

BİR FAZLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ İÇİN SENSÖRSÜZ DA GERİLİM KONTROLÜ

İlhami ÇOLAK, Orhan KAPLAN

Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü, Ankara.

Gazi Elektrik Makineleri ve Enerji Kontrol (GEMEC) Grubu

icolak@gazi.edu.tr, okaplan@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 18.05.2010; Kabul/Accepted: 22.10.2010)

ÖZET

Bu çalışmada, doğrusal olmayan yüklerin sebep olduğu güç kalitesi problemlerini çözmek amacıyla kullanılan paralel aktif güç filtrelerinde, DA kondansatör gerilimini regüle edebilmek için yeni bir kontrol teorisi önerilmiştir. Filtre kayıplarının kaynaktan karşılanması ve bu sayede daha etkili harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu yapılabilmesi için eviricinin DA kondansatör geriliminin kontrol edilmesi gerekmektedir. Geliştirilen kontrol algoritmasında önceki çalışmalardan farklı olarak filtrenin DA kondansatör gerilimini ölçmek için bir gerilim sensörü kullanılmamaktadır. Bunun yerine temel frekansta filtrenin referans kompanzasyon akımı ile gerçek kompanzasyon akımı arasındaki fark göz önünde bulundurularak, DA kondansatör gerilimi regüle edilmiştir. Bu sayede geçici durumda yaklaşık üç periyotta kaynak ile yük arasındaki güç dengesi sağlanmıştır. Sürekli durumda ise kaynaktan çekilen gücün doğrusal olmayan yükün aktif güç bileşeni ile filtrenin kayıplarının toplamına eşit olması sağlanmıştır. Gerçekleştirilen benzetim ve uygulama çalışmaları önerilen kontrol tekniğinin kolay yapısını, etkinliğini ve maliyetinin önceki sistemlerden daha düşük olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Aktif güç filtresi, harmonik, reaktif güç kompanzasyonu, DA gerilim kontrolü.

SENSORLESS DC VOLTAGE CONTROL FOR A SINGLE PHASE ACTIVE FILTER

ABSTRACT

In this study, a new control theory has been proposed to regulate DC bus voltage of shunt active power filters used to solve the power quality problems caused by nonlinear loads in power systems. DC bus voltage of the filter must be controlled to supply the power losses of filter from the grid, providing that more effective filtering and reactive power compensation are obtained. The DC bus capacitor voltage of filter to measure voltage sensor in the algorithm developed has not been used unlike previous studies. Instead of this, DC bus voltage has been regulated by considering difference between reference compensation current and real compensation current of the filter at fundamental frequency. Experimental and simulation studies performed have indicated the simple structure, effectiveness of the proposed control theory and the low cost unlike others studies.

Keywords: Active power filter, harmonic, reactive power compensation, DC voltage control.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda güç sistemlerindeki güç elektroniği kontrollü doğrusal olmayan yüklerin kullanımının artması, kaynak akımında harmonik bileşenlere ve güç katsayısının düşmesine sebep olmuştur. Harmonikler ve düşük güç katsayısı dağıtım sistemlerinde birçok probleme yol açarlar [1-4]. Güç kalitesi problemlerini çözümlenmede kurulum masraflarının ucuz olması, karmaşık matematiksel

hesaplar içermemesi, reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtrelemeyi birlikte yapabilmesi sebebiyle bobin ve kapasitörden oluşan pasif filtreler yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Ancak pasif filtreler güç sistemlerine yukarıda sayılan avantajların yanında sadece ayarlandığı frekans değerindeki harmonikleri filtrelemeleri, rezonansa sebep olabilmeleri ve boyutlarının büyük oluşu gibi bir takım dezavantajlarda getirmektedir [6].

Pasif filtrelerin dezavantajlarını ortadan kaldırabilmek için geliştirilen ve aktif güç filtresi olarak bilinen çalışmalar ilk olarak 1970'li yıllarda başlamıştır [7]. Günümüzde seri, paralel, hibrit ve birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyicisi gibi farklı aktif güç filtreleri topolojileri, güç kalitesi problemlerinin büyük çoğunluğuna çözüm getirmektedirler [5]. Paralel aktif güç filtreleri genellikle akım harmoniklerini filtrelemek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak amacıyla güç sistemlerinde kullanılmaktadır.

Literatürde paralel aktif güç filtrelerinin bir fazlı ve üç fazlı sistemlerde kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır [8-19]. Referans kompanzasyon akımını belirleme, akım kontrolü ve DA kondansatör gerilim kontrolü yapılan paralel aktif güç filtresi çalışmalarının başlıca konularıdır. H. Akagi ve ark. tarafından üç fazlı sistemler için önerilen ani güç teorisi veya bilinen diğer adıyla p-q teori [8], yanıt süresinin hızlı olması ve karmaşık hesaplamalar gerektirmemesi sebebiyle referans kompanzasyon akımı üretmek için üç fazlı paralel aktif güç filtresi çalışmalarında yoğun olarak kullanılmıştır. Sadece üç fazlı sistemlerle sınırlandırılan bu teoriyi, Lui ve ark. geliştirerek seri aktif güç filtresi ve paralel pasif filtreden oluşan bir fazlı hibrit güç filtresinde kullanmışlardır [9]. Haque [10], bir faz p-q kontrol teorisini üç fazlı paralel aktif güç filtresinin denetiminde kullanmıştır. Çalışmada bir faz p-q teorisinin üç fazlı sistemlerde, yük akımlarında veya gerilimlerinde dengesizlik olduğu durumlarda orijinal p-q kontrol teorisinden daha etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Khadkikar ve ark. [11], kaynak geriliminde bozukluk olan sistemlerde bir faz p-q kontrol teorisinin kullanımını göstermişlerdir. Çalışmada kaynak akımındaki toplam harmonik bozunumu kaynak geriliminde bozukluk olan sistemlerde (THD) %27,2'den %16,2'ye düşürülebilmektedir. Ancak bu THD değeri akım için belirlenen standartlara uygun değildir [20]. H.-L. Jou ve ark. bir faz paralel aktif güç filtrelerinde referans kompanzasyon akımını hesaplamak için sinüs çarpım tekniğini göstermişlerdir [12]. Geliştirilen kontrol algoritması kolay yapısı ve etkili sonuçlar vermesinin yanında, referans kompanzasyon akımını hesaplanmasında yarım sayıklık bir gecikmeye neden olmuştur [13]. C.Y. Hsu ve ark. [14] yaptıkları çalışmada bir fazlı paralel aktif güç filtresinin etkinliğini artırabilmek için filtrenin DA kondansatör gerilimini regüle etmişlerdir. Çalışmada enerji dengesi prensibi kullanılarak filtrenin kayıplarının kaynaktan karşılanması sağlanmıştır. Bölüt V. ve ark. [15] paralel aktif güç filtrelerinde DA kondansatör geriliminin kontrolünde adaptif bulanık mantık yöntemlerini kullanarak klasik PI denetleyicili sistemlerle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda klasik PI denetleyici kullanılarak yapılan sistemde kaynak akımının THD değeri adaptif bulanık mantık yöntemleri kullanılan sistemden daha küçük olmasına rağmen daha yavaş tepki verdiği gözlemlenmiştir.

