



# Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Asenkron Motorun Reaktif Güç Kompanzasyonunun PSCAD ile Modellenmesi

## *Modeling of Reactive Power Compensation of Induction Motor with PSCAD Using Parallel Active Power Filter*

Mustafa Güngör<sup>1\*</sup>, Mehmet Emin Asker<sup>2</sup>, Muhammed Bahaddin Kurt<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mardin Artuklu Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, mustafagungor@artuklu.edu.tr, ORCID :0000-0002-2702-8877

<sup>2</sup> Dicle Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, measker@dicle.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4585-4168

<sup>3</sup> Dicle Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, bkurt@dicle.edu.tr, ORCID:0000-0001-6983-2081

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 22 Şubat 2022  
Revizyon 12 Mayıs 2022  
Kabul 30 Mayıs 2022  
Online 28 Haziran 2022

#### Anahtar kelimeler:

*Paralel aktif güç filtresi, Üç fazlı asenkron motor, Güç katsayısı düzeltme, Anlık reaktif güç teorisi*

### ÖZ

Bu çalışmada, üç fazlı bir asenkron (ASM) motorun üç faz-üç telli gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresi (PAGF) yardımı ile güç katsayısının ( $\cos\phi$ ) düzeltilmesi amaçlı PSCAD/EMTDC yazılımı kullanılarak hazırlanan bir benzetim çalışması verilmiştir. Benzetim modeli üç fazlı bir asenkron motor, üç faz-üç telli gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresi ve AC kaynaktan oluşmaktadır. Paralel aktif güç filtresini kontrol için anlık reaktif güç teorisi tekniğini kullanarak referans akımlar üretmektedir. Fabrikalar ve işletmelerde yoğun olarak kullanılan üç fazlı asenkron motorların şebekeden anlık olarak değişen reaktif güç talepleri olmaktadır. Bu güç talepleri pasif filtrelerle düzeltilbilse de birçok olumsuz yönü de bulunmaktadır. Gerçekleştirilen benzetim çalışması ile güç katsayısının hızlı bir şekilde düzeltilbildiği gösterilmiştir. Ayrıca, yapılan benzetim çalışmasında PAGF'nin dinamik yük şartlarına cevabı oldukça iyi olduğu alınan sonuçlardan anlaşılmaktadır.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 22 February 2022  
Received in revised form 12 May 2022  
Accepted 30 May 2022  
Available online 28 June 2022

#### Keywords:

*Parallel active power filter, Three-phase asynchronous motor, Power factor correction, Instantaneous reactive power theory*

### ABSTRACT

In this study, a simulation study prepared by using PSCAD/EMTDC software for the correction of the power coefficient ( $\cos\phi$ ) of a three-phase asynchronous (ASM) motor with the help of a three-phase-three-wire voltage fed parallel active power filter (PAGF) is given. The simulation model consists of a three-phase asynchronous motor, a three-phase-three-wire voltage-supplied parallel active power filter and an AC source. It generates reference currents using the instantaneous reactive power theory technique to control the parallel active power filter. Three-phase asynchronous motors, which are used extensively in factories and businesses, have instantaneously changing reactive power demands from the network. With the simulation study, it has been shown that the power factor can be corrected quickly. In addition, it is understood from the results obtained in the simulation study that the response of PAGF to dynamic load conditions is quite good.

Doi: 10.24012/dumf.1077581

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Reaktif güç ve harmonikler şebekeyi olumsuz yönde etkileyen güç kalitesi problemlerinin en önemlilerindedir. Reaktif güç ve harmoniklerin yüksek gerilim sistemlerinde ve ağır sanayi tesislerinde kompanze edilmesi güç kalitesini arttırmak için önem arz etmektedir [1]. Aynı zamanda lineer olamayan yükler olan güç anahtarlarının kullanım alanları yaygınlaştıkça harmonikli akımlar şebeke sinyalinin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum düşük güç faktörü, düşük verimlilik, pasif elemanların aşırı ısınması gibi farklı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu için bugüne kadar kullanılan yöntem pasif devre elemanları ile yapılan filtrelerdir. Ancak pasif devre elemanları ile yapılan filtrelerin şebeke empedansı ile anlık olarak rezonansa girme riski vardır ve bu çok tehlikelidir. Aynı zamanda yükün talep ettiği yüksek reaktif güçlere çıkıldığında filtrelerde kullanılan pasif elemanların ağırlıkları ve hacimleri çok büyük ölçülere ulaşabilmektedir [2].

Günümüzde bozulmuş bir yük akımının neden olduğu bu tür problemleri çözmek için etkin bir çözüm, aktif güç filtrelerinin (AGF) kullanılmasıdır. Seri, paralel ve hibrit gibi farklı yapıya sahip AGF'ler, güç kalitesi problemlerinin büyük çoğunluğuna çözüm bulabilmek için denenmekte ve iyileştirme çalışmalarını günümüzde hala devam ettirmektedir [3]. Güç anahtarlarının çok yüksek frekanslarda anahtarlama yetenekleri sayesinde AGF'in yüksek frekanslı akım ve gerilim harmoniklerini de filtreleyebilmesine, reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesine, üç fazlı sistemlerde dengesizliğin giderilmesi ve nötr hattı akımlarının azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bu AGF'ler harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için günümüzün en etkili yöntemi olarak görülmektedir [4].

Paralel aktif güç filtresi (PAGF) ASM'nin talep ettiği reaktif gücü karşılamakla birlikte asenkron motor sürücüsünün şebekede meydana getirdiği akım bozulmalarına ters yönde akım enjekte ederek cevap verebilmektedir. Bu şekilde kaynak tarafında meydana gelebilecek olumsuzluklar ortadan kaldırılmış olur [5]. Üç fazlı ASM'ler fabrikalar ve atölyelerde çok yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Şebekeden talep ettikleri reaktif güçler bazen büyük boyutlara çıkabilmektedir. Bundan dolayı ağır sanayiye sahip birçok ülkede üretilen enerjinin önemli bir yüzdesi üç fazlı asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir [6]. Paralel aktif güç filtresi ile beraber kullanıldığında ise ASM'nin talep ettiği reaktif güç PAGF tarafından karşılanır.

