



Güç Sistemindeki Harmoniklerin Bilgisayar Destekli Modellenmesi

Computer Aided Modelling of Harmonics in the Power System

Sabir RÜSTEMLİ^{1*}, Sinan TEKEV²

¹ Bitlis Eren University, Bitlis, Turkey, srustemli@beu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4957-1782

² Bitlis Eren University, Bitlis, Turkey, sinantekev@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-4486-4383

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 22 Eylül 2021
Revizyon 27 Aralık 2021
Kabul 28 Aralık 2021
Online 31 Aralık 2021

Anahtar Kelimeler:

Güç Sistemleri, Harmonikler,
Araharmonikler, Filtreleme

ÖZ

Teknolojinin gelişmesi ve Dünya nüfusunun sürekli olarak artmasından dolayı, kullanılan elektrik enerji miktarı da sürekli artmaktadır. Elektrik enerjisinin talebinde meydana gelen artış ile birlikte, daha güvenilir ve daha kaliteli enerjiye ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Bu kavram elektrik mühendisliği alanında “güç kalitesi” başlığı ile yerini almıştır. Günümüzde sanayide kullanılan güç elektroniği elemanları, transformatörler, ark fırınları, konverterler vb. harmonik yayan elemanlar güç kalitesinin bozulmasına sebep olmuş ve sonuç olarak da harmoniklerden kurtulma yollarına bizi sevk etmiştir. Kaliteli elektrik enerjisinin sağlanabilmesi için enerjinin devamlılığı, gerilimin ve frekansın stabilitesi, güç faktörünün 1’e yakınlığı, faz gerilimleri dengesi ve gerilimdeki harmonik miktarlarının belli değerlerde kalması gibi bazı kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan çalışmada, güç sistemindeki harmonik ve araharmoniklerin analizi yapılabilmesi için ve sistemdeki oluşan etkinin görülebilmesi amacı ile MATLAB / Simulink programında seri aktif güç filtresi, farklı nonlineer yüklerle karşı modüle edilip simülasyonu yapılmıştır. Sistemdeki harmonikler ve ara harmoniklerin yok edilmesinin ve filtrelemeye karşı vermiş oldukları tepkinin görülebilmesi için FFT analiz programı ile sonuçlar gösterilmiştir. Nonlineer yükleri olan güç sistemindeki harmonik ve araharmoniklerin filtrelemeden önce ve filtrelemeden sonraki oluşturduğu sonuçlar analiz edilmiş ve incelenmiştir. İnceleme sonucunda alınabilecek önlemler ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 September 2021
Received in revised form 27 December 2021
Accepted 28 December 2021
Available online 31 December 2021

Keywords:

Power Systems, Harmonics,
Interharmonics, Filtering

Doi: 10.24012/dumf.1051328

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Due to the development of technology and the continuous increase in the world population, the amount of electrical energy used is constantly increasing. With the increase in the demand for electrical energy, more reliable and higher quality energy has begun to be needed. This concept has taken its place in the field of electrical engineering with the title of “power quality”. Power electronics components used in industry today are transformers, arc furnaces, converters, etc. Elements emitting harmonics caused the deterioration of power quality and as a result, led us to ways to get rid of harmonics. In order to provide quality electrical energy, some criteria such as the continuity of the energy, the stability of the voltage and the frequency, the power factor close to 1, the balance of the phase voltages and the harmonic amounts in the voltage should be taken into consideration. In the study, in order to analyze the harmonics and interharmonics in the power system and to see the effect on the system, the serial active power filter was modulated and simulated against different nonlinear loads in the MATLAB / Simulink program. In order to see the elimination of harmonics and interharmonics in the system and their response to filtering, the results are shown with the FFT analysis program. The results of harmonics and interharmonics in the power system with nonlinear loads before and after filtering have been analyzed and examined. As a result of the review, suggestions were made regarding the precautions that can be taken.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüs dalgası biçiminde olması gerekiyor. Fakat bu her zaman gerçekleşmeyebilir. Enerji sistemlerinde manyetik ve elektrik devre nonlineerliği harmoniklere neden olmaktadır. Harmonikler, üretilen enerjinin kalitesinde önemli bir etkidir. Akım ve gerilim dalga biçiminin sinüs dalga biçiminden uzaklaşması şeklinde tanımlanabilecek olan harmonikler, nonlineer elemana sinüzoidal bir kaynağın uygulanması yoluyla ya da nonsinüzoidal bir kaynaktan beslenen lineer veya nonlineer elemanlar tarafından oluşturulur [1].

Rüstemli vd. [2] Harmonikleri azaltmanın veya yok etmenin en önemli ve faydalı yöntemi harmonik filtreler kullanmaktır. Çalışmalarında Türkiye'nin doğusunda yer alan Van şehrinde bulunan iki farklı fabrikada, Zera MT310'un güç analizörü yardımıyla ölçümleri gerçekleştirilen (harmonikler, anlık elektriksel değerler, akım ve gerilim dalga şekilleri) gibi çeşitli parametrelerin farklı tarihlerde olmak üzere detaylı bir incelemesi yapılmıştır. Rüstemli vd. [3] Pasif filtre sisteminin yapısı ve uygulama şekilleri hakkında bilgiler verilmiştir. Enerjide harmoniklerin filtrelemesinde kullanılan (endüktans bağlı kompanzasyon sistemi) sistemleri verilmiştir. Dağıtım sisteminin çeşitli noktalarında harmonik analizörü Simplorer Simulation Center 6.0 (SSC 6.0) programı ile ölçüm yapılmıştır. Enerji sisteminin güç elektroniği uygulamalarında başarılı sonuçları elde edilmiştir. Rüstemli vd. [4] ZERA MT 310 sinyal analizörü kullanılarak güç kayıplarındaki parametreleri (gerilim dalga şekilleri, harmonikler) tespit edilmiştir. Güçteki bu istenmeyen kayıpların sebeplerini araştırılmıştır. Simplorer 6.0 program ile seri aktif filtrenin modellenmesi yapılarak incelenmiştir.

