

# AKIM KAYNAKLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ TASARIMI ve BENZETİM ÇALIŞMALARI

T. Kılınç, A. Terciyanlı

TÜBİTAK-Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, ODTÜ, 06531, ANKARA

[tulay.kilinc@uzay.tubitak.gov.tr](mailto:tulay.kilinc@uzay.tubitak.gov.tr)

## ÖZ

Doğrusal olmayan yüklerin sanayide kullanımının giderek artması birçok problemi de beraberinde getirmiştir. Bu yüklerin oluşturduğu başta akım harmonikleri olmak üzere güç kalitesini düşüren olumsuz etkiler, üretim aşamalarında kullanılan hassas ve modern endüstriyel yükleri olumsuz etkilemekte ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Akım harmoniklerinin olumsuz etkilerini ortada kaldırmak amacıyla pasif harmonik filtreleri yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu filtrelerin olumsuz yan etkileri ve düşük performansları, aktif güç filtrelerinin kullanımını ve önemini giderek artırmaktadır. Bu makalede akım harmoniklerini süzecek ve reaktif güç kompanzasyonu yapabilecek akım kaynaklı çevirgeç topolojisine dayalı paralel bağlı bir aktif güç filtresinin tasarımı ve Simpler V7.0 kullanılarak gerçekleştirilmiş benzetim çalışmalarına yer verilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal olmayan yük, harmonik, aktif güç filtresi, akım kaynaklı çevirgeç

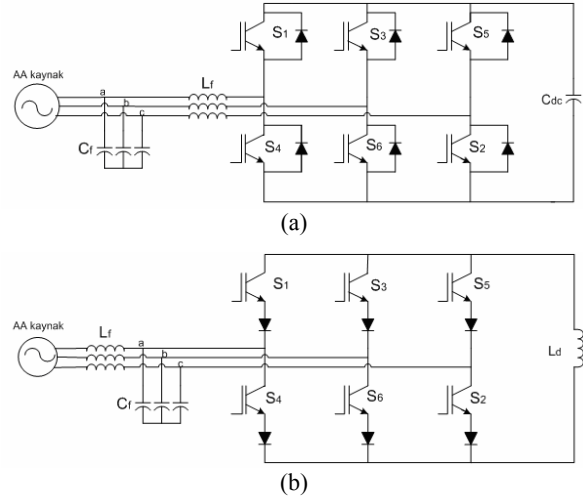
## I. GİRİŞ

Doğrusal olmayan yüklerin kullanımındaki artış, güç kalitesi problemlerinin ve bu problemlerin yol açtığı doğrudan ve dolaylı etkilerin daha çok görülmesini de beraberinde getirmiştir. Doğrusal olmayan yüklerin en belirgin olumsuz özelliklerinden biranesi şebekeye bastıkları akım harmonikleri olması sebebiyle, bu alanda yapılan çalışmalarda bu noktada ilgi yoğunlaşmıştır. Akım harmoniklerinin filtrelenmesi /süzülmesi ve bu harmoniklerden kaynaklı problemlerin bertaraf edilmesi için en çok kullanılan yöntem pasif filtre sistemleri olmuştur. Pasif filtre sistemleri kolay uygulanması ve yatırım maliyetlerinin görece düşük olması sebebiyle ilgi çekici olmakla birlikte; performanslarının sistem parametrelerine doğrudan bağlı ve sabit kompanzasyon yeteneklerinin olması ve paralel rezonans riski taşımaları sebebiyle uygulamalarda birçok problemle karşılaşmaktadır [1,2].

*Bu makalede sunulan çalışmalar, TÜBİTAK Kamu Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Program Kodu:1007) / 105G129 No.lu "Güç Kalitesi Milli Projesi" kapsamında yürütülmektedir.*

Bu nedenle, akım harmoniklerinin süzülmesi, reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu vb. birçok amaçla kullanılan aktif güç filtrelerinin, güç kalitesinin yükseltilmeye çalışıldığı uygulamalarda kullanımını artmaktadır [3,4].