Bu çalışmada PSCAD/EMTC'te hazırlanan üç fazlı bir ASM'nin üç fazlı-üç telli PAGF ile güç kompanzasyonu çalışılmıştır. PAGF doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonikleri yok etmek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmada kullanılırlar. Bu çalışmada yük olarak üç fazlı bir ASM seçilmiştir. Dolayısıyla reaktif güç kompanzasyonu hedeflenmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme için anlık reaktif güç teorisi, akım kontrol yöntemi için ise histerezis bant akım kontrol tekniğinin kullanılmıştır. Bir ASM'nin şebekeden talep ettiği reaktif gücün başarılı bir şekilde PAGF'den karşılanabildiği gösterilmiştir.

## PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) Programı

PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) dünyaca ünlü EMTDC elektromanyetik geçici simülasyon motoruna yönelik güçlü ve esnek bir grafik kullanıcı arabirimidir. PSCAD, kullanıcının şematik olarak bir devre oluşturmasını, bir simülasyon çalıştırmasını, sonuçları analiz etmesini ve verileri tamamen entegre, grafiksel bir ortamda yönetmesini sağlar. Kullanıcının bir simülasyon çalışması sırasında sistem parametrelerini değiştirmesine ve böylece simülasyon devam ederken etkileri görüntülenmesine olanak sağlar. PSCAD programı, elektrik şebekelerindeki zamana bağlı geçici olayları analiz etmek için kullanılan bir simülasyon programı olmakla birlikte, uygulamalı analizlerin zaman ve özel bilgi gerektirdiği durumlarda doğruluk ve verimlilik açısından güç elektroniği devrelerinin değerlendirilmesini yazılımsal hale getirip akıllı yöntemler ile simülasyon yapan bir yazılımdır. PSCAD aynı zamanda güç kalitesi ve özellikle geçişler ve harmonikler için test ve simülasyon imkânı sağlayan esnek ve etkili bir yazılımdır.

## Aktif Güç Filtreleri

Aktif güç filtreleri, yapısında bulunan inverter ve inverterin çıkışına bağlı dc kondansatör ile bobini üzerinde üretilen gerilimi veya akımı kontrol algoritmasına bağlı bir şekilde AC kaynağa ileten güç elektroniği tabanlı devreler olarak adlandırılır. Aktif filtrelerin ilk yatırım maliyeti pasif filtrelere göre fazla olmasına rağmen; şebeke empedansı rezonans riski taşıyor olması, yüksek frekanslarda lineer olamayan yüklerin sebep olduğu harmonikleri filtrelemesi ve hacimlerinin pasif filtrelere göre küçük olması AGF'leri ile yapılan uygulamaların artmasına sebep olmaktadır [7].

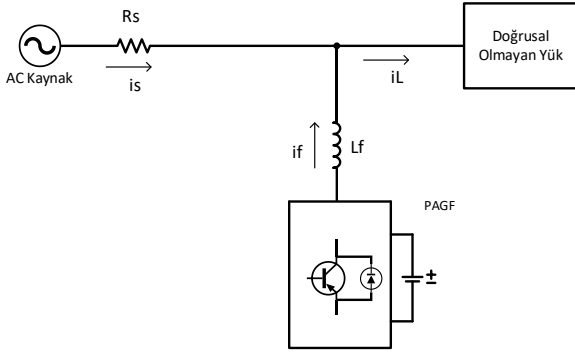
Güç elektroniği yarıiletken tabanlı devre elemanlarının kapasite ve anahtarlama frekansının gelişmesi ile birlikte, reaktif güç kompanzasyonu ve harmonikli akım filtreleme konusunda aktif güç filtreleri üzerine ilgi artmıştır. Aktif güç filtreleri uygulandığı sistemdeki akım ve gerilimdeki harmonik değişimlerine karşı filtreleme konusunda pasif filtrelere kıyasla çok daha başarılıdır. İlk yatırım maliyetleri fazla olsa da uzun dönemde enerji kalitesi ve maliyet açısından kar getirmektedirler [8].

Sistem yapılandırmasına göre aktif güç filtreleri; paralel aktif güç filtreleri, seri aktif güç filtreleri, hibrit aktif güç filtreleri, birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyicileri olarak dört grupta toplanırlar [9].

## Paralel Aktif Güç Filtreleri

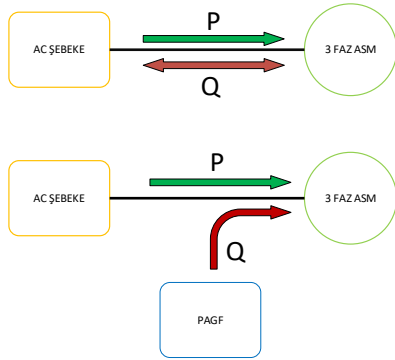
Bu benzetim çalışmasında paralel aktif güç filtresi (PAGF) kullanıldığından dolayı bu bölümde sadece PAGF'ne değinilmiştir. Literatürde PAGF'leri doğrusal olmayan yükler tarafından meydana getirilen akım bozulmalarını filtrelemek, çekilen reaktif gücü minimize etmek ve dengesiz yük sistemlerinde faz akımlarını dengelemek amacıyla kullanılmaktadırlar. Paralel aktif güç filtresi bağlandığı şebekenin yük akımını anlık olarak ölçer ve sisteme yük akımının harmonikli sinyalleri ile eşit genlikte fakat zıt yönde akım vererek 180° zıt reaktif güçle yükler [3]. Şekil 1'de gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresi verilmiştir. Üç telli-üç fazlı PAGF'de güç devresinin kontrolü için lazım olan darbeler, yük akımının çektiği harmonikli akım ölçülüp anlık

reaktif güç teorisine göre analizi yapıldıktan sonra üretilir. Bu çalışmamızda gerilim beslemeli üçfazlı-üç telli bir PAGF kullanılmıştır.