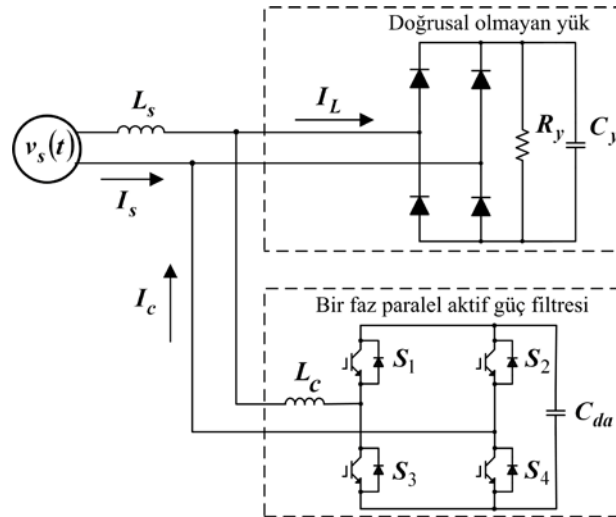
Buso S. ve ark. yaptıkları çalışmada paralel aktif güç filtrelerinde kullanılan histersiz, deadbeat ve lineer akım kontrol tekniklerini incelemişlerdir [16]. Çalışma sonunda histersiz akım kontrol tekniğinin kaynak akımının THD değerini lineer ve deadbeat kontrolden daha aza indirdiği gösterilmiştir. Özdemir Ş. ve Kuşdoğan Ş. üç fazlı paralel aktif güç filtresinde tepe kaynak akımı tekniği ile ani güç teorisini karşılaştırmışlardır [17]. Gerçekleştirdikleri benzetim çalışmasında tepe kaynak akımının kullanıldığı sistemin daha etkili bir filtreleme yaptığı belirlenmiştir. Zhou L. ve Li Z. bir faz paralel aktif güç filtrelerinde referans kompanzasyon akımını hesaplamak için yeni bir kontrol teorisi göstermişlerdir [18]. Geliştirilen kontrol algoritmasında başlangıç değerinin seçimi, referans kompanzasyon akımının hesaplanması için geçen süreyi etkilemiştir.

Önceki paralel aktif güç filtresi çalışmalarında DA kondansatör gerilimini regüle edebilmek için genellikle DA kondansatör gerilim bilgisi sensör yardımıyla ölçülüp bir PI denetleyicide belirlenen referans değerinde tutulmuştur. Bu çalışmada bir fazlı paralel aktif güç filtrelerinde DA kondansatör gerilimini regüle etmek için geliştirilen yeni bir kontrol tekniği gösterilmiştir. Önerilen kontrol tekniğinde referans kompanzasyon akımı temel frekans bileşeni ile gerçek kompanzasyon akımı temel frekans bileşeni arasındaki fark bir PI denetleyicide kontrol edilmiştir. Klasik sistemlerde DA kondansatör gerilimini belirlemek için kullanılan gerilim sensörünün yeni algoritmada kullanılmaması maliyeti düşürmektedir. Buna ilaveten filtrenin DA taraf geriliminin referans değerini belirlemek için yapılan hesaplamaların geliştirilen teknikte kullanılmaması yeni kontrol tekniğinin kolay yapısını göstermektedir. Çalışma sonunda ilave bir gerilim sensörü kullanılmadan filtrenin DA kondansatör geriliminin regüle edilmesi, filtrenin kayıplarının kaynaktan karşılanması ve etkili filtreleme performansının gösterilmesi hedeflenmektedir. Gerçekleştirilen benzetim ve uygulama çalışmaları önerilen tekniğin geçerliliğini doğrulamıştır.

2. SİSTEMİN TANIMLANMASI VE ÖNERİLEN KONTROL TEKNİĞİ (DEFINITION OF SYSTEM AND PROPOSED CONTROL TECHNIQUE)

2.1. Paralel Aktif Güç Filtresi (Shunt Active Power Filter)

Bir fazlı paralel aktif güç filtresi, tam köprü evirici, eviricinin DA tarafında enerji depolama elemanı olarak kullanılan kondansatör (Cda) ve eviriciyle güç sistemi arasına bağlanan hat endüktansından (Lc) meydana gelmektedir. Eviricinin AA tarafında kullanılan hat endüktansının görevi, filtre tarafından oluşturulan anahtarlama parazitlerini engellemektedir. Doğrusal olmayan bir yükün bağlı bulunduğu güç sistemine paralel aktif güç filtresinin bağlantısı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Bir faz paralel aktif güç filtresi temel bağlantı şeması (Fundamental connection schedule of single phase shunt active power filter)

Paralel aktif güç filtresinin çalışma prensibi temel olarak, kaynak akımının sinüsoidal olmasını sağlamak için doğrusal olmayan yük tarafından meydana getirilen akım harmoniklerine zıt yönde ve eşit genlikte bileşenler üreten akım kaynağı olarak düşünülebilir [21].

2.2. Referans Kompanzasyon Akımı Hesabı (Calculation of Reference Compensation Current)

Yapılan çalışmada filtrenin referans kompanzasyon akımını hesaplamak için kontrol yapısının kolaylığı ve önceki çalışmalarda etkin sonuçlar vermesi göz önünde bulundurularak sinüs çarpım tekniği kullanılmıştır [12]. Ancak kaynak geriliminin ideal sinüsoidal formda olmadığı güç sistemlerinde sinüs çarpım tekniği etkinliğini kaybetmektedir [13]. Bu sebeple, çalışmada kaynak geriliminin harmonik bileşenlerini elemek ve saf sinüsoidal formda kaynak gerilimi elde edebilmek için Şekil 2'de gösterilen faz-kilitleme-devresi (PLL) kullanılmıştır [11].

