

Atf İçin: Çelik, D. (2023). Aktif Güç Filtresi ile Akım Harmonikleri, Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Etkili Güç Akışı için Geliştirilmiş Bir Kontrol Yöntemi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2), 995-1004.

To Cite: Çelik, D. (2023). An Improved Control Method for Current Harmonics, Reactive Power Compensation and Effective Power Flow with Active Power Filter. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2), 995-1004.

Aktif Güç Filtresi ile Akım Harmonikleri, Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Etkili Güç Akışı için Geliştirilmiş Bir Kontrol Yöntemi

Doğan ÇELİK^{1*}

Öne Çıkanlar:

- Farklı yüklerin harmonik etkilerinin ortadan kaldırılması
- Reaktif güç kompanzasyonun etkili bir şekilde sağlanması
- Güç faktörünün iyileştirilmesi

Anahtar Kelimeler:

- Reaktif güç,
- Aktif güç filtresi
- Harmonik kompanzasyonu
- Endüktif ve kapasitif yükler

ÖZET:

İndüktörler, kapasitörler, transformatörler, doğrultucular, kesintisiz güç kaynakları, elektrikli makineleri ve flüoresan lambalar gibi çeşitli konut yükleri, güç faktörünün bozulmasına ve harmoniklere neden olmaktadır. Elektrik güç sistemlerine bağlı reaktif yükler, ana şebekedeki akım/güç kalitesini ve güç faktörünü azaltan reaktif güç üretmektedirler. Bu nedenle, istikrarlı ve güvenilir bir elektrik şebekesi için yeterli reaktif güç sağlanması gerekir. Bu bağlamda, bu makalede üç fazlı şönt aktif güç filtresi (ŞAGF) ile farklı yüklerin harmonik etkilerinin ortadan kaldırılması, reaktif güç kompanzasyonun ve etkili bir şekilde reaktif güç akışını sağlanması için geliştirilmiş bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen kontrol yönteminin performans sonuçları, dirençli-kapasitif doğrusal yük (D-KDY), dirençli-endüktif doğrusal yük (D-EDY), doğrusal olmayan yük (DOY) ve yüksek endüktif DOY gibi kapsamlı durum çalışmaları altında incelenmiş ve geleneksel kontrol yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kontrol yöntemi ile yüksek bir güç faktörü sağlamak için ana şebekeden güç çekmeden ŞAGF yeterli reaktif güç sağlamaktadır. Çeşitli durum çalışmaları, önerilen kontrol yöntemi şebeke akımı ve gerilimi arasındaki faz uyumsuzluğunu azaltabileceğini ve şebeke akımı harmoniklerini azaltabileceğini göstermektedir. Farklı yük grupları etkisi altında, önerilen kontrol yöntemi ile yaklaşık 0.99 güç faktörü değeri elde edilirken geleneksel kontrol yöntemi ile 0.79 ve 0.81 gibi daha düşük güç faktörü değerleri elde edilmiştir. Ayrıca önerilen kontrol yöntemi ile farklı harmonik yüklerin etkisi ortadan kaldırılarak akım harmoniklerinin THB¹ si %1.0 seviyesinin altına düşürülmüştür.

An Improved Control Method for Current Harmonics, Reactive Power Compensation and Effective Power Flow with Active Power Filter

Highlights:

- Elimination of harmonic effects of different loads
- Effectively providing reactive power compensation
- Enhanced power factor

Keywords:

- Reactive power
- Active power filter
- Harmonic compensation
- Inductive and capacitive loads

ABSTRACT:

Various residential loads such as inductors, capacitors, transformers, rectifiers, uninterruptible power supplies, electrical machines and fluorescent lights result in power factor deterioration and harmonics. Reactive loads linked to the electrical power systems produce reactive power, which declines the current/power quality and power factor in the main network. Therefore, adequate reactive power is required to provide a stable and reliable electric grid. In this paper, an improved control method is proposed to eliminate harmonic effects of different loads, to provide reactive power compensation and effective reactive power flow with a three-phase shunt active power filter (SAPF). The performance results of the proposed control method is examined and compared with the conventional control under comprehensive case studies such as resistive-capacitive linear load (R-CLL), resistive-inductive linear load (R-ILL), non-linear load (NLL) and highly inductive NLL. With the proposed control method, the SAPF supplies adequate reactive power without being drawn power from the main grid to provide a high power factor. Various case studies indicate that the proposed control method can decrease phase discrepancy between grid current and voltage as well as reduce grid current harmonics. Under the impact of different load groups, approximately 0.99 power factor values have been obtained by the proposed control method, while lower power factor values such as 0.79 and 0.81 have been obtained by the conventional control method. In addition, with the proposed control method, the effect of different harmonic loads has been eliminated and the THB of current harmonics has been reduced below 1.0%.

¹ Doğan ÇELİK ([Orcid ID: 0000-0002-8348-130X](https://orcid.org/0000-0002-8348-130X)), Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Doğan ÇELİK, e-mail: dogancelik@yuu.edu.tr