Şekil 1. Gerilim beslemeli paralel aktif güç fitresi

Şebekeye bağlı bir ASM'nin PAGF ile beraber kullanılıp kullanılmama durumunda güç akışı Şekil 2'de gösterilmiştir. Günümüzde sürme devreleri ile kontrol uygulamaları artan ASM'ler şebekeden reaktif güç talep etmekle birlikte harmonik akımlarda çekerek sinyal kalitesini bozabilmektedirler.



Şekil 2. Aktif Güç Filtresinin devrede olduğu ve olmadığı durum

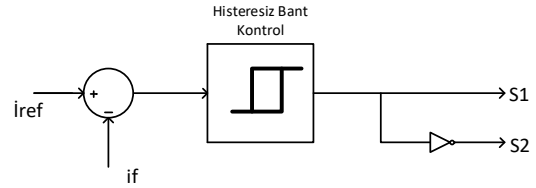
### Paralel aktif güç filtresinde kontrol

PAGF'nin kontrolü sadece harmoniklerin kompanzasyonu durumunda değil aynı zamanda çalışabileceği gücü içinde önem arz etmektedir. PAGF'nin kararlı durumdaki verimli çalışması kadar geçici durumlardaki davranışı aktif güç filtresinin kontrol yöntemi için oldukça önemlidir [10]. AGF'ler kontrol tekniklerine göre; zaman domeni teknikleri ve frekans domeni tekniği olarak ikiye ayrılır. Kontrol tekniğine ileride ayrıntılı bir şekilde değinilecektir.

### Histerezis bant akım kontrol tekniği

Bu çalışmada, kontrol yöntemi olarak Histerezis Bant Akım Kontrol Tekniği (HBAT) kullanılarak anahtarlama sinyalleri elde edilmiştir. HBAT gerilim kaynaklı aktif güç filtresinin çoğu uygulamalarında anahtarlama sinyalleri üretmek için etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Anahtarlama sinyalleri üretmek için referans akımı ( $i_{ref}$ ) ile gerçek akımın ( $i_f$ ) bir histerezis bandında birleştirildiği bir kontrol tekniğidir. Simülasyonda kullanılan evirici çıkışındaki akımı kontrol etmek için çıkış akımları ve referans akımları karşılaştırılır ve elde edilen hata sinyalleri, anahtarlama sinyalleri üretmek için histerezis kontrolörlerine uygulanır [11]. Üretilen hata sinyali belirlediğimiz histerezis bandının üst sınırına

ulaştığında S2 anahtarı devreye girer ve akımı azaltır. Aynı şekilde hata sinyali histerezis bandının alt sınırına ulaştığında ise S1 anahtarı devreye girer ve akım değeri artırır. Hata sinyallerini üretmek için kullandığımız histerezis bant akım kontrol blok şeması Şekil 3'de verilmiştir [12].



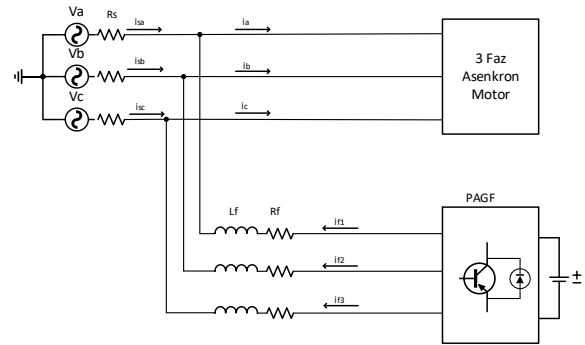
Şekil 3. Histerezis akım kontrol tekniği

### Sistem yapısına göre AGF sınıflandırması

AGF'lerde sınıflandırma yapılırken öncelikle şebekenin tek fazlı veya üç fazlı olmasına göre sınıflandırma yapılır. Daha sonra üç fazlı sistemlerde AGF'ler üç fazlı-üç telli veya üç fazlı-dört telli olmasına göre yapılandırılabilir. Bu çalışmamızda olduğu gibi bazı uygulamalarda üç fazlı doğrusal olmayan yükler nötrüz olarak üç telli sistemler olarak yapılandırılır. Üç fazlı dört telli sistemler üzerinden beslenen birçok tek fazlı doğrusal olmayan yük olabilmektedir. Bundan dolayı AGF'ler iki telli, üç telli, dört telli olmak üzere üç şekilde sınıflandırılırlar [13].

### Üç telli aktif güç filtresi

Üç telli AGF'ler üç fazlı üç telli doğrusal olmayan ve reaktif güç çeken yüklerin beslenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yapıdır. Şekil 4'de verilen yapı üç fazlı-üç telli aktif güç filtresinde kullanılan bir yapıdır.



Şekil 4. Üç faz üç telli AGF genel blok şeması

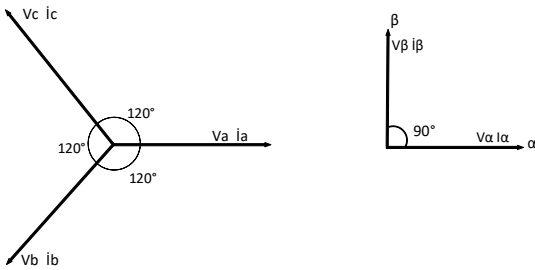
### Referans akım üretme

Referans akım harmonikli akımları söndürmek ve güç katsayısını düzeltmek amacıyla AGF'nin şebekeye vermesi gereken akımın hesaplanmasında kullanılır. AGF'nin ihtiyaç duyduğu harmonikli akımı dinamik bir şekilde üretebilmesi için, doğru ve hızlı bir referans akım üretme metodu kullanmak önemlidir.