Birçok yeteneği bulunan aktif güç filtrelerinin uygulamada kullanılacak (gerekli) özellikleri ise devre yapılarına, sisteme bağlantı şekillerine ve kontrol yöntemlerine göre şekillenmektedir. Çevirgeç yapıları dikkate alındığında, aktif güç filtreleri akım ve gerilim kaynaklı olmak üzere iki başlıkta değerlendirilebilir (Şekil-1). 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 .



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

Gerilim kaynaklı aktif güç filtreleri, özel olarak DA bağ kapasitörü ve DA bağ reaktörü açısından karşılaştırıldığında, yüksek verimlilikleri, düşük maliyetleri ve küçük fiziksel boyutları ile akım kaynaklı aktif güç filtrelerine üstünlük sağlarlar. Akım kaynaklı aktif güç filtreleri ise mükemmel akım kontrol kapasiteleri, hızlı tepki süreleri, kolay korunabilmeleri ve yüksek güvenilirlikleri bakımından gerilim kaynaklı aktif güç filtrelerinden üstündürler. Büyük kapasitelerde yüksek çalışma verimliliğine önem verildiğinden literatürdeki çalışmaların büyük

çoğunluğu gerilim kaynaklı aktif güç filtresinden bahsetmektedir. Fakat, kayıpsız DA reaktörlerin yapılabileceği süper iletkenler pratikte kullanılabilirse akım kaynaklı aktif güç filtreleri gelecek vaat edecektir [5].

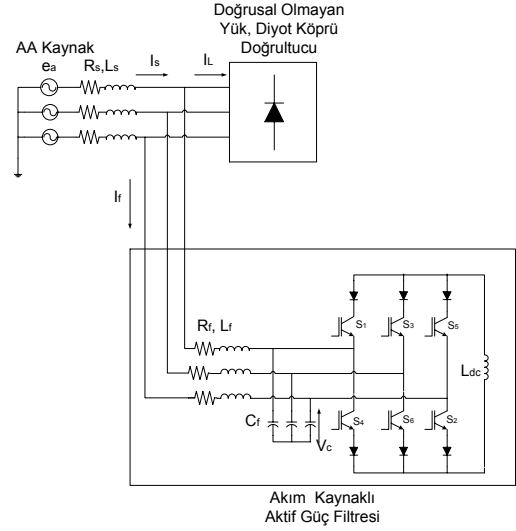
## II. SİSTEM TANIMI

Akım kaynaklı çevirgeç devre yapısına dayalı ve paralel bağlı bir aktif güç filtresi Şekil-2’de gösterilmektedir. Gerilim kaynaklı aktif güç filtrelerinde yarı-iletken anahtarlara anti-paralel diyotlar kullanılırken; akım kaynaklı devre yapısında bundan farklı olarak yarı-iletken anahtarlara seri diyot kullanılmaktadır. Yarı-iletken anahtar (IGBT, IGCT, GTO vb.) ve diyot beraber düşünüldüğünde, üç fazlı akım kaynaklı devre yapısı, tek yönlü akım taşıyabilen altı adet anahtardan oluşmaktadır. Devrede kullanılan seri diyotlar yardımı ile, yarı-iletken anahtarların her iki yönde gerilim tutabilmeleri sağlanmaktadır. DA bağ reaktöründeki akımın sürekliliğinin sağlanması için, akım kaynaklı devre yapısında üst gruptaki üç anahtardan bir tanesi ve alt gruptaki üç anahtardan bir tanesi her durumda devrede olmalıdır.

Aktif filtre tarafından üretilen harmonik bileşenlerin genliğini ve fazını etkilemeyecek şekilde, PWM (Pulse Width Modulation)’den kaynaklanan yüksek frekanslı akım bileşenlerini süzmek için ikinci dereceden alçak geçiren pasif filtre ( $L_f, C_f$ ) kullanılabilir. Aktif filtrede süzülecek harmoniklerin frekansının anahtarlama frekansına görece yaklaşması durumunda, pasif filtrenin rezonans frekansına yakın harmonikler bu filtre nedeniyle büyüyecektir (amplification). Bunu engellemek için çeşitli kontrol yöntemleri uygulanagelmekle birlikte; devrede bir sönümlendirme (damping) direnci kullanılması da mümkündür [6], [7]. Aktif güç filtresi, reaktif güç kompanzasyonu ve/veya akım harmoniklerinin süzülmesi gibi hangi amaçla kullanılırsa kullanılsın öncelikle kontrol sisteminin uygun akım ve/veya gerilim referanslarını oluşturması, ve daha sonra bu referansların uygun modülasyon yöntemleri kullanılarak ürettirilmesi gerekmektedir.