GİRİŞ

Güç dönüştürücüleri, kesintisiz güç kaynakları, elektrik makineleri ve indüktörler, kapasitörler ve diğer doğrusal olmayan yükler (DOY) gibi çeşitli konut yüklerinin yoğun kullanımı, güç faktörünün bozulmasına, harmoniklere ve gerilim ve/veya akım dalga biçimlerinin bozulmasına neden olmaktadır (Afonso ve ark., 2000; Ahmed ve Çelik, 2022; Çelik, 2022; Kürker, 2022). Ana şebeke sistemlerinin güç faktörü, ABD Enerji Bakanlığı tarafından belirlenen standartlara göre 0.95' den büyük olması ve toplam harmonik bozulmaların (THB) IEEE-519 standardına göre %5' in altında olması gerekmektedir. Kanada şebeke kriterleri gereksinimlerine ve Alberta Elektrik Sistemi Operatörüne göre dinamik ve dinamik olmayan reaktif güç için iki farklı çalışma koşulu bulunmaktadır: Bunlardan birisi; dinamik çalışmada 0.985 endüktif ile 0.95 kapasitif arasında bir aralık gerekirken ve diğeri ise sürekli çalışma durumu için güç faktörü aralığı 0.9 kapasitif/ileri ve 0.95 endüktif/geri olmasıdır (AESO, 2013). Ayrıca endüktif yükler, gereksiz güç akışına ve fatura cezalarına neden olmakla birlikte entegre cihazlar için güç kaybı ve yüksek sıcaklık riski de oluşturur (Cossutta ve ark., 2015; Chilipi ve ark., 2017; Meraj ve ark., 2022). Bu sorun, reaktif gücün kompanze edilmesi, harmonik bileşenlerin ortadan kaldırılması ve şebekenin akımı ile gerilimi arasındaki faz sapmalarının azaltılması ile giderilebilir (İnci, 2020; Meraj ve ark., 2022).

Çeşitli uygulamalarda güç kalitesini iyileştirmek için şönt aktif güç filtreleri (ŞAGF), seri AGF' ler ve hibrit AGF' ler gibi aktif çözümleri kullanan çeşitli kontrol yaklaşımları araştırılmıştır (Shu ve ark., 2011; Chilipi ve ark., 2018; Ferreira ve ark., 2018; Hoon ve ark., 2018; Tareen ve Mekhielf, 2018; Hasan ve ark., 2022; Mishra ve Lal, 2022). Moeini ve ark. (2022), güç kalitesi standartlarını karşılamak için asimetrik seçici harmonik akımı azaltan yapay sinir ağı tekniğini ele almaktadırlar. Pichan ve ark. (2022), ŞAGF ile yük harmoniklerini azaltmak için yeni bir doğrudan güç kontrol yöntemini kullanarak incelemiştirler. DOY' ler tarafından oluşan akım harmoniklerin etkisini azaltmak ve reaktif gücü kompanze etmek için Chilipi ve ark. (2019), uyarlanabilir bir filtreleme yöntemini önermişlerdir. Golla ve ark. (2022), güç kalitesi endeksini iyileştirmek için fotovoltaik beslemeli AGF için anlık güç teorisini bir araya getiren ikinci dereceden genelleştirilmiş integratör ile birlikte tarak filtresini sunmuşlardır. Ayrıca sistemin maliyetini ve boyutunu azaltmak için Tareen ve Mekhielf (2018), üç fazlı bir ŞAGF için yeni bir gerilim kaynaklı evirici topolojisini önermişlerdir. Önerilen bu topolojide, reaktif güç ve akım harmoniklerin kompanzasyonu etkili bir şekilde sağlanmaktadır. Mishra ve ark. (2020), dengeli ve dengesiz yük koşullarında harmonik kompanzasyonu için yeni bir kontrol algoritması ile birlikte bir hibrit ŞAGF sunmaktadırlar. Gong ve ark. (2022), ideal olmayan şebeke koşullarında hızlı dinamik yanıt ve daha iyi sağlamlık elde etmek için hibrit AGF için ikinci dereceden kayan kipli bir denetleyici incelemiştirler. Diğer bir çalışmada, Tekin ve ark. (2016), hidroelektrik santraller tarafından üretilen harmoniklerin elektrik şebekesini nasıl etkilediği inceleyip araştırmışlardır. Tekin (2022), alçak ve orta gerilim elektrik şebekelerinde meydana gelen güç ve gerilim dengesizliklerini tespit edip analiz etmiştir. Endüktif ve kapasitif karakteristiğe sahip olan şebeke tarafından çekilen reaktif gücü azaltmak için statik var kompanzasyonu yapılmıştır. Koroglu ve ark. (2019), güç kalitesi sorunlarına alternatif bir çözüm olarak yeni bir hibrit birleşik güç kalitesi düzenleyici topolojisini önermişlerdir. Soumana ve ark. (2022), iki seviyeli şebekeye bağlı fotovoltaik (FV) sistemleri için bir akım harmonik filtreleme işlevini içeren bir kontrol tekniği önermişlerdir. Önerilen bu yöntem ve ŞAGF kullanılarak THB' si yaklaşık % 2.0 olan şebeke akımı elde edilmiştir. Fan ve ark. (2021), yük harmoniklerinin etkisini azaltmak için FV-süper iletken manyetik enerji depolama tabanlı AGF önermişlerdir. Ouchen ve ark.

(2021), supertwisting kayan mod kontrolüne dayalı uzay vektör modülasyonu kullanılarak ŞAGF için doğrudan güç kontrolünü önermişlerdir. Önerilen bu metot ile hızlı yanıt süresi ve yüksek sağlamlık sağlamanın yanı sıra daha düşük THB ve daha düşük güç dalgalanmaları sağlanmıştır.

Bu makale üç fazlı ŞAGF ile farklı harmonik yüklerin etkisini ortadan kaldırmak, reaktif güç kompanzasyonunu sağlamak ve etkili bir şekilde reaktif güç akışını sağlamak için bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Mevcut birkaç çalışma ile karşılaştırıldığında önerilen kontrol yöntemi ile ana şebekeden reaktif güç çekilmeden reaktif güç kompanzasyonu sağlanmış ve akım harmonikleri de azaltılmıştır. Önerilen kontrol yöntemi geleneksel kontrol yönteminin aksine daha yüksek bir güç faktörü, daha düşük faz sapması ve daha düşük harmonik bozulma sağlamaktadır. Önerilen kontrol yönteminin çalışması dirençli-kapasitif doğrusal yük (D-KDY), dirençli-endüktif doğrusal yük (D-EDY), DOY ve yüksek endüktif DOY gibi çeşitli yük koşulları altında doğrulanmıştır. ŞAGF için önerilen kontrol yönteminin performansı farklı yüklerin etkisi altında PSCAD/EMTDC ortamında test edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu bölümde ŞAGF sisteminin yapısı ve önerilen kontrol yöntemi detaylı olarak incelenmiştir.