Referans akım tahmin teknikleri literatürde zaman ve frekans domeni kontrolü olarak iki kategoride incelenmektedir. Frekans domeniindeki referans akım üretme kontrol yöntemi, harmonikli akım sinyallerinin fourier analizine dayanır. Frekans domeni yöntemi genel olarak; klasik fourier ve hızlı fourier dönüşümü algoritmaları, sinüs çarpma tekniği ve modifiye fourier serileri teknikleri şeklindedir. AGF'nin zaman alanındaki kontrol yöntemleri ise; kompanzasyon için

lazım olan referans akımın anlık olarak üretilmesine dayanmaktadır. Zaman domenii yöntemi genel olarak literatürde; sabit aktif güç algoritması, sabit güç faktörü algoritması, DQ yöntemi, anlık reaktif güç kontrol yöntemi (p-q), ve senkron akı algılama yöntemleridir[14].

Bu çalışmadaki referans akım üretme yöntemi, harmonikli ve reaktif güç çeken yüklerin gerilim veya akım değerlerinin anlık olarak ölçülüp, harmonikli akımı ve gerilimi söndürmek için zıt yönde akım veya gerilimin elde edilmesi dayanır. Anlık reaktif güç teorisi Akagi tarafından 1983 yılında öne sürülmüştür. Bu teoride göre istenen reaktif güç, gerilim ve akımlar anlık olarak ölçülüp elde edilen değerlere göre hesaplamalar yapılır. Anlık reaktif güç teorisi hesaplamaları için, öncelikle üç fazlı akım ve gerilim değerlerinin Clarke dönüşümü yapılarak akımlar ve gerilimler iki fazlı durağan yapıya dönüşümü sağlanır. Şekil 5’de görüleceği gibi a, b, c düzlemindeki üç fazlı akım ve gerilim değerlerinin uzay vektörleriyle gösterimi ve bu akım ve gerilimlerin  $\alpha$ - $\beta$  durağan yapıdaki dönüşümleri gözükmemektedir. Bilindiği üzere üç fazlı sistemdeki akım ve gerilimler  $120^\circ$  açı farkıyla üretildikleri için düzlem üzerine birbirine  $120^\circ$  açılı üç vektör şeklinde gösterilmiş [15].



Şekil 5. Üç fazlı abc sistemden iki fazlı  $\beta$ - $\alpha$  sisteme dönüşüm

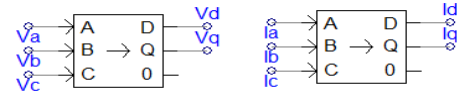
Zaman domeninde çalışma, frekans domenindeki çalışmaya göre birçok üstünlüklere sahiptir. Bunlar arasında zaman domenii yönteminin cevap hızının frekans domenine göre yüksek olması söylenebilir. Bununla birlikte zaman domeninde uygulama ve hesaplamalar daha kolaydır. Zaman domenii tekniğinin hızlı cevap yeteneği ve harmonikleri bastırmada iyi olması zaman domenii tekniğinin frekans domenii tekniğine göre çok daha üstün hale gelmesine sebep olmuştur [16].

### Zaman domeninde anlık reaktif güç kontrol yöntemi (p-q)

Bu çalışmada kontrol yöntemi olarak zaman domeninde anlık reaktif güç teorisi kullanılmıştır. Anlık reaktif güç teorisi yöntemi (p-q), a b c koordinatlarındaki 3 fazlı sistem gerilimlerinin ( $V_a, V_b, V_c$ ) ve yük akımlarının ( $I_a, I_b, I_c$ ) denklem (1) ve (2) kullanılarak  $\alpha$ - $\beta$  koordinatlarına Clarke dönüşümü yapılarak elde edilir. Bu dönüşüm PSCAD ile yapılan blok şeması Şekil 6’de ile gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

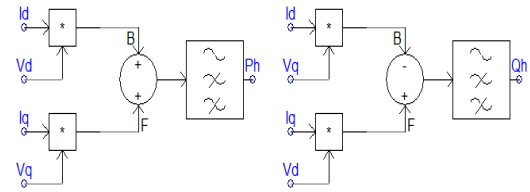


Şekil 6. Üç fazlı abc sistemden durağan dq dönüşümü için PSCAD modelleri

Dönüşümler yapıldıktan sonra, aktif gücün anlık gerçek değeri “p” ve reaktif gücün anlık değeri “q” nun hesabı denklem (3) de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

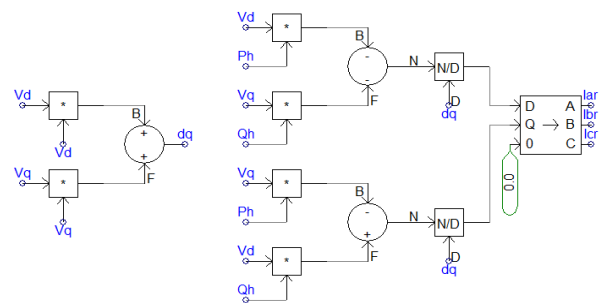
Aktif ve reaktif gücün her biri sürekli ve değişken değerlerden oluşur. Sürekli olarak değişen bu değerler, temel akım ve gerilimleri PAGF’nin şebekeye vermesi gereken kompanzasyon akımlarını hesaplamak için istenmeyen güç olarak adlandırdığımız Ph ve Qh ile gösterilen bileşenlerden ayırmak gerekir. Şekil 7’te gösterildiği gibi, istenen güç bileşenlerini temel akım ve gerilimden ayırmak için bir yüksek geçiren filtreler (YGF) kullanılmıştır.