### i) Akım referansının üretilmesi

Bu çalışmada kompanzasyon referans akımlarını hesaplamak için senkron referans düzlem yöntemi (synchronous reference frame method) kullanılmıştır. Bu yöntemle  $\omega t$  ile dönen üç faz akım ve gerilim vektörleri d (direct) ve q (quadrature) vektörlerine dönüştürülmektedir. Öncelikle üç fazdan iki faza dönüştürülen akım-gerilim vektörleri, daha sonra şebeke gerilimlerine kilitlenmiş ve aynı  $\omega t$  hızı ile (senkron) dönen bir uzaya/düzleme taşınmaktadır. Böylece senkron hızda dönen d-q referans düzleminde, yük akımının temel bileşeni DA sinyale dönüşürken, harmonik bileşenlerin dönme hızları (frekansları) senkron hıza ve dönme yönüne göre kaymaktadır.



Şekil-2 Şönt bağlı akım kaynaklı aktif güç filtresi

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1)^*$$

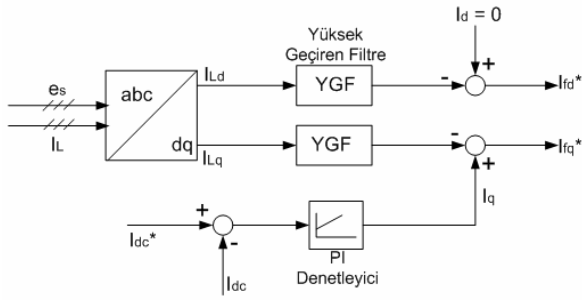
\*  $x$ , yerine göre gerilimi (V), veya akımı (I) temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) & -\sin(\omega_s t) \\ \sin(\omega_s t) & \cos(\omega_s t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sırasıyla, denklem (1) ve denklem (2), dönen üç faz vektörünü d-q düzlemine dönüştüren Clarke dönüşüm matrisini ve Park dönüşüm matrisini göstermektedir. Dönüşümler neticesinde elde edilen d-q bileşenler yüksek geçiren bir filtreden geçirilerek ana bileşen ayrıştırılmakta ve sonuç olarak filtrelenmek istenilen akım harmoniklerinin d-q bileşenleri elde edilmektedir. Bu vektörlere ters Park (denklem 3), ve ters Clarke (denklem 4) dönüşümleri uygulanarak abc düzleminde referans akımlar üretilmektedir. Şekil-3’te gösterildiği gibi, bununla birlikte, DA bağ reaktörü akımının sabit tutulabilmesi için bir PI kontrol döngüsü kullanılmakta, ve buradan elde edilen referans akımda yukarıda bulunan referans akımlara eklenmektedir. Aktif filtrenin reaktif güç kompanzasyonu da yapabilmesi için d-bileşeninin DA kısmının da referans olarak ters Park ve Clark dönüşümlerine sokulması gerekmektedir.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) & \sin(\omega_s t) \\ -\sin(\omega_s t) & \cos(\omega_s t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$



