGKD Devrede	
		Akımlar (A)	Gerilimler (V)	Akımlar (A)	Gerilimler (V)
THD (%)	fazlar				
	A	31,2	20,2	3,0	1,4
	B	31,7	17,7	3,1	1,4
	C	29,9	19,7	3,3	1,3

5. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

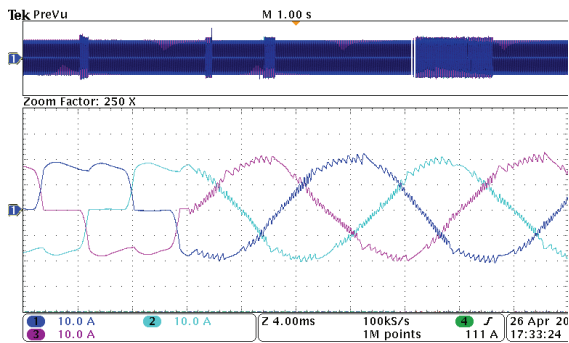
BGKD laboratuvar düzeneğinin fotoğrafı Şekil 13'de verilmektedir. BGKD deneysel düzeneğinde paralel aktif filtre, seri aktif filtre ve sistem parametrelerini denetlemek üzere üç adet DSP kartı kullanılmaktadır. DC bara gerilimi 700V seviyesinde iki adet seri bağlı 2200 uF kondansatör kullanılmıştır. Yük tarafında üç fazlı ve tek fazlı köprü diyotlu doğrultucular kullanılmaktadır. Deneysel çalışma parametreleri Tablo 2'de verilen simülasyon parametreleri ile yaklaşık aynı seçilmiştir. Kaynak ve yük gerilimleri LEM LV 25P, kaynak akımları LEM LA 55P/SP1 alan etkili algılayıcılarla ölçülmektedir. Seri ve paralel aktif filtre güç katında SEMIX 101GD128Ds IGBT

modülleri kullanılmaktadır. Bu IGBT blokları, CONCEPT 6SD106EI ve SEMIKRON SKHI 61 IGBT sürücülerini ile anahtarlanmaktadır. Her iki IGBT sürücüsü aşırı akım ve kısa devre koruma ve giriş-çıkış arasında elektriksel yalıtım özelliklerine sahiptir. Denetim algoritması TMS320F28335 DSP yongaları kullanılarak sağlanmaktadır.

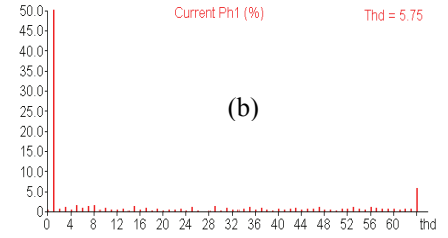
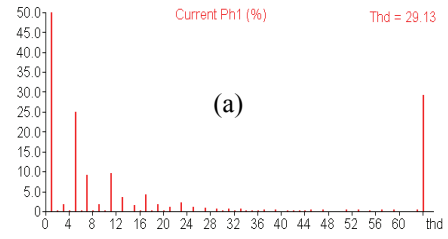
Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen kaynak akımının filtre öncesi ve sonrası deneysel sonuçları Şekil 14'de, kaynak akımı filtre öncesi ve filtre sonrası harmonik dağılımı Şekil 15'de, filtre öncesi ve sonrası kaynak akımı ve nötr akım kompanzasyonu Şekil 16'da görülmektedir. Deneysel uygulama sonuçları incelendiğinde kaynak akımında görülen harmoniklerin ve dengesizliklerin giderildiği açıkça görülmektedir. Şekil 17'de yük değişimi öncesi ve sonrası DC hat gerilimi ve kaynak akımı değişimi görülmektedir. Şekil 18'de filtre çalışmadan önce şebeke ve yük gerilimi değişimi, Şekil 19'da ise filtre öncesi ve sonrası tek faz ve üç faz yük gerilimi değişimi deneysel sonuçları görülmektedir. Yük gerilimi v_{Yabc} filtre öncesi ve filtre sonrası harmonik dağılımına ilişkin harmonik analizöründen alınan veriler Şekil 20'de verilmektedir. OBN'da, yük gerilimindeki harmoniklerin giderildiği deneysel sonuçlardan görülmektedir [25].