Şekil 7. Anlık istenmeyen güç bileşenlerinin filtrelenmesi için YGH filtre PSCAD modelleri

İstenmeyen güç bileşenleri daha sonra denklem (4) kullanılarak  $\alpha$ - $\beta$  koordinatlarındaki kompanzasyon akımlarını belirlemek için kullanılmıştır. Bu durum Şekil 8’te gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} \quad (4)$$



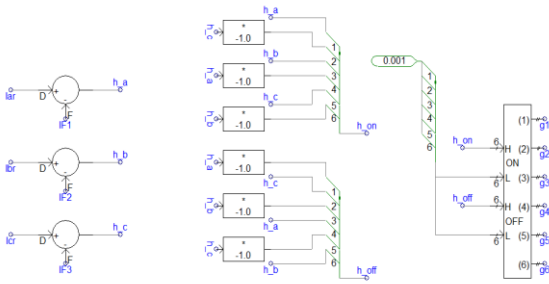
Şekil 8. Referans akımlar ( $I_{ar} I_{br} I_{cr}$ ) için PSCAD modelleri

a, b, c koordinatlarındaki  $[I_{ar}, I_{br}, I_{cr}]$  referans kompanzasyon akımları daha sonra denklem (5)'te gösterildiği gibi  $\alpha$ - $\beta$  koordinatlarındaki akımları ters Clarke dönüşümü uygulanarak hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\beta r} \\ I_{\alpha r} \end{bmatrix} \quad (5)$$

### PAGF için anahtarlama sinyallerinin üretimi

PAGF'si bir inverterden oluşmaktadır. Bu inverterin kontrolü için gerekli olan anahtarlama sinyalleri (PWM) için farklı modülasyon yöntemleri kullanılabilir. Bu çalışmada anahtarlama sinyalleri üretmek için histerezis akım kontrollü modülasyon tekniği kullanılmıştır. PAGF'nin anahtarlarına aktif güç değişimlerine bağlı olarak uygulanması gereken darbeleri üretmek için gerçek filtre akımları  $[IF1, IF2, IF3]$  ve referans kompanzasyon akımları  $[I_{ar}, I_{br}, I_{cr}]$  arasındaki farktan faydalanılır. Bu fark hata akımı olarak adlandırılır. Hata akımı bir histerezis kontrolör yardımıyla anahtarların iletim sırasına bağlı olarak, PAGF anahtarlarını açmak ve kapatmak için gerekli olan anahtarlama sinyallerini (PWM) hesaplamak için kullanılır. Hesaplanan bu hata akımlarının üretildiği PSCAD blokları Şekil 9 gösterilmiştir.



Şekil 9. PAGF referans akımlar kullanılarak anahtarlama sinyallerinin üretimi

### Sonuçlar ve Tartışma

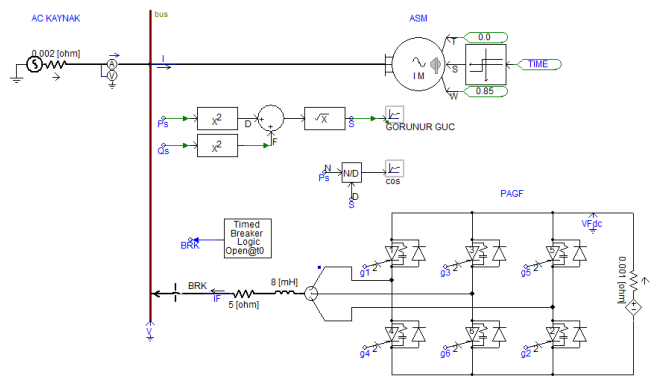
Benzetim çalışmasında üç fazlı üç telli PAGF ile üç fazlı bir ASM'nin reaktif güç kompanzasyonunun gerçekleştirilmesi için PSCAD/EMTDC paket programı kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle, üç fazlı üç telli paralel aktif güç filtresinin genel yapısı incelenip, reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme için en uygun referans akım bulma ve kontrol yöntemi olarak p-q teorisi olarak bilinen Akagi tarafından öne sürülen anlık reaktif güç teorisi kullanılmıştır. Akım kontrol yöntemi için ise histerezis bant akım kontrol tekniğinin kullanılmıştır. Şekil 10'da PSCAD/EMTDC'te hazırlanan üç fazlı bir ASM'nin üç fazlı-üç telli PAGF ile güç kompanzasyonunun blok şeması gösterilmiştir. Sistemde kullanılan PAGF asenkron motora paralel bağlanmış olup PAGF istenilen bir zamanda devreye alınabilmesi için bir anahtar üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Kullanılan üç fazlı ASM ve üç fa-üç telli fazlı PAGF simülasyon çalışmalarında uyum içerisinde çalışmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 11 ile Şekil 17 arasında verilmiştir. Tablo 1'de PSCAD'te kullanılan üç fazlı asenkron motor ve üç telli paralel aktif

filtresinin bazı önemli görülen parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 1: Simülasyonda Kullanılan Parametreler

AC Kaynak Parametreleri	
Temel Kaynak Gerilim	380V
Temel Görünür Güç	20kVA
Temel Frekans	50Hz
Kaynak Direnci	0.002Ω
PAGF Parametreleri	
Filtre Hat Endüktansı	8mH
Filtre Hat Direnci	5 Ω
Filtre DC Tarafı Gerilimi (DC)	1.2kV
ASM Parametreleri	
RMS Faz Gerilimi	380V
ASM Gücü	7.46 kW
Stator Direnci	0.066 [pu]
Stator Doymamış Kaçak Reaktansı	0.046 [pu]
Rotor Doymamış Kaçak Reaktansı	0.122 [pu]
Doymamış Mıknatıslanma Reaktansı	3.86 [pu]
Kutup Sayısı	4
Seçilen Yüzde Kayma	% 15