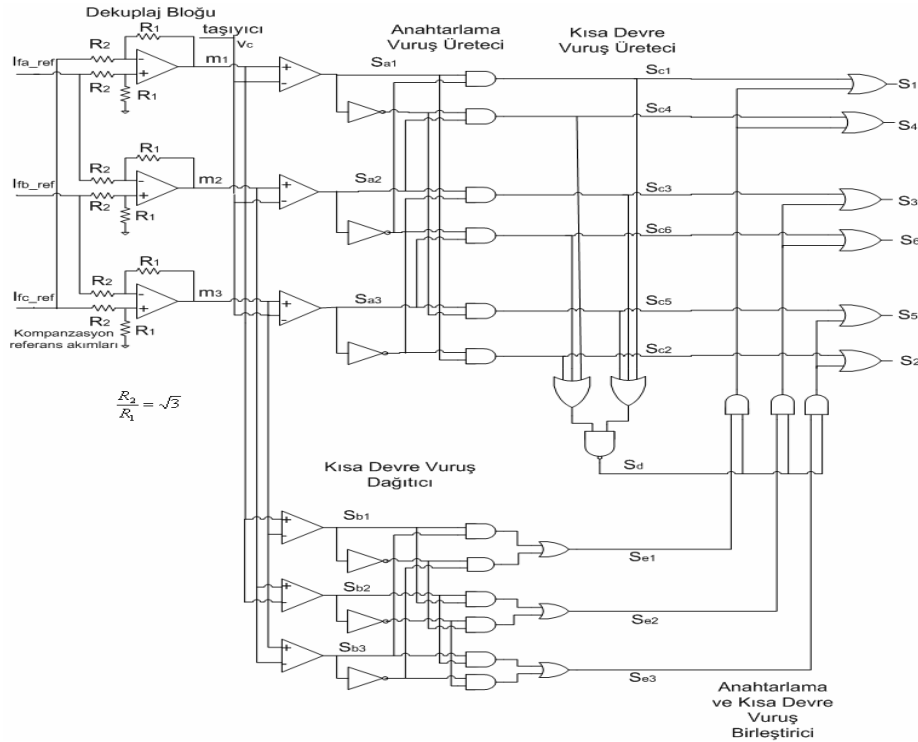
Şekil-3 Senkron referans çerçeve yöntemi ile referans akımların elde edilmesi

## ii) Modülasyon yöntemi

[8]'de verilen akım kaynaklı çeviriciler için modellenmiş analog çevirimiçi taşıyıcı-tabanlı PWM anahtarlama örnek üretici bu çalışmada akım kaynaklı aktif güç filtresinin yarı-iletken anahtarlarını kontrol etmek için kullanılmıştır. Anahtarlama örnek üreticinin yapısı Şekil-4'te verilmiştir. Anahtarlama sinyal üretici, taşıyıcıya (carrier) ve üç faz için modülasyon dalga şekillerine ( $[m]_{abc} = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ ) göre anahtarlama sinyallerini ( $[S] = [S_1 \dots S_6]^T$ ) üretmektedir. Örnek üreticinin, Şekil-4, ilk bileşeni anahtarlama vuruş üreticidir (switching pulse generator). Burada sinyaller  $S_{ai}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) aşağıdaki gibi üretilmektedir:

$$S_{ai} = \begin{cases} \text{yüksek} = 1, & \text{eger } m_i > v_c \\ \text{alçak} = 0, & \text{diğer türlü} \end{cases} \quad i = 1,2,3$$

Anahtarlama vuruş üreticinin çıkışındaki sinyaller  $S_{ci}$  ( $i = 1, \dots, 6$ ), kısa devre vuruşları (shorting pulses) eklenmemiş akım kaynaklı evirici anahtarlama sinyalleridir. Buradan en fazla bir üst ve bir alt anahtarın KAPALI tutulduğu açıkça görülebilir. Bu, akım kaynaklı çeviricilerin kısıtlamaları olan, AA devresinin PWM hat akımlarını çektiği için kapasitif olması gerekliliğini ve her zaman en fazla bir üst ve bir alt anahtarın kapalı tutularak devrenin kısa devre edilmemesi gerekliliğini sağlamaktadır. Akım kaynaklı çeviricilerin başka bir kısıtlaması DA bağ akımının açık devre edilmemesidir. Bu yüzden her zaman en az bir üst anahtar (1, 3 veya 5) ve bir alt anahtar (4, 6 veya 2) kapalı tutulmalıdır. Üst anahtarlardan ( $S_{c1} = S_{c3} = S_{c5} = 0$ ) veya alt anahtarlardan herhangi biri ( $S_{c4} = S_{c6} = S_{c2} = 0$ ) anahtarlama zamanlarında kısa devre vuruşu (shorting pulse) ( $S_d = 1$ ) üretilmektedir. Daha sonra bu vuruş, anahtarlama ve kısa devre vuruşu birleştiricisi (switching and shorting pulse combinator) yardımıyla akım kaynaklı çeviricinin sadece bir koluna (anahtarlar 1 ve 4'e veya 3 ve 6'ya veya 5 ve 2'ye) eklenir.  $S_{ei}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) sinyalleri ise, akım kaynaklı çeviricinin yalnızca bir kolunun kısa devre edilmesini, çünkü sinyallerden sadece birisi herhangi bir anda YÜKSEK'tir (HIGH), ve kısa devre vuruşunun çift dağıtımını sağlamaktadır.



