

Paralel Aktif Güç Filtresi Denetimi İçin Adaline YSA Tabanlı Farklı Referans Akım Çıkartım Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Baran HEKİMOĞLU

Batman Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
baran.hekimoglu@batman.edu.tr

Serdar EKİNCİ

Batman Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
serdar.ekinci@batman.edu.tr

ÖZET

Bu makalede 3-fazlı bir paralel aktif güç filtresinin (PAGF), Adaline yapay sinir ağlarına (YSA) dayalı üç farklı referans akım çıkartım yöntemiyle denetiminin karşılaştırılması sunulmaktadır. PAGF'nin amacı harmonikleri gidermek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmaktır. PAGF, şebekeye doğrusal olmayan yük ile paralel bağlanan, bir akım kaynağı gibi davranmaktadır ve gerekli kompanzasyon akımlarının üretilmesi için denetlenmektedir. Denetim için kullanılan referans akım çıkartım yöntemleri sırasıyla 3-fazlı akım yöntemi, anlık güç yöntemi ve 2-fazlı (*DQ*) akım yöntemidir. Bu yöntemlerin tümünde Adaline YSA, uyarlamalı bir gürültü giderici gibi çalışarak PAGF'nin şebekeye enjekte edeceği akımın referans değerini, yük akımından elde etmek için kullanılmaktadır. Tüm referans akım çıkartım yöntemleriyle denetlenen 3-fazlı PAGF'nin farklı çalışma koşulları altında benzetim sonuçları verilerek çalışma performanslarının karşılaştırılması sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Paralel aktif güç filtresi, yapay sinir ağları, Adaline, referans akım çıkartımı, uyarlamalı gürültü giderici, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu.

ABSTRACT

This paper presents the comparison of three different reference current extraction methods based on Adaline neural networks for controlling three-phase shunt active power filters. The objective of the active power filter is to eliminate harmonics and reactive power. The filter acts as a current source, which is connected in parallel with a nonlinear load and controlled to generate the required compensation currents. The reference current extraction methods to be used for the control of the active power filter are 3-phase currents method, instantaneous power method and two-phase (*DQ*) currents method, respectively. In all of these methods, Adaline neural networks functioning as an adaptive noise canceller to extract the reference current from the load current, which will be injected to the mains by shunt active power filter. Under different operation conditions the simulation results of three-phase shunt active power filter that is controlled by all of the three methods proposed in this paper are presented and their operation performances are compared.

Keywords: Shunt active power filters, artificial neural networks, Adaline, reference current extraction, adaptive noise canceller, harmonics and reactive power compensation.

1. Giriş

Aktif güç filtreleri, günümüzde doğrusal olmayan yüklerin yarattığı sorunların çözümünde daha uygun bir çözüm olarak kabul görmektedir. AGF'ler istenmeyen harmoniklerin giderilmesi ve güç faktörünün iyileştirilmesi için sisteme bu bileşenler kadar fakat zıt işaretli kompanzasyon akımı enjekte ederler. En yaygın AGF türü paralel aktif güç filtresidir (PAGF) ve adından anlaşıldığı gibi doğrusal olmayan yüke paralel bağlanırlar ve gerekli kompanzasyon akımını sisteme enjekte ederek şebekeden sadece temel frekanstaki akım bileşeninin çekilmesini sağlayan bir akım kaynağı gibi davranırlar. Bu tür AGF'ler harmonik ve reaktif güç kompanzasyonunun yanında aynı zamanda dengesiz ve doğrusal olmayan yüklerle de yüklenmiş güç sistemini dengeleyebilirler [1].

AGF'lerin denetiminde kullanılan referans akım çıkartım yöntemi performansı belirleyen en temel ölçütlerden biridir. AGF'ler için birçok referans akım çıkartım yöntemi mevcuttur. Yapay sinir ağları (YSA) tabanlı çıkartım yöntemi de bunlardan biridir. Doğrusal olmayan ve belirsiz sistemleri öğrenme becerileri sayesinde de kullanım alanları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Son yıllarda YSA tabanlı farklı harmonik belirleme ve filtreleme teknikleri, özellikle Adaline tabanlı ağlar, güç sistemlerinde kullanılmaya başlamıştır. Adaline YSA, zamanla değişen işaretlerin doğrusal birleşiminden yararlanan basit ve dinamik öğrenme sistemleridir. Eğitim olarak adlandırılan ağırlıkların güncellenmesi, öğrenme kuralı denilen en küçük karesel ortalama gibi etkin algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu doğrusal olmayan regresyon yöntemi hem hızlı hem de doğru sonuçlar veren bir yöntemdir [2]. Ağ yapısının basitliği ise uygulamalarda yazılım ve donanım açısından kolaylıklar getirmektedir. Bu makalede çalışma performansları karşılaştırılan referans akım çıkartım yöntemleri de Adaline YSA tabanlıdır. Bu yöntemler sırasıyla 3-fazlı akım yöntemi, anlık güç yöntemi ve 2-fazlı (*DQ*) akım yöntemidir.

3-fazlı akım yöntemi, doğrusal olmayan yükün şebekeden çektiği akımın aktif bileşeninin, harmonik ve reaktif bileşenlerinden Adaline YSA yardımı ile ayrıştırılması prensibine dayanmaktadır ve literatürdeki benzer yöntemlerden farkı, doğrusal hale getirilmiş yük akımı ifadelerine ait temel ve diğer frekans bileşenlerinin ayrı ayrı hesaplanması yerine sadece temel frekans bileşeninin hesaplanıp sonra toplamdan çıkarılarak diğer bileşenlerin hesaplanmasıdır [3]. Böylece kompanzasyon türüne göre

gerekli referans akımlar elde edilmektedir.

Anlık güç yöntemi, anlık güç teorisini kullanarak doğrusal olmayan yükün şebekeden çektiği gücü, güç uzayında doğrusal bir ifadeye dönüştürdükten sonra Adaline YSA yardımı ile gücün harmonik ve reaktif bileşenlerinin aktif bileşeninden ayrıştırılması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemin literatürdeki benzer yöntemlerden farkı, doğrusal hale getirilmiş anlık güç ifadelerine ait sabit ve değişken bileşenlerin ayrı ayrı hesaplanması yerine sadece sabit bileşenlerin hesaplanıp sonra toplamdan çıkarılarak değişken bileşenlerin hesaplanmasıdır [4]. Böylece kompanzasyon türüne göre gerekli referans akımlar elde edilmektedir.

2-fazlı (DQ) akım yöntemi ise daha önce Abdeslam vd. (2006) tarafından önerilen iki-faz yöntemi olarak adlandırılan yöntemin değiştirilmiş halidir [5]. Asıl yöntem, bozuk yük akımlarının $\alpha\beta$ - ya da DQ -uzayına doğrusal bir ifade halinde dönüştürülerek harmonik bileşenlerin ayrıştırılması prensibine dayanmaktadır. Bu makalede ise her bir harmonik bileşeninin ayrı ayrı belirlenmesi yerine sadece temel frekanstaki aktif güç bileşeninin çıkartımı yapıp toplam akımdan çıkarılarak kompanzasyon türüne göre gerekli referans akım elde edilmektedir.

Yukarıda bahsedilen tüm referans akım çıkartım yöntemlerinde Adaline YSA bir gürültü giderici gibi işlev görmektedir. Literatürde uyarlamalı gürültü giderici olarak adlandırılan bu teknik temelde iki girişli ve uyarlamalı bir geri beslemeli sistemdir [2]. Girişleri oluşturan işaretlerin arasındaki korelasyondan faydalanılarak birincil giriş işareti içindeki ikincil giriş işaretiyle aynı fazda olan gürültü işareti giderilmeye çalışılır [6]. Sonuç olarak sistem çıkışı, istenilen harmonik ve reaktif güç bileşenlerinin toplamı olur. Bu güç bileşenlerine karşılık gelen referans akımlar belirlendikten sonra PAGF ile sisteme aynı fazda fakat ters işaretli olarak enjekte edilirler. YSA'nın öğrenme imkân ve kabiliyetleri PAGF'nin doğrusal olmayan yük değişimlerine kendini uyarlamasını mümkün kılmaktadır. Karşılaştırılan bu yöntemlerin tümü, yük akımı ya da anlık güç ifadelerindeki tüm bileşenleri hesaplamadığından daha az sayıda işlem gerektirmektedirler. Ayrıca sürekli değişen harmonik bileşenleri gerçek zamanlı belirlemede de etkin ve hızlıdır.