Benzetim çalışmasında sonuçlar elde edilirken %15'lik kayma değerleri ile sonuçlar elde edilmiştir. Asenkron motordaki farklı kayma değerleri, rotor devrinin yüklerle birlikte değişmesi anlamına gelmektedir. Benzetim çalışmasında üç fazlı asenkron motor ilk kalkınma anında atalet momenti ile çalıştırılmış, belirli bir süre sonra yük devreye alınmıştır. Asenkron motor çalıştırıldığı kayma değerindeki hızına ulaştıktan sonra ve geçici durum bittikten sonra PAGF bir anahtar üzerinden ASM'ye paralel bağlanmıştır. Bu şekildeki bir çalışma ile PAGF bağlı değilken ve bağlandıktan sonra; akım, güç ve güç katsayısının değişimleri ayrıntılı bir şekilde gözlemlenebilmiştir.

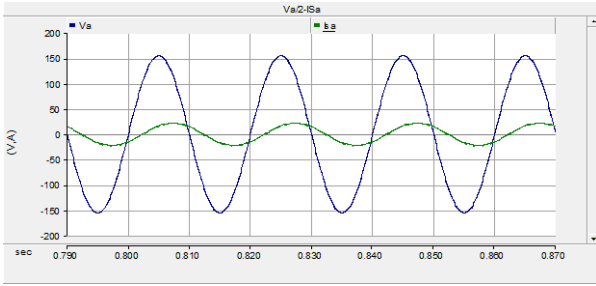


Şekil 10: Benzetim çalışmasının genel blok şeması

PAGF aktif olmadığı durumda kaynaktan çektiği akım Şekil 11'de verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi kaynaktan çektiği akım gerilimden geride kalmaktadır. Diğer bir ifade ile üç fazlı ASM kaynaktan aktif güç ile birlikte reaktif güçte çekmektedir. ASM yüksüz durumdayken genel olarak %3-%5'lik bir kayma değeri ile çalışır ve yaklaşık olarak aktif gücün iki-üç katına kadar şebekeden reaktif güç talep ederler.



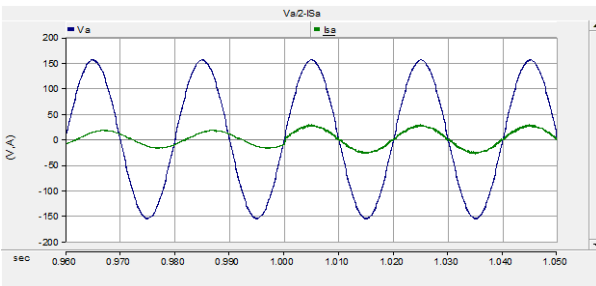
Yani güç katsayısı sıfıra yakın bir değerdedir. ASM'ye yük bağlandığı zaman kayma değeri ile birlikte kaynaktan çekilen aktif güç artmakta ve çekilen reaktif güç ise aktif güce oranla daha az artmaktadır.



Şekil 11: PAGF devrede değilken a fazını gerilim ve akımları

Reaktif güçten kaynaklı sıfıra yakın güç katsayısının 1'e yaklaştırılabilmesi için yapılması gereken, reaktif gücü meydana getiren harmonikli akımla aynı büyüklükte fakat zıt yönde reaktif gücü kaynağa uygulamaktır. Asenkron motorun yük değeri değiştikçe kaynaktan çekilen reaktif güç değeri de değişmektedir. Benzer şekilde fabrika veya işletmelerde onlarca ASM'nin sürücü devresi ile birlikte kullanıldığı uygulamalarda reaktif güçteki bu anlık değişimler pasif filtreler ile kontrol edilemez bir hal almaktadır. Bundan dolayı pasif filtreler yapılan kompanzasyonlar tam olarak ihtiyaç duyulan reaktif güce karşılık veremezler. PAGF'ler ise ihtiyaç duyulan harmonikli akıma geniş aralıklarda hızlı ve aktif cevap verebilmektedir. Yapılan bu benzetim çalışmasında bu sonuca ulaşılabilmektedir.

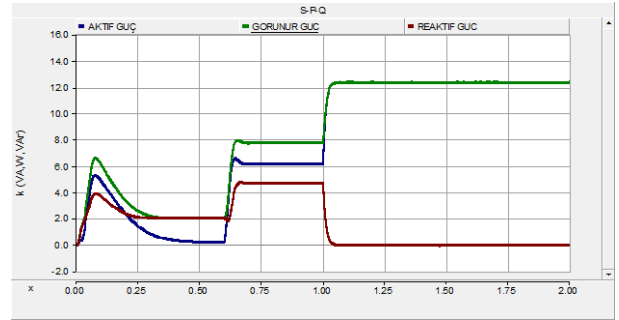
Bu benzetim çalışmada elde edilen sonuçlar %15'lik kayma değerine gerçekleşmiştir. Benzetimde seçilmiş bu kayma değeri genel olarak bir ASM'nin çalışma aralıklarına yakın değeri olup, gerçek uygulama koşullarını ifade etmektedir. ASM %15'lik bir kayma ile çalışırken kaynak akımı ve kaynak gerilimi Şekil 12'deki gibi olmaktadır. İlk kalkınma anında asenkron motor boşta çalıştırılmış olup daha sonra ise %15'lik kayma hızında çalışacak şekilde yüklenmiştir. Asenkron motor geçici durumdan çıktıktan sonra 1'ci saniyede PAGF aktif hale gelmekte ve a fazı akımı (I<sub>a</sub>) ile gerilimi (V<sub>a</sub>) arasındaki faz farkı çok kısa süre içerisinde sıfır olmaktadır.