Şahin [5] Harmonik kaynaklar, harmoniklerin güç sistemlerindeki etkileri ve harmoniklerin süzülmesine ilişkin bilgi vermiştir. Harmonik analizi için geliştirilmiş olan algoritma ve akış diyagramı ile kullanılan yazılım açıklanmıştır. Şahin [6] çalışmasında harmoniklerin yeraltı güç kabloları üzerine etkilerinin tespit edilmesi ve harmonik etkilerinin düşürülmesi adına önerilerde bulunmuştur. Bu noktada bir OG sistemde harmonik ölçümü yapılarak, elde edilen değerler doğrultusunda bir MATLAB/SIMULINK modeli oluşturulmuştur.

Yapılan çalışmada farklı tipte yüklere sahip bir güç sistemi için harmoniklerin ve araharmoniklerin kıyaslanıp incelenmesi yapılmış olup alınabilecek önlemler planlanmıştır. Güç sisteminde meydana gelen sonucu görmek için ve harmonik ve araharmoniğin gösterilebilmesi için MATLAB/Simulink programıyla modüle edilip, simülasyonu yapılarak belirtilmiştir. Bu çalışmada amaç, güç sistemi üzerindeki harmonik ve araharmoniğin sonuçlarının analiz edilip neler yapılabilirliğinin incelenerek ilgili önerilerde bulunulmasıdır.

2. HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ

Harmoniklerin oluşmasına neden olan kaynaklar; Döner makineler, Transformatörler, Güç elektroniği elemanları, Doğru akım ile enerji nakli, Statik VAR generatörleri, Ark fırınları, Kesintisiz güç kaynakları, Fotovoltaik sistemler, Konverterler, Elektronik balastlar ve Gaz deşarjlı aydınlatma şeklinde sıralanabilir.

Harmonikler; genellikle nonlineer elemanlar ve nonsinüzoidal kaynaklardan birinin ya da her ikisinin de sistemde mevcut olmasından kaynaklanmaktadır. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde mevcut olması sinüzoidal dalganın bozulmasına yol açacaktır. Bu bozulan dalgalara, nonsinüzoidal dalga adı verilmektedir. Harmonikler güç sistemlerinde; rezonans olayları, ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, güç faktörünün değişmesi gibi teknik ve ekonomik sorunlara sebep olur. Sinüzoidal alternatif akım uygulanan bir alıcının şebekeden harmonikli akım çekmesi, bu alıcının yapısının gerektirdiği bir durumdur. Bu; alıcının nominal çalışması esnasında harmonik meydana getirerek akım çekmesi demektir. Harmonik üreten bu alıcıların dışında, lineer karakteristikte olmalarına karşın harmonikli akımlara yol açan alıcılar da mevcuttur. Bu da, alıcıya uygulanan gerilimin nonsinüzoidal oluşundan kaynaklanmakta olan bir durumdur. Alternatif akım üretimi esnasında alternatörlerde alınan iyileştirici önlemlerle, elektrik enerjisinin sinüzoidale mümkün olduğunca yaklaştırılması sağlanmaktadır. Ancak, aynı şebekeye bağlı diğer nonlineer yükler, lineer bir alıcıya etki edebilmektedir [7].

Enerji sistemlerinde, harmonikler nedeniyle gerilim ve akım dalga şekillerinde yaşanan bozulmalar birçok farklı soruna sebebiyet vermektedir. Bu sorunlar; Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerdeki kaybın artışı, Generatör ve şebeke geriliminin bozulması, Gerilim düşümünde artış, Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma sebebiyle hasar görmesi, Uzaktan komanda, yük kontrolü gibi yerlerde ortaya çıkan çalışma bozuklukları, Şebekede rezonans olayları, rezonansın yol açtığı aşırı gerilimler ve akımlar, Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın ortaya çıkması, Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçümler, İzolasyon malzemesinin delinmesi, Ateşleme devrelerinin anormal çalışması, Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması, Makinelerde mekanik titreşimler (vibrasyon), Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma, Mikro bilgi işlemciler üzerinde hatalı çalışma, Elektronik kart arızaları, Elektromekanik cihazlarda ve kablolarda ısınma, CAD/CAM terminallerinde hafıza silinmesi, Kesici ve şalterlerde açmalar, Kompanzasyon sigortalarının atması, Güç kondansatörlerinde güç kayıpları, delinmeler ve patlamalar, Röle sinyallerinin bozulması ve anormal çalışması ve Enerji kayıpları şeklinde sıralanabilir [8]. Kullanıcıların sistemi kirlenmelerine ve birbirlerine zarar verecek etki yaratmalarına izin verilmesi düşünülemez, bu nedenle ülkelerin çoğunda elektrik dağıtımını yapan kuruluşlar çekilecek harmonik akım miktarını sınırlayan kurallar koymuşlardır [9].

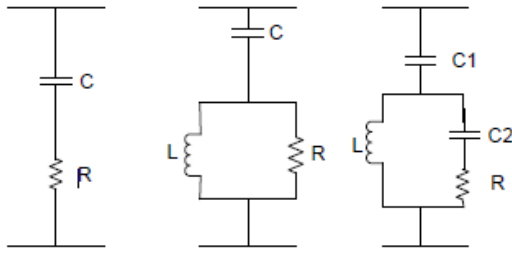
Endüstrileşmenin bir sonucu olarak elektrik şebekelerinde meydana gelen kirlenme kaçınılmaz bir durumdur. Enerji kalitesi üzerinde belirleyici rol oynayan başlıca faktörler; gerilim değişimleri, kesintiler ve temel frekans dışındaki frekansları (harmonikleri) üreten tüketicilerdir. Harmoniklerden kaynaklı olası zararlı etkilerin önüne geçilmesi yalnızca tasarım aşamasında alınacak önlemlerle mümkün olabilmektedir. Harmonik akımların şebekeye geçmesini engellemek adına ek devrelere gereksinim duyulmaktadır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devreler, 'harmonik

filtresi' olarak adlandırılır. Harmonik filtreler, bir veya daha fazla frekanstaki akımın veya gerilimlerin yani harmoniklerin etkisini azaltmayı amaçlar. Bu filtrelerin görevi, kısaca; harmonik üreten bir cihazın beslediği yükün gerilim dalgalarını düzelterek, AC sisteme katılan istenmedik harmonik bileşenlerin önüne geçmektir [10, 11, 12].