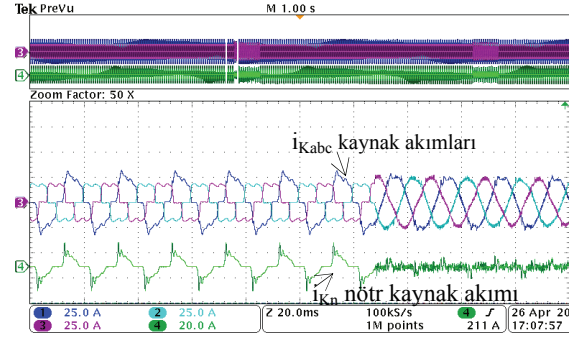
Şekil 13. BGKD deneysel düzeneğin fotoğrafı (UPQC experimental prototype photograph)



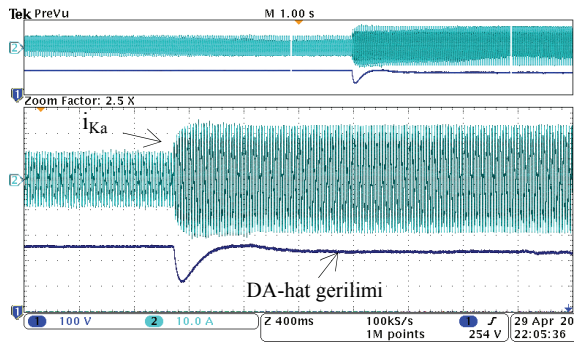
Şekil 14. Kaynak akımının (i_{Kabc}) filtre öncesi ve sonrası deneysel sonuçları (Source current experimental results before and after filter operation)



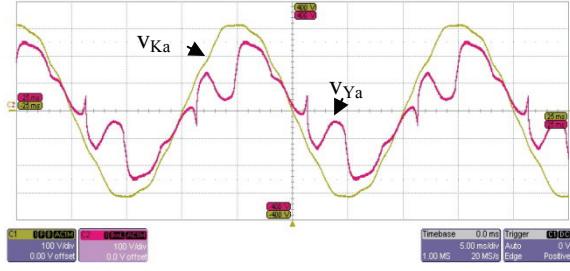
Şekil 15. Kaynak akımı i_{Sa} (a) filtre öncesi ve (b) filtre sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları (Experimental results for source current harmonic spectrum (a) before filter (b) after filter operation)



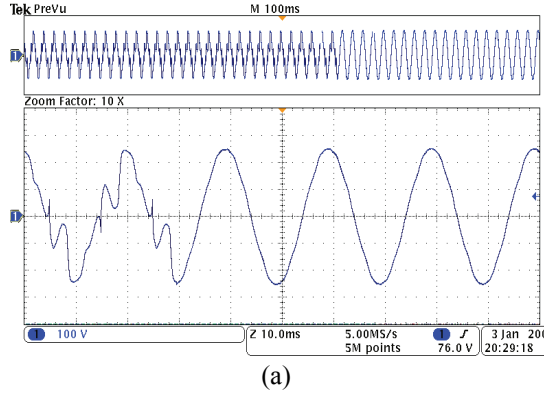
Şekil 16. Filtre öncesi ve sonrası kaynak akımı ve nötr akım kompanzasyonu deneysel sonuçları (experimental results for source and neutral current compensation before and after filter operation)



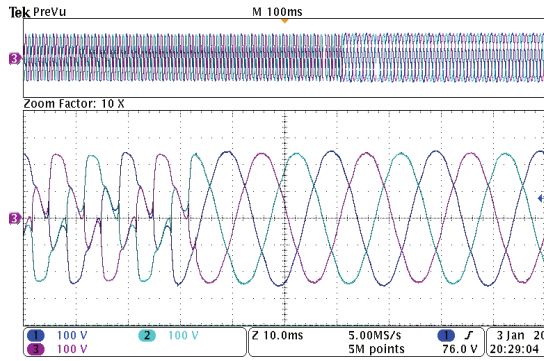
Şekil 17. Yük değişimi öncesi ve sonrası DA hat gerilimi ve kaynak akımı değişimi deneysel sonuçları (Experimental results for source and DC link voltage before and after load variation)



Şekil 18. Filtre devreye girmeden önce şebeke ve yük gerilimi değişimi deneysel sonuçları (Experimental results for source and load voltage before filter operation)



(a)