Şekil 12: Kayma %15 iken a fazının gerilim ve akım durumu

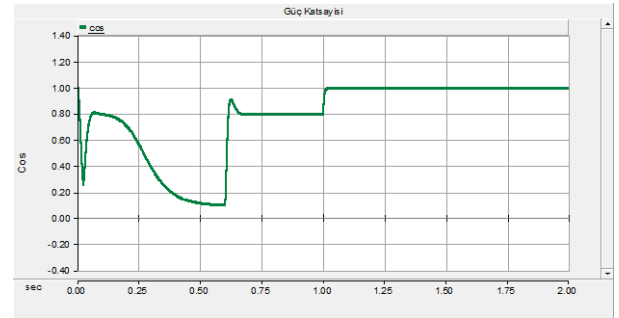
A fazının gerilimi ve akımı arasındaki faz açısının sıfır olması ile çekilen reaktif güç sıfır olmaktadır. Bu durum Şekil 13'de görülmektedir. Aynı zamanda şekilde görüldüğü gibi kaynaktan çekilen reaktif güç ise 4.7kVAr'dan çok kısa bir sürede sıfır seviyelerine düşmektedir. Aktif güç ise 7.8kW

seviyelerinden yaklaşık olarak 12kW seviyelerine çıkmıştır. Bunun sebebi görünür güç(S), aktif ve reaktif güçlerin vektörel toplamı olmasıdır. Yani reaktif güç sıfıra yaklaştıkça ASM'nin çektiği aktif güç görünür güce eşit olmakta ve yükselmektedir.



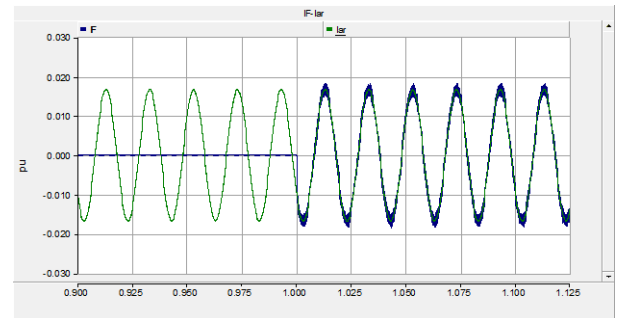
Şekil 13: Kayma %15 iken Aktif-Reaktif-Görünür güç durumu

Çekilen reaktif gücün bir göstergesi olan güç katsayısı(cosφ) ise Şekil 14'de gösterildiği gibi ASM boşta ilk çalışmaya başladıktan sonra 0.1 seviyelerine yaklaşmış ve daha sonra asenkron motor yüklenip geçici duruma sona erdikten sonra 0.8 seviyelerine çıkmıştır. PAGF 1'ci saniyede devreye alındığında ise 0.025 saniye gibi çok kısa bir sürede güç katsayısı 1'e yaklaşmaktadır.



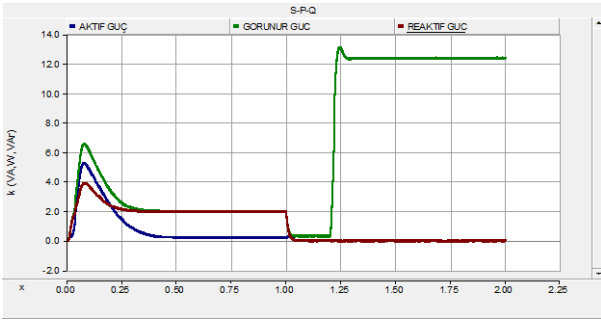
Şekil 14: Kayma %15 iken güç katsayısının durumu

ASM'nin %15 kayma ile çalışırken kompanzasyon ve harmonik filtreleme için gerekli referans akım ve PAGF akımları Şekil 15'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi PAGF pasif durumdayken filtre akımı 0A'dır. Daha sonra 1'ci saniyede PAGF devreye alındığında filtre akımı hesaplanan referans akımın üzerine binmekte ve referans akımı takip etmektedir.



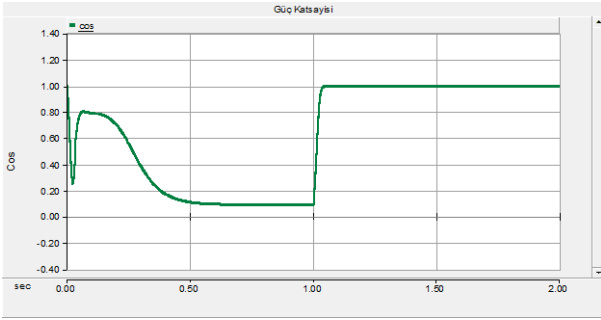
Şekil 15: PAGF'nin akımının üretilen referans akımı takip etmesi

Asenkron motor atalet momenti ile çalıştırılıp PAGF'nin devreye alındığı senaryo Şekil 16'da görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi PAGF'i asenkron motor yüksüz halden yüklü hale geçtiği durumda dahi çok hızlı bir şekilde anlık reaktif güç talep değişimine cevap verebilmektedir. Yani ilk olarak motor boşta çalışmaya başlayıp sonra 1'ci saniyede PAGF devreye alınıyor. Bu durumda çekilen reaktif güç 2kVAr seviyelerinde iken, aktif güç 2kW seviyelerindedir. Daha sonra PAGF devreye alındığında reaktif güç sıfır seviyelerine düşmektedir. ASM %15 kaymada çalışacak şekilde yüklendiği anda ise aktif güç 12.4KW seviyelerine yükselmekte ama reaktif güç sıfır seviyelerindeki durumunu koruduğu görülmektedir.