ŞAGF Sisteminin Devre Yapısı

ŞAGF güç devresinin konfigürasyonu ve temel elemanları Şekil 1' de detaylı olarak verilmiştir. v_s şebeke gerilimini, i_s şebeke akımını, i_f filtre akımını, i_l yük akımını, C_{da} DA tarafı kapasitörü ve v_{DA} DA-bağ gerilimini temsil etmektedir. ŞAGF bir arayüz endüktans filtresi L_f aracılığıyla ortak bağlantı noktasında (OKN) ana şebekeye bağlanmaktadır.

Önerilen Kontrol Yöntemi

Bu bölümde Şekil 2' de gösterilen üç fazlı ŞAGF ile reaktif güç kompanzasyonunu sağlamak ve akım harmoniklerini elimine etmek için çok amaçlı bir kontrol yöntemi tanıtılmaktadır. OKN gerilimlerini ve yük akımlarını bileşenlerine ayırmak için adaptif çentik filtre (AÇF) tekniği kullanılmıştır (Yazdani ve ark., 2008). Gerekli güç kompanzasyonunu sağlamak için yükün ve ŞAGF'nin aktif ve reaktif güçleri hesaplanmıştır.

Dengesiz ve harmonikli üç fazlı sinyaller durumunda, v_α - v_β ve i_α - i_β sinyallerinin temel frekans bileşenleri dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, AÇF tekniği kullanılarak kaynak geriliminin ($\hat{v}_{\alpha f}^p$ ve $\hat{v}_{\beta f}^p$) ve yük akımının ($\hat{i}_{\alpha f}^p$ ve $\hat{i}_{\beta f}^p$) temel frekans bileşenleri Eşitlik 1'de ve Eşitlik 2'de aşağıda verildiği şekilde elde edilir.

$$\begin{pmatrix} \hat{v}_{\alpha f}^p \\ \hat{v}_{\beta f}^p \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -e^{-j\frac{\pi}{2}} \\ e^{-j\frac{\pi}{2}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{i}_{\alpha f}^p \\ \hat{i}_{\beta f}^p \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -e^{-j\frac{\pi}{2}} \\ e^{-j\frac{\pi}{2}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

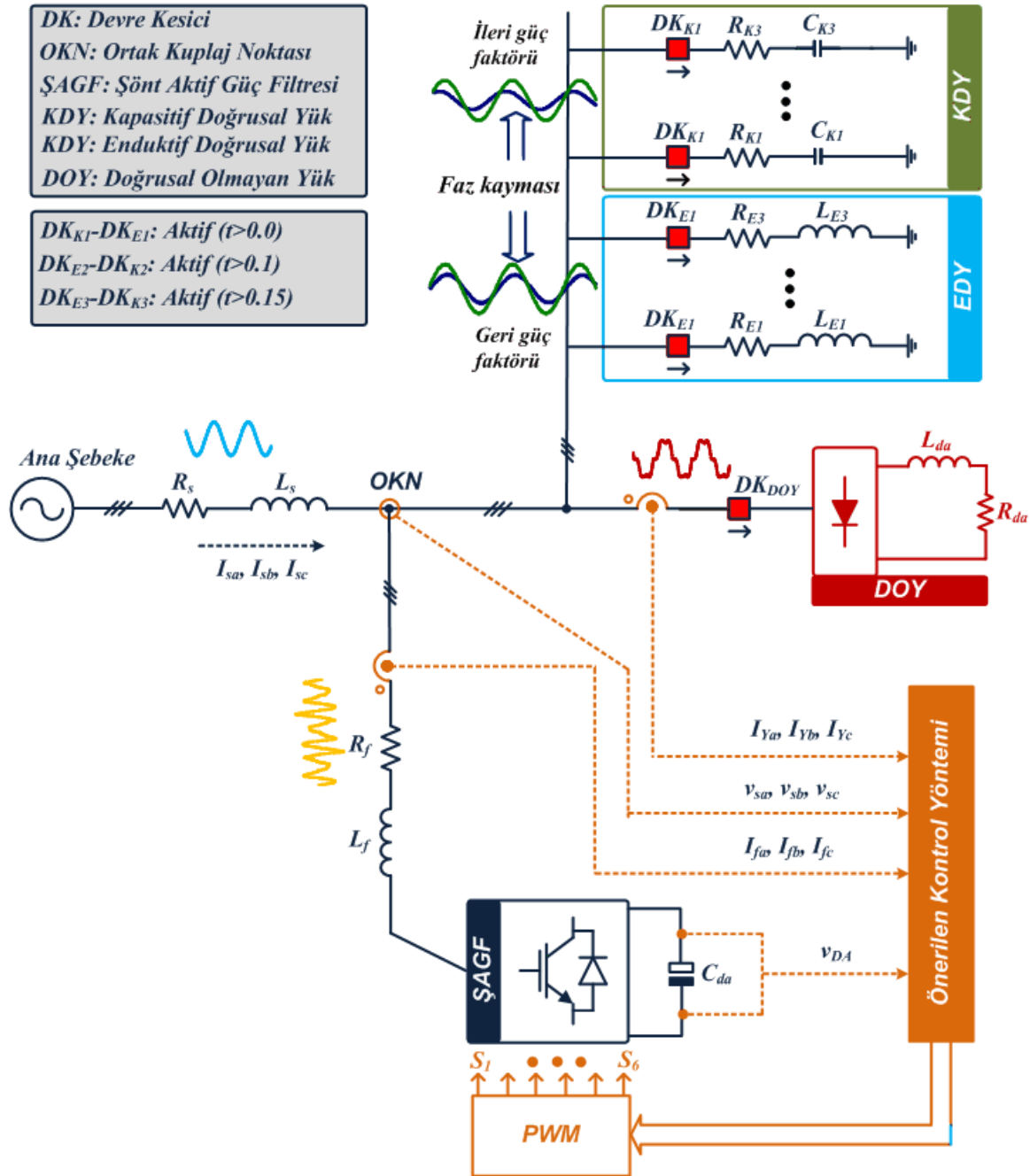
Üç fazlı anlık yük akımları ($i_{l\alpha,b,c}$) α - β çatı düzleminde α ve β bileşenlerine dönüştürüldükten sonra temel ($\hat{i}_{\alpha,\beta f}^p$), harmonik ($\hat{i}_{\alpha,\beta h}^p$) ve negatif ($\hat{i}_{\alpha,\beta h}^n$) sıralı bileşenlere Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 ile ayrılmıştır.

