



Yüksek gerilimli doğru akım iletim sistemleri için aktif doğru akım filtresi tasarımı ve simülasyonu

Murat Akdemir^{1*}, Selçuk Yıldırım¹, Naci Genç²

¹Siirt Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

²Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yüksek gerilimli doğru akım iletim sistemleri
- Aktif doğru akım filtre tasarımı
- Toplam harmonik distorsiyon (THD) analizi

Makale Bilgileri

Geliş: 28.10.2015

Kabul: 10.08.2016

DOI:

10.17341/gummfd.05816

Anahtar Kelimeler:

Aktif doğru akım filtresi,
harmonikler,
yüksek gerilimli doğru akım

ÖZET

Bu çalışmada, ilk önce tek kutuplu bir Yüksek Gerilimli Doğru Akım (YGDA) iletim sistemi modeli oluşturulmuştur. Bu YGDA iletim sisteminde dönüştürücülerden kaynaklanan harmonikleri bastırmak için seri, paralel ve seri-paralel aktif doğru akım filtre tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu filtrelerin kullanıldığı YGDA iletim sisteminin simülasyonları MATLAB Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Bu iletim sistemi modelinde fitesiz ve filtreli durumlar için yük akımının ve geriliminin dalga şekilleri ile toplam harmonik distorsiyonu (THD) değerleri elde edilmiştir. YGDA iletim sisteminde kullanılan aktif doğru akım filtreleriyle yük gerilimindeki ve akımındaki harmonikler büyük oranda bastırılmıştır. Ayrıca bu akım ve gerilimler için THD değerleri %5'in oldukça altında elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, tasarlanan aktif doğru akım filtrelerinin basit bir yapıya sahip olması ve kontrolünün fazla karmaşık olmaması önemli avantajlar sağlamaktadır.

Design and simulation of active direct current filter for high voltage direct current transmission systems

H I G H L I G H T S

- High voltage direct current transmission systems
- Design of active direct current filter
- Total harmonic distortion (THD) analysis

Article Info

Received: 28.10.2015

Accepted: 10.08.2016

DOI:

10.17341/gummfd.05816

Keywords:

Active direct current filter,
harmonics,
high voltage direct current

ABSTRACT

In this paper, firstly, a monopolar High Voltage Direct Current (HVDC) transmission system model has been formed. Series, parallel and series-parallel active direct current filter designs were carried out to suppress harmonics caused by the converters in this HVDC transmission system. Simulations of the designed HVDC transmission system using these filter were carried out in MATLAB Simulink. Waveforms and total harmonic distortion (THD) values of load current and voltage were obtained in this transmission system model for filtered and unfiltered conditions. Harmonics in the load voltage and current were suppressed to a large extent by active direct current filter used in the HVDC transmission system. Furthermore, THD values for current and voltage were obtained significantly below 5%. According to these results, designed active direct current filters which have simple structure and not complex controller offer significant advantages.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: muratakdemir@siirt.edu.tr / Tel: +90 507 697 2180

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek gerilimli doğru akım (YGDA) dönüştürücüleri, alternatif akım (AA) ile doğru akım (DA) arasındaki dönüşüm işlemleri esnasında harmonik üretirler [1]. Bu harmonikler hem AA hem de DA iletim hatlarına bulaşır. Sisteme bulaşan harmonikler sistemde arızaya ve hat çevresindeki telefon kablolarında elektromanyetik etkileşime neden olur. Oluşabilecek zararları engellemek için kabul edilebilir bir bozulma seviyesi uluslararası standartlar ile belirlenmiştir [2]. Belirlenen uluslararası standartlara ancak harmonik belirleme yöntemleri ile harmonik filtrelerin kurulmasıyla ulaşılabilir [3]. İletim hattının DA tarafında harmoniklerin iletim sistemine ve bileşenlerine zarar vermemesi için süzülmesi gerekir. Bu harmoniklerin süzülmesi için kullanılan aktif doğru akım filtreleri (ADF) konusunda bazı çalışmalar yapılmıştır. YGDA sistemlerinde kullanılmak üzere iki farklı çalışmada hibrit aktif DA filtresi için yöntemler önerilmiştir. Önerilen yöntemler DA iletim hattı akımına, parametrelerine ve anahtarlama frekansına göre değişir [4, 5]. 2008 yılında yapılan bir çalışmada, akım harmoniklerini yok etmek için sisteme kompanzasyon akımlarını enjekte eden paralel aktif bir filtre tasarlanmıştır. Devre parametrelerinden bağımsız yüksek kazançlı geri beslemeli kontrol yöntemi önerilmiştir. Pasif filtre ile ADF'nin harmonik bastırma etkileri karşılaştırılmış ve ADF'nin hibrit filtrenin seri empedansını artırabileceği ve pasif filtrenin eşdeğer gerilimi düşürebileceği gözlemlenmiştir [6]. 2010 yılında yapılan bir çalışmada, dönüştürücünün DA tarafındaki çıkış gerilim harmoniklerini bastırmak için 6 darbeli bir ADF tasarlanmıştır. Düşük dalgalanma faktörüne sahip yük gerilimini elde etmek için yüke seri bir bobin bağlanmıştır. Kompanzasyon akımı bobin üzerinde gerekli gerilim harmoniklerini üretecek şekilde kontrol edilmiştir. Yük gerilimi dalgalanma faktörü %28'den %5'e ve 6. harmonik bileşen %32,3'ten %5,6'ya düşürülmüştür [7]. 2011 yılında yapılan bir çalışmada 12 darbeli tristör köprü konfigürasyonuna sahip orta gerilimli doğru akım (OGDA) sistemi için bir ADF önerilmiştir. Önerilen ADF, DA hat dalgalanmalarını giderirken aynı zamanda tüm sistem sönümlenmesini iyileştirmiştir. Önerilen metod ile geçici yüklerden kaynaklanan DA hata geriliminin filtreyi hatta seri bağlayan transformatörü doyuma sokmamasından emin olunur ve harmonikler bastırılır.

Ayrıca sınırlı anahtarlama frekansı, sınırlı bant aralığı, uygunsuz anahtarlama ve ölü zaman etkisi gibi donanımsal kısıtlamalardan dolayı tüm harmonikler sisteme enjekte edilemediği için bu kontrolör ile üretilen referans sinyal ile harmonikler belli frekanslara kadar sisteme enjekte edilir. Seri DAF kontrolörler temelde açık-devre ileri-besleme kontrolör yapısına sahiptir. Basit ve çok iyi bir kararlılık sınırlarına sahip olmalarına rağmen sistem parametreleri değiştiği zaman ya da farklı yük koşulları altında görevlerini yerine getiremeyebilirler [8, 9]. Literatürdeki ADF'ler genellikle Orta Gerilimli Doğru Akım iletim sistemlerinde akım harmoniklerini ya da gerilim harmoniklerini bastırarak şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada bunlara ilave olarak, YGDA iletim sistemlerinde

hem akım harmoniklerini hem de gerilim harmoniklerini bastıran karma ADF'ler tasarlanacaktır.