PLL'in birim $\sin(\omega t)$ çıkışı, temel frekansta kaynak geriliminin genliği ile çarpılarak Eşitlik 1'de gösterilen ideal ani gerilim denklemi elde edilir.

$$v_s(t) = v_s \sin(\omega t) \quad (1)$$

Güç sistemine doğrusal olmayan bir yük bağlandığında, kaynaktan çekilen akım Eşitlik 2'de ifade edildiği gibi temel bileşen ve harmoniklerden meydana gelmektedir [13].

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n \sin(n\omega t - \theta_n) \quad (2)$$

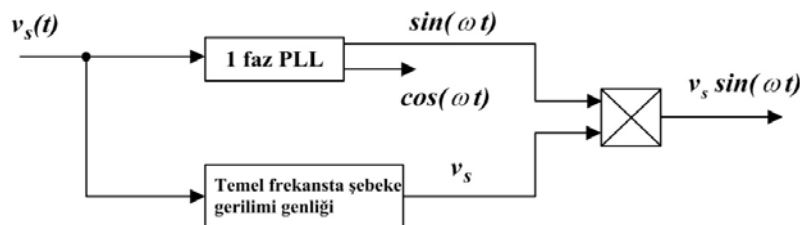
$$i_L(t) = i_1 \sin(\omega t - \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} i_n \sin(n\omega t - \theta_n)$$

Doğrusal olmayan yükün kaynaktan çektiği toplam ani güç ($p_L(t)$) Eşitlik 3'de ki gibi yazılabilir.

$$p_L(t) = v_s(t) \cdot i_L(t) \quad (3)$$

$$= v_s \cdot i_1 \sin^2(\omega t) \cdot \cos \theta_1 +$$

$$v_s \cdot i_1 \sin(\omega t) \cos(\omega t) \sin \theta_1 + \sum_{n=2}^{\infty} v_s \sin(\omega t) \cdot i_n \sin(n\omega t - \theta_n)$$



Şekil 2. İdeal kaynak gerilimi üretimi (Generation of ideal grid voltage)

Eşitlik 3'de birinci terim ($p_s^*(t)$) temel frekansta yük akımının referans aktif gücüdür ve kaynak tarafından karşılanmalıdır. İkinci terim temel frekansta yük akımının reaktif gücü, üçüncü terim ise harmoniklerin meydana getirdiği güçtür. Aktif güç filtresi reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtrelemeyi birlikte karşılıyorsa, ikinci ve üçüncü terim birleştirilerek toplam referans kompanzasyon gücü ($p_c^*(t)$) hesaplanabilir. Temel frekansta kaynaktan çekilecek referans ortalama aktif güç (P_s^*) Eşitlik 4'de gösterildiği gibi bulunan ani güç denkleminin 0-T arası integraline eşittir.

$$P_s^* = \frac{1}{T} \int_0^T p_L(t) dt \quad (4)$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T v_s i_1 \sin^2(\omega t) \cdot \cos \theta_1 dt + v_s i_1 \sin(\omega t) \cos(\omega t) \sin \theta_1 dt +$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=2}^{\infty} v_s \sin(\omega t) i_n \sin(n\omega t - \theta_n) dt$$

$$= \frac{1}{T} v_s i_1 \frac{1}{2} \cos \theta_1 [\cos(\omega t) - \sin(\omega t) \cos(\omega t)]_0^T +$$

$$\frac{1}{T} v_s i_1 \sin \theta_1 [-\frac{1}{2} \cos^2(\omega t)]_0^T + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{T} v_n i_n [0]$$

$$P_s^* = \frac{v_s i_1 \cos \theta_1}{2} = V_s I_1 \cos \theta_1$$

Doğrusal olmayan yükün kaynaktan talep ettiği aktif akım, Eşitlik 5'de gösterildiği gibi bulunabilir.

$$I_1 \cos \theta_1 = \frac{P_s^*}{V_s} \quad (5)$$

Hesaplanan aktif akım değerine filtrenin kayıplarını karşılamak için bir aktif bileşen (I_{da}) ilave edilerek kaynaktan çekilmesi gereken toplam referans aktif akım Eşitlik 6'da ki gibi hesaplanabilir.

$$I_s^* = I_1 \cos \theta_1 + I_{da} \quad (6)$$

Kaynaktan çekilen aktif akımın kaynak gerilimi ile aynı fazda ve saf sinüsoidal olduğu bilindiğine göre PLL devresinin çıkışından alınan birim sinüs sinyal ile referans aktif akımın genliği çarpılarak kaynaktan çekilen akımın ani değer denklemi Eşitlik 7'de gösterilmiştir.

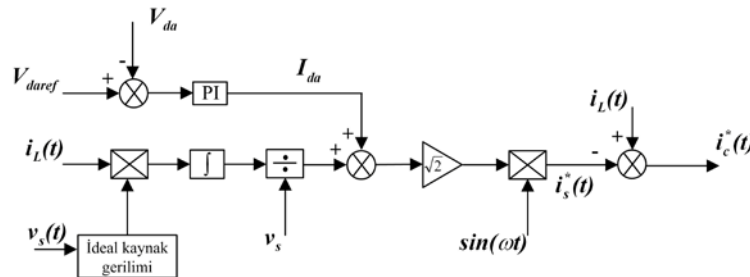
$$i_s^*(t) = \sqrt{2} \cdot I_s^* \cdot \sin(\omega t) \quad (7)$$

Son olarak, toplam yük akımından referans aktif akım bileşeni çıkartılarak, Eşitlik 8'de verilen paralel aktif güç filtresinin referans kompanzasyon akımı hesaplanabilir.

$$i_c^*(t) = i_L(t) - i_s^*(t) \quad (8)$$

2.3. Önerilen DA Gerilim Kontrolü (Proposed DC Voltage Control)