$$i_{l\alpha} = \frac{1}{\sqrt{6}}(2i_{l\alpha} - i_{l\beta} - i_{l\gamma}) = \hat{i}_{\alpha f}^p + \sum_{h=2}^{\infty} \hat{i}_{\alpha h}^p \sin(h\omega t + \varphi_h^p) + \sum_{h=1}^{\infty} \hat{i}_{\alpha f}^n \sin(h\omega t + \varphi_h^n) \quad (3)$$

$$i_{l\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{l\beta} - i_{l\gamma}) = \hat{i}_{\beta f}^p + \sum_{h=2}^{\infty} \hat{i}_{\beta h}^p \sin(h\omega t + \varphi_h^p) + \sum_{h=1}^{\infty} \hat{i}_{\beta f}^n \sin(h\omega t + \varphi_h^n) \quad (4)$$

Burada p , h , ve n sırasıyla pozitif, harmonik ve negatif bileşenleri temsil etmektedir. Ayrıca elde edilen pozitif temel akım bileşenleri aşağıdaki gibi aktif ve reaktif bileşenlere ayrıştırılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \hat{i}_{\alpha f}^p \\ \hat{i}_{\beta f}^p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{i}_{\alpha f}^p(p) \\ \hat{i}_{\beta f}^p(p) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \hat{i}_{\alpha f}^p(q) \\ \hat{i}_{\beta f}^p(q) \end{Bmatrix} \quad (5)$$



Şekil 1. ŞAGF güç devresinin ve önerilen kontrolün konfigürasyonu

Burada $\hat{i}_f^p = \hat{i}_{\alpha f}^p + j\hat{i}_{\beta f}^p$. Harmonik ve negatif sıralı bileşenler Eşitlik 6 kullanılarak elde edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \hat{i}_{\alpha}^{com} \\ \hat{i}_{\beta}^{com} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} i_{l\alpha} - \hat{i}_{\alpha f}^p \\ i_{l\beta} - \hat{i}_{\beta f}^p \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Clarke dönüşümünü yük gerilimlerine ve akımlarına uyguladıktan sonra aktif ve reaktif güç hesabı Eşitlik 7'deki gibi verilmektedir.

$$\begin{pmatrix} p_l \\ q_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Benzer şekilde ŞAGF tarafından enjekte edilen aktif ve reaktif güçler Eşitlik 8 ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{pmatrix} p_{apf} \\ q_{apf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha,inj} \\ i_{\beta,inj} \end{pmatrix} \quad (8)$$

p_{apf} ve q_{apf} ŞAGF' nin aktif ve reaktif güçlerini temsil etmektedir. $i_{\alpha,inj}$ ve $i_{\beta,inj}$ ŞAGF ile enjekte edilen akımlardır. ŞAGF ve şebeke tarafı güçlerinin toplamı yükün gücüne eşittir. Ana şebeke, yük ve ŞAGF arasındaki güç dengesi Eşitlik 9 ile ifade edilmiştir:

$$\begin{aligned} p_s &= p_l - p_{apf} \\ q_s &= q_l - q_{apf} \end{aligned} \quad (9)$$

Yüksek bir güç faktörü sağlamak ve faz eşitsizliğini azaltmak için ŞAGF, ana şebekeden reaktif güç çekmeden yeterli reaktif güç sağlamalıdır. Yük için gerekli reaktif gücü enjekte etmek için referans reaktif güç Eşitlik 10 ile hesaplanabilir.

$$q^{ref} = \zeta_p (q_l - q_{apf}) \quad (10)$$

Eşitlik 10'da ζ_p ölçek telafi faktörüdür. $\alpha\beta$ –referans çerçevesindeki referans akım bileşenleri tahmini şebeke gerilimlerine ve aktif-reaktif güç kontrolüne bağlı olarak Eşitlik 11 ile üretilir.

$$i_{\alpha}^*(p, q) = \frac{p^{ref}}{(\hat{v}_{\alpha f}^p)^2 + (\hat{v}_{\beta f}^p)^2} \hat{v}_{\alpha f}^p + \frac{q^{ref}}{(\hat{v}_{\alpha f}^p)^2 + (\hat{v}_{\beta f}^p)^2} \hat{v}_{\beta f}^p \quad (11)$$