Şekil-4 Anahtarlama örnek üretici gösterimi

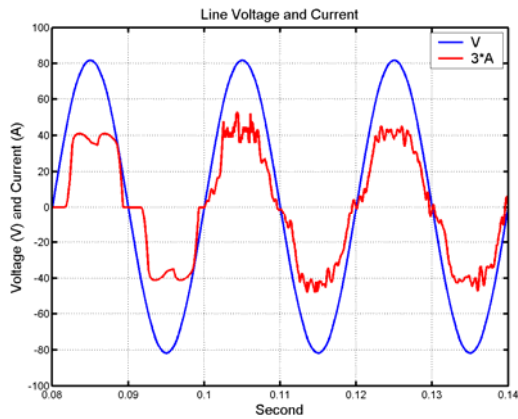
### III. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetim çalışmalarında, Şekil-1’de verilen devre topolojisi ve aktif filtre yarı-iletken anahtarlarının kontrolü için ise Şekil-4’te verilen anahtarlama sinyal üretici Simplorer’da modellenmiştir. Modülasyon sistemindeki üçgen dalga taşıyıcının frekansı 4 kHz alınmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan güç devresinin parametreleri Çizelge-1’de verilmiştir.

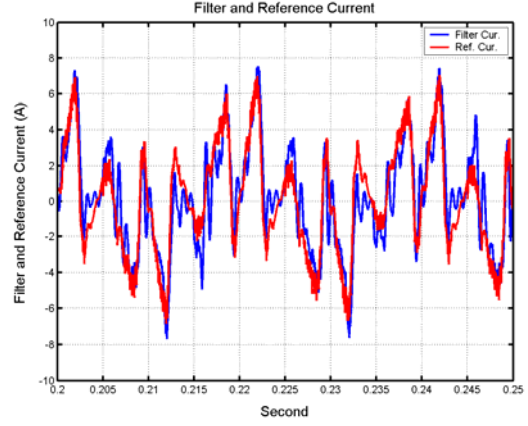
Çizelge-1 Güç devresi parametreleri

AA Kaynak Gerilimi, $e_s$	100 V
Temel Frekans	50 Hz
Kaynak Reaktörü, $L_s$	343.77 uH
Doğrultucu Reaktörü, $L_L$	520.94 uH
Doğrultucunun Yük Direnci, $R_{Load}$	10 $\Omega$
Evirici DA Akımı, $I_{DC}$	10 A
Evirici Reaktörü, $L_{DC}$	50 mH
Giriş Filtresi Reaktörü, $L_f$	0.3 mH
Giriş Filtresi Kapasitörü, $C_f$	25 $\mu$ F

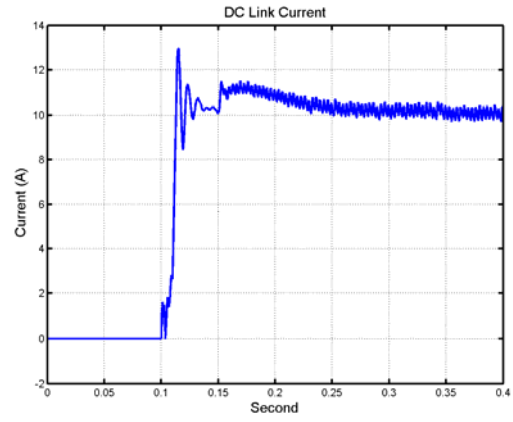
Aşağıdaki şekillerde modellenen sistem için yapılan benzetim çalışmalarının sonuçları görülmektedir. Şekil-5 ve Şekil-6’da sırasıyla hat gerilimi ve akımı ; filtre akım referansı ve gerçekleşen akım dalga şekilleri verilen aktif güç filtresi, harmonik filtreleme yanında reaktif güç kompanzasyonu da yapmaktadır. Dalga şekillerinden de anlaşılacağı üzere aktif güç filtresi, sistem çalışmaya başladıktan 0.1 saniye sonra devreye girmektedir. Şekil-7’de akım kaynaklı aktif güç filtresinin DA bağ reaktörü üzerindeki akımı; Şekil-8’de ise yük akımı ile aktif filtre devreye girdikten sonra gerçekleşen şebeke akımının frekans spektrumları verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere aktif filtre devreye girdikten sonra akım harmonikleri belirgin bir biçimde azalmaktadır.