2. Üç-fazlı Akım Yöntemi ile Referans Akım Çıkartımı

Harmonik bileşenlerin çıkartımı akım ya da güç uzayında gerçekleştirilebilir. 3-fazlı akım

yöntemi gerçek ve sanal güçler yerine akımlara dayanır. 3-fazlı bir sistemde distorsiyonlu akımları temsil eden aşağıdaki ifadeyi ele alalım:

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = I_1 \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \alpha_1) \\ \sin(\omega t + \alpha_1 + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + \alpha_1 - 2\pi/3) \end{bmatrix} + \sum_{n=2..N} I_n \begin{bmatrix} \sin(n\omega t + \alpha_n) \\ \sin(n\omega t + \alpha_n + 2\pi/3) \\ \sin(n\omega t + \alpha_n - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

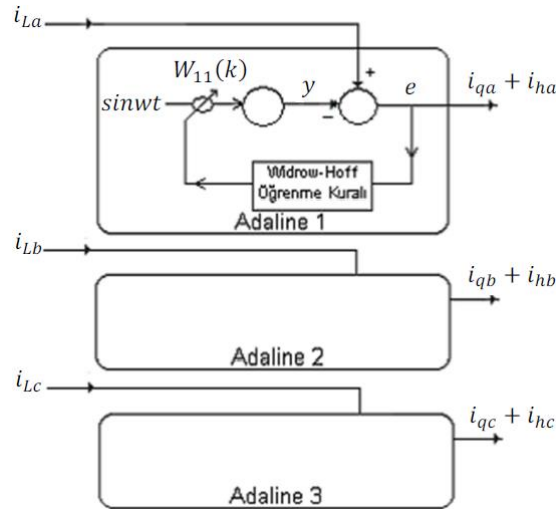
Bu akımlar aşağıdaki gibi de yazılabilirler:

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = I_1 \cos \alpha_1 \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + I_1 \sin \alpha_1 \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$+ \sum_{n=2..N} I_n \begin{bmatrix} \sin(n\omega t + \alpha_n) \\ \sin(n\omega t + \alpha_n + 2\pi/3) \\ \sin(n\omega t + \alpha_n - 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

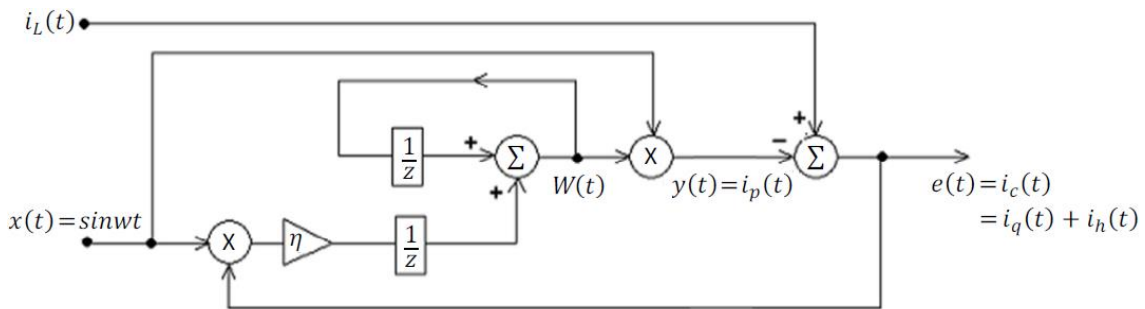
$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{qa} \\ i_{qb} \\ i_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ha} \\ i_{hb} \\ i_{hc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) ve (3) eşitliklerinin sağ tarafı üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci ve ikinci terimler temel frekanstan kaynaklanan aktif ve reaktif bileşenleri, üçüncü terim ise diğer frekanslardan kaynaklanan harmonik bileşenleri temsil etmektedir. Referans akım çıkartım yöntemi (2) ve (3) eşitliklerinin sağındaki ilk terimi yani temel frekans aktif bileşenini diğer bileşenlerden ayırabilirse, PAGF denetim devresi için referans akımlar elde edilmiş olur. Yük akımının temel frekans bileşenini harmonik bileşenlerden ayırmak için geleneksel olarak alçak geçiren filtre kullanılır. 3-fazlı akım yönteminde ise Adaline YSA tabanlı uyarlamalı bir gürültü giderici kullanılır. 3-fazlı akım yöntemine ait prensip şeması Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. 3-fazlı akım yönteminin prensip şeması

Bu yöntemin literatürdeki benzer YSA tabanlı yöntemlerden farkı, yük akımı ifadelerine ait temel ve diğer frekans bileşenlerinin ayrı ayrı hesaplanması yerine sadece temel frekans aktif bileşeninin hesaplanıp sonra toplamdan çıkarılarak diğer bileşenlerin hesaplanmasıdır [3]. Böylece Adaline hücresi daha az hesaplama yapmaktadır. Ayrıca hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonu için her fazda tek bir Adaline hücresinin kullanımı yeterlidir. 3-fazlı akım yöntemi için önerilen Adaline YSA tabanlı uyarlamalı gürültü gidericiye ait blok şema Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 3-fazlı akım yöntemi için önerilen Adaline YSA tabanlı uyarlamalı gürültü giderici blok şeması

3-fazlı akım yöntemindeki Adaline YSA çıkışına ait ifade aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 e(t) &= i_L(t) - y(t) \\
 e(t) &= i_L(t) - W \cdot x(t) \\
 i_q(t) + i_h(t) &= i_L(t) - W \cdot \sin(wt) \\
 i_c(t) &= i_L(t) - W \cdot \sin(wt)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

(4) eşitliğindeki ifade doğrusal bir ifade olduğundan Adaline YSA tarafından kolaylıkla öğrenilebilir. Burada W , YSA öğrenme algoritmasının bulduğu ağırlık değeridir ve

sabittir. $x(t)$ giderilmek istenen gürültüdür ve 3-fazlı akım yöntemi için değeri $\sin(\omega t)$ dir. $y(t)$ ağın çıkışıdır ve $i_p(t)$ temel frekans aktif bileşenidir. $e(t)$ ise sistemin çıkışıdır ve $i_q(t)+i_h(t)$ temel frekans reaktif bileşeni ile harmonik bileşenlerin toplamı yani $i_c(t)$ kompanzasyon akımıdır.

3. Anlık Güç Yöntemi ile Referans Akım Çıkartımı

Akagi vd. (1984) tarafından ortaya konulan anlık güç teorisi, güç uzayında gerçek ve sanal güçlerle uğraşır. Bu teknik, anlık aktif ve reaktif gücü, yük akımlarının - dengeli ve sinüzoidal kaynak gerilimleri koşulu altında- ölçümünden yararlanarak hesaplar [7]. Bu nedenle kaynak gerilimleri dengesiz ve distorsiyonlu 3-fazlı sistemlerde bu tekniğin uygulanabilmesi için kaynak gerilimlerinin dengeli ve sinüzoidal hale getirilmesi gerekmektedir. Bu makalede kullanılan 3-fazlı 3-telli sistemin kaynak gerilimleri dengeli ve sinüzoidal, yük akımları ise dengeli fakat distorsiyonludur. 3-fazlı 3-telli bir sistemde anlık güç ifadelerinin elde edilmesi, Clarke dönüşümü olarak da adlandırılan ve aşağıda belirtilen T_{32}^T dönüşüm matrisinin kaynak gerilimleri ve yük akımlarına uygulanarak 3-fazlı abc koordinatlarından 2-fazlı $\alpha\beta$ -uzayına geçişle başlar:

$$T_{32}^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^T \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^T \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Bu dönüşümden sonra anlık güç bileşenleri aşağıdaki ifadeyle elde edilirler:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