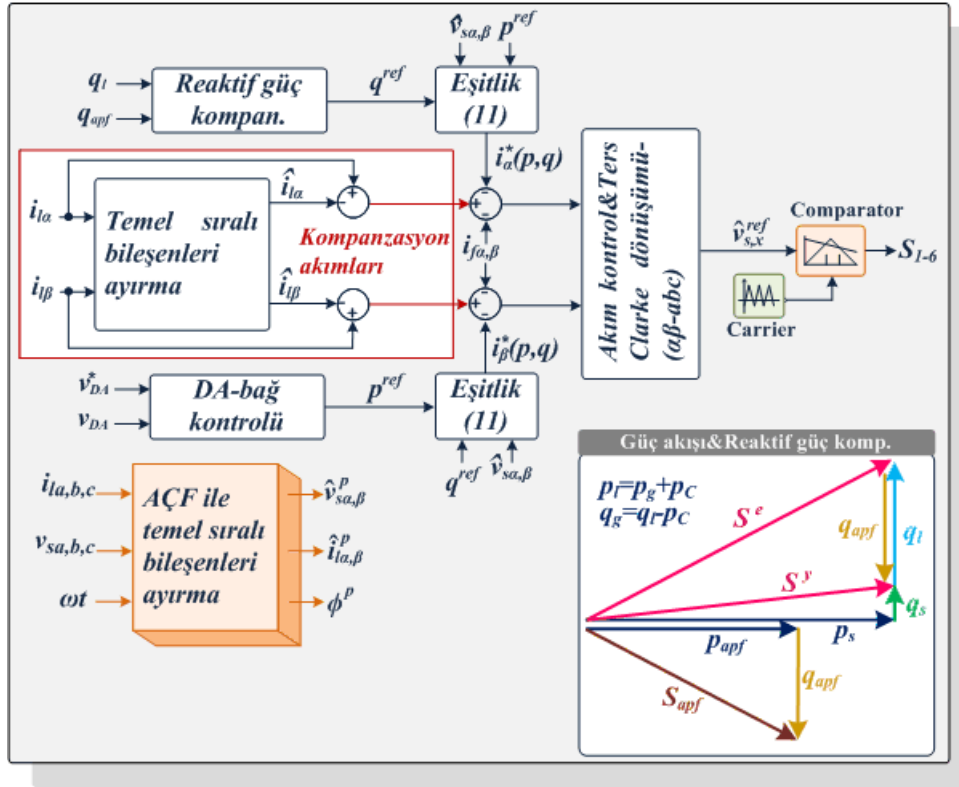
$$i_{\beta}^*(p, q) = \frac{p^{ref}}{(\hat{v}_{\alpha f}^p)^2 + (\hat{v}_{\beta f}^p)^2} \hat{v}_{\beta f}^p - \frac{q^{ref}}{(\hat{v}_{\alpha f}^p)^2 + (\hat{v}_{\beta f}^p)^2} \hat{v}_{\alpha f}^p$$

Eşitlik 11'de p^{ref} DA-bağlantı kontrolünün çıkışından elde edilen referans aktif güçtür. Literatürde DA tarafı kontrolü için oransal integral (proportional integral-PI) kullanılmıştır. Referans aktif güç Eşitlik 12 ile aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$p^{ref} = (k_1 + k_2/s)(v_{DA}^* - v_{DA}) \quad (12)$$

k_1 ve k_2 PI denetleyicinin oransal ve integral katsayılarıdır. v_{DA}^* DA-bağ gerilimini temsil etmektedir. Dengesiz ve harmonikli şebeke gerilimleri ve DOY durumlarında yüksek kalitede akım elde etmek için referans akımları aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} i_{\alpha}^{ref} \\ i_{\beta}^{ref} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{i}_{\alpha}^{com} - i_{\alpha}^*(p, q) - i_{\alpha,apf}^{inj} \\ \hat{i}_{\beta}^{com} - i_{\beta}^*(p, q) - i_{\beta,apf}^{inj} \end{Bmatrix} \quad (13)$$



Şekil 2. ŞAGF için önerilen kontrol yöntemi

Kompanze edilen yük akım bileşenleri ve aktif-reaktif akım bileşenleri hesaplandıktan sonra akım hatalarını tahmin etmek için referans akım bileşenleri ŞAGF akımları ile karşılaştırılır. Üç fazlı eviricinin anahtarlama sinyallerini oluşturmak için modülasyon sinyali elde etmek üzere akım hata sinyalleri akım denetleyicilerini besler.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde önerilen kontrol yönteminin performansı ve etkinliğini doğrulamak için PSCAD/EMTDC tabanlı benzetim sonuçları kullanılmıştır. Kapasitif ve endüktif doğrusal yükler, DOY ve yüksek endüktif DOY gibi çeşitli durum çalışmaları önerilen kontrol yönteminin geçerliliğini göstermiştir. Harmonik akım üretimi ve faz sapması DOY, KDY ve EDY tarafından oluşturulmuştur. DOY için üç fazlı bir diyot-köprü doğrultucu kullanılmıştır. Şebekeye bağlı ŞAGF sisteminin devre parametreleri Çizelge 1’ de verilmiştir.

Benzetim Sonuçları

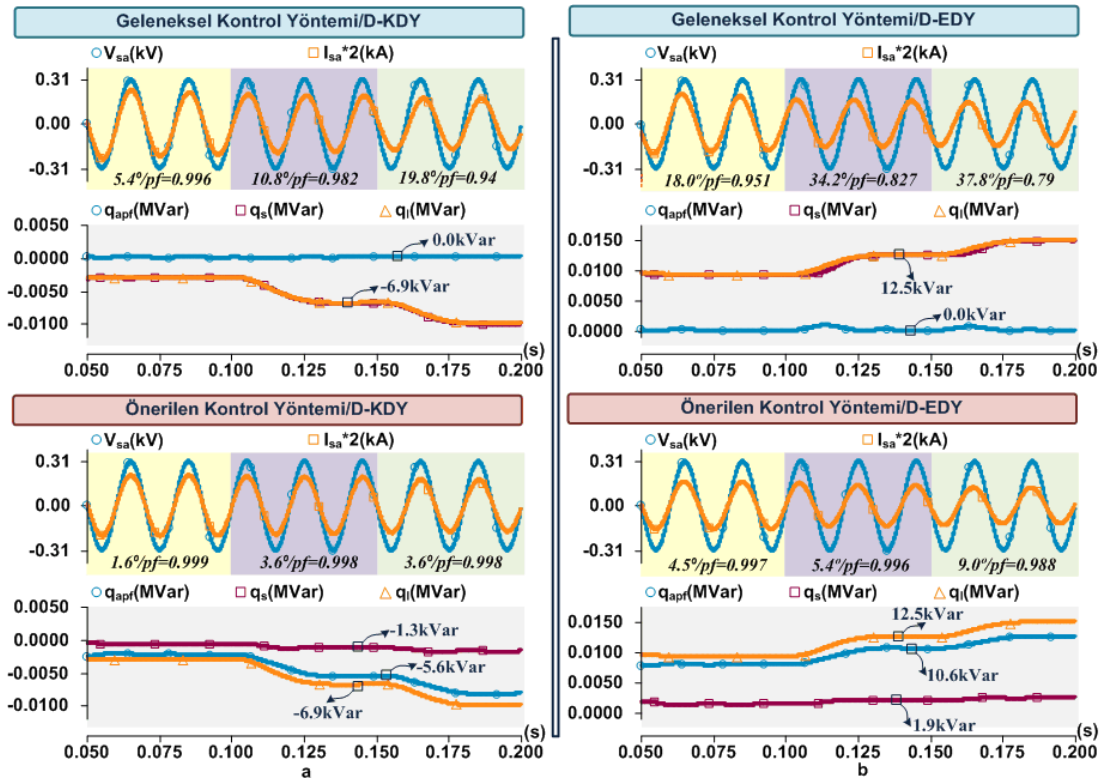
Önerilen kontrol yönteminin güç faktörü düzeltme (GFD) kabiliyeti ana şebekeye dirençli-kapasitif, dirençli-endüktif yükler ve yüksek endüktif DOY paralel bağlanarak incelenmiştir. 0.1s, 0.125s ve 0.15s gibi farklı çalışma zamanlarında yüklerin her birini anahtarlama için bir devre kesici bağlanmıştır.