Şekil 16: PAGF devre iken ASM nin yüklü duruma geçmesi durumunda aktif, reaktif ve görünür güç

Güç katsayısı ise Şekil 17'de gözüktüğü gibi ASM boşta çalıştırılıp geçici durum bittikten sonra 0.1 seviyelerinde iken 1'ci saniyede 1'ya yaklaşmaktadır. ASM %15 kayma ile yüklendiği anda ise güç kat sayısı 1 seviyelerindeki durumunu koruduğu görülmektedir.



Şekil 17: PAGF devre iken ASM nin yüklü duruma geçmesi durumunda güç katsayısı

## Sonuç

Bu benzetim çalışmasında üç fazlı bir asenkron motorun reaktif güç kompanzasyonu için PSCAD paket programındaki ASM modeli kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm verileri değerlendirildiğinde, ASM'nin şebekeden talep ettiği reaktif güç, başarılı bir şekilde PAGF'den karşılanabildiği gösterilmiştir. İlk senaryoda PAGF kaynağa bağlanmadan önce ASM'nin geçici çalışma durumundan çıkılması beklenmekte ve değerler nominal hale geldikten sonra devreye alınması için bir anahtar kullanılmıştır. Bu amaçla anahtar devreye girmeden önce ASM'nin nominal çalışma değerlerine ulaşmasına izin verilmiştir. Aktif filtre şebekeye bağlandıktan yaklaşık 0.025 saniye sonra şebekeden karşılan

reaktif güç aktif filtreden karşılanmaya başlamıştır. Seçilen %15'lik kayma değerinde, reaktif güç kompanzasyonu benzetim çalışmasında başarılı bir şekilde yapıldığı gözlenmiştir. ASM kendi atalet momenti üzerinden çalışırken çekilen reaktif gücün yaklaşık olarak aktif güce eşit olduğu, daha sonra ASM yüklenince yani kayma değeri %15 olunca kaynaktan çekilen reaktif gücün aktif güç ile beraber arttığı ama aktif gücün daha çok arttığı gözlemlenmiştir. Daha sonra PAGF'nin reaktif güce karşı dinamik tepkisinin başarılı olduğu sonucu grafiklerinden çıkarılabilmektedir. İkinci senaryoda ise ASM yüklenmeden önce PAGF devreye alınmıştır. PAGF aktif durumdayken ASM yüklendiği anda reaktif gücün sıfır seviyelerindeki durumunu koruduğu sonuçlardan gözlenmiştir. Sonuç olarak PAGF ile ASM'in ihtiyaç duyduğu reaktif gücü ister boş çalışmada ister yüklü çalışmada veya boş çalışmadan yüklü çalışma duruma geçişlerde hızlı bir şekilde karşılayabildiği sonuçlardan gözlemlenebilmektedir.

## Kaynaklar

- [1]E. Özdemir, Ş. Özdemir, M. Kale, "Aktif Güç Filtresi ile Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu", ELECO Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendis Sempozyumu, 2002, 135-139.
- [2]J. C. Das, "Passive filters-potentialities and limitations", IEEE Trans. On Indst. Appl., 40 (1): 232-241, 2004.
- [3]M. El-Habrouk, M.K. Darwish, P. Mehta, "Active Power Filters: A Review", IEEE Proc. Electric Power Appl., 147(5): 403-413, 2000.
- [4]M. Gedikpınar, M. Güngör, "Bir-Fazlı İndüksiyon Motorlar İçin Paralel Aktif Güç Filtresi Tabanlı Reaktif Güç Kompanzasyonu", Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 29 (2), 185-193, 2017.
- [5]N. F. Adan, and D. M. Soomro Articles, "A hybrid filter to mitigate harmonics caused by nonlinear load and resonance caused by power factor correction capacitor", AIP Conference Proceedings 1788, 030118, 2017.
- [6]Ö. Ali Karaman, A. Gündoğdu, and M. Cebeci, "Performing reactive power compensation of three-phase induction motor by using parallel active power filter", International Advanced Researches and Engineering Journal 04(03): 239-248, 2020.
- [7]O. Kaplan, "Bir fazlı paralel aktif güç filtreleri için sensörsüz da gerilim kontrolü", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [8]T. L. Skvarenina, "The Power Electronics Handbook", CRC Press, 477-478, 2002.
- [9]V. F. Pires, J.F.A. Silva, "Teaching Nonlinear Modeling, Simulation, and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/SIMULINK", IEEE Transactions on Education, 45 (3): 253-261, 2002.
- [10]L. Benchaita, S. Saadate, A. Salemnia, "A Comparison of voltage source shunt active power filter by simulation and experimentation", IEEE Trans. Power Electronics, 14(2): 642-647, 1999.

- [11]Karaman, Ö. A., Erken, F., & Cebeci, M. (2018). Decreasing harmonics via three phase parallel active power filter using online adaptive harmonic injection algorithm. *Tehnički vjesnik*, 25(Supplement 1), 157-164.
- [12]Mustafa Güngör, Paralel Aktif Güç Filtresi ile Bir Fazlı Asenkron Motorun Reaktif Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniv. Fenbilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [13]Selin ÖZÇİRA, “Aktif Güç Filtre Tipinin Kompanze Edilmesi Gereken Büyüklüğe Göre Belirlenmesi”, *GU J Sci, Part C*, 6(3): 691-704, 2018.
- [14]SARIBULUT, L., Ahmet, T. E. K. E., Meral, M., & Tumay, M. (2011). Active power filter: review of converter topologies and control strategies. *Gazi university journal of science*, 24(2), 283-289.
- [15]H. Akagi, “Instantaneous Power Theory Ders Notları, Tokyo Institute of Technology”, Tokyo, Fall 2010.
- [16]D. Chen, S. Xie, “Review of the Control Strategies Applied to Active Power Filters”, *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, April, Hong, 2004.