p ve q anlık güç bileşenlerinin her biri sabit ve değişken olmak üzere iki temel bileşene ayrılabilir:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Burada \bar{p} ve \bar{q} sabit bileşenleri yük akımının pozitif sıralı bileşenlerinden \tilde{p} ve \tilde{q} ise yük akımının negatif sıralı ve harmonik bileşenlerinden oluşur [8]. Eğer güç sistemi 3-fazlı ve 4-telli bir sistem olsaydı, bu durumda bir de sıfır sıralı bileşenlerden kaynaklanan ve nötr hattında dolaşan sabit ve değişken ($\bar{p}_0 + \tilde{p}_0$) bileşenlerden oluşan başka bir güç (p_0) ifadesi daha yer alırdı. Bu makalede 3-faz 3-telli bir sistem kullanıldığından bu güç ifadesi oluşmayacaktır. Ancak bu temel güç ifadelerinin yanında bir de aktif güç filtresinin doğru akım katındaki kondansatörün gerilimini sabit tutmak için şebekeden çekilen ve regülasyon gücü olarak adlandırılan bir güç bileşeni daha vardır:

$$p_{reg} = k_{pi} \cdot (V_{dc} - V_{ref}) \quad (10)$$

Burada V_{dc} PAGF doğru akım katındaki kondansatörün ölçülen gerilimini, V_{ref} ise bu gerilimin referans değerini, k_{pi} ise PI denetleyicisinin transfer fonksiyonunu temsil etmektedir. PAGF tarafından şebekeye enjekte edilecek anlık güç değeri, istenmeyen güç bileşenlerinden (harmonik, reaktif güç, dengesizlik) oluşacaktır. Hem harmonik ve hem de reaktif güç kompanzasyonu yapacak bir güç filtresi için sisteme enjekte edilecek anlık güç ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} p_f \\ q_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{p} - p_{reg} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{p} - p_{reg} \\ q \end{bmatrix} \quad (11)$$

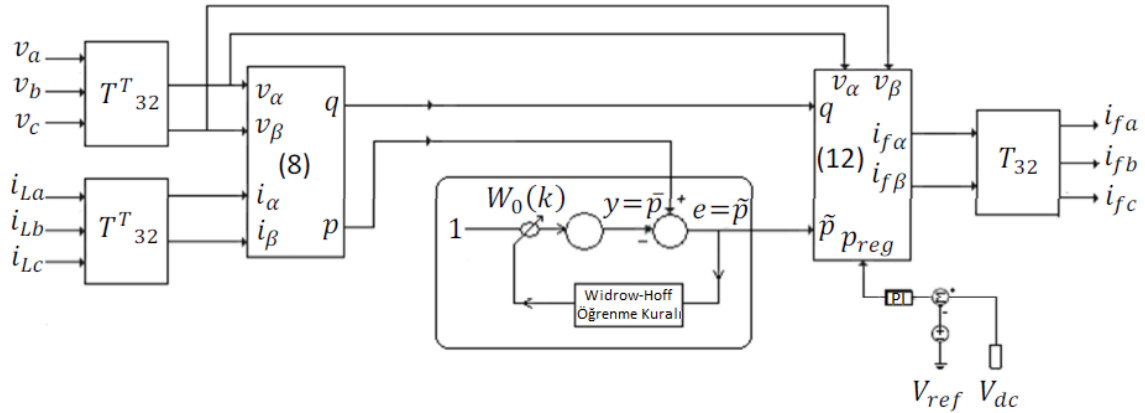
(11) ifadesindeki anlık güçlere karşılık gelen akımların $\alpha\beta$ -uzayındaki ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} - p_{reg} \\ q \end{bmatrix} \quad (12)$$

abc koordinatlarına ters Clarke dönüşümü olarak da adlandırılan T_{32} dönüşüm matrisi ile geçilerek PAGF için referans akım değerleri elde edilir:

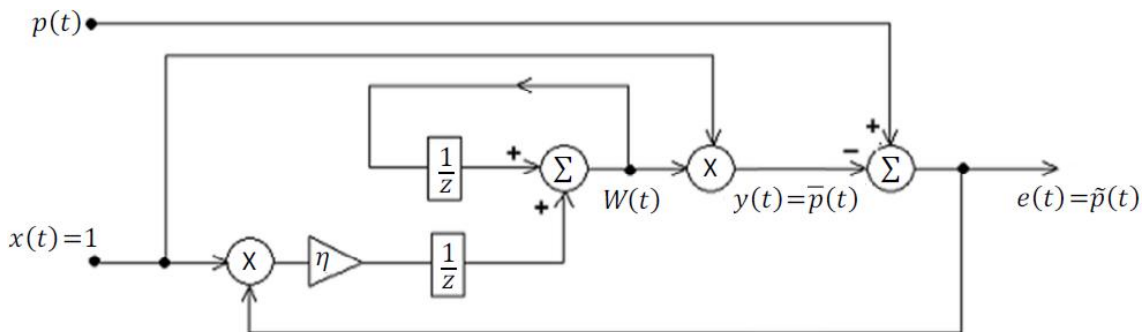
$$\begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} = T_{32} \cdot \begin{bmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Anlık güç ifadelerinin sabit bileşenini değişken bileşenden ayırırken geleneksel olarak alçak geçiren filtre kullanılır. Anlık güç yönteminde ise Adaline YSA tabanlı uyarlamalı bir gürültü giderici kullanılır. Anlık güç yöntemine ait prensip şeması Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Anlık güç yönteminin prensip şeması

Bu yöntemin literatürdeki benzer YSA tabanlı yöntemlerden farkı, gücün tüm bileşenlerinin Adaline hücresi tarafından hesaplanması yerine sadece sabit bileşenin hesaplanıp toplam güç değerinden çıkarılarak değişken güç bileşeninin elde edilmesidir [4]. Böylece Adaline hücresi daha az hesaplama yapacaktır. Ayrıca hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonu için tek bir Adaline hücresinin kullanımı yeterli olmaktadır. Anlık güç yöntemi için önerilen Adaline YSA tabanlı uyarlamalı gürültü gidericiye ait blok şema Şekil 4’de gösterilmektedir.



Şekil 4. Anlık güç yöntemi için önerilen Adaline YSA tabanlı uyarlamalı gürültü giderici blok şeması

Anlık güç yöntemindeki Adaline YSA çıkışına ait ifade aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 e(t) &= p(t) - y(t) \\
 e(t) &= p(t) - W \cdot x(t) \\
 \tilde{p} &= p(t) - W \cdot 1
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

(14)’deki ifade doğrusal bir ifade olduğundan Adaline YSA tarafından kolaylıkla

öğrenilebilir. Burada W , YSA öğrenme algoritmasının bulduğu ağırlık değeridir ve sabittir. $x(t)$ giderilmek istenen gürültüdür ve bu yöntemde değeri 1'dir. $y(t)$ ağırlık çıkışıdır ve \bar{p} sabit güç bileşenidir. $e(t)$ ise sistemin çıkışıdır ve \tilde{p} değişken güç bileşenidir.

4. İki-fazlı (DQ) Akım Yöntemi ile Referans Akım Çıkartımı

Anlık reaktif güç teorisinin aksine, 2-fazlı (DQ) akım yöntemi akım uzayında çalışır ve daha az hesaplama ile doğru sonuçlar veren daha sağlam bir yöntemdir [2]. Bu yöntem gerçek ve sanal güçler yerine akımlara dayanır. 3-fazlı bir sistemde distorsiyonlu akımları temsil eden aşağıdaki ifadeyi ele alalım:

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = I_1 \begin{bmatrix} \sin(wt + \alpha_1) \\ \sin(wt + \alpha_1 + 2\pi/3) \\ \sin(wt + \alpha_1 - 2\pi/3) \end{bmatrix} + \sum_{n=2..N} I_n \begin{bmatrix} \sin(nwt + \alpha_n) \\ \sin(nwt + \alpha_n + 2\pi/3) \\ \sin(nwt + \alpha_n - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Eşitliğin sağ tarafı iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi temel frekanstan kaynaklanan bileşenleri, ikincisi ise diğer frekanslardan kaynaklanan bileşenleri temsil etmektedir. Bu akımlar T_{32}^T dönüşüm matrisi kullanılarak $\alpha\beta$ -uzayında aşağıdaki gibi yazılabilirler:

$$T_{32}^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^T \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \sin(wt + \alpha_1) \\ \cos(wt + \alpha_1) \end{bmatrix} + \sum_{n=2..N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \sin(nwt + \alpha_n) \\ \cos(nwt + \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Bu akımları DQ -uzayında ifade etmek için ise $-wt$ açısıyla Park dönüşümü, $P(-wt)$ uygulanır:

$$P(wt) = \begin{bmatrix} \cos wt & \sin wt \\ -\sin wt & \cos wt \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = P(-wt) \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_1 \end{bmatrix} + \sum_{n=2..N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \sin((n-1)wt + \alpha_n) \\ \cos((n-1)wt + \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (19)$$