Şekil 3a’ da gösterildiği gibi 0.1s ile 0.15s arasında dirençli-kapasitif yükler olduğunda ŞAGF geleneksel yöntem ile reaktif güç kompanze etmezken, önerilen yöntemle ŞAGF şebeke kriterlerinin gereksinimlerini karşılamak için -5.6 kVar reaktif güç sağlamaktadır. Geleneksel yöntem reaktif gücü kompanze etmemektedir ve kapasitif yük tüm reaktif gücü ana şebekeden çekmektedir. Ayrıca geleneksel ve önerilen yöntemlerin gerilim ve akımlar arasındaki faz eşitsizliği D-KDY altında gösterilmiştir.

Önerilen kontrol yöntemi şebeke akımı ve şebeke gerilimi arasındaki faz kaymasını düzgün bir şekilde azaltmakta ve sonuç olarak bire yakın bir güç faktörü sağlamaktadır. Benzer şekilde, kontrol yöntemlerinin performansı Şekil 3b' de gösterildiği gibi D-EDY altında test edilmiştir. Geleneksel kontrol yöntemi ile faz farkının daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Önerilen kontrol yöntemi, D-EDY' nin reaktif güç talebini 10.6 kVAr ile karşılamaktadır ancak geleneksel yöntem ile tüm reaktif güç ana şebekeden çekilmektedir. Önerilen kontrol metodu ile güç faktörü iyileştirilerek 1.0' a yakın olmaktadır.

Çizelge 1. Güç devresinin benzetim parametreleri

Parametreler	Değerler
Şebeke gerilimi	311 V (faz nötr)
Frekans	50 Hz
Anahtarlama frekansı	5 kHz
Referans DA gerilimi	80 0V
DA-bağ kapasitör	2200 μ F
AA filter endüktans	5 mH
Yük grupları	
D-KDY	5 Ω – 100 μ F; 10 Ω – 150 μ F; 15 Ω – 200 μ F
D-EDY	5 Ω – 20mH; 15 Ω – 40mH; 20 Ω – 60mH
DOY ve yüksek endüktif DOY	15 Ω – 10mH; 5 Ω – 300mH



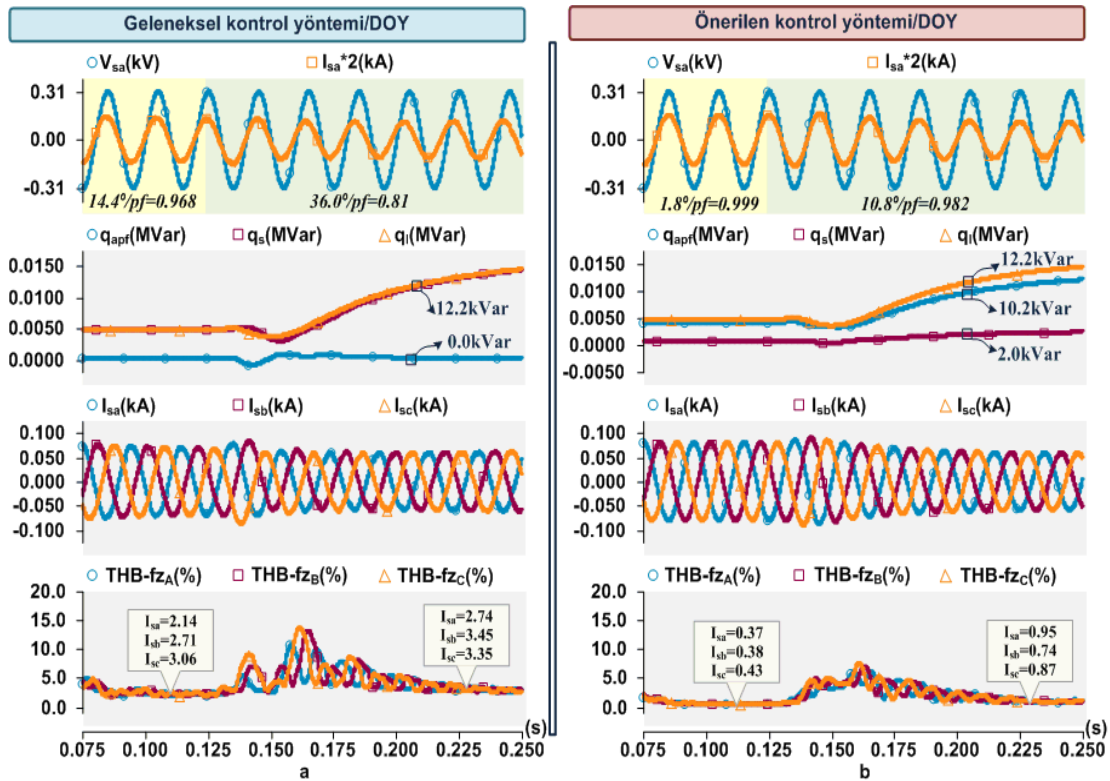
Şekil 3. a) D-KDY ve b) D-EDY yükleri durumunda geleneksel ve önerilen yöntemlerin GFD analizi