Filtrenin DA tarafında kullanılan kondansatörün iki ana amacı vardır. Bunlardan birincisi sürekli durumda DA bara gerilimini küçük salınımlarla sabit tutmak ve bu sayede filtrenin kayıplarının kaynaktan karşılanmasını sağlamaktır. Sürekli durumda kaynaktan çekilen aktif güç, doğrusal olmayan yükün talep ettiği güç ile paralel aktif güç filtresinin kayıplarının toplamına eşit olmalıdır [22]. Aksi halde filtreye meydana gelen kayıplar filtrenin DA kondansatör geriliminde salımlara ve filtre tarafından sisteme sağlanan kompanzasyon gücünün azalmasına yol açar [19]. DA kondansatörünün ikinci görevi geçici durumda kaynak ile doğrusal olmayan yük arasındaki aktif güç farkının karşılanmasıdır. Bu görevlerin yerine getirebilmesi için genellikle filtrenin DA tarafından gerilim sensörü yardımıyla alınan gerçek gerilim değeri, belirlenen referans gerilim değeri ile PI denetleyicide karşılaştırılarak DA kondansatör gerilimi regüle edilmiştir [11]. PI denetleyicinin çıkışı, algoritma içerisinde hesaplanan temel frekansta doğrusal olmayan yük tarafından çekilen aktif akım bileşenine eklenerek kaynaktan çekilmesi gereken toplam referans aktif akım genliği bulunmuştur. Daha sonra bu genlik değeri kaynak gerilimi ile aynı fazda olan birim sinüs sinyali ile çarpılarak filtrenin kayıplarının da dahil edildiği toplam kaynak akımı elde edilmiştir. Literatürde sıklıkla kullanılan bu kontrol algoritmasının blok diyagramı Şekil 3'deki gibi gösterilebilir.



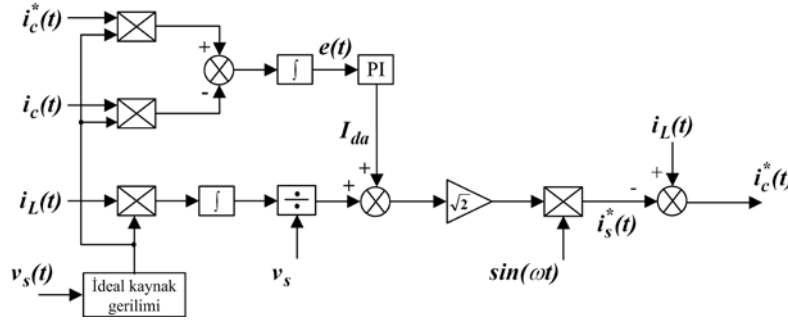
Şekil 3. Klasik kontrol algoritması (Conventional control algorithm)

Bu çalışmada bir fazlı paralel aktif güç filtresinin DA kondansatör gerilimini regüle edebilmek için temel frekansta referans kompanzasyon akımı ile gerçek kompanzasyon akımı arasındaki fark bir PI denetleyicide kontrol edilmiştir. Sürekli durumda filtre güç sistemine temel frekansta aktif akım bileşeni sağlamadığı göz önünde bulundurulduğunda, referans kompanzasyon akımı ile gerçek kompanzasyon akımı arasındaki fark değeri sıfır olmalıdır. Eşitlik 9'da ifade edilen bu ilişki filtrenin kayıpları sebebiyle sıfırdan farklı olacaktır. Önerilen kontrol teorisinde bu

fark PI denetleyicinin girişine uygulanan hata ($e(t)$) değeridir.

$$e(t) = \frac{1}{T} \int [v_s(t)i_c^*(t) - v_s(t)i_c(t)] dt \quad (9)$$

PI denetleyicinin çıkışından alınan değer ise filtrenin kayıpları sebebiyle kaynaktan çekmesi gereken aktif akım bileşenidir (I_{da}). Geliştirilen kontrol algoritmasının blok diyagramı Şekil 4'de gösterilmiştir.

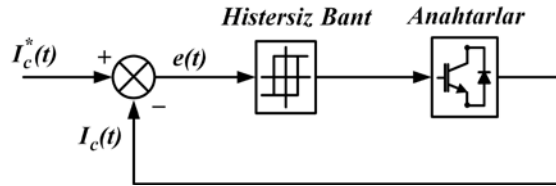


Şekil 4. Önerilen kontrol algoritması (Proposed control algorithm)

2.4. Akım Kontrolü (Current Control)

Aktif güç filtrelerinde anahtarlama sinyalleri üretmek için çeşitli akım kontrol teknikleri kullanılmıştır [16]. Şekil 5'de gösterilen referans kompanzasyon akımı ile gerçek kompanzasyon akımının bir histersiz bantta (hb) karşılaştırılarak anahtarlama sinyallerinin üretildiği histersiz kontrol, en çok kullanılan akım

kontrol tekniği olmuştur [17]. Bu çalışmada anahtar sürme sinyalleri histersiz kontrol kullanılarak elde edilmiştir. Histersiz kontrol tekniği dezavantajlarına karşın, kolay yapısı ile güvenilir sürme sinyalleri üretebilmektedir [16]. Yapılan benzetim ve uygulama çalışmalarında histersiz bant üst sınırı +0,1 histersiz bant alt sınırı -0,1 olarak seçilmiştir.



Şekil 5. Histersiz kontrol (Hysteresis control)

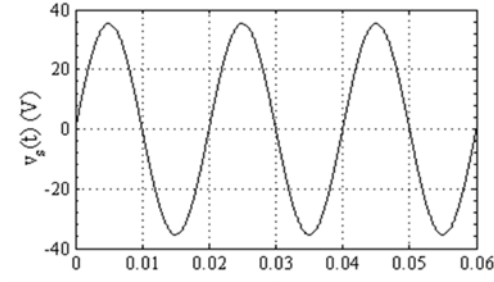
3. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Geliştirilen kontrol tekniğinin performansını değerlendirmek için Matlab/Simulink programı kullanılarak doğrusal olmayan bir yükün bağlı olduğu bir fazlı güç sistemi tasarlanmıştır. Benzetim sistemini oluşturan büyüklükler Tablo 1'de verilmiştir.