(19)'daki akımlar sabit ve değişken iki bileşen halinde yazılabilir:

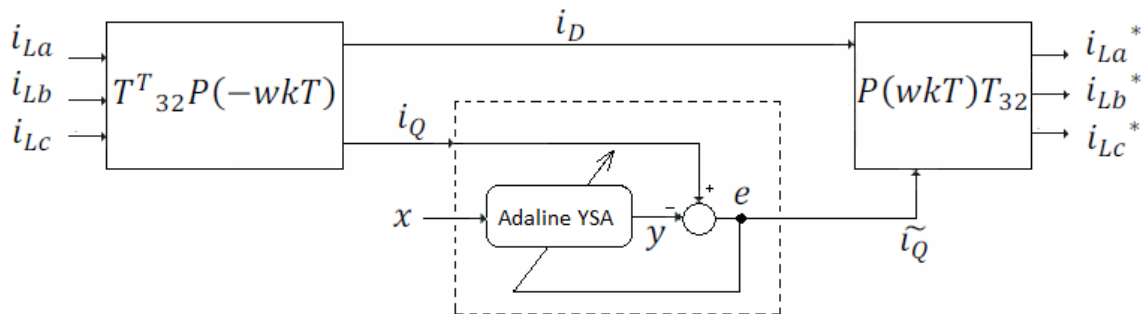
$$\begin{bmatrix} \bar{i}_D \\ \bar{i}_Q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_D \\ \tilde{i}_Q \end{bmatrix} = \sum_{n=2..N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \sin((n-1)wt + \alpha_n) \\ \cos((n-1)wt + \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (21)$$

2-fazlı (DQ) akım uzayında (20)'deki \bar{i}_D ve \bar{i}_Q sabit bileşenler, temel frekanstaki bileşenden; (21)'deki \tilde{i}_D ve \tilde{i}_Q değişken bileşenler ise harmonikli bileşenlerden kaynaklanan terimlerdir. Burada amaç DQ -akımlarının sabit ve değişken bileşenlerinin belirlenmesidir. Eğer sadece harmonik kompanzasyonu yapılacaksa \tilde{i}_D ve \tilde{i}_Q akımları, hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonu yapılacaksa $\bar{i}_D + \tilde{i}_D$ ve \tilde{i}_Q akımları kullanılarak sırasıyla $P(wt)$ ve T_{32} ters dönüşümleri uygulanıp PAGF tarafından üç fazlı sisteme enjekte edilecek akımların referans değerleri belirlenir:

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = T_{32} P(wt) \begin{bmatrix} \tilde{i}_D \\ \tilde{i}_Q \end{bmatrix} + T_{32} P(wt) \begin{bmatrix} \bar{i}_D \\ 0 \end{bmatrix} = T_{32} P(wt) \begin{bmatrix} i_D \\ \tilde{i}_Q \end{bmatrix} \quad (22)$$

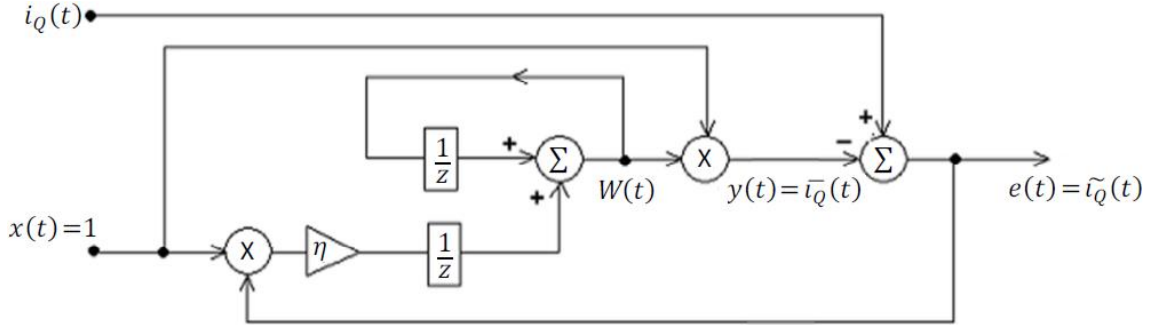
DQ -akımlarının sabit ve değişken bileşenleri belirlenirken geleneksel olarak alçak geçiren filtre kullanılır. 2-fazlı (DQ) akım yönteminde ise Adaline YSA tabanlı uyarlamalı bir gürültü giderici kullanılır. Bu yöntem iki-fazlı akımlar yönteminin [2] değiştirilmiş halidir. 2-fazlı (DQ) akım yöntemine ait prensip şeması Şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 5. 2-fazlı (DQ) akım yönteminin prensip şeması

Bu yöntemin orijinal yöntemden farkı, akımın tüm bileşenlerinin Adaline hücresi tarafından hesaplanması yerine sadece sabit bileşenin hesaplanıp toplam akım değerinden çıkarılarak değişken bileşenlerin elde edilmesidir. Ayrıca hem harmonik

hem de reaktif güç kompanzasyonu için tek bir Adaline hücrenin kullanımı yeterli olmaktadır. 2-fazlı (DQ) akım yöntemi için önerilen Adaline YSA tabanlı referans akım çıkartım yöntemine ait blok şema Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. 2-fazlı (DQ) akım yöntemi için önerilen Adaline YSA tabanlı uyarlamalı gürültü giderici blok şeması

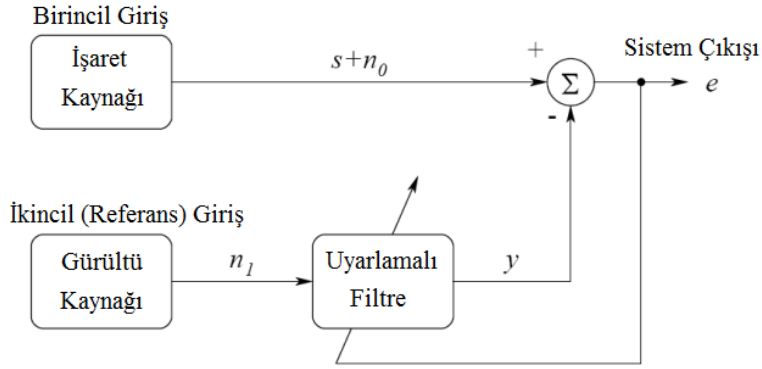
2-fazlı (DQ) akım yöntemindeki Adaline YSA çıkışına ait ifade aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} e(t) &= i_Q(t) - y(t) \\ e(t) &= i_Q(t) - W \cdot x(t) \\ \tilde{i}_Q(t) &= i_Q(t) - W \cdot 1 \end{aligned} \quad (23)$$

(23)'deki ifade doğrusal bir ifade olduğundan Adaline YSA tarafından kolaylıkla öğrenilebilir. Burada W , YSA öğrenme algoritmasının bulduğu ağırlık değeridir ve sabittir. $x(t)$ giderilmek istenen gürültüdür ve bu makalede değeri 1'dir. $y(t)$ ağırlık çıkışıdır ve Q -ekseni akımının sabit bileşenidir \bar{i}_Q . $e(t)$ ise sistemin çıkışıdır ve Q -ekseni akımının değişken bileşenidir \tilde{i}_Q .

5. Adaline YSA Tabanlı Uyarlamalı Gürültü Giderici

Şekil 1, Şekil 3 ve Şekil 5'de kullanılan Adaline YSA gürültü filtresi gibi çalışan iki girişli ve uyarlamalı bir geri beslemeli sistemdir. Adaline YSA tabanlı uyarlamalı gürültü gidericinin prensip şeması Şekil 7'de gösterilmektedir. Girişleri oluşturan işaretlerin arasındaki korelasyondan faydalanarak birincil giriş işareti ($s+n_0$) içindeki ikincil giriş işareti (n_1) ile aynı fazda olan gürültü işareti (n_0) giderilir.