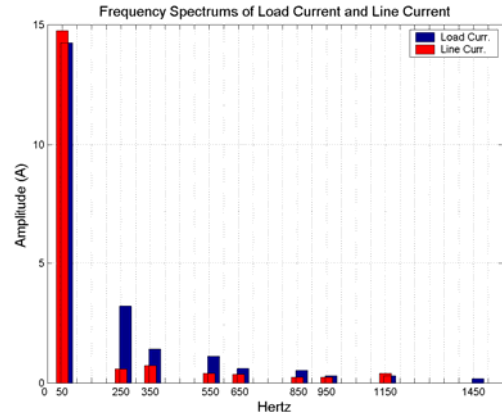
Şekil-5 Hat gerilimi ve akımı dalga şekli



Şekil-6 Filtre akım referansı (kırmızı) ve gerçekleşen akım dalga şekli



Şekil-7 DA bağ reaktörü akımı dalga şekli



Şekil- 8 Yük akımı ve hat akımının frekans spektrumu

#### IV. SONUÇ

Aktif güç filtreleri, gelişen ve yaygınlaşan yarı-iletken teknolojisi sayesinde, doğrusal olmayan yüklerin kullanımından kaynaklanan güç kalitesi problemlerinin çözümünde giderek daha fazla tercih edilen bir yöntem olmaktadır. Pasif filtrelerin istenmeyen olumsuz yönleri ve güç kalitesi problemlerinin bir bütün olarak ele alınması gerekliliği bu yönelimi daha belirgin kılmaktadır. Bu çalışmada, tasarım çalışmaları gerçekleştirilen akım kaynaklı çevirgeç topolojisine dayalı aktif güç filtresinin gerek akım harmoniklerini filtreleme gerekse reaktif güç kompanzasyonu yapabilmekle yeteneği ile; harmoniklerden kaynaklı güç kalitesi problemlerinin çözümünde çok etkin bir çözüm yöntemi olduğu benzetim çalışmaları yardımı ile gösterilmiştir. Bu çalışmanın devamında tasarımı ve benzetim çalışmaları yapılan aktif güç filtresinin uygulaması gerçekleştirilecektir.

#### V. KAYNAKÇA

- [1] T. J. Miller, "Reactive Power Control in Electrical Systems", John Wiley&Sons,1982
- [2] J. C. Das, Passive Filters - Potentialities and Limitations, IEEE Trans. on Industry App., vol. 40, pp. 232-241, 2004

- [3] B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra, "A review of Active Filters for Power Quality Improvement", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.46, no.5, 1999
- [4] T.L. Skvarenina, The Power Electronics Handbook - Industrial Electronics Series, H. Akagi, Chapter 17.4 Active Filters for Power Conditioning , CRC Press, 2002
- [5] S. Fukuda, M. Yamaji, "Design and Characteristics of Active Power Filter Using Current Source Converter", IEEE Trans. on Industry App., vol. 2, pp. 965-970, 1990
- [6] L. Benchaita, 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
- [7] Y. Hayachi, N. Sato, K. Takahashi "A Novel Control of a Current Source Active Filter for AC Power System Harmonic Compensation", IEEE Trans. on Industry App., vol. 27, no. 2, 1991, pp. 380-384
- [8] J.R. Espinoza, G. Joos, "Current-Source Converter On-Line Pattern Generator Switching Frequency Minimization", IEEE Trans on Ind. Electronics, vol. 44, pp. 198-206, 1997