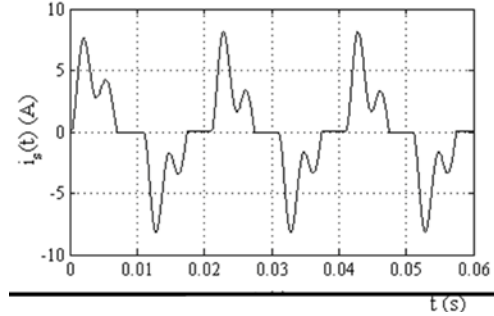
Filtre sisteme bağlanmadan önce kaynak gerilimi Şekil 6a'da, özellikle 3., 5. ve 7. harmoniklerin yoğun olarak gözlemlendiği doğrusal olmayan yükün şebekeden çektiği kaynak akımı Şekil 6b'de ve kaynak akımına ait harmonik analizi Şekil 6c'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Benzetim devresi parametreleri (Parameters of the simulation circuit)

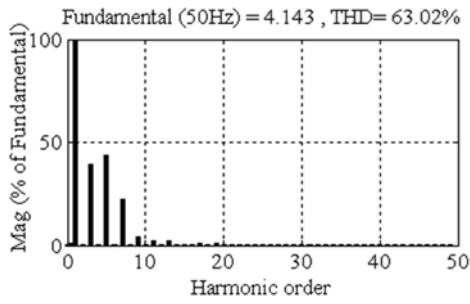
Faz gerilimi (rms), V_s	25 V
Kaynak frekansı, f	50 Hz
Kaynak endüktansı, L_s	1 mH
Yük direnci R_L	10 Ω
Yük kondansatörü C_L	330 μ F
Filtre hat endüktansı, L_c	1,2 mH
Filtre kondansatörü, C_{da}	680 μ F



(a) Kaynak gerilimi (Grid voltage)



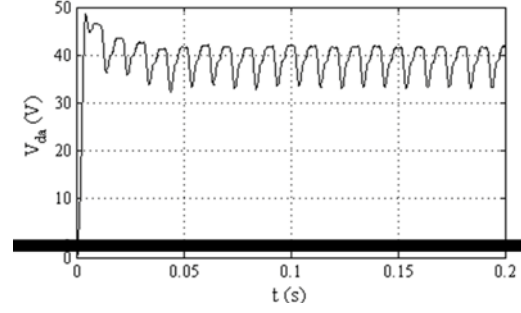
(b) Kaynak akımı (Source current)



(c) Kaynak akımı harmonik analizi (Harmonic spectrum of source current)

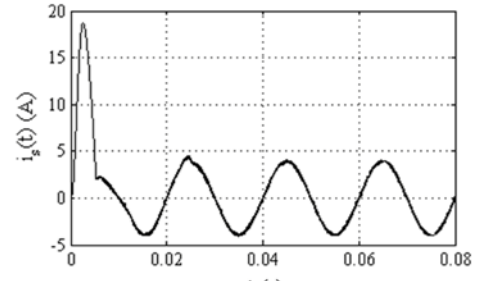
Şekil 6. Aktif güç filtresi sisteme bağlanmadan önce kaynak gerilimi, kaynak akımı ve kaynak akımı harmonik analizi (Grid voltage, source current and harmonic spectrum of source current before active power filter connection to the system)

Filtre güç sistemine bağlandıktan sonra geliştirilen kontrol algoritması sürekli durumda DA kondansatör gerilimini 41V ile 33V arasında regüle etmeyi başarmıştır. Geçici durumda ise kaynak ile yük arasındaki güç farkını karşılamak için DA bara gerilimi 41V'dan 49V'a kadar yükselmiştir. Önerilen kontrol algoritması denetiminde DA kondansatör geriliminin maksimum aşım miktarı %19, nihai gerilim değerine oturma zamanı yaklaşık 0.06s olarak belirlenmiştir. Filtrenin DA kondansatör geriliminin sürekli ve geçici durum davranışı Şekil 7'de verilmiştir.

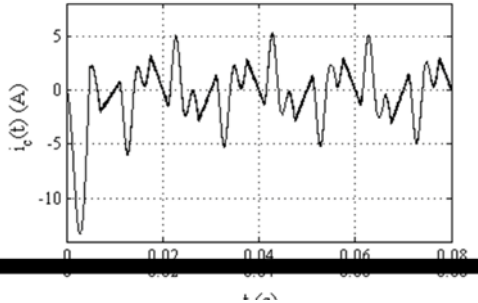


Şekil 7. DA kondansatör gerilimi (DC capacitor voltage)

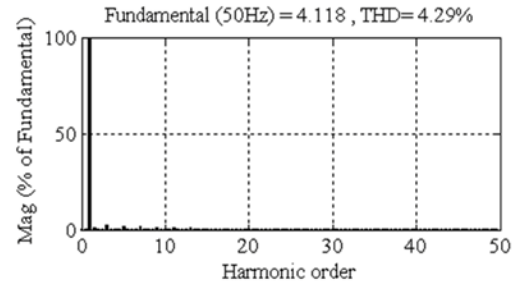
Filtre sisteme bağlandıktan sonra kaynak akımı THD değerini %63,02'den %4,29'a kadar düşürmüştür. Filtre sisteme bağlandıktan sonra ölçülen kaynak akımı Şekil 8a'da, kompanzasyon akımı 8b'de ve kaynak akımına ait harmonik analizi 8c'de gösterilmiştir.



(a) Kaynak akımı (Source current)

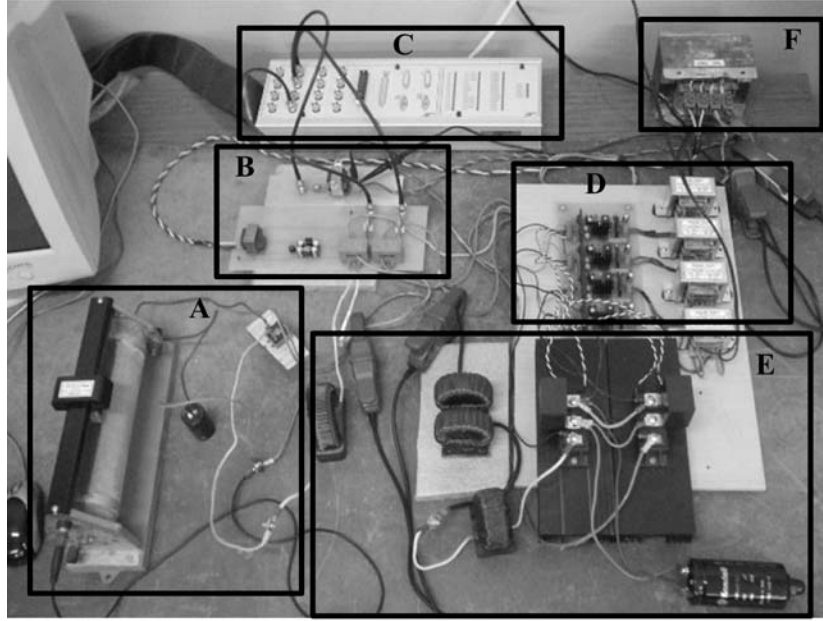


(b) Kompanzasyon akımı (Compensation current)