Şekil 7. Adaline YSA tabanlı uyarlamalı gürültü giderici prensip şeması

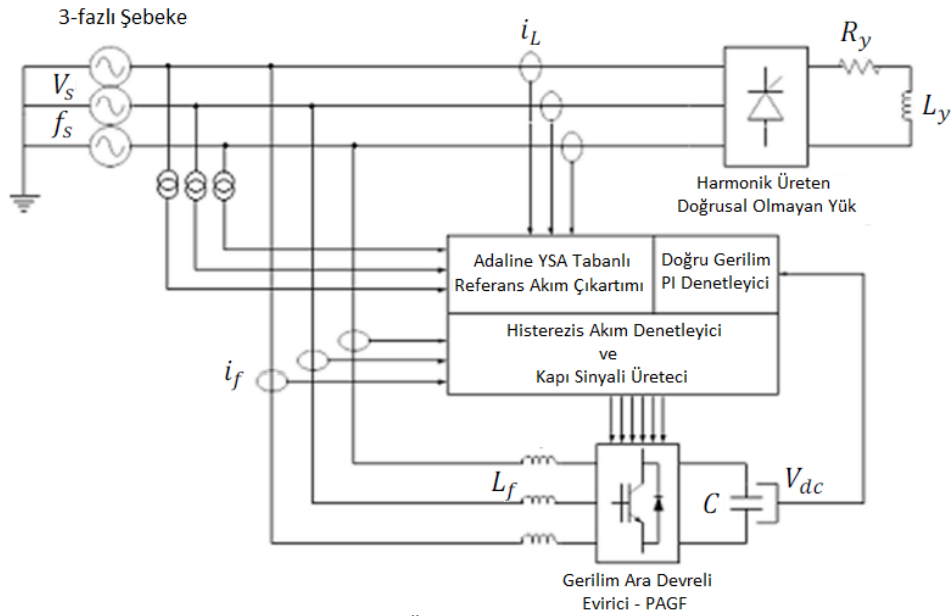
YSA ağırlıklarının öğrenilmesi ve ağırlıkların eğitilmesi için performans göstergesi olarak hatanın karesel ortalamasını kullanan ve bir *yaklaşık gradyan azalma* algoritması olan Widrow-Hoff öğrenme kuralı kullanılır [6]. Bu öğrenme kuralına göre ağırlıkların güncellenmesi ve ağırlıkların eğitilmesi aşağıdaki gibidir:

$$W(k) = W(k-1) + \eta \cdot e(k-1) \cdot x(k-1) \quad (24)$$

Burada k zaman indisini, $W(k-1)$ ağırlığın bir önceki değerini, $W(k)$ ise şimdiki değerini göstermektedir. Bu makaledeki her üç yöntem için de ağırlığın başlangıç değeri sıfırdır. Ayrıca η öğrenme katsayısı, yakınsama hızı ve kararlılık açısından 0.001 seçilmiştir. Yakınsama analizi, ikinci dereceden bir fonksiyon için öğrenme katsayısının $0 < \eta < 1/\lambda_{max}$ aralığında seçilmesi durumunda kararlı çözüme ulaşılacağını göstermektedir. Burada λ_{max} , giriş korelasyon matrisinin en büyük öz-değeridir [6].

6. Önerilen Paralel Aktif Güç Filtresi

Önerilen PAGF yapısı Şekil 8'de gösterilmektedir. PAGF, doğru akım katına kondansatör bağlanmış gerilim ara devreli bir eviricidir. Yukarıda bahsedilen Adaline YSA tabanlı akım çıkartım yöntemleri ile referans akımlar elde edilmektedir. Doğru gerilim PI denetleyici, evirici doğru akım katındaki kondansatörün gerilimini sabit tutmaktadır. Histerezis akım denetleyici ve kapı sinyal üretici de PAGF çıkışındaki gerçek akımın, referans akımı belirli bir bant aralığı içinde takip etmesini sağlayacak evirici anahtarlama işaretlerini üretmektedir.



Şekil 8. Önerilen PAGF yapısı

7. Benzetim Sonuçları

PAGF denetimi için önerilen üç farklı referans akım çıkartım yönteminin performansının doğrulanması amacıyla farklı çalışma koşulları altında bir dizi bilgisayar benzetimi yapılmıştır. Bu koşullar PSIM benzetim programı ile gerçekleştirilmiştir. PSIM, özellikle güç elektroniği ve motor denetim uygulamaları için tasarlanmış hızlı bir benzetim programıdır. Benzetim parametreleri ve değerleri Tablo 1 de gösterilmektedir.

Tablo 1. Benzetim parametreleri

Parametreler	Değerler
Şebeke gerilimi V_s ve frekansı f_s	220 V, 50 Hz
Köprü doğrultucu direnç yükü R_y	10 Ω
Köprü doğrultucu endüktif yükü L_y	5 mH
PAGF DA kondansatörü C_{dc}	1500 μ F
PAGF öz endüktörü L_f	3 mH
PAGF DA kondansatörü referans gerilimi V_{ref}	750 V
Histerezis akım denetleyici bant aralığı	2 A

PAGF'nin beslediği doğrusal olmayan yük olarak kullanılan 3-fazlı tam denetimli köprü doğrultucunun altı farklı gecikme açısı için elde edilen benzetim sonuçları Tablo 2 de özetlenmiştir.

Tablo 2. Tam denetimli köprü doğrultuculu yükün farklı gecikme açıları için şebekeden çektiği akımın toplam harmonik distorsiyonu (THD%) ve güç faktörü (GF)

Kontrollü doğrultucu gecikme açısı	PAGF devreye alınmadan önce	PAGF devreye alındıktan sonra							
		3-fazlı akım yöntemi		Anlık güç yöntemi		2-fazlı (DQ) akım yöntemi			
	THD%	GF	THD%	GF	THD%	GF	THD%	GF	

$\alpha=0^\circ$	24,45	0,95	3,14	0,99	2,89	0,99	3,11	0,99
$\alpha=30^\circ$	24,45	0,95	3,06	0,99	2,90	0,99	3,07	0,99
$\alpha=45^\circ$	27,41	0,91	4,40	0,99	3,78	0,99	4,19	0,99
$\alpha=60^\circ$	29,97	0,81	11,45	0,97	11,34	0,97	12,15	0,97
$\alpha=75^\circ$	32,94	0,67	15,60	0,94	15,94	0,95	16,10	0,95
$\alpha=90^\circ$	39,38	0,49	15,17	0,87	14,15	0,87	14,51	0,87

Tablo 2 'den görüldüğü üzere farklı referans akım çıkartım yöntemleriyle denetlenen PAGF'nin devreye alındıktan sonra yükün şebekeden çektiği akımın THD ve GF değerleri için birbirlerine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Anlık güç yöntemiyle denetlenen PAGF, diğerlerine nazaran daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni referans akım çıkartımının akım uzayı yerine güç uzayında yapılması ve böylece reaktif ve harmonik güçlere karşılık gelen akımların daha doğru hesaplanmasıdır. Ancak uygulamada anlık güç yöntemi ile referans akım çıkartımının diğer yöntemlere göre bazı dezavantajlı yanları vardır. Tablo 3'de referans akım çıkartım yöntemlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.

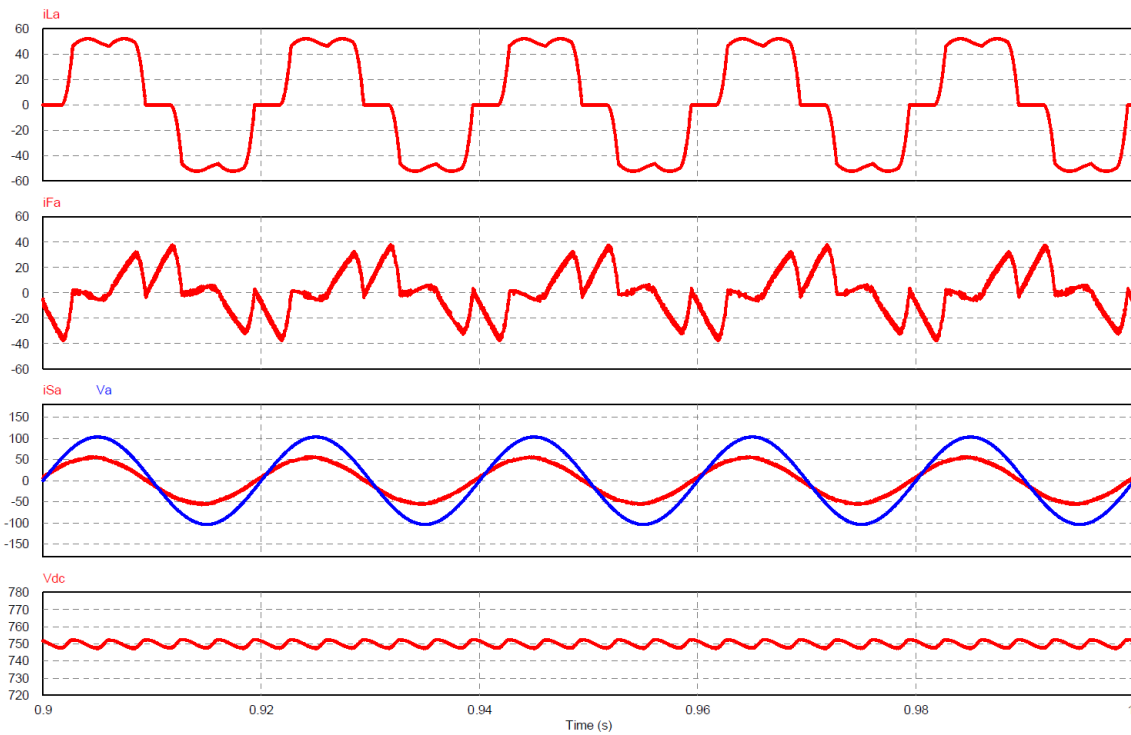
Tablo 3. İşlem yükü açısından referans akım çıkartım yöntemlerinin karşılaştırılması