Şekil 4' de gösterilen diğer durum çalışmasında ise kontrol metotlarının performans karşılaştırması DOY ve yüksek oranda endüktif DOY altında analiz edilmiştir. Devre kesicileri ile DOY 0.125 saniyeye kadar çalıştırılmış ve daha sonra yüksek endüktif DOY' u çalıştırmak için başka bir devre kesici etkinleştirilmiştir. Şekil 3' de gösterilen durum çalışmasına benzer reaktif güç talebi, geleneksel kontrol yöntemiyle kompanse edilmemektedir. Şekil 4a' nın solunda gösterildiği gibi faz uyuşmazlığı ve şebeke akımı harmonikleri önerilen kontrol yönteminden daha yüksektir. Önerilen kontrol metodu ile güç faktörü 1.0' a yakın olurken, geleneksel kontrol metodu ile güç faktörü 0.90' ın altında kalmaktadır. Bunun yanında, önerilen kontrol metodu ile akım harmoniklerinin THB' si %1.0' ın

altında olurken, geleneksel kontrol metodu ile akım harmoniklerinin THB' si %3.0' ın üstünde olmaktadır. Ayrıca kontrol yöntemleri için faz farkı, THB ve güç faktörleri Çizelge 2' de detaylı olarak özetlenmiştir.

Tartışma

Geleneksel ve önerilen kontrol yöntemlerinin performans sonuçları Çizelge 2' de çeşitli yük grupları altında faz farklılığı, THB ve güç faktörleri ile ilgili olarak vurgulanmıştır. Faz eşitsizliği ve güç faktörü verileri D-KDY ve D-EDY için 0.15s ile 0.2s arasında, DOY ve endüktif DOY için ise 0.125s ile 0.25s arasında elde edilmiştir. Şebeke akımı sinyalinin B fazı için THB sonuçları verilmiştir. Sonuçlar önerilen kontrol yönteminin şebeke akımı harmoniklerini ve faz sapmalarını etkin bir şekilde en aza indirdiğini ve sonuç olarak daha yüksek bir güç faktörü sağladığını göstermektedir.



Şekil 4. DOY ve yüksek endüktif DOY durumunda, a) geleneksel kontrol yönteminin ve b) önerilen kontrol yönteminin harmonik kompanzasyonu ve GFD yeteneği.

Çizelge 2. Çeşitli yük bankaları altında faz farkı, THB ve güç faktörleri

Yük grupları	Faz kayması		Güç faktörü		THB (%)	
	Geleneksel	Önerilen	Geleneksel	Önerilen	Geleneksel	Önerilen
D-KDY	19.8°	3.6°	0.940	0.998	0.22	0.17
D-EDY	37.8°	9.0°	0.790	0.988	0.33	0.23
DOY	14.4°	1.8°	0.968	0.999	2.71	0.38
Yüksek endüktif DOY	36.0°	10.8°	0.810	0.982	3.45	0.74

SONUÇ

Bu makale, farklı harmonik yüklerin etkisini ortadan kaldırmak, reaktif güç kompanzasyonu sağlamak ve etkili bir şekilde reaktif güç akışını sağlamak için geliştirilmiş bir kontrol yöntemini sunmaktadır. Önerilen kontrol yönteminin performansı D-KDY, D-EDY, DOY ve yüksek endüktif DOY gibi çeşitli yük grupları altında test edilmiş ve analiz edilmiştir. Çeşitli durum çalışmasına dayalı sonuçlar, önerilen kontrol yönteminin faz sapmalarını azalttığını ve harmonikleri telafi ettiğini

göstermektedir. Çeşitli kapasitif ve endüktif yüklerden gelen reaktif güç talebi önerilen kontrol yöntemi ile ana şebekeden çekilmeden ŞAGF tarafından karşılanmıştır. Bu nedenle yüksek kapasitif ve endüktif yük grupları altında, önerilen kontrol yöntemi ile şebeke kriterleri gerekliliklerini karşılayan 0.99 kapasitif ve endüktif güç faktörü değerleri elde edilirken, geleneksel kontrol yöntemi ile şebeke akımında 0.79 ve 0.81 gibi daha düşük güç faktörü değerleri elde edilmiştir. Ayrıca önerilen kontrol yöntemi, DOY' un harmoniklerini %1.0 THB seviyesinin altına düşürmektedir. Önerilen kontrol yönteminin avantajları ve etkinliği PSCAD/EMTDC yazılım paketi ortamında doğrulanmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda, AGF' lerin uygulama alanlarına sahip olduğu elektrikli uçaklarda, elektrikli araçlarda, elektrikli demiryolu güç sistemlerinde ve gemi mikro şebekelerinde yeni kontrol algoritmalarıyla çalışılması hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (Van, Türkiye), Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir (Proje Numarası: FYD-2021-9636).