(c) Kaynak akımı harmonik analizi (Harmonic spectrum of source current)

Şekil 8. Aktif güç filtresi sisteme bağlandıktan sonra kaynak akımı, kompanzasyon akımı ve harmonik analizi (Source current, compensation current and harmonic spectrum of source current after connection of active power filter to system)



A: Doğrusal olmayan yük
B: Akım-gerilim ölçme kartları
C: DSP

D: Anahtar sürme devresi
E: Aktif filtre
F: Kaynak

Şekil 9. Deney seti (Experimental setup)

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI (EXPERIMENTAL STUDY)

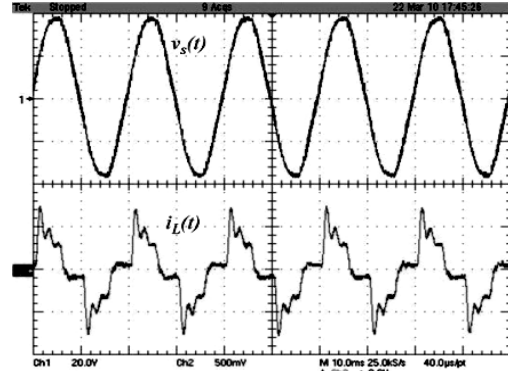
Benzetim çalışmasının sonuçlarının doğruluğunu onaylamak için Şekil 9'da gösterilen model prototip [23] dijital sinyal işlemci (DSP) kontrollü gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Prototip model parametreleri (Parameters of prototype model)

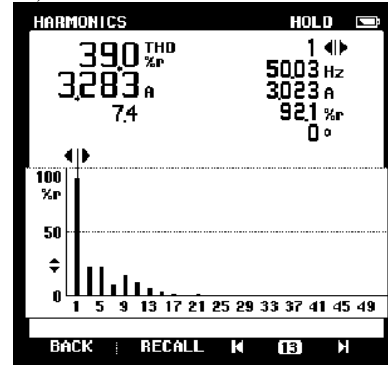
Faz gerilimi (rms), V_s	25 V
Kaynak frekansı, f	50 Hz
Kaynak endüktansı, L_s	1 mH
Yük direnci R_L	10 Ω
Yük kondansatörü C_L	330 μ F
Filtre hat endüktansı, L_c	1,2 mH
Filtre kondansatörü, C_{da}	680 μ F

Paralel aktif güç filtresi sisteme bağlanmadan önce kaynak gerilimi ve kaynak akımının dalga şekilleri 10a'da ve kaynak akımı harmonik analizi 10b'de verilmiştir. Özellikle 3., 5. ve 9. harmonikleri içeren kaynak akımı THD değeri %39 olarak ölçülmüştür.

Geliştirilen kontrol tekniğinin sürekli durumda DA kondansatör gerilimini 40V ile 32V arasında 8V'luk salınımla sabit tutulabildiği Şekil 11a'da gösterilmiştir. Bu sayede kaynaktan çekilen akım temel frekansta doğrusal olmayan yükün aktif akım bileşeni ile filtrenin kayıplarının toplamına eşit olmuştur. Filtrenin geçici durum tepkisi 11b'de gösterilmiştir. Önerilen kontrol tekniği geçici durumda DA kondansatör gerilimini %19 maksimum

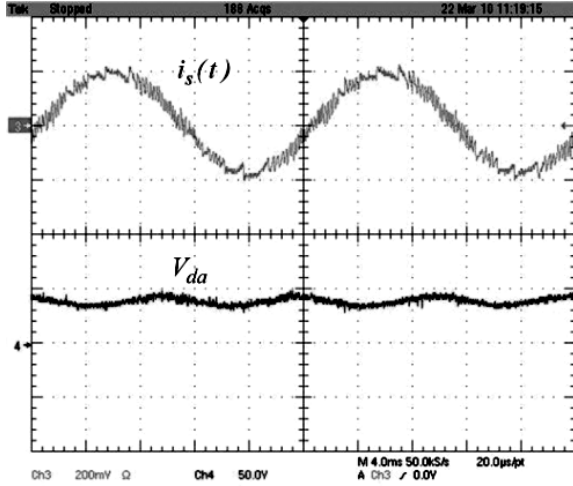


a) Kaynak gerilimi ve kaynak akımı (Grid voltage and source current)

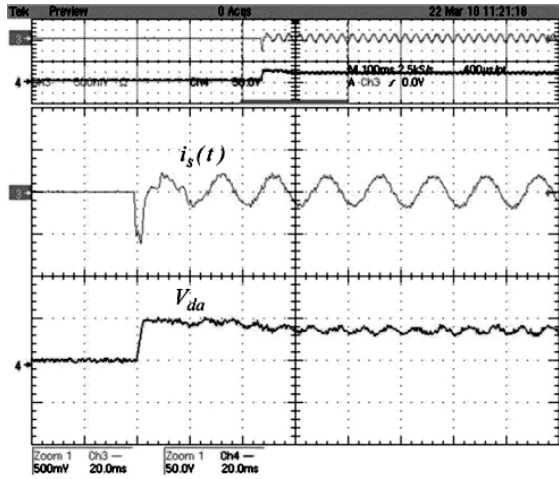


b) Kaynak akımı harmonik analizi (Harmonic spectrum of source current)

Şekil 10. Aktif güç filtresi sisteme bağlanmadan önce kaynak gerilimi, kaynak akımı ve kaynak akımı harmonik analizi (Grid voltage, source current and harmonic spectrum of source current before connecting active power filter to the system)



a) Sürekli durumda kaynak akımı ve DA kondansatör gerilimi (Source current and DC capacitor voltage at permanent condition)



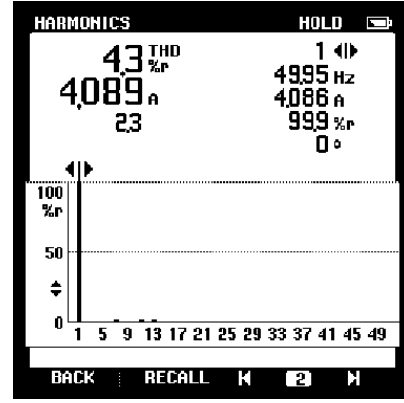
b) Geçici durumda kaynak akımı ve DA kondansatör gerilimi (Source current and DC capacitor voltage at transient condition)

Şekil 11. Önerilen kontrol tekniğinin sürekli ve geçici durum performansı (Performance of proposed control technique at permanent on transient conditions)

aşım ve yaklaşık 0.06s oturma süresi ile regüle edebilmiştir.