Gerekli İşlem Yüğü	3-fazlı akım yöntemi	Anlık güç yöntemi	2-fazlı (DQ) akım yöntemi
Adaline YSA hücre sayısı ve ağırlık güncellenmesi	3	1	1
Akımlar için $abc/a\beta$ ve $a\beta/abc$ dönüşümleri	Yok	Var	Var
Gerilimler için $abc/a\beta$ ve $a\beta/abc$ dönüşümleri	Yok	Var	Yok
Akımlar için $a\beta/DQ$ ve $DQ/a\beta$ dönüşümleri	Yok	Yok	Var
Gerilimler için $a\beta/DQ$ ve $DQ/a\beta$ dönüşümleri	Yok	Yok	Yok
3-fazlı akımların ölçümü	Var	Var	Var
3-fazlı gerilimlerin ölçümü	Yok	Var	Yok

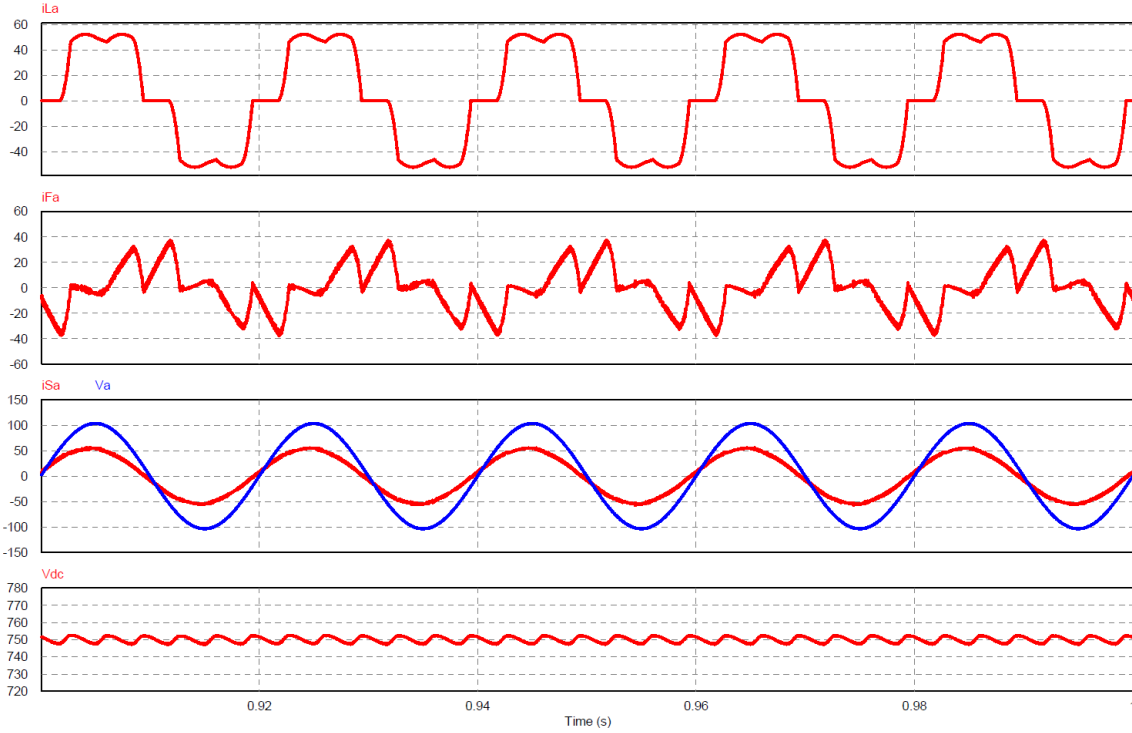
Tablo 3'den görüldüğü üzere anlık güç yönteminin güç uzayında filtreleme yapabilmesi için hem 3-fazlı akım bilgilerine hem de 3-fazlı gerilim bilgilerine ihtiyaç vardır. Bu ise daha fazla ölçme sensörünün kullanılması anlamına gelir. Buna ek olarak, daha önce de belirtildiği gibi, anlık güç yöntemi dengeli 3-fazlı sistemlerde doğru sonuçlar veren bir yöntemdir. 3-fazlı şebekenin dengesiz ve/ya distorsiyonlu olduğu durumlarda PAGF'nin çalışma performansı önemli ölçüde azalır. Bunu gidermek için dengesiz ve/ya distorsiyonlu 3-fazlı şebeke gerilimlerinin önce pozitif, negatif ve sıfır sıralı bileşenlerine ayrılması gerekir. Bu yapıldıktan sonra pozitif sıralı bileşenler kullanılarak PAGF, bu makalede önerildiği gibi denetlenir. Bu da uygulamada denetimi

yapacak olan mikrodenetleyicinin işlem yükünün daha da artması demektir. Bu yöntemlerden en az işlem yüküne sahip olan ve bu sayede düşük maliyetli mikrodenetleyicilerle bile gerçekleştirilebilecek olan yöntem 3-fazlı akım yöntemidir.

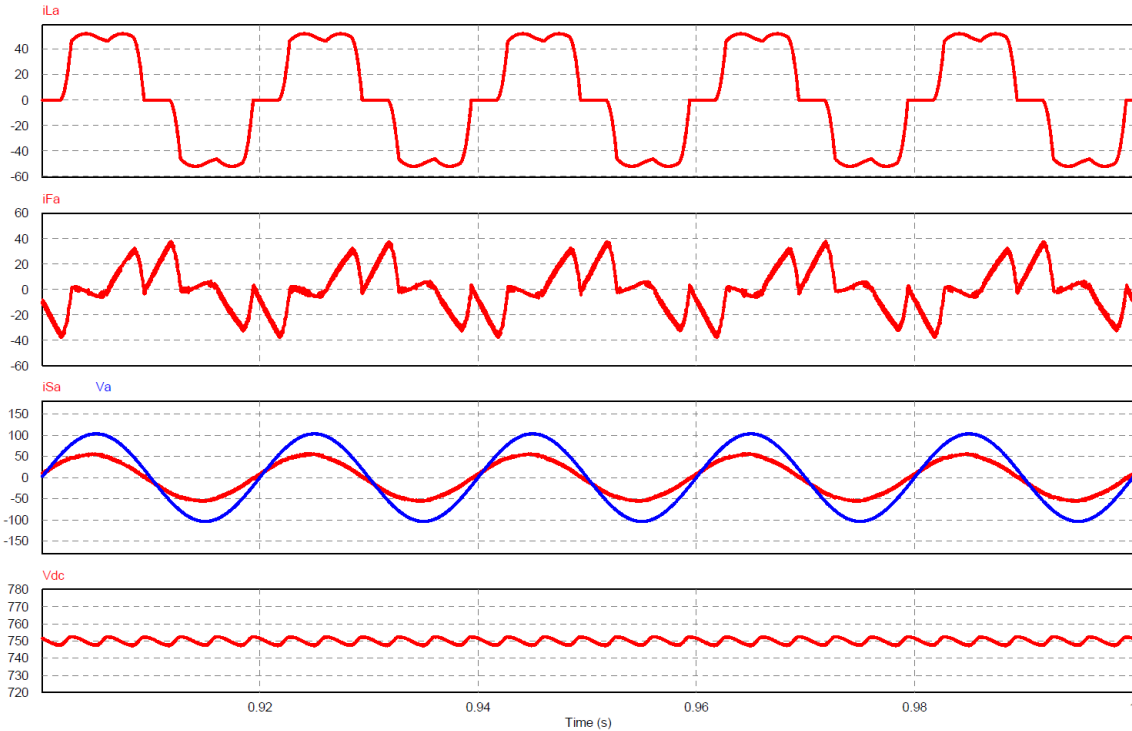
Aşağıda yer darlığı nedeniyle sadece $\alpha = 0^\circ$ gecikme açısı için elde edilen kararlı hal davranışının benzetim sonuçları ile köprü doğrultucu yükünün anlık değiştirilmesiyle elde edilen geçici hal davranışının benzetim sonuçları gösterilmektedir. Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de sırasıyla 3-fazlı akım, anlık güç ve 2-fazlı (DQ) akım yöntemlerine ait $\alpha = 0^\circ$ için kararlı hal benzetim sonuçları verilmiştir. Bu şekillerin tümünde, a-fazına ait yük akımı i_{La} , filtre akımı i_{Fa} , şebeke akımı i_{Sa} ile gerilimi V_a ve evirici doğru akım (DA) kondansatörünün gerilimi V_{dc} gösterilmektedir.