2. FİLTRELER (FILTERS)

Harmoniklerin devre üzerinde oluşturduğu olumsuzlukları yok etmenin en etkili yolu filtrelerdir. Filtreler kendi içinde aktif, pasif ve hibrit filtreler olmak üzere 3 gruba ayrılır. Pasif filtreler, bobin, kondansatör ve bazı durumlarda omik dirençlerin bir araya gelmesiyle oluşur. Pasif filtrelerde amaç; ayarlanan frekanslarda rezonans oluşturarak harmoniklerin yük tarafına geçişini engellemektir. Ancak pasif filtrelerin, kaynak empedansları ve sistemdeki frekans değişiminden etkilenmeleri, kaynakla rezonansa girme gibi risklere sahip olmaları, filtreleme frekansının sabit olup kolay kolay değiştirilememesi ve büyük hacimli olmaları gibi dezavantajları vardır [10]. Bu dezavantajlar harmonik kompanzasyonun güç elektroniği elemanları ile yani aktif filtrelerle gerçekleştirilmesine yol açmıştır [11]. Aktif filtreler, harmonik bileşenleri yok etmek için oluşturulmuş, temeli ileri güç elektroniğine dayanan programlanabilir filtrelerdir. Temel özelliklerinden biri, birden fazla harmonik bileşeni yok etmek için programlanabilir olmalarıdır. Kullanıldıkları güç sistemlerinde değişiklikler yapılsa bile aktif filtreler kompanzasyonlarına devam ederler. Bu da aktif filtrelerin diğer filtrelere göre en önemli avantajıdır [12]. Güç sistemlerindeki aktif filtrelerin temel görevi, iletim hattında var olan harmonikleri tespit etmek ve bu harmoniklerle aynı büyüklükte ters fazda akım veya gerilim üreterek sisteme enjekte etmektir [13]. Harmonik kompanzasyonunda kullanılan aktif güç filtrelerinde önce harmonikler temel bileşenlerden ayrılır ve referans akım veya gerilim elde edilir. Elde edilen referans akım ve gerilim, üretilen filtre akım veya gerilimiyle karşılaştırılır ve üretilmesi gereken yeni akım veya gerilim için sinyaller elde edilir. Bu sinyaller inverter devresine uygulanır ve gerekli filtre akım veya gerilimi üretilir. Şekil 1'de aktarılan aktif filtrenin yapısından görüleceği üzere I_y , yük akımı I_s şebeke akımı ve I_f filtre akımının toplamından oluşur (Eş. 1).

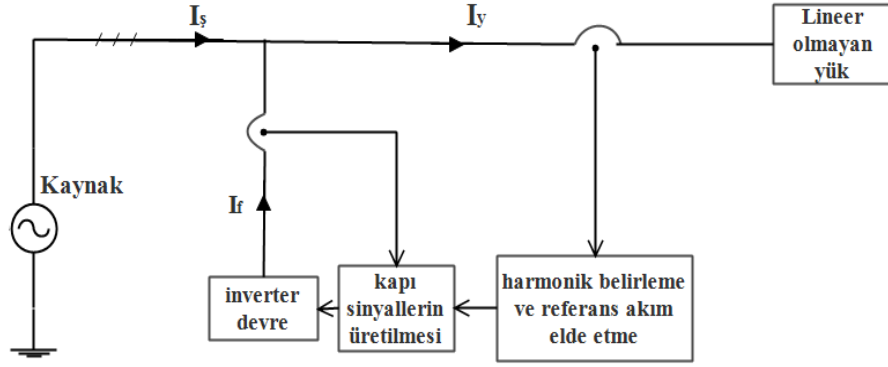
$$I_y = I_s + I_f \quad (1)$$

Aktif ve pasif filtrelere ek olarak karma (hibrit) aktif filtreler kullanılmaktadır. Sistemin ihtiyacına göre değişik konfigürasyonlarla bağlanabilirler. Bu filtreler harmonik kompanzasyonu ile beraber gerilim regülasyonu, dengesizlik kompanzasyonu, kaynak ve lineer olmayan yük arasındaki izolasyon içinde kullanılırlar [10].

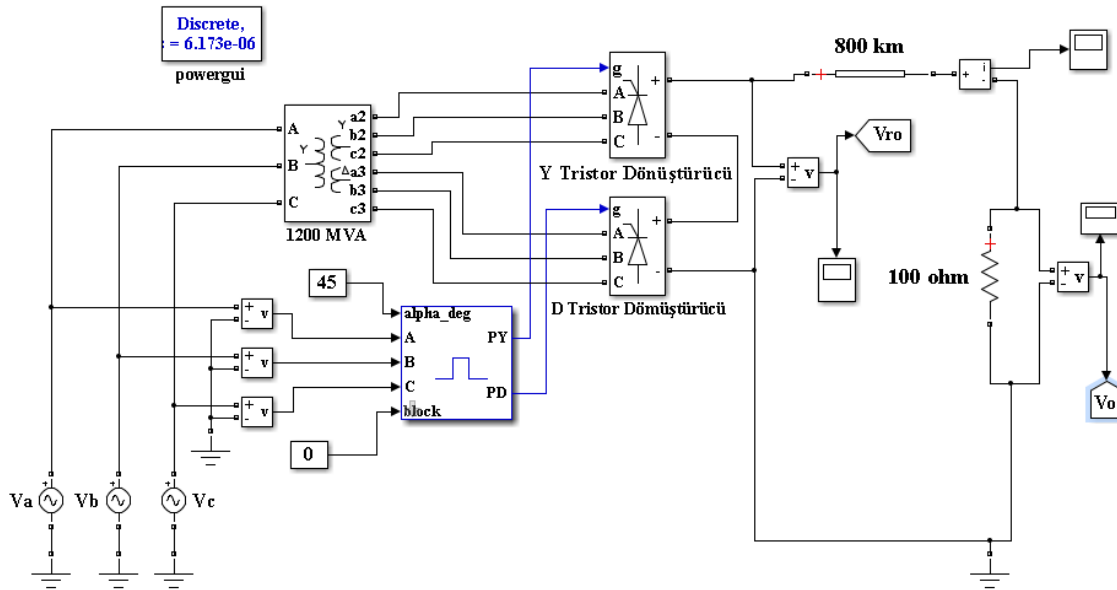
3. AKTİF DOĞRU AKIM FİLTRESİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU

(ACTIVE DIRECT CURRENT FILTERS DESIGN AND SIMULATION)

Bu çalışmada, bir YGDA iletim sisteminde oluşan harmoniklerin giderilmesi için, MATLAB/Simulink'te oluşturulan Şekil 2'deki filtersiz güç sistemi modelinde aktif doğru akım filtresi uygulamaları yapılmıştır. Güç sisteminin AA tarafında üç adet 50 Hz, 500 kV gerilim



Şekil 1. Aktif filtrenin yapısı (The structure of the active filter)