Şekil 12'de aktif filtre sisteme bağlandıktan sonra doğrusal olmayan yükün kaynak akımında meydana getirdiği THD analizi gösterilmiştir. Filtre sisteme bağlanmadan önce %39 olan bu THD değeri %4,3'e kadar düşürülmüştür. Bu değerlere göre aktif güç filtresinin harmonik filtreleme performansı %88,9 olarak ölçülmüştür.

Yapılan çalışmada, aktif filtre harmonik filtrelemenin yanında sisteminin reaktif güç kompanzasyonu da başarıyla gerçekleştirmiştir. Filtre sisteme bağlandıktan sonra Şekil 13a'da kaynak akımı ile kaynak gerilimi arasında faz farkının olmaması güç katsayısının yaklaşık olarak "1" olduğunu



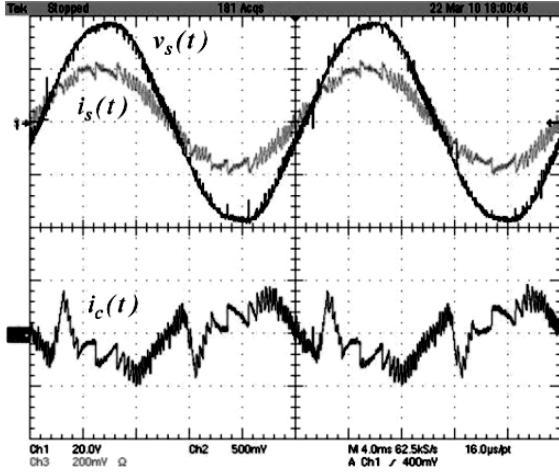
Şekil 12. Filtre sisteme bağlandıktan sonra kaynak akımı harmonik analizi (Harmonic spectrum of source current after connection of filter to the system)

göstermektedir. Bu sayede yükün talep ettiği akımın aktif bileşeni kaynak tarafından karşılanmakta reaktif bileşeni ise aktif filtre tarafından sağlanmaktadır. Şekil 13a'da filtrenin güç sistemine enjekte ettiği kompanzasyon akımı, kaynak akımı ve kaynak gerilimi verilmiştir. Şekil 13b'de ise 40V ile 32V arasında değişen DA kondansatör gerilimi gösterilmiştir.

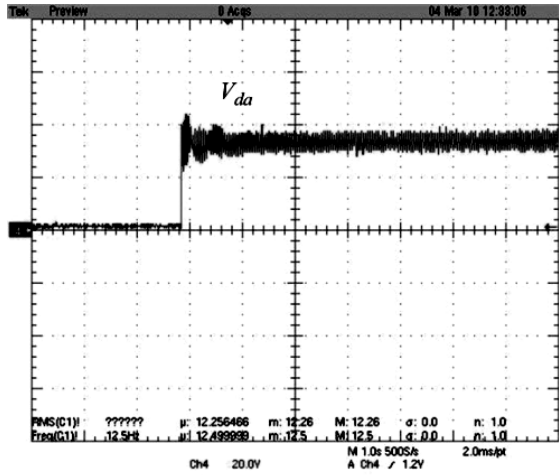
5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bir fazlı paralel aktif güç filtrelerinde, DA kondansatör gerilimini kontrol etmek için geliştirilen yeni bir kontrol tekniği gösterilmiştir. Yapılan benzetim ve uygulama çalışmaları önerilen kontrol tekniğinin sürekli durumda DA kondansatör gerilimini küçük salınımlarla sabit tutabildiğini ve filtrenin kayıplarının kaynaktan karşılanmasını sağladığını göstermiştir. Bu durum filtreleme performansının geliştirilmesini sağlamıştır. Geliştirilen kontrol tekniği, geçici durumda yük ile kaynak arasında meydana gelen güç farkını karşılayabilmek için kondansatör geriliminde meydana gelen değişimi 3 periyotluk bir sürede regüle etmiştir. Yapılan benzetim ve deneysel çalışmalarda güç sisteminin kaynak akımı THD değerinin %5'in altına düşürülmesi ve güç katsayısının yaklaşık olarak "1" olması geliştirilen kontrol tekniğinin etkinliğini göstermektedir. Literatürde diğer kontrol tekniklerinin kullanıldığı makaleler incelendiğinde yapılan çalışmanın harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu performansı açısından benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir.

Buna ilaveten, paralel aktif güç filtrelerinde DA kondansatör geriliminin kontrolünde kullanılan gerilim sensörünün kullanılmaması önerilen algoritmanın getirdiği bir yeniliktir ve önerilen algoritma sistem maliyetinin daha düşük olmasını sağlamaktadır. Ayrıca kontrol tekniğinde sadece temel frekansta gerçek kompanzasyon akımı ile referans kompanzasyon akımının kullanılması önerilen algoritmanın kolay yapısını göstermektedir.



a) Kaynak gerilimi, kaynak akımı ve kompanzasyon akımı (Grid voltage, source current and compensation current)



b) DA kondansatör gerilimi (DC capacitor voltage)

Şekil 13. Filtre sisteme bağlandıktan sonra kaynak gerilimi, DA kondansatör gerilimi, kaynak akımı ve kompanzasyon akımı (Grid voltage, source current, compensation current and DC capacitor voltage after active power filter connection to the system)