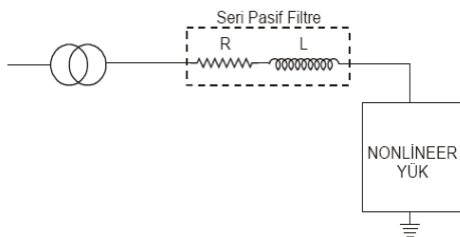
Endüstriyel tesislerde gerilimde meydana gelen bozulmanın %5'in üzerinde olmaması genellikle kabul edilir olup pasif filtreler aracılığıyla bu seviyeye inilebilir. Fakat hava alanı ve hastanelerde gerilimde meydana gelen bozulma (THD_v) %3 oranının altında olmalıdır. Bu, her zaman pasif filtre ile sağlanamayabilir. Böyle bir durumda aktif filtreler ihtiyacı duyulur.

2.1. PASİF FİLTRELER

Pasif filtreler kaynak ve yük arasında yerleştirilen ve temel frekans dışındaki bileşenlerin yok edilmesine yönelik olarak tasarlanan ve kondansatör, endüktans ve kimi durumlarda direnç elemanlarından oluşan devrelerdir. Pasif filtreler, ortadan kaldırılmak istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerinin belirlenmesini amaçlar. Her bir harmonik için ayrı devre tasarımı yapılır. Pasif filtreler; seri pasif filtreler ve paralel (şönt) pasif filtreler olmak üzere 2 ayrı bölümde incelenir. Değişik pasif filtre çeşitleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Seri pasif filtreler harmonik kaynağı ile şebeke arasında seri olarak bağlanır. İstenmeyen harmonik bileşen işaretlerini geçirmemek için yüksek bir seri empedansın kullanımıyla sistemde istenmeyen harmonik işaretlerini engeller. Yalnızca belirli frekansa sahip harmonik işaretleri engeller. Seri filtreler, filtrelerde rezonans durumu gözlenmemesine karşın, tam yük akımını taşıma ve hat gerilimine göre yalıtım zorunlulukları mevcuttur. Şekil 2'de seri filtrenin devreye bağlanış şekli gösterilmiştir [13].



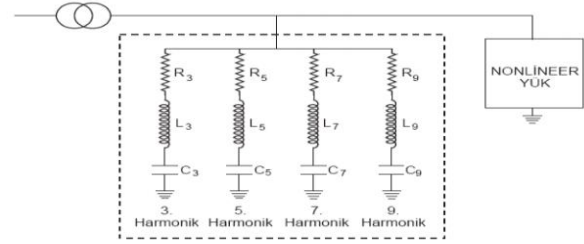
Şekil 1. Değişik pasif filtre çeşitleri



Şekil 2. Bir devrede seri filtrenin kullanımı

Seri filtreler pratikte AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin önlerinde kullanılır. Seri filtrenin uygulanmasındaki zorluk; tüm yük akımının filtre üzerinden geçmesi olup, tam hat gerilimleri için yalıtılmasının gerekmesi ve gerilim düşümüne sebebiyet vermesidir [8].

Parelel filtreler harmonik kaynağına paralel bağlanır. Paralel pasif filtreler, ortadan kaldırılmak istenen harmonik bileşen frekansı için rezonansa gelecek C ve L değerlerini hesaplayarak bu devreyi kaynağa bağlamayı amaçlar. Her bir harmonik frekansı için bu hesaplama ayrı ayrı yapılır ve oluşturulan devre kaynağına bağlanır. Bu işlem genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Bunun nedeni her harmonik için yapılması optimum bir çözüm sağlamamasıdır. Genliği düşük olan harmonik işaret frekansları için bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterlidir. Şekil 3'de paralel filtrenin devreye bağlanış şekli gösterilmiştir [14].



Şekil 3. Bir devrede paralel filtrenin kullanımı

2.2. AKTİF FİLTRELER

Aktif güç filtresi genel kullanım sebebi olarak, tüketicilerinin her biri için kendisinin de bir harmonik kaynak olan yüklerinin akım gerilim dengesizliğini elimine etmektir. Diğer taraftan fabrikalar için kullanılan aktif güç filtresi temelde, güç dağıtım sistemlerindeki harmonik değerleri azaltmayı ve bu şekilde gerilim harmonikleri ve gerilim dengesizliklerini ortadan kaldırmayı amaçlar [15]. Aktif filtrenin çalışma yöntemi pasif filtrenin çalışma yönteminden bütünüyle farklıdır. Aktif filtre şebekedeki harmonikleri hesaplayarak, onlara aynı genlikte ters fazda harmonik üretir. Bu şekilde güç kalitesine etki eden harmonikleri yok eder. Aktif filtre var olan harmoniklerin ortadan kaldırılmasını sağlayacak harmoniklerin üretiminden sorumlu olup, aşırı yüklenme olasılığı taşımamaktadır. Kapasitenin üstündeki harmonikler şebekede dolaşmayı sürdürerek, aktif filtre kapasitesi mertebesinde harmoniklerin üretilmesine yani çalışmaya devam eder.

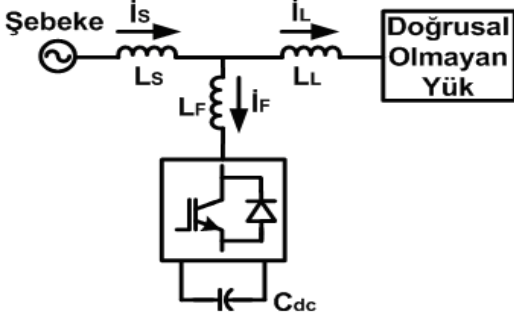
Aktif filtreler yapıları bakımından; paralel, seri ve hibrit güç filtreleri olmak üzere 3 bölümde incelenir. Kontrol yöntemine göre de açık çevrim ve kapalı çevrim aktif güç kontrol sistemi olarak iki farklı bölüm altında ele alınmaktadır.

Paralel aktif güç filtresi (PAGF), şebekeye paralel bağlanır. Filtre çeşitlerinden bu tür, sanayi işletmelerindeki en önemli ve en geniş kullanım alanına sahip yapılardır [16]. Bu filtreler harmonik akım filtrelemesi, reaktif güç kompanzasyonu, yük akımı dengelemesi ve nötr akım kompanzasyonu gibi akım kaynaklı harmoniklerin eliminasyonu için elverişlidir [17]. Şekil 4'de temel bir PAGF gösterilmektedir.