Şekil 2. Filtresiz YGDA iletim sistemi modeli (Unfiltered HVDC transmission system model)

kaynağı kullanılmıştır ve üç fazlı üç sargılı transformatör yardımı ile 2 adet seri bağlı altı darbelik doğrultucunun birleşiminden elde edilen on iki darbelik doğrultucuya bağlanmıştır. Yükte 100 Ohm'luk bir direnç kullanılmıştır. Doğrusal olmayan yükleri beslediği zaman şebeke gerilimi ve akımı aşağıda aktarıldığı gibi AA ve DA bileşenlerden oluşur.

$$V_s = V_{sac} + V_{sdc} \quad (2)$$

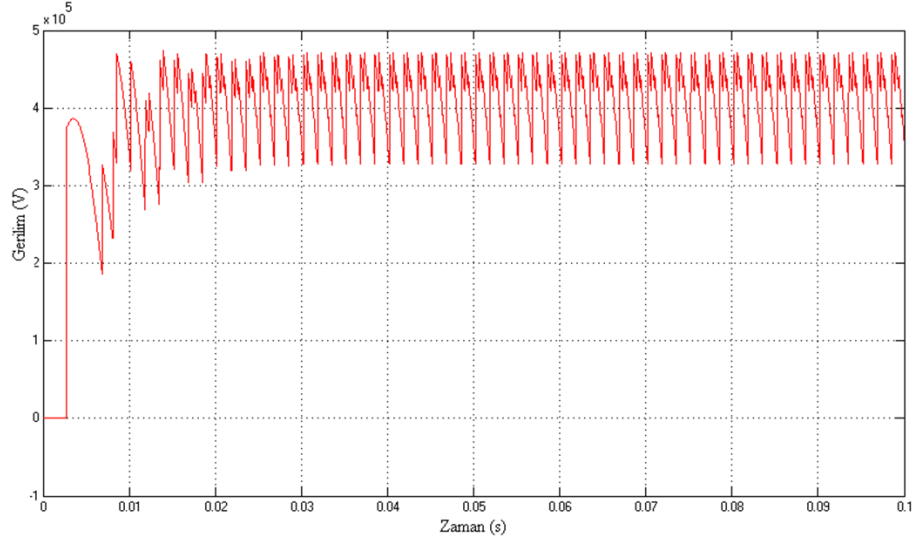
$$I_s = I_{sac} + I_{sdc} \quad (3)$$

Eş. 2 ve Eş. 3'deki V_{sac} hat geriliminin AA bileşenini yani gerilimdeki dalgalanmaları oluştururken I_{sac} hat akımının AA bileşenini yani akımdaki dalgalanmaları oluşturur. Bu bileşenler sistemdeki istenmeyen harmoniklerdir. Şekil 2'de verilen YGDA iletim sisteminde filtre kullanılmadan elde edilen yük gerilimi ve yük akımı grafikleri sırasıyla Şekil 3'te ve Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da ise

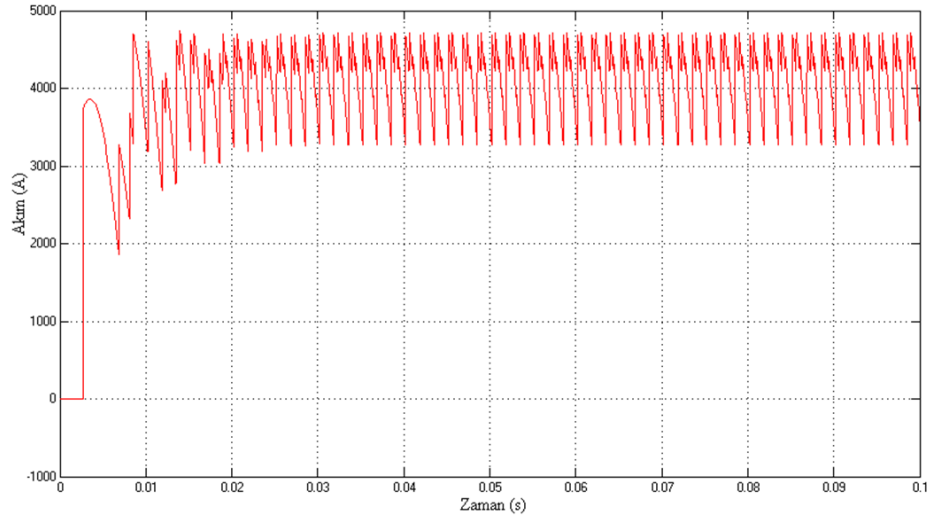
kompanzasyon öncesinde (filtresiz durumda) yük gerilimi ve yük akımının THD grafikleri verilmiştir. Bu çalışmada üç adet aktif doğru akım filtresi tasarlanmıştır. Birincisi seri aktif filtre, ikincisi paralel aktif filtre ve son olarak da bu iki filtrenin birleştirilmesiyle oluşturulan karma aktif filtre tasarımı yapılmıştır. Seri filtreden sisteme V_F gerilimi enjekte edilirken paralel filtreden sisteme I_F akımı enjekte edilir. Bundan dolayı normal durumda DA hattaki yük akımı $I_y = I_S + I_F$ ve hattaki yük gerilimi $V_y = V_s + V_F$ olur. Enjekte edilen akım ve gerilimler $V_F = -V_{sac}$ ve $I_F = -I_{sac}$ değerindedir. Sonuç olarak filtre kullandıktan sonra yük gerilimi ve akımı; Eş. 4 ve Eş. 5 ile ifade edilir ve elde edilen akım ve gerilim dalgalanmalarından bağımsız yani harmoniklerden arındırılmış olur.

$$I_y = I_{sac} + I_{sdc} - I_{sac} \Rightarrow I_y = I_{sdc} \quad (4)$$

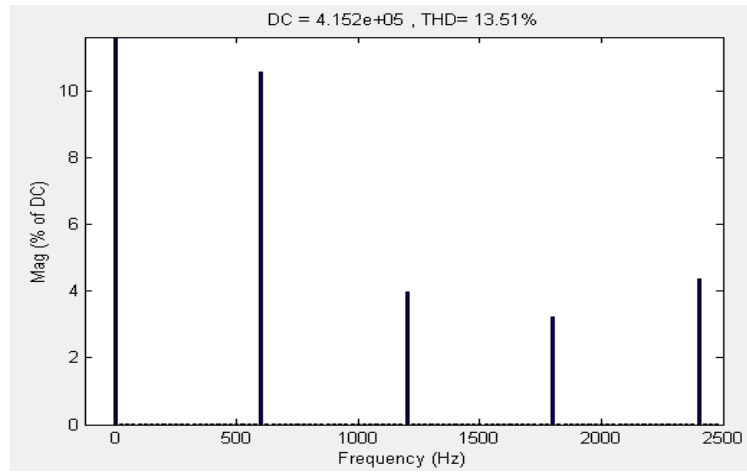
$$V_y = V_{sac} + V_{sdc} - V_{sac} \Rightarrow V_y = V_{sdc} \quad (5)$$