Ancak filtre sisteme ilk bağlandığında gerçek kompanzasyon akımı ile referans kompanzasyon akımının hesaplanmasında oluşan bir periyotluk gecikme geliştirilen kontrol tekniğinin bir dezavantajı olarak gösterilebilir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$v_s(t)$	kaynak gerilimi
v_s	kaynak gerilimi tepe değeri
V_s	kaynak gerilimi rms değeri
T	kaynak periyodu
θ_n	yük akımı n. harmonik faz açısı
θ_1	yük akımı temel bileşen faz açısı
i_n	yük akımı n. harmonik tepe değeri
i_1	yük akımı temel bileşen tepe değeri
I_1	yük akımı temel bileşen rms değeri

$i_L(t)$	yük akımı
$i_s(t)$	kaynak akımı
$i_c(t)$	kompanzasyon akımı
$i_c^*(t)$	kompanzasyon akımı referans değeri
$i_s^*(t)$	kaynak akımı referans değeri
I_s^*	referans kaynak akımı rms değeri
I_{da}	PI kontrolörün çıkışı
$p_L(t)$	ani güç değeri
$p_s^*(t)$	ani aktif güç referans değeri
$p_c^*(t)$	ani kompanzasyon gücü referans değeri
P_s^*	ortalama aktif güç referans değeri
P_s	ortalama aktif güç gerçek değeri
$e(t)$	hata değeri
hb	histersiz bant
V_{da}	DA kondansatör gerilim değeri
V_{daref}	DA kondansatör gerilimi referans değeri

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Singh, G.K., "Power System Harmonics Research: A Survey", **Euro. Trans. Electr. Power**, Cilt 19, No 1, 151-172, 2009.
2. Grady, W.M., Santoso, S., "Understanding Power System Harmonics", **IEEE Power Eng. Rev.**, Cilt 21, No 11, 8-11, 2001.
3. Massey, G.W., "Estimation Methods for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformer", **IEEE Trans. Industry Appl.**, Cilt 30, No 2, 485-489, 1994.
4. Bayındır, R., Kaplan, O., "PIC Denetimli Reaktif Güç Rölesi Tasarımı", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, Cilt 22, No 1, 47-56, 2007.
5. Singh, B., Al-Haddad, K., Chandra, A., "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", **IEEE Trans. Ind. Electron.**, Cilt 46, No 5, 960-971, 1999.
6. Rahmani, S., Al-Haddad, K., Kanaan, H.Y., "A Comparative Study of Shunt Hybrid and Shunt Active Power Filters for Single-Phase Applications: Simulation and Experimental Validation", **Math. Comput. Simulat.**, Cilt 71, No 4, 345-349, 2006.
7. Gyugyi, L., Strycula, E.C., "Active AC Power Filters", **IEEE Ind. Appl. Ann. Meeting**, Cilt 19-C, 529-535, 1976.
8. Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A., "Instantaneous Reactive Power Compensator Switching Devices without Energy Storage", **IEEE Trans. Ind. Appl.**, Cilt 20, No 3, 625-629, 1984.
9. Lui, J., Yang, J., Wang, Z., "A New Approach for Single-Phase Harmonic-Current Detecting and Its Application in a Hybrid Active Power Filter" **Proc. Ann. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON'99)**, San Jose, U.S.A, 849-854, 29 Kasım-3 Aralık 1999.

10. Haque, T.M., "Single-Phase pq Theory for Active Filters", **Proc. Annu. Conf. IEEE Compu. Communi. Contr. Power Engg. (TENCON'02)**, Cilt 3, 1941-1944, 28-31 Ekim 2002.
11. Khadkikar, V., Chandra, A., Singh, B.N., "Generalised Single-Phase p-q Theory for Active Power Filtering: Simulation and DSP-Based Experimental Investigation", **IET Power Electronics**, Cilt 2, No 1, 67-78, 2009.
12. Jou, H.L., Wu, J.C., Chu, H.Y., "New Single-Phase Active Power Filter", **IEE P-Elect. Pow. Appl.**, Cilt 141, No 3, 129-134 (1994).
13. Linash, P., Mahesh K.M., "Comparison of Single Phase Shunt Active Filter Algorithms", **IEEE Power India Conference**, New Delhi, 10-12 Nisan 2006.
14. Hsu, C.Y., Wu, H.Y., "A New Single Phase Active Power Filter with Energy-Storage Capacity", **IEE P-Elect. Pow. Appl.**, Cilt 143, No 1, 25-30, 1996.
15. Bölüt, V., Boğosyan, S., Gökaşan M., "Paralel Aktif Filtre Uygulamalarında Adaptif Bulanık Mantık Kontrol Yöntemlerinin Uygulanması", **İTÜ Müh. Der.**, Cilt 4, No 2, 105-115, 2005.
16. Buso, S., Melesani, L. and Mattavelli, P., "Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications", **IEEE Trans. Ind. Electron.**, Cilt 45, No 5, 722-729, 1998.
17. Özdemir, Ş., Kuşdoğan, Ş., "Doğrusal Olmayan Yüklerde Aktif Güç Filtresi ile Harmoniklerin Filtrelenmesi ve Reaktif Güç Kompanzasyonu", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, Cilt 20, No 2, 225-232, 2005.
18. Zhou, L., Li, Z., "A Novel Active Power Filter Based on the Least Compensation Current Control Method", **IEEE Trans. Power Electr.**, Cilt 15, No 4, 655-659, 2000.
19. Çolak, İ., Bayındır, R., Kaplan, O., "Simulation of the DC Capacitor Voltage Controlled Single Phase Shunt Active Power Filters for Power Quality Improvement", **G.U. J. Sci.**, Cilt 23, No 2, 177-186, 2010.
20. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, **IEEE Std. 519-1992**, New York 1993.
21. Chaoui, A., Gaubert, J-P., Krim, F., Rambault, L., "On the Design of Shunt Active Filter for Improving Power Quality", **IEEE International Symposium on Industrial Electronics, (ISIE2008)**, Cambridge, 31-37, 29 Haziran-2 Temmuz 2008.
22. Jain, S.K., Agrawal, P., Gupta H.O., "Fuzzy Logic Controlled Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement", **IEE P-Elect. Pow. Appl.**, Cilt 149, No 5, 317-328, 2002.
23. Çolak, İ., Kaplan, O., "DSP Denetimli Bir Faz Paralel Aktif Güç Filtresi Uygulaması", **EEBM 13. Ulusal Kongresi**, Ankara, 23-26 Aralık 2009.