Şekil 9. Adaline YSA tabanlı 3-fazlı akım yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için a-fazına ait kararlı hal benzetim sonuçları: Yük akımı i_{La} (20A/div), filtre akımı i_{Fa} (20A/div) şebeke akımı i_{Sa} (50A/div) ile gerilimi V_a (150V/div), ve evirici DA kondansatörünün gerilimi V_{dc} (10V/div), zaman t (50ms/div)



Şekil 10. Adaline YSA tabanlı anlık güç yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için a-fazına ait kararlı hal benzetim sonuçları: Yük akımı i_{La} (20A/div), filtre akımı i_{Fa} (20A/div) şebeke akımı i_{Sa} (50A/div) ile gerilimi V_a (150V/div), ve evirici DA kondansatörünün gerilimi V_{dc} (10V/div), zaman t (50ms/div)



Şekil 11. Adaline YSA tabanlı 2-fazlı (DQ) akım yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için a-fazına ait kararlı hal benzetim sonuçları: Yük akımı i_{La} (20A/div), filtre akımı i_{Fa} (20A/div) şebeke akımı i_{Sa} (50A/div) ile gerilimi V_a (150V/div), ve evirici DA kondansatörünün gerilimi V_{dc} (10V/div), zaman t (50ms/div)

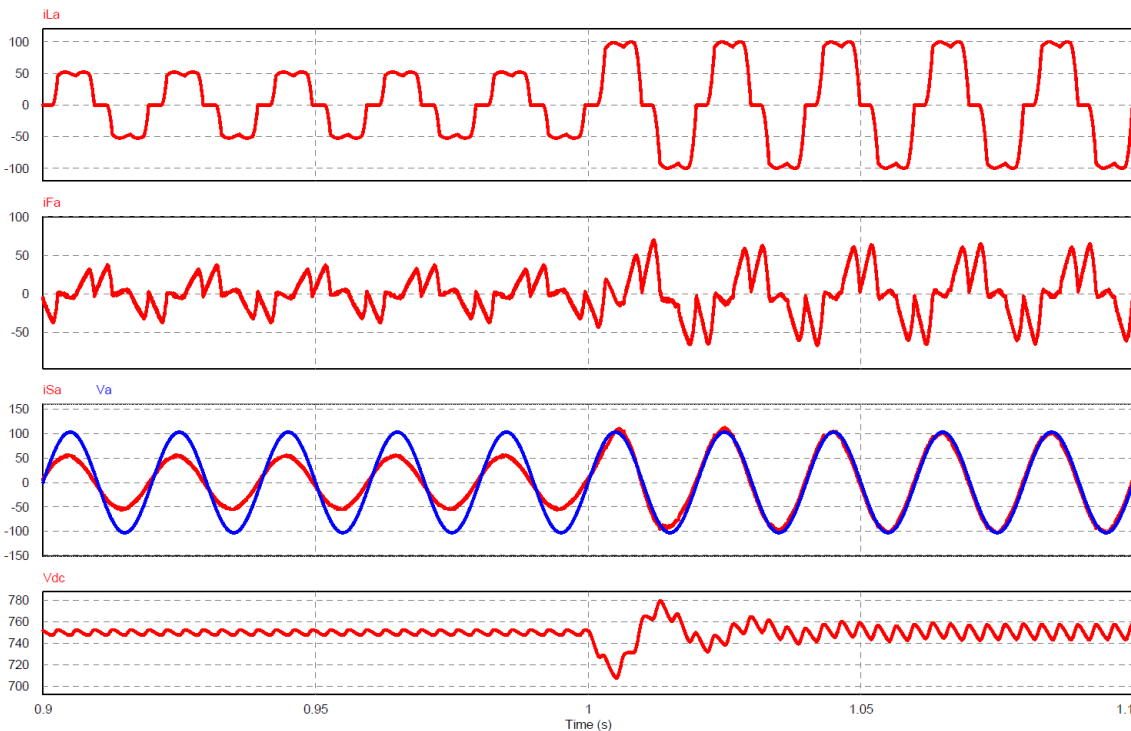
Şekil 9'da 3-fazlı akım yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için THD değeri %24.45'den %3.14'e düşmüş, GF değeri ise 0.95'den 0.99'a çıkmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi Adaline

YSA tabanlı 3-fazlı akım yöntemi ile denetlenen PAGF, kararlı hal çalışma durumunda harmonik ve reaktif güç kompanzasyonunu başarılı bir şekilde gerçekleştirmektedir.

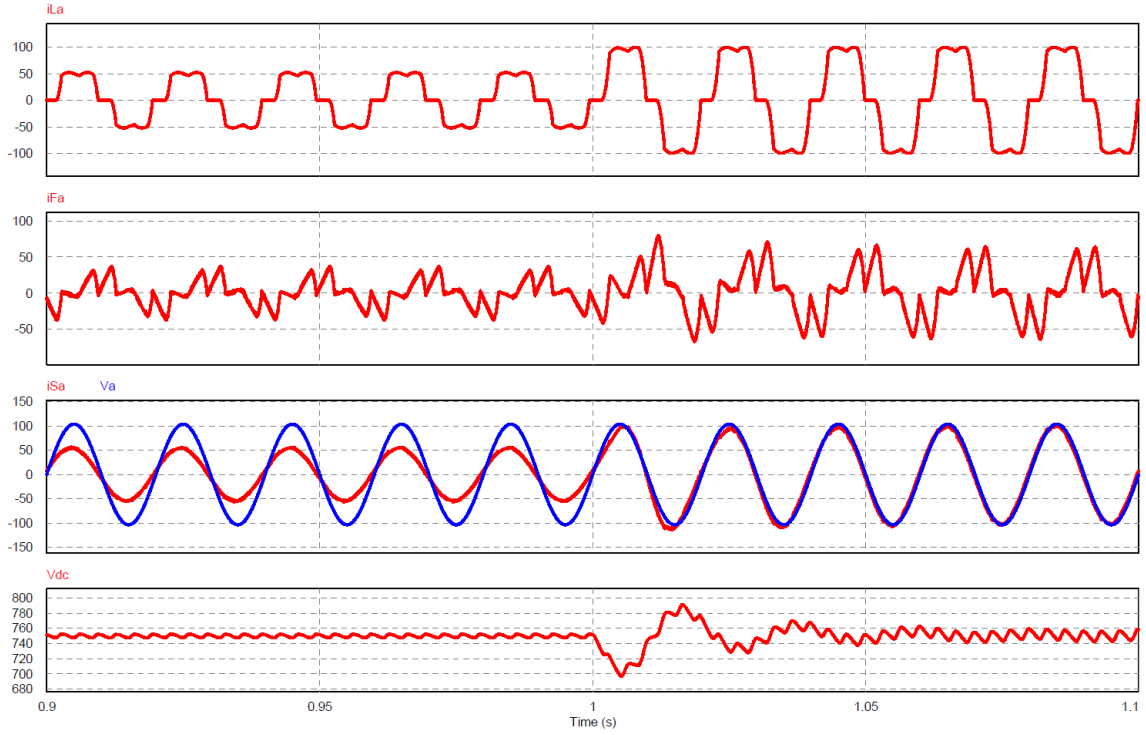
Şekil 10'da anlık güç yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için THD değeri %24.45'den %2.89'a düşmüş, GF değeri ise 0.95'den 0.99'a çıkmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi Adaline YSA tabanlı anlık güç yöntemi ile denetlenen PAGF, kararlı hal çalışma durumunda harmonik ve reaktif güç kompanzasyonunu başarılı bir şekilde gerçekleştirmektedir.