KAYNAKLAR

- Afonso, J. L., Couto, C., Martins, J. S. (2000). Active filters with control based on the pq theory. *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, 47(3), 5-10.
- Ahmed, H., Çelik, D. (2022). Sliding mode based adaptive linear neuron proportional resonant control of Vienna rectifier for performance improvement of electric vehicle charging system. *Journal of Power Sources*, 542, 231788.
- Alberta Electrical System Operator (AESO), ISO Rules, Part 500Facilities, Division 502 Technical Requirements, Section 502.1 WindAggregated Generating Facilities, Technical Requirements, Calgary,AB: AESO, 2013-04-30.
- Chilipi, R. S. R., Al Sayari, N., Al Hosani, K. H., Beig, A. R., (2017). Adaptive notch filter-based multipurpose control scheme for grid-interfaced three-phase four-wire DG inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 4015-4027.
- Chilipi, R., Al Sayari, N., Al Hosani, K., Fasil, M., Beig, A. R. (2018). Third order sinusoidal integrator (TOSSI)-based control algorithm for shunt active power filter under distorted and unbalanced voltage conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 96, 152-162.
- Chilipi, R., Al Sayari, N., Alsawalhi, J. Y. (2019). Control of single-phase solar power generation system with universal active power filter capabilities using least mean mixed-norm (LMMN)-based adaptive filtering method. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(2), 879-893.
- Cossutta, P., Aguirre, M. P., Cao, A., Raffo, S., Valla, M. I. (2015). Single-stage fuel cell to grid interface with multilevel current-source inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(8), 5256-5264.
- Çelik, D. (2022). Lyapunov based harmonic compensation and charging with three phase shunt active power filter in electrical vehicle applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136, 107564.
- Kürker, F. (2022). Lineer olmayan yüklerin sebep olduğu harmoniklerin ve fazlar arası güç dengesizliğinin nötr akımına etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), 1456-1467.
- Fan, Y., Zhou, Q., Wang, J., Mu, S., Wang, L. (2021). Application of superconducting-magnetic-energy-storage-based current-source active power filter in photovoltaics for harmonic mitigation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 1-4.
- Ferreira, S. C., Gonzatti, R. B., Pereira, R. R., da Silva, C. H., da Silva, L. B., Lambert-Torres, G. (2018). Finite control set model predictive control for dynamic reactive power compensation with hybrid active power filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), 2608-2617.
- Golla, M., Thangavel, S., Simon, S. P., Padhy, N. P. (2023). A novel control scheme using UAPF in an integrated PV grid-tied system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 38 (1), 133 - 145.

- Gong, C., Sou, W. K., Lam, C. S. (2022). Observer based second-order sliding mode current controller for thyristor-controlled LC-coupling hybrid active power filter. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1-13.
- Hasan, K., Othman, M. M., Meraj, S. T., Rahman, N. F. A., Noor, S. Z. M., Musirin, I., Abidin, I. Z. (2022). Online harmonic extraction and synchronization algorithm based control for unified power quality conditioner for microgrid systems. *Energy Reports*, 8, 962-971.
- Hoon, Y., Radzi, M. A. M., Hassan, M. K., Mailah, N. F. (2018). Operation of three-level inverter-based shunt active power filter under nonideal grid voltage conditions with dual fundamental component extraction. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(9), 7558-7570.
- İnci, M. (2020). Active/reactive energy control scheme for grid-connected fuel cell system with local inductive loads. *Energy*, 197, 117191.
- Koroglu, T., Tan, A., Savrun, M. M., Cuma, M.U., Bayindir, K.C., Tumay, M. (2019). Implementation of a novel hybrid UPQC topology endowed with an isolated bidirectional DC-DC converter at DC link. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(3), 2733-2746.
- Meraj, S. T., Yahaya, N. Z., Hasan, K., Lipu, M. H., Elavarasan, R. M., Hussain, A. (2022). A filter less improved control scheme for active/reactive energy management in fuel cell integrated grid system with harmonic reduction ability. *Applied Energy*, 312, 118784.
- Mishra, A. K., Das, S. R., Ray, P. K., Mallick, R. K., Mohanty, A., Mishra, D. K. (2020). PSO-GWO optimized fractional order PID based hybrid shunt active power filter for power quality improvements. *IEEE Access* 8, 74497-74512.
- Mishra, M. K., Lal, V. N. (2022). An enhanced control strategy to mitigate grid current harmonics and power ripples of grid-tied pv system without pll under distorted grid voltages. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(4), 4587-4602.
- Moeini, A., Dabbaghjamanesh, M., Kimball, J. W., Zhang, J. (2022). Artificial neural networks for asymmetric selective harmonic current mitigation-PWM in active power filters to meet power quality standards. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1-9.
- Ouchen, S., Benbouzid, M., Blaabjerg, F., Betka, A., Steinhart, H. (2021). Direct power control of shunt active power filter using space vector modulation based on supertwisting sliding mode control. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(3), 3243-3253.
- Pichan, M., Seyyedhosseini, M., Hafezi, H. (2022). A new deadbeat-based direct power control of shunt active power filter with digital implementation delay compensation. *IEEE Access*, 10, 72866-72878.
- Soumana, R. A., Saulo, M. J., Muriithi, C. M. (2022). A new control scheme for limiting the compensation current and prioritizing power injection in multifunctional grid-connected photovoltaic systems. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2, 100055.
- Shu, Z., Xie, S., Li, Q. (2011). Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(2), 334-343.
- Tareen, W. U. K., Mekhielf, S. (2018). Three-phase transformerless shunt active power filter with reduced switch count for harmonic compensation in grid-connected applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(6), 4868-4881.
- Tekin, M. (2022). OG-AG Elektrik şebekelerinde dinamik kontrollü kompanzasyon uygulaması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 480-490.
- Tekin, M., Keçecioglu, Ö. F., Erafşar, Ö., Şekkelı, M. (2016). Bir Hidroelektrik Santralin (HES) Elektrik Şebekesindeki Harmonik Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 70-77.
- Yazdani, D., Bakhshai, A., Joos G., Mojiri, M. (2008). A nonlinear adaptive synchronization technique for grid-connected distributed energy sources. *IEEE Transactions on power electronics*, 23(4), 2181-2186.