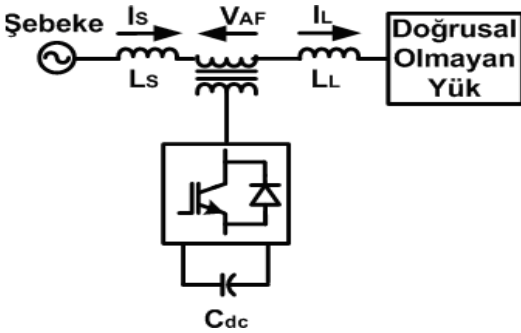
Paralel aktif güç filtrelerinin dezavantajları yüksek güçlü uygulamalarda oluşmaktadır. Çünkü yüksek güç uygulamalarında, aktif filtrelerde kullanılacak yarı iletken sıkıntısı meydana gelmektedir. Bu uygulamalarda transformatörler, çoklu konvertörler veya kaskat bağlama

konvertörleri PAGF ve elektrik güç şebekesi değerlerinin birleşmesi için kullanılması gerekmektedir [16].

Seri aktif güç filtresi (SAGF) şebeke ile bağlantılı bir trafo üzerinden seri bağlanır. Seri aktif güç filtresi temel olarak anlık gerilim giriş çıkışıyla yük boyunca saf sinüzoidal gerilim dalga formunun stabilizasyonunu sağlanmasına dayalıdır [16]. Bu filtreler gerilim harmonik kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, gerilim dengelenmesi, gerilim dalgacıklarının azalması ve gerilim düşmelerinin yok edilmesi için kullanılır [18]. Bu, yük üzerinde saf sinüzoidal dalga formu sağlar ki bu da gerilim değişimlerinde hassas olan cihazlar için oldukça önemlidir. PAGF'in SAGF'a karşı en büyük dezavantajı üzerindeki çıkış gerilim dalgasının sinüzoidal biçimini devam ettiremiyor olmasıdır. Bu durum SAGF'ı ideal hale getirmektedir [16]. Bununla beraber, SAGF transformatör bağlantılarının tamamını yük akımları üzerinden geçireceğinden, yüksek kapasiteye sahip olması gerekmektedir. Harmonik akımların yüksek olduğu durumlarda, aktif güç filtresinin kapasitesi de artmaktadır. Şekil 5'de temel bir SAGF gösterilmektedir.



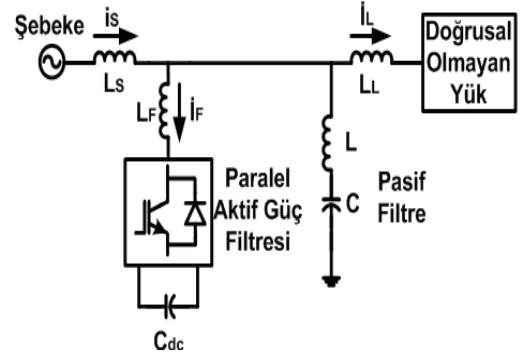
Şekil 4. Paralel aktif güç filtresi



Şekil 5. Seri aktif güç filtresi

Hibrit aktif güç filtresi (HAGF), aktif güç filtresi ve pasif güç filtresinin bağlantı yapılarının birleşimiyle meydana gelen filtre yapısıdır. HAGF sadece harmonik kompanzasyonu için kullanılması yanında, gerilim regülasyonu, güç kompanzasyonu, kaynak ve harmonik kaynaklı yük arası izolasyon için de kullanılmaktadır. Bu filtrelerin esas amacı, maliyeti azaltmak ve etkinliğini artırmaktır. PAGF'ın PPF ile bileşimi, PAGF ile beraber paralel pasif filtre veya yüksek geçişli filtresinin oluşumudur. Bunun için kullanılan PAGF düşük salınımlı harmoniklerin eliminasyonuna yönelik modellenirken, PPF yüksek salınımlı harmoniklerin kompanzasyonuna yönelik olarak modellenir [16]. Yüksek sıralı harmoniklerin kompanzasyonu adına, anahtarlar frekansı sınırlandırılır. Eş zamanlı olarak, bunun için

kullanılan PAGF, PPF ile kaynak empedansı arasındaki olası rezonansın elimine edilmesi için kullanılmaktadır [19]. Şekil 6'da, PPF ve PAGF ile oluşan temel bir hibrit aktif güç filtresini göstermektedir.



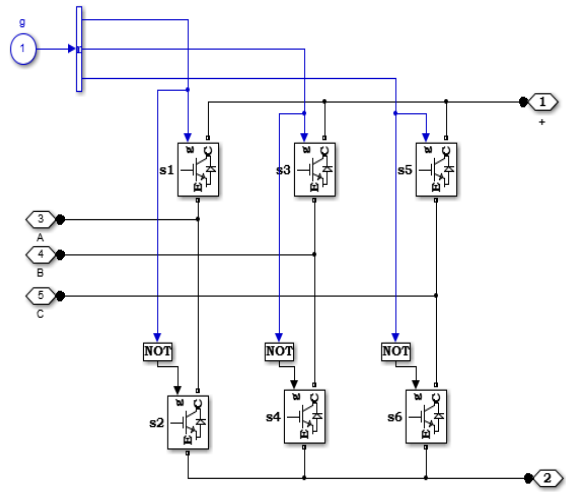
Şekil 6. Hibrit aktif güç filtresi

Hibrit aktif güç filtresinin tekniğindeki başlıca dezavantajı, PPF için çok sayıda güç bileşenine sahip olmasıdır. Burada, PPF sürekli sisteme bağlandıklarından lineer olmayan kaynakları önceden bilinen yükler için uygundur [16].