Şekil 11'de 2-fazlı (DQ) akım yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için THD değeri %24.45'den %3.11'e düşmüş, GF değeri ise 0.95'den 0.99'a çıkmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi Adaline YSA tabanlı 2-fazlı (DQ) akım yöntemi ile denetlenen PAGF, kararlı hal çalışma durumunda harmonik ve reaktif güç kompanzasyonunu başarılı bir şekilde gerçekleştirmektedir.

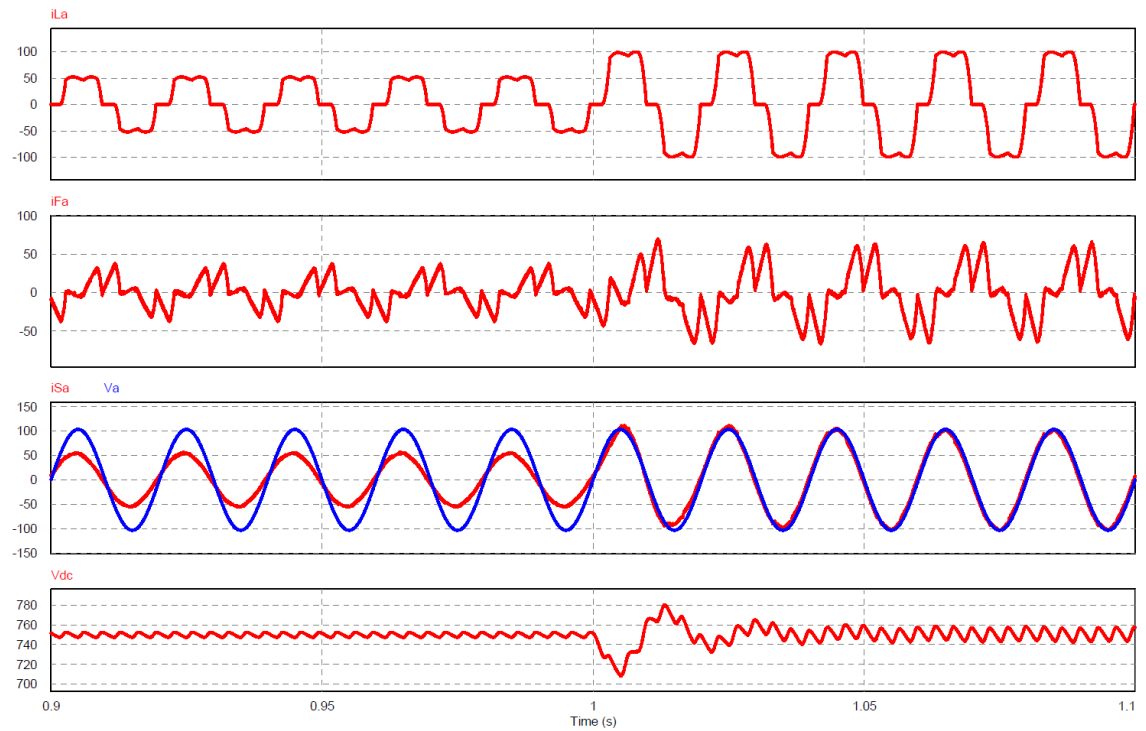
Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'de ise kararlı halde çalışan güç sistemindeki doğrultucu yükü $t = 1$ s anında artırıldığında sistemin geçici hal koşulu altında benzetim sonuçları incelenmiştir. PAGF, yine her üç farklı yöntem için başarılı bir harmonik ve reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirmekte ve gösterilen parametreler kısa sürede kararlı hal değerlerine erişmektedir.



Şekil 12. Adaline YSA tabanlı 3-fazlı akım yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için a-fazına ait geçici hal benzetim sonuçları: Yük akımı iLa (50A/div), filtre akımı iFa (50A/div), şebeke akımı iSa (50A/div) ve gerilimi Va (150V/div), ve evirici DA kondansatörünün gerilimi Vdc (20V/div), zaman t (50ms/div)



Şekil 13. Adaline YSA tabanlı anlık güç yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için a-fazına ait geçici hal benzetim sonuçları: Yük akımı i_{La} (50A/div), filtre akımı i_{Fa} (50A/div), şebeke akımı i_{Sa} (50A/div) ve gerilimi V_a (150V/div), ve evirici DA kondansatörünün gerilimi V_{dc} (20V/div), zaman t (50ms/div)



Şekil 14. Adaline YSA tabanlı 2-fazlı (DQ) akım yöntemi ve $\alpha = 0^\circ$ için a-fazına ait geçici hal benzetim sonuçları: Yük akımı i_{La} (50A/div), filtre akımı i_{Fa} (50A/div), şebeke akımı i_{Sa} (50A/div) ve gerilimi V_a (150V/div), ve evirici DA kondansatörünün gerilimi V_{dc} (20V/div), zaman t (50ms/div)

8. Sonuçlar

Bu makalede Adaline tabanlı yapay sinir ağlarına dayanan ve gürültü filtresi gibi çalışan 3-farklı referans akım çıkartım yöntemiyle paralel aktif güç filtresi denetimi sunulmuş yapılan benzetim sonuçları ile de hem kararlı ve geçici hallerde çalışma performansı açısından hem de uygulamadaki işlem yükü açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırılan yöntemlerin tümü pasif filtrelerin kullanıldığı benzer yöntemlere göre daha az sayıda işlem gerektirmektedirler. Ayrıca sürekli değişen harmonik bileşenleri gerçek zamanlı belirlemede de etkin ve hızlıdır. Farklı çalışma koşulları altında alınan benzetim sonuçları, önerilen yöntemlerle denetlenen PAGF'nin hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonunu başarıyla gerçekleştirdiğini doğrulamıştır.

Kaynaklar

- [1] Gao D., Sun X., A Shunt Active Power Filter with Control Method Based on Neural Network, Proceedings of International Conference on Power System Technology, PowerCon 2000, Vol. 3, 4-7 Dec. 2000, pp. 1619 – 1624, 2000.
- [2] Abdeslam D.O., Wira P., Flieller D., Merckle J., “Power Harmonic Identification and Compensation with an Artificial Neural Network Method”, International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'2006), Montreal, Canada, 2006.
- [3] Hekimoğlu B., Abut N., “Adaline Tabanlı Referans Akım Çıkartım Yöntemi ile Paralel Aktif Güç Filtresi Denetimi”, 3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK 2009, 21-22 Mayıs, pp. 269-273, Kocaeli, 2009.
- [4] Hekimoğlu B., Abut N., “Adaline Tabanlı Yapay Sinir Ağlarına Dayalı Uyarlamalı Gürültü Giderici Yöntemi ile Paralel Aktif Güç Filtresi Denetimi”, 5. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, ELECO 2008, Vol. 1, 26-30 Kasım 2008, pp. 296-300, Bursa, 2008.
- [5] Hekimoğlu B., Abut N., “Yapay Sinir Ağları Tabanlı Harmonik Bileşen Çıkartım Yöntemi ile Paralel Aktif Güç Filtresi Denetimi”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi 30. Yıl Sempozyumu, 16-17 Ekim 2008, pp. 242-247, Adana, 2008.
- [6] Hagan M.T., Demuth B.H., Beale M., “*Neural Network Design*”, PWS Publishing, Boston, 1996.
- [7] Abdeslam D.O., Wira P., Merckle J., Flieller D., Chapuis Y.A., “A Unified Artificial Neural Network Architecture for Active Power Filters”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 1, pp. 61-76, 2007.
- [8] Peng F.Z., Ott Jr. G.W., Adams D.J., “Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire Systems”, *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 13, No. 6, pp. 1174-1181, 1998.