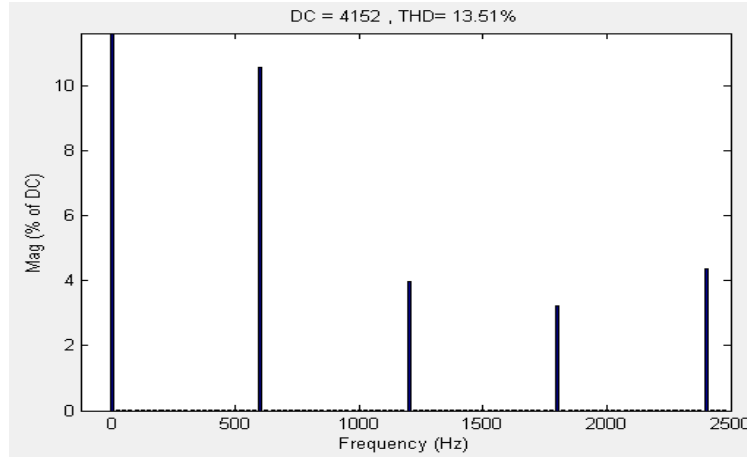
Şekil 3. Filtresiz durumda yük gerilimi (Unfiltered case load voltage)



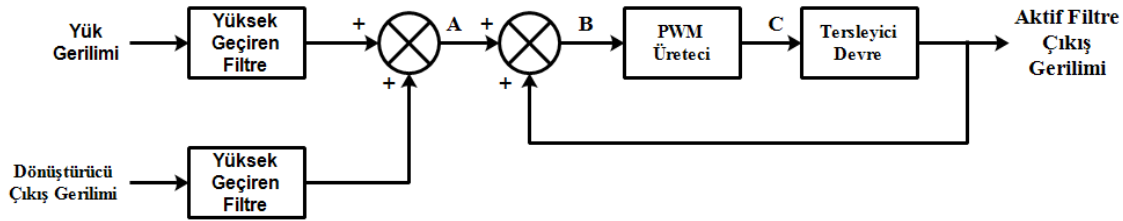
Şekil 4. Filtresiz durumda yük akımı (Unfiltered case load current)



Şekil 5. Filtresiz durumda yük geriliminin harmonikleri (Load voltage harmonics at unfiltered case)



Şekil 6. Filtresiz durumda yük akımının harmonikleri (Load current harmonics at unfiltered case)



Şekil 7. Seri aktif filtre kontrol sistemi blok diyagramı (Series Active filter control system block diagram)

Tasarımlar Matlab-Simulink'te SimPowerSystem araç kütüphanesi kullanılarak modellenmiştir. Doğru akım iletim hattı bloğunda, tek faz için dağıtılmış parametrelili hat modeli kullanılmıştır. 800 km'nin üstündeki iletim hattı mesafelerinde HVDC ile enerji iletimi alternatif akım ile enerji iletimine nazaran daha ekonomik olduğundan, iletim hattı modelindeki hat uzunluğu 800 km olarak alınmıştır. Sistemde kullanılan DA iletim hattı parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. DA iletim hattı parametreleri
(DC transmission line parameters)

Faz sayısı	1
Birim uzunluktaki direnç	0,015 ohm/km
Birim uzunluktaki endüktans	0,792 mH/km
Birim uzunluktaki kapasitans	14,4 nF/km

3.1. Seri Aktif Filtre (Series Active Filter)

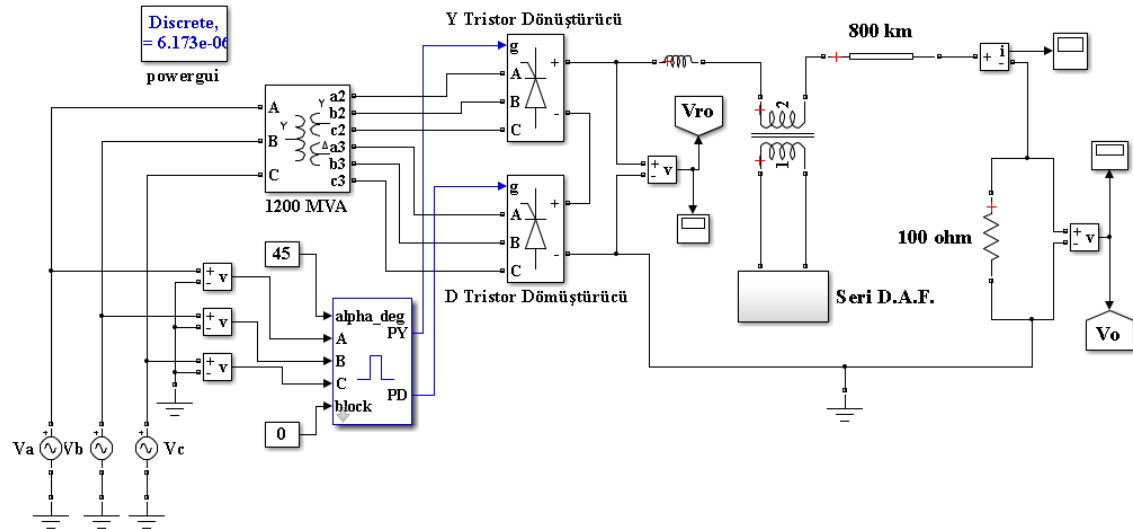
Gerilim kontrollü tasarlanan seri aktif filtre blok diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Blok diyagramında da görüldüğü gibi herhangi bir geleneksel kontrol yöntemi kullanılmamıştır. Filtre kontrolü çok basit ve anlaşılır bir şekilde tasarlanmıştır. Yüksek geçiren filtrenin frekansının belirlenmesi dışında herhangi bir matematiksel işleme ihtiyaç duyulmamaktadır. Sinyal yönlendirme blokları yardımıyla yük gerilimi ve dönüştürücünün çıkış gerilimi 80 Hz'lik yüksek geçiren filtrelerden geçirilmiştir. Seri aktif filtrenin kontrol tasarımında kullanılan elemanlar, sistemde 80 Hz'den düşük frekanslarda ara harmonikler oluşturduğundan 80 Hz'lik yüksek geçiren filtreler

kullanılmıştır. Bu filtre çıkışları toplanarak A noktasında sistemde var olan harmonikler DA bileşeninden ayırt edilmiştir ve elde edilen bu harmoniklerden aktif filtrenin çıkış gerilimi çıkarılarak B noktasında referans gerilim üretilmiştir. Elde edilen referans gerilim maksimum anahtarlama frekansı 20 kHz olan IGBT anahtarlama elemanlarından oluşan tek faz 4 bacaklı tam köprü PWM üreticisine uygulanarak C noktasında tetikleme sinyalleri oluşturulmuştur. İnverter tarafından üretilen ters fazdaki harmonik gerilimler bir transformator yardımı ile sisteme uygulanmıştır. Dolayısıyla aktif filtre, gerilim harmoniklerini bastırmak için tasarlanmıştır. Filtreyi sisteme bağlayan transformator, filtreyi istenmeyen aşırı gerilimlerden korur.