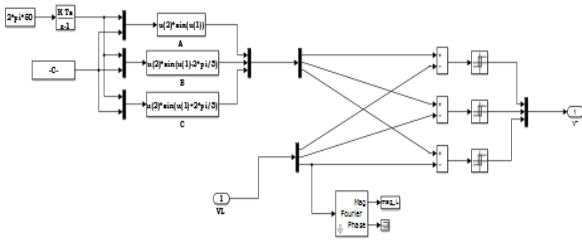
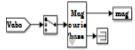
5. MATLAB/Simulink

Simulink, çok alanlı simülasyon ve model tabanlı tasarım için bir blok diyagram ortamıdır. Sistem düzeyinde tasarımı, simülasyonu, otomatik kod oluşturmayı ve gömülü sistemlerin sürekli test edilmesini ve doğrulanmasını destekler. Simulink, bir grafik editörü, özelleştirilebilir blok kütüphaneleri ve dinamik sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu için çözümler sağlar. Özetle, simulink ile kod yazmadan blok diyagramlar kullanılarak simülasyon yapılabilmektedir. Simulink'in kullanıldığı alanlardan birkaçı; Görüntü işleme uygulamaları, Kontrol sistemleri (PID kontrolü), Sayısal işaret işleme, Elektrik devre çözümü, Durum-uzay modelleri ve Transfer fonksiyonları şeklinde sıralanabilir.

Simulink ortamında kullanılan seri aktif güç filtresi, tetikleme blok şeması Şekil 7'de görülmektedir. Şekil 8'de ise seri aktif güç filtresinin fourier dönüşümü simulink modellemesi ile oluşturulan iç yapısı blok şeması verilmiştir [20].

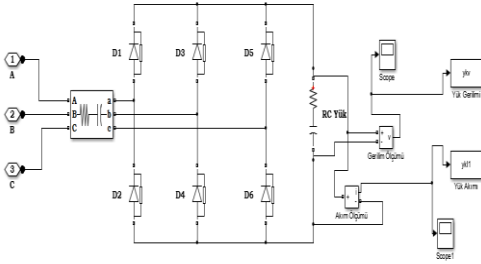


Şekil 7. Seri aktif filtre tetikleme blok şeması



Şekil 8. Seri aktif güç filtre iç yapısı blok şeması

Şekil 9'da Non-Linear kapasitif yükün Matlab/ Simulink blok şeması verilmiştir [20].



Şekil 9. Nonlinear kapasitif yükün Matlab/Simulink şeması

Matlab/Simulink programında örnek alınan sistemin seri aktif güç filtre ile modellenmesi ve simülasyonu yapılarak harmonik ve araharmonik bozulması incelenmiş ve eliminasyonu yapılmıştır. Tablolar halinde veriler sunulmuş, karşılaştırılarak sonuçlar gösterilmiştir.

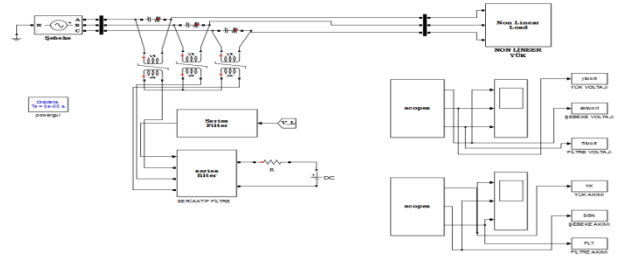
İncelenen modül yapı gerilimin üç fazlı bir dağıtım şebekesinden alındığı, fazların herbirinin 380 V AC olarak alındığı, yükün fazlara eşit olarak dağıldığı bir sistemdir. Seçilen sistem parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sistem modüle edilirken SAGF parametreleri

SAGF Parametreleri	Değer
Kaynak Gerilimi ve Akımı (Va, Vb, Vc, Ik)	380 V, 60A
Kaynak Frekans	50 Hz
Kaynak Empedansı (Rk, Ck)	1 Ω , 100e-6 F
Yük Empedansı (Ry, Ly)	55 Ω , 0.20e-3 H
Yük Empedansı (Ry, Cy)	55 Ω , 5e-6 F

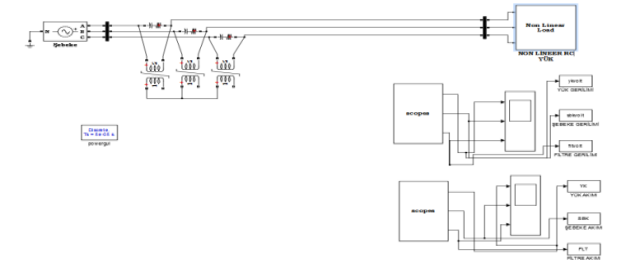
Çalışmanın amacı harmonik ve araharmoniklerin modüle edilerek belirlenmesi ve harmoniklerin yok edilmesi olduğundan filtrenin Şekil 10'da verilen Güç Sistemi

MATLAB/Simulink programında sistem yükü tasarlanarak analiz için sonuçlar elde edilmiştir.

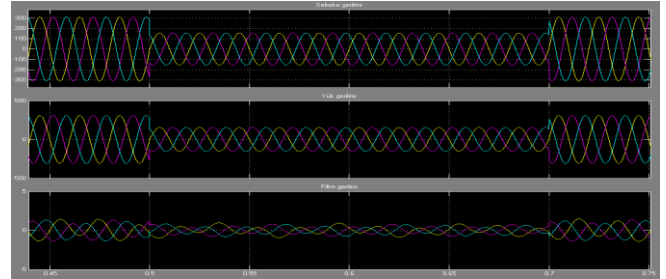


Şekil 10. Güç sistemi Matlab/Simulink şeması

Şekil 11'de Nonlinear kapasitif yüklü, fitesiz güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması, Şekil 12'de Kapasitif yüklü fitesiz sisteme ait gerilim dalga verileri verilmiştir.

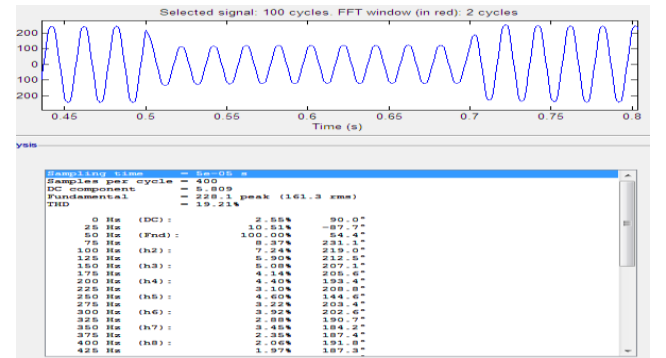


Şekil 11. Nonlinear kapasitif yüklü, fitesiz güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması



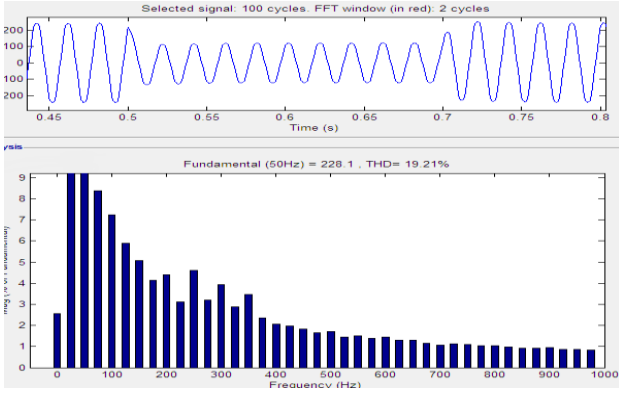
Şekil 12. Kapasitif yüklü fitesiz sisteme ait gerilim dalga verileri

Şekil 12'ye bakan olursak yük geriliminin fitesiz sisteme ait olduğu gerilim dalga verilerinin örnek zaman olarak (0.4-0.8) t sürelerinde harmoniğe maruz kalarak genişliğini düşüğünü 250 V'tan 150 V'a düşüğü ve sinüzoidal dalga şeklini koruyamayıp, filtremizin devrede olmadığı için gerekli ters faza sisteme akım gönderip regüle yapamadığı görülmektedir. Şekil 13'de Kapasitif yüklü fitesiz sistemin FFT sistemi analiz diyagramı verilmiştir.



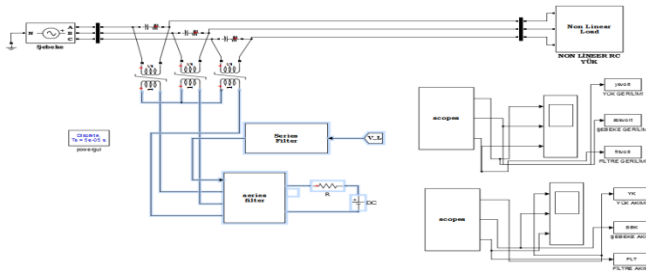
Şekil 13. Kapasitif yüklü fitesiz sistemin FFT sistemi analiz diyagramı

Şekil 13'e bakacak olursak filtrelenmemiş sistemin yine FFT sistemi analiz diyagramına bakılırsa görülen THD_V oranının %19.21 olduğu ve n. harmoniğin dışındaki araharmoniklerinde varlığının olduğu görülmektedir. Sistemdeki bozulmayı gösterebilmek, harmonik ve araharmonikteki karşılaştırmayı ve harmoniklerin yok edilmesini daha iyi gösterebilmek için seri aktif güç filtresi devreye alınmış ve sonuçlar yansıtılmıştır. Şekil 14'de kapasitif yüklü filtresiz güç sisteminin FFT sistemi ile genlik spektrumu görünümünü gösterilmektedir.

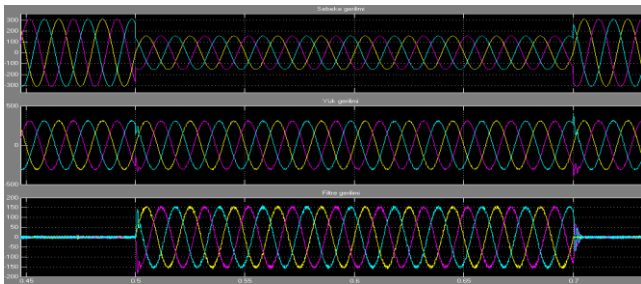


Şekil 14. Kapasitif yüklü filtresiz sistemin FFT sistemi genlik spektrumu

Şekil 15'de SAGF filtreli kapasitif yüklü güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması verilmiştir. Şekil 16'da ise Kapasitif yüklü filtreli sistem gerilim dalga verileri gösterilmiştir.



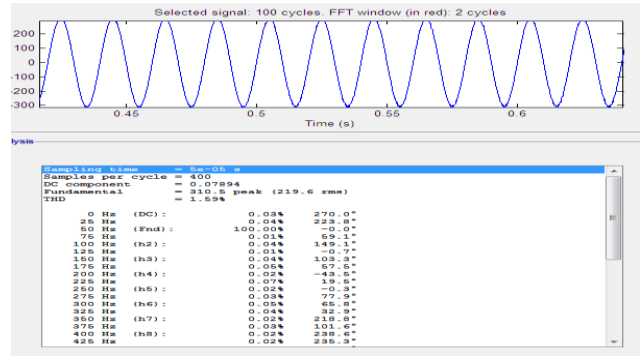
Şekil 15. SAGF filtreli kapasitif yüklü güç sistemine ait Matlab/Simulink şeması



Şekil 16. Kapasitif yüklü filtreli sistem gerilim dalga verileri

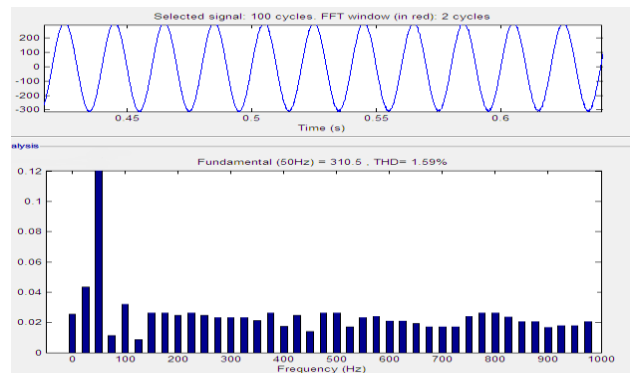
Şekil 16'ya bakacak olursak seri aktif güç filtresi kapasitif yükteki sistemde varken gerilim dalga verisinin stabilizasyonu için örnek zaman aralığı (0.4-0.8) t aralıklarında yük için 250 V'daki gerilimi korumak için genlik değerlerinin dengeye girebilmesi için 100 V luk genlik artırıp harmoniklere karşı koyduğu görülmektedir.

Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi analiz diyagramı Şekil 17'de verilmiştir.