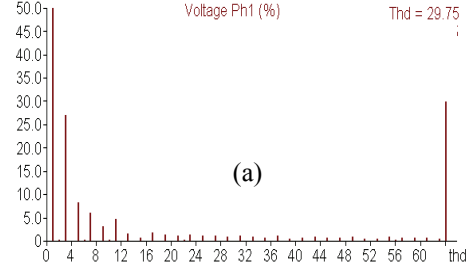


(b)

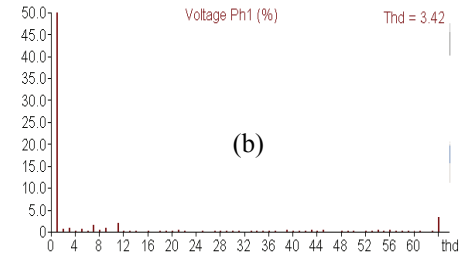
Şekil 19. Yük gerilimi v_{Yabc} filtre öncesi ve sonrası (a) tek fazlı, (b) üç fazlı deneysel sonuçlar (Experimental results for load voltages before and after filter operation (a) single phase – (b) three-phase)

Yukarıdaki deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar Tablo 4’de özetlenmekte, BGKD öncesi ve sonrası olmak üzere iki aşamalı olarak karşılaştırılmaktadır. BGKD devreye alındığında akım ve gerilim harmoniklerinin giderildiği görülmektedir. “a” fazı için akım Toplan Harmonik Dağılımı (THD) değeri % 29,1 den %5,7’ye, gerilim THD değeri % 29,7’den %3,42’ye düşürülmektedir.

3-fazlı 4-telli sistemlerde önerilen BGKD sisteminin, kararlı hal ve yük değişimi durumunda oldukça iyi sonuç verdiği ve güç kalitesinin iyileşmesini sağladığı deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 20. Yük gerilimi v_{Yabc} (a) filtre öncesi ve (b) filtre sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları (Experimental results for load voltage harmonic spectrum (a) before filter, (b) after filter operation)

Tablo 4. Ortak bağlantı noktasında akım ve gerilimlerin THD seviyeleri deneysel sonuçları (Experimental results and THD levels of voltage and current waveforms at the PCC)

		BGKD Öncesi		BGKD Devrede	
		Akımlar (A)	Gerilimler (V)	Akımlar (A)	Gerilimler (V)
THD (%)	fazlar				
	A	29,1	29,7	5,7	3,42
	B	28,4	30,6	5,5	4,11
C	29,5	30,2	5,7	3,91	

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 3-fazlı 4-telli sistemlerde, ortak bağlantı noktasında görülen gerilim dalgalanması, dengesizliği ve kırışmasının giderilmesinde ve aynı zamanda doğrusal olmayan yüklerin meydana getirdiği akım harmonikleri, dengesizlikleri ve nötr akım kompanzasyonunda kullanılan BGKD için geliştirilen denetim algoritmasının simülasyonu ve deneysel sonuçları verilmektedir. Simülasyon ve deneysel çalışmalar, BGKD devreye girmeden önce ve sonra olmak üzere iki aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. Sistemin dinamik cevabını test etmek üzere yük artışı da yapılmaktadır. Dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz yük akımı durumu ayrı test edilmektedir. Simülasyonlarda geliştirilen BGKD denetim algoritması ile kabul edilebilir seviyede sonuç elde edilmiştir. Ayrıca deneysel uygulama sonuçlarında ortak bağlantı noktasındaki akım ve gerilim harmonikleri ile dengesizliklerin azaltıldığı, nötr akım ve reaktif güç kompanzasyonunun başarılı biçimde yapıldığı açıkça görülmektedir.

7. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 108E083 nolu proje ve Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi hızlı destek projesi kapsamında desteklenmektedir.

8. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. Santoso, S. Beaty, H.W., **Electrical Power Systems Quality**, Second Edition, McGraw-Hill, ISBN 0- 07-138622-X, 1996.
- Fuchs, E.F., Masoum, M.A.S., **Power Quality in Electrical Machines and Power Systems**, Academic Press, ISBN: 0123695368, 2008.
- Grady, W.M., Santoso, S., "Understanding power system harmonics", **IEEE Power Engineering Review**, Volume: 21 Issue: 11, Page(s): 8- 11, Nov 2001.
- Gyugyi, L., Strycula, E., "Active AC Power Filters", **IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**, Chicago, USA, 529-535, 1976.
- Aredes, M., Heumann, K., Watanabe, E. H., "An universal active power line conditioner", **IEEE Trans. on Power Delivery**, Vol. 13, No.2, 545-551, Apr 1998,.
- Monteiro, L. F. C., Aredes, M., Neto, L. A. M., "A control strategy for unified power quality conditioner", **IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2003**, Vol. 1, 391-396, June 2003.
- Peng, F. Z., OTT, G. W., Adams, D. J., "Harmonic and Reactive Power Compensation on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire Systems", **IEEE Trans. on Power Electronics**, Vol. 13, No. 6, 1174-1181, 1998.
- Bhattacharya, S., Divan, D. M., Banerjee, B., "Synchronous Reference Frame Harmonic Isolator Using Series Active Filter", **Proc. 4th EPE, Florence**, Vol. 3, 30-35, 1991.
- Bhattacharya, S., Frank, T.M., Divan, D.M., Banerjee, B. "Active filter system implementation", **IEEE Industrial Application Magazine**, 47-63, September/October 1998.
- Bhattacharya, S., Divan, D., "Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system", **IEEE Industry Applications Conference**, 2531-2540, 1995.
- Marques, G.D., Pires, V. F., Malinowski, M., Kazmierkowski, M., "An Improved Synchronous Reference Frame Method for Active Filters" **EUROCON 2007, The International Conference on Computer as a Tool**, 2564-2569, September 2007.
- Bhattacharya, S., Frank, T. M., Divan, D.M., and Banerjee, B., "Parallel active filter system implementation and design issues for utility interface of adjustable speed drive systems", **Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96**, 1032-1039, 1996.
- Marques, G.D., "A comparison of active power filter control methods in unbalanced and non-sinusoidal conditions", **Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON APOS98**. Vol. 1, Issue 31, 444 – 449, 1998.
- Kaura, V., Blasko, V., "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 33, Issue 1, 58 – 63, 1997.
- Limongi, L.R., Bojoi, R., Pica, C., Profumo, F., Tenconi, A., "Analysis and Comparison of Phase Locked Loop Techniques for Grid Utility Applications", **Power Conversion Conference, Nagoya, PCC, APOS;07**, 674 – 681, 2007.
- Le Roux, A.D., Du Toit, J.A., Enslin, J.H.R., "Integrated active rectifier and power quality compensator with reduced current measurement", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 46, Issue 3, 504 – 511, 1999.
- Takeshita, T.; Matsui, N., "Control of active filters using source current detection", **The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2003. IECON APOS'03**, Vol.2, 1515 - 1520, 2003.
- Chatterjee, K.; Fernandes, B.G.; Dubey, G.K., "An instantaneous reactive volt-ampere compensator and harmonic suppressor system", **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 14, Issue 2, 381 – 392, 1999.
- Ozdemir, E., Ucar, M., Kesler, M., Kesler, Kale, M., "The Design and Implementation of a Shunt Active Power Filter based on Source Current Measurement", **The IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2007**, Antalya, Turkey, 608-613, 2007.
- Ozdemir, E., Ucar, M., Kesler, M. Kale, M., "A Simplified Control Algorithm for Shunt Active Power Filter Without Load and Filter Current Measurement", **The 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'06**, Paris, France, 2599-2604, 2006.
- Han, B. Bae, B., Kim, H., Baek, S., "Combined Operation of Unified Power-Quality Conditioner With Distributed Generation", **IEEE Transaction on Power Delivery**, Vol. 21, No. 1, 2006.
- Esfandiari, A., Parniani, M., Emadi, A., Mokhtari, H., "Application of the Unified Power Quality Conditioner for Mitigating Electric Arc Furnace Disturbances", **International Journal of Power and Energy Systems**, Vol. 28, No. 4, 363-371, 2008.
- Aredes, M., Akagi, H., Watanabe, E.H., Salgado, E.V., Encarnacao, L.F., "Comparisons Between the p-q and p-q-r Theories in Three-Phase Four-Wire Systems", **IEEE Transactions on Power**

- Electronics**, Vol. 24, No. 4, 924-933, April, 2009.
24. Kesler, M., Ozdemir, E., “A Novel Control Method for Unified Power Quality Conditioner (UPQC) Under Non-Ideal Mains Voltage and Unbalanced Load Conditions”, **IEEE APEC 2010 The Applied Power Electronics Conference and Exposition**, 374-379, 2010.
25. Kesler M., **Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisinin Senkron Referans Yapı Tabanlı Uygulama Tasarımı ve Analizi**, Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.