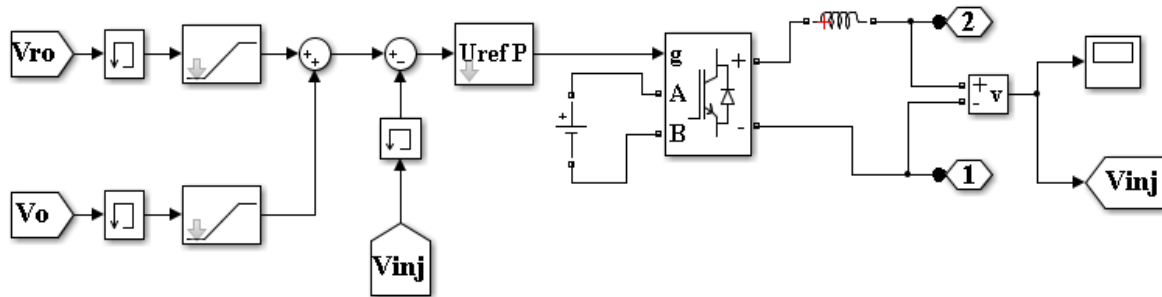
Şekil 8'de tasarlanan iletim sistemi modeli ve Şekil 9'da kontrol sistemi verilmiştir. Seri aktif filtre devresi uygulandıktan sonra elde edilen yük gerilimi grafiği ile yük geriliminin temel bileşen ve THD grafikleri Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir.

3.2. Paralel Aktif Filtre (Parallel Active Filter)

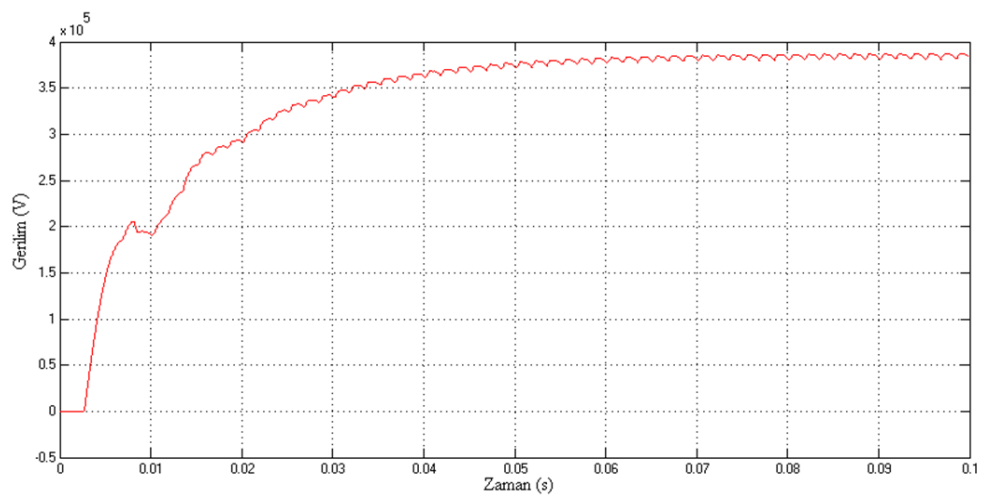
Akım kontrollü paralel aktif filtre blok diyagramı Şekil 12'de verilmiştir. Filtrede geleneksel kontrol yöntemleri kullanılmamış ve filtre kontrolü basit ve anlaşılır bir şekilde tasarlanmıştır. Yüksek geçiren filtrenin frekansının belirlenmesi dışında herhangi bir matematiksel işleme ihtiyaç duyulmamaktadır. Tasarımda, sinyal yönlendirme blokları aracılığı ile elde edilen yük akımı yüksek geçiren bir filtreden geçilerek A noktasında harmonikler elde edilmiştir.



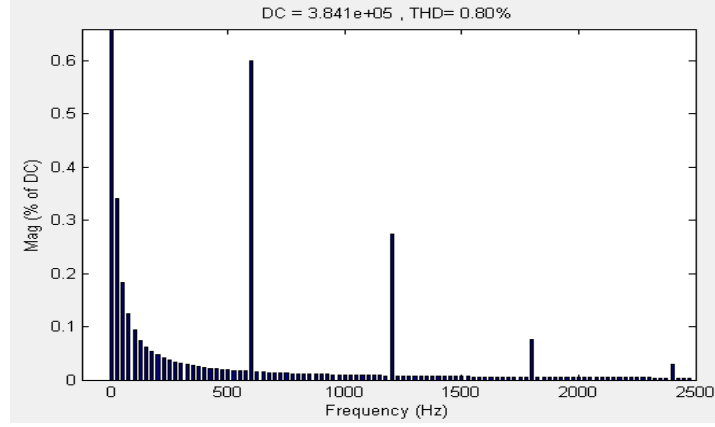
Şekil 8. Seri aktif filtre kontrollü iletim sistemi modeli (Series active filter controlled transmission system model)



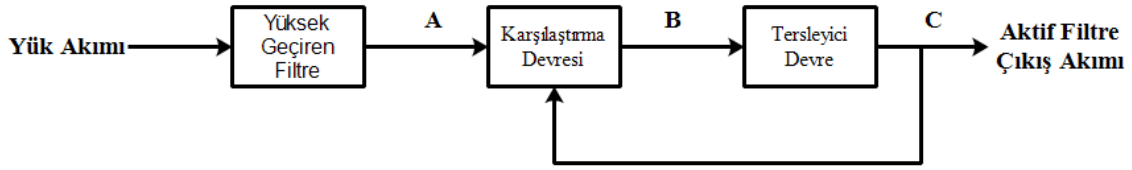
Şekil 9. Seri aktif filtre kontrol sistemi (Series active filter control system)



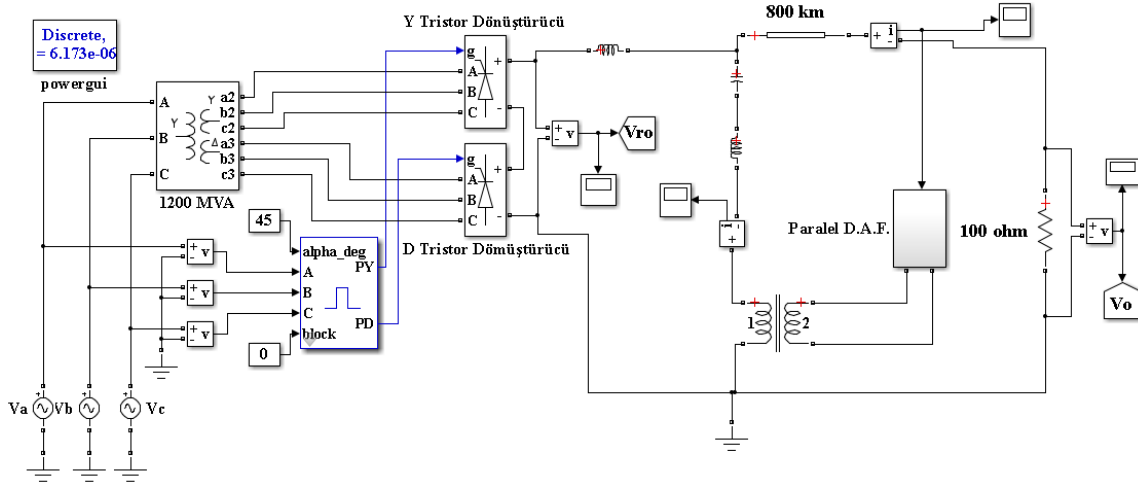
Şekil 10. Seri aktif filtreli durumda yük gerilimi (Load voltage at series active filter case)



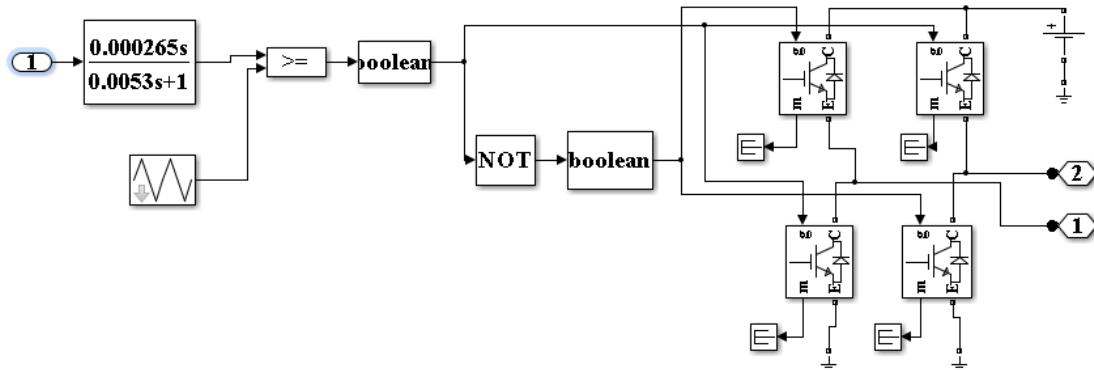
Şekil 11. Seri aktif filtreli durumda yük gerilimi harmonikleri (Load voltage harmonics at series active filter case)



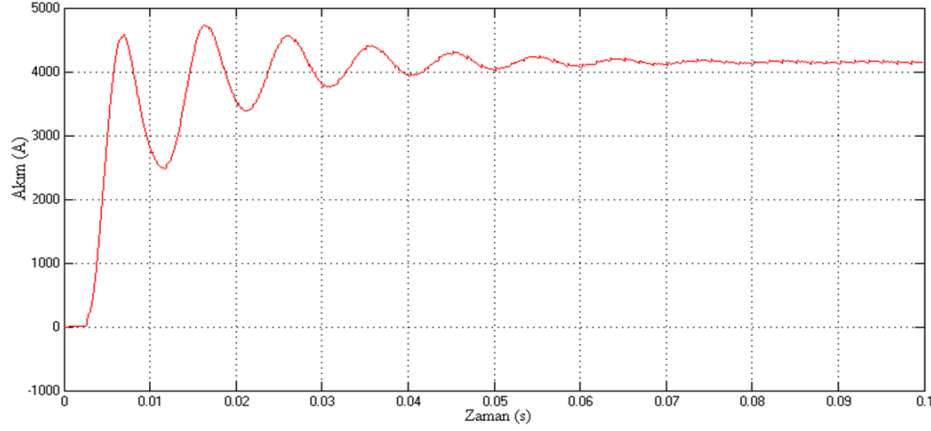
Şekil 12. Paralel aktif filtre kontrol sistemi blok diyagramı (Shunt active filter control system block diagram)



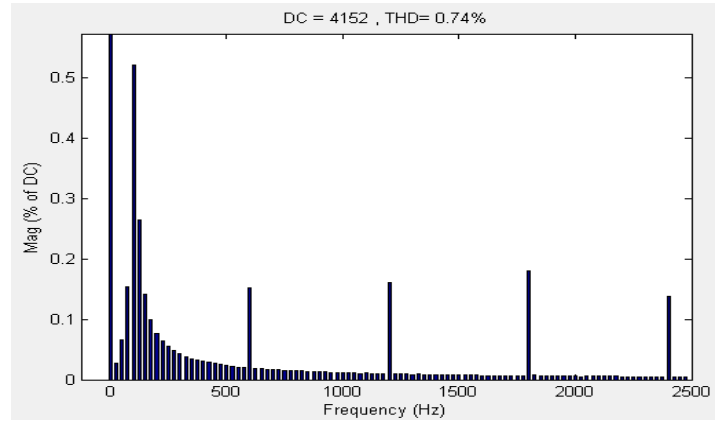
Şekil 13. Paralel aktif filtre kontrollü iletim sistemi modeli (Shunt active filter controlled transmission system model)



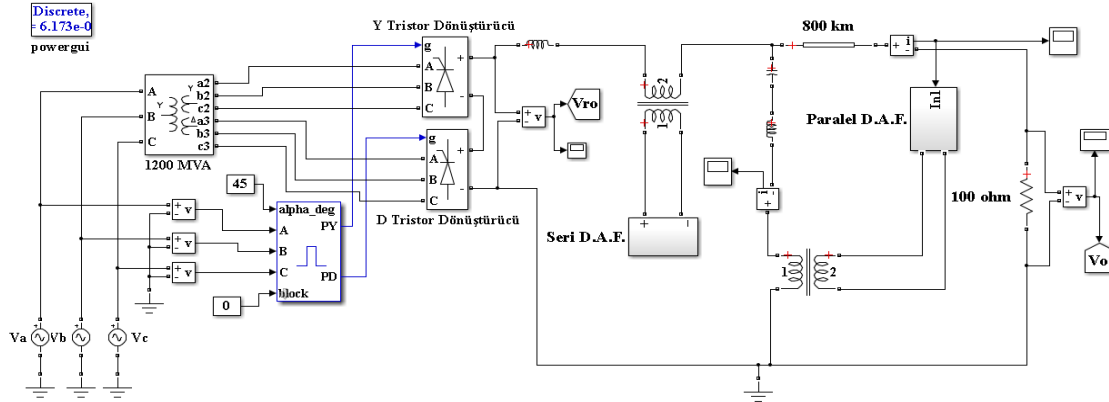
Şekil 14. Paralel aktif filtre kontrol sistemi (Shunt active filter control system)



Şekil 15. Paralel aktif filtreli durumda yük akımı (Load current at shunt active filter case)