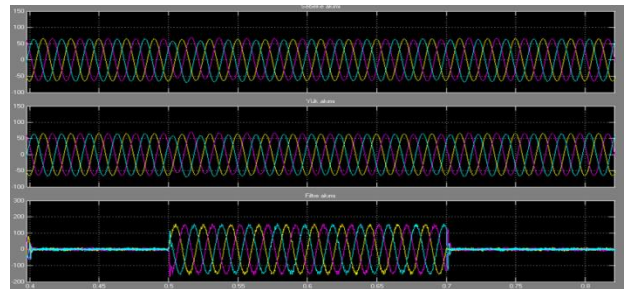
Şekil 17. Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi analiz diyagramı

Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi genlik spektrumu Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 18. Kapasitif yüklü filtreli sistemin FFT sistemi genlik spektrumu

Şekil 17'de analiz diyagramından ve Şekil 18'de genlik spektrumundan kapasitif yüklü sistem için örnek verecek olursak (0.5-0.7) t sürelerinde genliğini koruduğunu 3., 5., 7., 9. harmonikleri sıfırlara çektiğini arada kalan yarı değerli 3.5, 4.5, 5.5, 7.5'deki değerlerde de araharmonik tanımladığımız nonlinear dengelemlerin elimine edildiği gözükmektedir. Şekil 19'da farklı yükteki sistemin akım dalga verileri gösterilmiştir.



Şekil 19. Farklı yükteki güç sistemindeki akım dalga verileri

FFT analizi ile sistemin filtreye karşı vermiş olduğu sonuçları ayrıntılı şekilde liste halinde yapılmış ve gösterilmiştir. Harmonikler ve seçilen araharmonikleri için filtreden önceki yük uçlarından ve filtreyi kullandıktan sonraki yük uçlarından analizi yapılarak Tablo halinde sunulmuştur. Birkaç noktadan karşılaştırma yapılarak gösterilmiştir. Tablo 2'de SAGF'tan önceki kapasitif yük ucunun, Tablo 3'de SAGF'tan sonraki kapasitif yük ucunun ve Tablo 4'de

filtreden önceki ve filtreden sonraki elde edilen veriler karşılaştırılarak sistem değerleri sunulmuştur. Alınan FFT analiziyle harmonikler için sonuçların hem çok düşük seviyeye getirildiği hemde seri aktif güç filtresi sistemdeyken harmonikleri elimine ettiği tespit edilmiş olup karşılaştırmalar Tablolar halinde gösterilmiştir.

Tablo 2. Filtreden önceki kapasitif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi

Sampling time = 5e-05 s		
Samples per cycle = 400		
DC component = 5.809		
Fundamental = 228.1 peak (161.3 rms)		
THD = 19.21%		
0 Hz (DC) :	2.55%	90.0°
25 Hz :	10.51%	-87.7°
50 Hz (Fnd) :	100.00%	54.4°
75 Hz :	8.37%	231.1°
100 Hz (h2) :	7.24%	219.0°
125 Hz :	5.90%	212.5°
150 Hz (h3) :	5.08%	207.1°
175 Hz :	4.14%	205.6°
200 Hz (h4) :	4.40%	193.4°
225 Hz :	3.10%	209.8°
250 Hz (h5) :	4.60%	144.6°
275 Hz :	3.22%	203.4°
300 Hz (h6) :	3.92%	202.6°
325 Hz :	2.88%	190.7°
350 Hz (h7) :	3.45%	184.2°
375 Hz :	2.35%	187.4°
400 Hz (h8) :	2.06%	191.8°
425 Hz :	1.97%	187.3°

Tablo 3. Filtreden sonraki kapasitif sistem yük ucu FFT sistem gerilim harmonik analizi

Sampling time = 5e-05 s		
Samples per cycle = 400		
DC component = 0.07894		
Fundamental = 310.5 peak (219.6 rms)		
THD = 1.59%		
0 Hz (DC) :	0.03%	270.0°
25 Hz :	0.04%	223.8°
50 Hz (Fnd) :	100.00%	-0.0°
75 Hz :	0.01%	59.1°
100 Hz (h2) :	0.04%	149.1°
125 Hz :	0.01%	-0.7°
150 Hz (h3) :	0.04%	103.3°
175 Hz (h4) :	0.05%	57.5°
200 Hz (h5) :	0.02%	-43.5°
225 Hz :	0.07%	19.5°
250 Hz (h6) :	0.02%	-0.3°
275 Hz :	0.03%	77.9°
300 Hz (h7) :	0.05%	65.8°
325 Hz :	0.04%	32.9°
350 Hz (h8) :	0.02%	218.8°
375 Hz :	0.03%	101.6°
400 Hz (h9) :	0.02%	238.6°
425 Hz :	0.02%	235.3°

Tablo 4. Filtresiz ve filtreli durumda sistemin Gerilim ve THD_v değerleri

Sistem		Sistem Gerilim THD _v (%)	Sistem Gerilim (V)
Kapasitif Yük Durumu	Filtresiz	19.21	219.6 RMS
	Filtreli	1.59	161.3 RMS

Sistem incelendiğinde alınan verilerin Tablo 2 ve Tablo 3'ün ayrıntılı analizi, önemli bilgilerin edinilmesini sağlamıştır. Harmonik ve araharmonik değerlerin eliminasyonunun görülmesini sağlamıştır. Harmonik ve araharmonik bozulma değerleri farklı yükler için karşılaştırmalı gösteriminde elde edilen kazanımlar sunulmuştur. Çalışmanın daha iyi anlaşılması için sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Kapasitif yükün SAGF'a karşı vermiş olduğu gerilim sonuç değerleri

Harmonik	Yükteki Filtreden Önce Harmonik Bozulma (%)	Yükteki Filtreden Sonra Harmonik Bozulma (%)
3	5.08	0.04
3.5	4.14	0.05
5	4.60	0.02
5.5	3.22	0.03
7	3.45	0.02
7.5	2.35	0.03

Tablo 5'ten kapasitif yükteki seri aktif güç filtresi için örnek verecek olursak, filtre kullanmadan önce 3. harmonikteki bozulma %5.08'dir. Seri aktif güç filtresinin sisteme alınmasıyla 3. harmonikteki bozulma filtresinin eliminasyonu ile %0.04'e düşmüştür. Kapasitif yük ucundaki araharmonik olarak tanımlanan yani tamsayı değerine denk gelmeyen 3.5'teki harmonik bozulma %4.14'dir. Seri aktif güç filtresinin sisteme alınmasıyla 3.5'teki harmonik bozulma filtresinin eliminasyonu ile %0.05'e düşmüştür. Seri aktif güç filtresinin tercih sebebi olarak ta sonuçların gösterdiği şekilde istenmeyen nonsinüzoidal dalga şekline sürekli karşılık verdiği, gerilim dengesizliğini elimine ettiği, ideal sinüzoidal dalga şeklini çıkardığı görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Şebekede akan harmonik akımlar şebeke empedansında gerilim düşümüne yol açar ve bu da gerilim dalgasının formunun bozulması, kayıpların artması, şebekede kullanılan cihazlarda arızaların veya aksaklıkların oluşmasıyla sonuçlanır. Söz konusu sonuçlar, harmonik kaynakların sistemdeki yeri, iletim ve dağıtım sistemlerindeki yayılımı ve şebeke karakteristikleri ile bağlantılıdır.