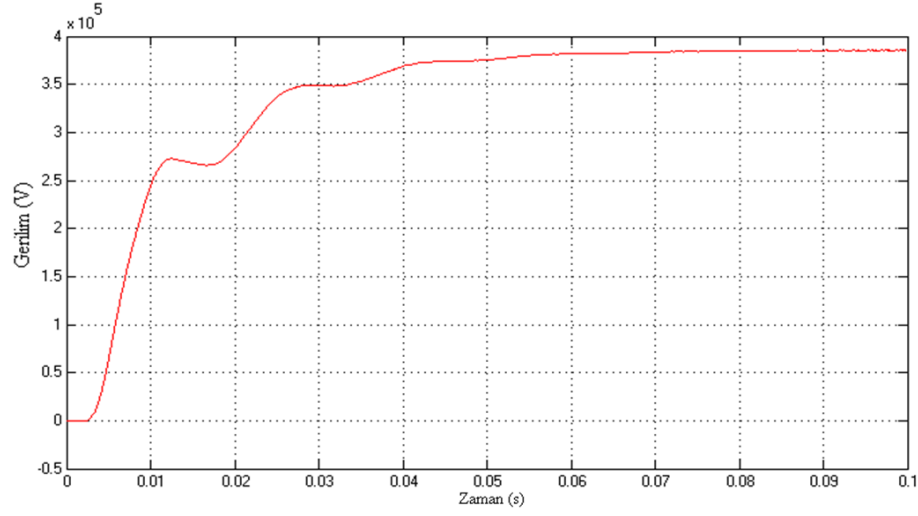
Şekil 16. Paralel aktif filtreli durumda yük akımı harmonikleri (Load current harmonics at shunt active filter case)



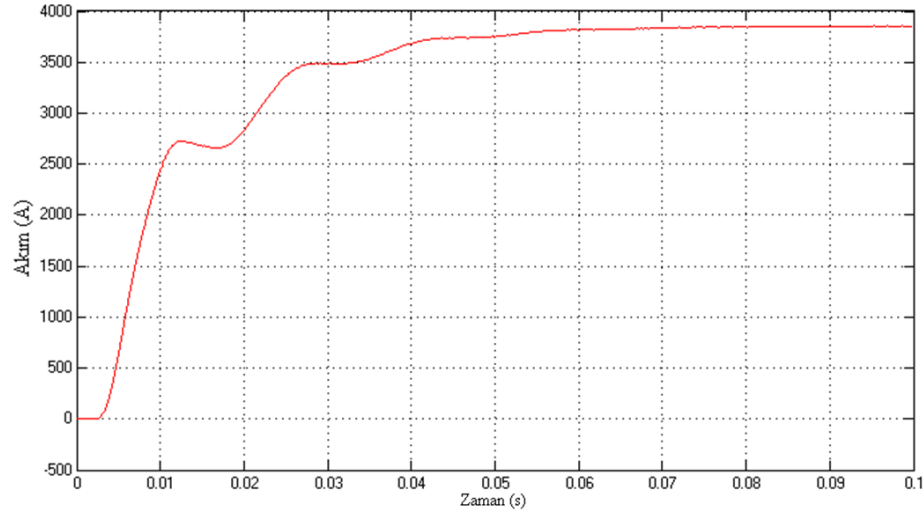
Şekil 17. Karma aktif filtreli YGDA iletim sistemi modeli (Mixed active filter controlled transmission system model)

Aktif filtrede kullanılan elemanlar ve sisteme bağlı yükler sistemde 50 Hz'e yakın değerlerde ara harmonikler oluşturmaktadır. Bu ara harmoniklerin ve sistemde oluşan diğer harmoniklerin akımın DA bileşeninden süzülmesi için 30 Hz frekansının üstünü geçiren bir yüksek geçiren filtre kullanılmıştır. Elde edilen harmonikler üçgen dalga ile karşılaştırılarak B noktasında tetikleme sinyalleri elde edilmiştir. Tetikleme sinyalleri dört bacaklı tek faz IGBT anahtarlama elemanlarından oluşan inverter devresine uygulanarak C noktasında harmonik akımlar ters fazda

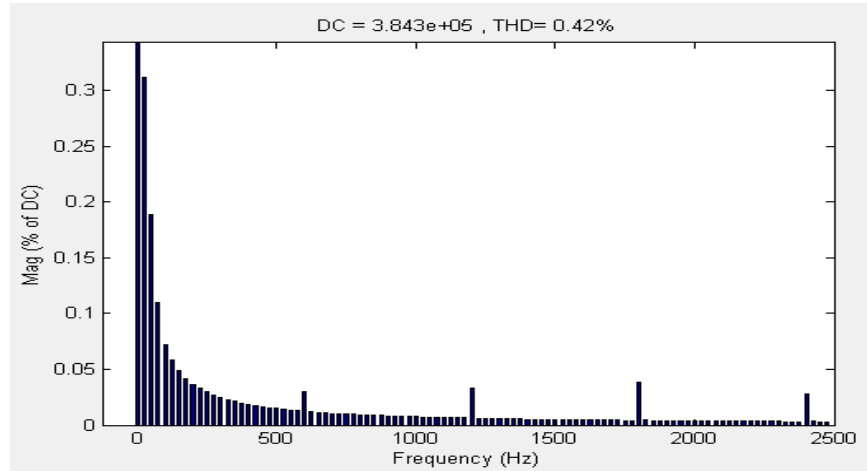
üretilep seri pasif filtre üzerinden sisteme enjekte edilmiştir. Dolayısıyla aktif filtre akım harmoniklerini bastırmak için tasarlanmıştır. Ayrıca 12. Harmonik bileşenin frekansına ayarlanmış pasif filtre yardımıyla sistemde var olan en büyük harmonik bileşen direk olarak toprağa aktarılmıştır. Şekil 13'te tasarlanan iletim sistemi modeli ve Şekil 14'te kontrol sistemi verilmiştir. Paralel aktif filtre devresi uygulandıktan sonra elde edilen yük akımı grafiği ile yük akımının temel bileşen ve THD grafikleri Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir.



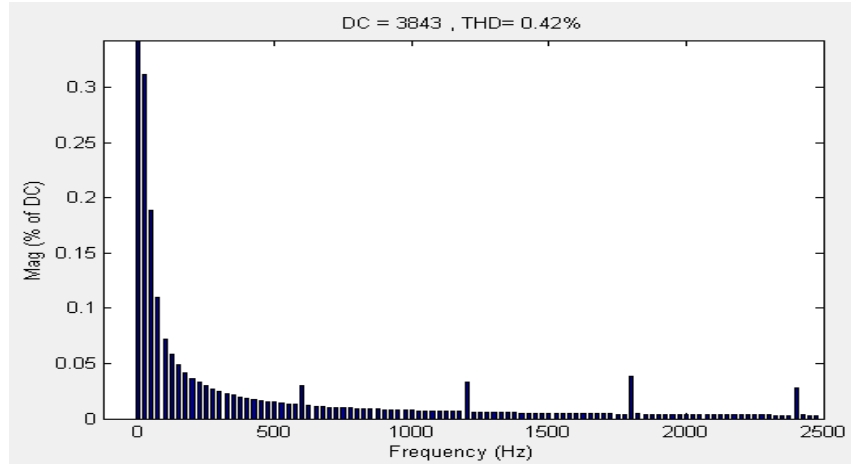
Şekil 18. Karma aktif filtreli durumda yük gerilimi (Load voltage at mixed active filter case)



Şekil 19. Karma aktif filtreli durumda yük akımı (Load current at mixed active filter case)



Şekil 20. Karma aktif filtreli yük gerilimi harmonikleri (Load voltage harmonics at mixed active filter case)



Şekil 21. Karma aktif filtreli yük akımı harmonikleri (Load current harmonics at mixed active filter case)

3.3. Karma Aktif Filtre (Mixed Active Filter)

Karma aktif filtre tasarımında seri aktif filtre ile paralel aktif filtre tasarımları birlikte kullanılmıştır. Bu tasarım sayesinde akım ve gerilim kontrolü beraber yapılmıştır. Dolayısıyla hem yük akımındaki hem de yük gerilimindeki harmonikler etkin bir şekilde bastırılmaya çalışılmıştır. Tasarlanan güç sistemi modeli Şekil 17’de verilmiştir. Kompanzasyon sonrasında elde edilen yük gerilimi ve yük akımı grafikleri Şekil 18 ve Şekil 19’da verilmiştir. Ayrıca, yük gerilimi ve yük akımı için temel bileşen değerlerin ve THD grafikleri sırasıyla Şekil 20 ve Şekil 21’de aktarılmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, tek kutuplu bir yüksek gerilimli doğru akım (YGDA) iletim sistemi modeli oluşturularak, bu iletim sisteminde dönüştürücülerden kaynaklanan harmonikleri bastırmak için seri, paralel ve karma aktif doğru akım filtre tasarımları ve simülasyonları gerçekleştirilerek başarılı sonuçlar elde edilmiştir. YGDA iletim sistemi modelinde filtre kullanılmadan elde edilen gerilim ve akım grafiklerinde, dönüştürücülerden kaynaklı harmoniklerin temel akım ve gerilim bileşenlerine sızdığı görülmektedir. Ayrıca sistemdeki transformatör ve diğer lineer olmayan elemanlardan dolayı ara harmonikler de oluşmuştur. Kompanzasyon öncesinde gerilim ve akım için THD değerleri %13,51 olarak ölçülmüştür ve elde edilen sonuçlar IEEE tarafından belirtilen standartların ($THD \leq 5$) oldukça üstündedir. YGDA iletim sistemi modelinde ilk olarak gerilim kontrollü seri aktif filtre devresi uygulanmıştır. Kompanzasyon sonrasında gerilim grafiğinin doğru akım değerlerine yakın olduğu ve THD değerinin standartlara uygun bir şekilde %0,80 olarak elde edilmiştir. Simülasyonun ikinci aşamasında akım kontrollü paralel aktif doğru akım filtresi YGDA iletim sistemine uygulanmıştır. THD değeri %0,74 olarak ölçülmüştür ve standartlara uygun olarak elde edilmiştir. Paralel aktif filtre ile elde edilen THD değerinin seri aktif filtre ile elde edilen

değerinden daha düşük olmasına rağmen kararlılık noktasına daha geç ulaştığı görülmüştür. Son olarak, YGDA iletim sistemine akım ve gerilim kontrollü karma aktif güç filtresi uygulanmıştır. Kompanzasyon sonrasında elde edilen gerilim ve akım grafiklerinde, harmoniklerin etkin bir şekilde bastırıldığı ve grafiklerin doğru akım değerlerine çok yaklaştığı görülmektedir. Simülasyon sonucunda THD değeri %0,42 olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak, YGDA iletim hatlarındaki harmoniklerin bastırılması amacıyla tasarlanan doğru akım aktif güç filtrelerinin iletim sistemine uygulanması sonucunda, yük akımı ve yük gerilimi için THD değerleri IEEE standartlarında belirtilen $THD \leq 5$ ilkesine uygun olarak elde edilmiştir. Ayrıca, seri aktif filtrede gerilim harmonikleri başarılı bir şekilde bastırılırken, paralel aktif filtrede akım harmoniklerinin başarılı bir şekilde bastırıldığı görülmüştür. En başarılı harmonik kompanzasyonu işlemi ise, seri ve paralel aktif filtrelerin birlikte kullanıldığı karma aktif güç filtresi uygulamasında gerçekleştirilmiştir. Böylece tasarlanan karma aktif güç filtresinin YGDA iletim sistemlerinde kullanılmasıyla, sistemdeki akım ve gerilim harmonikleri başarılı bir şekilde bastırılacak ve güç kalitesinin iyileştirilmesine olumlu yönde katkı sağlanacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Akdemir M., Yüksek gerilimli doğru akım iletim sistemleri için bir aktif doğru akım filtresi tasarımı ve simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Siirt, 2015.
2. Barghi Latran M., Teke A., Investigation of Inverter Based Shunt Compensators for Mitigation of Power Quality Problems in Power Distribution System, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (4), 793-805, 2014.
3. Germeç K.E., Erdem H., Time-Harmonic Analysis in Electric Power Systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 263-271, 2015.

4. Hajibeigy M., Farsadi M., Asl K.B., A modified structure of hybrid active DC filter in HVDC system, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 4 (10), 11-16, 2012.
5. Nowdeh S.A., Hajibeigy M., Hajibeigy M., Proposed method to control the hybrid active DC filter in HVDC system, *Acta Electrotehnica*, 54 (3), 214-220, 2013.
6. Hao P., Zangji W., Study on the control of shunt active DC filter for HVDC systems, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 23 (1), 396-401, 2008.
7. Ahmed K.H., Hamad M.S., Finney S.J., Williams B.W., DC-side shunt active power filter for line commutated rectifiers to mitigate the output voltage harmonics, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, USA, 151-157, 2010.
8. Mirzaee H., Parkhideh B., Bhattacharya, S., Design and control of series DC active filter (SDAF) for shipboard medium-voltage DC power system, *Electric Ship Technology Symposium Conference Proceedings*, VA, USA, 452-458, 2011.
9. Mirzaee H., Bala S., A multi-loop control system for series DC active filter in a medium DC amplifier, *Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, Colorado, USA, 5193-5198, 2013.
10. Akmaz D., Güç Sistemlerinde Harmoniklerin İncelenmesi ve Akım Harmoniklerinin Azaltılması için Aktif Güç Filtre Tasarımları, Yüksek Lisans Tezi, Tunceli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli, 2012.
11. Arrillaga J., Watson N.R., *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, Singapore, 2003.
12. Efe S.B., Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2006.
13. Jun Y., Zehong L., Yan S., Studies on designs of DC filters of three Gorges to Changzhou ± 500 kV HVDC link, *International Conference on Power System Technology*, Beijing, 460-465, 1998.