Yapılan çalışmada örnek alınan farklı tipteki nonlineer yüklü güç sistemi için seri aktif güç filtresi kullanmadan önceki ve kullandıktan sonraki harmonik ve araharmonik bozulma seviyelerini elde etmek için sistemin MATLAB/Simülink programında modüle edilerek, simülasyonu yapılmıştır. Detaylı bir FFT analiz yöntemiyle incelemesi yapılan karşılaştırmalı spektrum ve Tablo analiz sonuçlarıyla, seri aktif güç filtreden önceki ve seri aktif güç filtreden sonraki 3 faz sistemin filtreden önceki kapasitif yüklü nonlineer yükün THD_v oranının %19.21 olduğu, filtreyi kullandıktan sonraki kapasitif yüklü nonlineer yükün THD_v oranının %1.59'lara kadar azaldığı görülmüştür. Harmonik gerilim stabilizasyonunun gerçekleştirildiği ve oluşan harmonik frekanslar etrafındaki bir tamsayıya karşılık gelmeyen

araharmoniklerin de negatif bir etkisinin olduğunu bunların da yok edilmesi gerektiği gözlemlenmiştir.

Güç kalitesi güç sistemindeki dikkat edilmesi gereken önemli problemlerden birisidir. Pasif güç filtresi ile yapılan harmonik çalışmalar ve harmonik filtreleme, doğrusal olmayan yüklerin güç kalitesi üzerindeki etkilerini engellemek için yeterli değildir. Bundan dolayı da devreye aktif güç filtresi girmektedir. Seri aktif güç filtresinin üstün özellikleri;

- 1) Harmonik ve araharmonikleri çok yüksek oranda filtreleme özelliği,
- 2) Harmonik değişimlerine milisaniyeler içerisinde çok hızlı cevap verme özelliği sonucu değişken yük koşullarında yüksek harmonik bastırma oranı,
- 3) Geniş bir yelpazedeki harmonikleri filtreleme özelliği,
- 4) Harmonik seviyelerinden bağımsız tasarım, birçok sisteme kolaylık ile uygulanabilme özelliği,
- 5) Şebeke empedansından bağımsız çalışma şebeke ile rezonansa girmeme özelliği,
- 6) Aşırı yüklenme durumu olmaması,
- 7) Seri aktif güç filtrenin harmonik kompanzasyon gücünün istenildiği zaman artırılabilmesi, şeklinde sıralana bilir.

Sonuç olarak harmoniklerin varlığı, elektrik sistemlerinin çalışmayacağı anlamına gelmemektedir. Bunun için filtrenin kendisinin de bir harmonik kaynağı olduğu göz önünde bulundurulursa, bu hassasiyetlerin tasarım sürecinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Rüstemli S , Cengiz MS , Dinçer F, 2013. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi 2(1): 30-38.
- [2] Rüstemli S, Okuducu E, Almali MN, Efe SB, 2015. Reducing The Effects Of Harmonics On The Electrical Power Systems With Passive Filters. Bitlis Eren Univ J Sci & Technol 5 (1): 1 – 10.
- [3] Rüstemli S, Cengiz MS, 2016. Passive Filter Solutions and Simulation Performance in Industrial Plants, Bitlis Eren Univ J Sci & Technol 6 (1): 39-43.
- [4] Rüstemli S, Cengiz MS, 2015. Active Filter Solutions İn Energy Systems. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 23: 1587-1607.
- [5] Şahin Ö, 2003. Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi. Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] Şahin YG, 2006. Harmoniklerin Yeraltı Güç Kablolara Etkisi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] Zenger M. Akım ve Gerilim Harmonikleri. www.harmonik.wsmustafazenger@gmail.com.
- [8] Kocatepe C, Uzunoglu M, Yumurtacı, R, Karakas A, Arıkan O, 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [9] Chapman D. “Harmonikler, Nedenleri Ve Etkileri” Copper Development Association.
- [10] Karakaş A, Kocatepe C, Baysal M, Çakır H, 2005. Harmonikli Sistemlerde Filtre Uygulamasının Karşılaştırılması, Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu. Kocaeli, 17-18.
- [11] Ellis RG, 1996. Harmonic analysis of industrial power systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, 2: 417-420.
- [12] Demirören A, Zeynelgil L, 2004. Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı, Kontrolü ve Çalışması. İstanbul, 1:204-238.
- [13] Odabaşı T, 2004. 3. Harmoniğin meydana getirdiği problemler . www.etmd.org.tr.
- [14] Sucu M, 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Türkiye.
- [15] Akagi H, 1996. New Trends in Active Filters For Power Conditioning, Industry Applications, IEEE Transactions on, 32: 1312–1322.
- [16] El-Habrouk M, Darwish K.M, Mehta, P, 2000. Active power filters: A review, Electric Power Applications, IEE Proceedings, 147: 403– 413.
- [17] Li D, Tian J, 2008. A Novel Active Power Filter for the Voltage-Source Type Harmonic Source, Electrical Machines and Systems. ICEMS 2008. International Conference on, Wuhan, HUST, 2077 – 2080 (in China).
- [18] Singh B, Al-Haddad K, Chandra A, 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 46: 960–971
- [19] Peng ZF, Adams JD, 2001. Harmonic Sources and Filtering Approaches. Industry Applications Magazine, IEEE, 7: 18–25
- [20] Tekev S., 2021. Güç Sistemlerindeki Harmoniklerin ve Araharmoniklerin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü