

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE REAKTİF GÜÇ
KOMPANZASYONU VE HARMONİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynel BAŞ

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR

Haziran 2014

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE REAKTİF GÜÇ
KOMPANZASYONU VE HARMONİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynel BAŞ

Enstitü Anabilim Dalı : **ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : **ELEKTRİK**

Bu tez 16 / 06 /2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR

Jüri Başkanı

**Doç. Dr. Yılmaz
UYAROĞLU**

Üye

**Yrd. Doç. Dr. Sinan
TÜNCEL**

Üye

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın her aşamasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm, çalıőmalarımın yönlendirilmesi ve sonuçlandırılmasında büyük emeği geçen tez danıőmanım Sayın Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR'e, çalıőmalarım sırasında maddi açıdan destekleyen TÜBİTAK-BİDEB Bilim Adamı Yetiőtirme Grubu'na, her fırsatta bilgi ve birikimlerinden yararlandığım tüm bölüm hocalarıma, ayrıca bana her konuda destek olan araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, bu günlere gelmemde her türlü maddi ve manevi desteğini gördüğüm abime ve desteğini her zaman gördüğüm eőime sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--------------------------------------|------|
| TEŞEKKÜR | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | viii |
| TABLolar LİSTESİ..... | ix |
| ÖZET | x |
| SUMMARY | xii |

BÖLÜM 1.

| | |
|--|----|
| GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Aktif Güç, Reaktif Güç ve Güç Faktörü Tanımları | 3 |
| 1.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu | 5 |
| 1.3. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Faydaları | 7 |
| 1.3.1. Sistem kapasitesinin artması | 8 |
| 1.3.2. Isı kayıplarının azalması | 9 |
| 1.3.3. Gerilim düşümlerinin azalması | 9 |
| 1.4. Reaktif Güç Çeken Alıcılar | 10 |
| 1.5. Reaktif Güç Kompanzasyonundan Beklenen Özellikler | 11 |
| 1.6. Reaktif Güç İhtiyacının Karşlanması..... | 12 |
| 1.6.1. Aktif gücün sabit olması durumu..... | 12 |
| 1.6.2. Görünür gücün sabit olması durumu..... | 13 |
| 1.7. Reaktif Güç Kompanzasyon Yöntemleri | 14 |

BÖLÜM 2.

| | |
|---|----|
| HARMONİKLER | 16 |
| 2.1. Harmoniklerin Sebepleri | 18 |
| 2.2. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler..... | 18 |

| | |
|---|----|
| 2.2.1. Harmoniklerin kullanıcılarda etkileri..... | 19 |
| 2.2.2. Harmoniklerin elemanlar üzerindeki etkisi..... | 20 |
| 2.2.3. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi | 21 |
| 2.3. Harmoniklerin Tespiti, Sınırlanması ve Harmonik Standartları | 21 |
| | |
| BÖLÜM 3. | |
| HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ..... | 26 |
| 3.1. Fourier Analizi ve Katsayılarının Bulunması | 26 |
| 3.2. Analitik Yöntemle Fourier Katsayılarının Bulunması | 29 |
| 3.3. Grafikselle Yöntemle Fourier Katsayılarının Bulunması | 29 |
| 3.4. Ölçme Yöntemiyle Fourier Katsayılarının Bulunması | 30 |
| 3.5. Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü ve Hızlı Fourier Dönüşümü | 31 |
| 3.5.1. Ayrık zamanlı fourier dönüşümü (DFT)..... | 32 |
| 3.5.2. Hızlı fourier dönüşümü (FFT)..... | 33 |
| 3.5.2.1. Zamanda örnek seyreltme..... | 34 |
| 3.5.2.2. Frekansta örnek seyreltme | 35 |
| | |
| BÖLÜM 4. | |
| HARMONİK BÜYÜKLÜKLERE AİT TEMEL KAVRAMLAR..... | 37 |
| 4.1. Distorsiyon Gücü (D)..... | 37 |
| 4.2. Tekil Harmonik Bozunum (HD)..... | 38 |
| 4.3. Toplam Harmonik Bozunumu (THD)..... | 38 |
| 4.4. Toplam Talep Bozunumu (TTD)..... | 39 |
| 4.5. Güç Faktörü (PF) | 39 |
| | |
| BÖLÜM 5. | |
| HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ VE FİLTRE TASARIMI | 40 |
| 5.1. Pasif Filtreler..... | 40 |
| 5.1.1. Seri pasif filtreler | 41 |
| 5.1.2. Paralel pasif filtreler..... | 42 |
| 5.1.2.1. Tek ayarlı filtreler | 43 |
| 5.1.2.2. Çift ayarlı filtreler | 46 |
| 5.2. Aktif Filtreler..... | 47 |

| | |
|---|----|
| 5.2.1. Paralel aktif güç filtreleri (PAGF) | 49 |
| 5.2.2. Seri aktif güç filtreleri (SAGF) | 49 |
| 5.2.3. Hibrit aktif güç filtreleri (HAGF) | 50 |
| | |
| BÖLÜM 6. | |
| FİLTRE TASARIMI VE BENZETİM ÇALIŞMASI..... | 51 |
| 6.1. Filtreye Ait Benzetim Çalışması Devreleri..... | 54 |
| 6.1.1. Örnek endüstriyel sistem..... | 54 |
| 6.1.2. Endüstriyel sisteme tek ayarlı pasif filtrenin uygulanması | 60 |
| | |
| BÖLÜM 7. | |
| SONUÇLAR..... | 69 |
| | |
| KAYNAKLAR..... | 70 |
| EKLER..... | 72 |
| ÖZGEÇMİŞ | 73 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|---------------|--|
| AA | : Alternatif akım |
| AG | : Alçak gerilim |
| C | : Kapasitans |
| $\cos\varphi$ | : Güç faktörü |
| D | : Distorsiyon gücü |
| EPDK | : Enerji piyasası düzenleme kurulu |
| f | : Frekans |
| FFT | : Hızlı fourier dönüşümü |
| HAGF | : Hibrit aktif güç filtresi |
| HD | : Tekil harmonik bozunum |
| HVDC | : Doğru akım ile enerji nakli |
| I | : Akım |
| IEC | : Uluslararası elektroteknik komisyonu |
| I_p | : Aktif akım |
| I_q | : Reaktif akım |
| L | : Endüktans |
| OG | : Orta gerilim |
| P | : Aktif güç |
| PAGF | : Paralel aktif güç filtresi |
| PF | : Güç faktörü |
| Q | : Reaktif güç |
| S | : Görünür güç |
| SAGF | : Seri aktif güç filtresi |
| t | : Zaman |
| THD | : Toplam harmonik bozunum |

| | |
|-----------|-------------------------------|
| TTD | : Toplam talep bozunumu |
| V | : Gerilim |
| VA | : Volt amper |
| W | : Watt |
| X | : Reaktans |
| X_{eff} | : Filtrenin efektif reaktansı |
| φ | : Faz açısı |
| ω | : Açısal hız |
| Z_F | : Filtre empedansı |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1. Akım ve güçlerin fazör diyagramda gösterilmesi..... | 3 |
| Şekil 1.2. Endüktif sistem (a) ve kapasitif sistem (b)..... | 5 |
| Şekil 1.3. Omik, endüktif ve kapasitif sistem..... | 5 |
| Şekil 1.4. İdeal akım ve gerilim dalgası..... | 6 |
| Şekil 1.5. Dağıtım hattından beslenen tüketici..... | 8 |
| Şekil 1.6. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisi..... | 10 |
| Şekil 1.7. Aktif gücün sabit olması durumunda reaktif gücün belirlenmesi..... | 12 |
| Şekil 1.8. Görünür gücün sabit olması durumunda reaktif gücün belirlenmesi..... | 13 |
| Şekil 1.9. Sabit kondansatör ve harmonik filtre bankası tek hat şeması..... | 15 |
| Şekil 2.1. Saf sinüs(temel bileşen) ve 5. harmonikli dalga şekli..... | 16 |
| Şekil 2.2. Sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan dalga şekilleri..... | 17 |
| Şekil 2.3. 5,7 ve 11. harmonik derecesinde meydana gelen bozulmalar..... | 17 |
| Şekil 3.1. Grafikselleştirilerek Fourier analizi..... | 30 |
| Şekil 3.2. Frekansta seyreltilmiş 8 noktalı FFT algoritması..... | 36 |
| Şekil 5.1. Seri pasif filtre..... | 42 |
| Şekil 5.2. Paralel pasif filtre (Tek ayarlı paralel pasif filtre)..... | 43 |
| Şekil 5.3. Tek ayarlı paralel pasif filtre..... | 44 |
| Şekil 5.4. Tek ayarlı paralel pasif filtrenin frekans-empedans ilişkisi..... | 45 |
| Şekil 5.5. Çift ayarlı paralel pasif filtre..... | 47 |
| Şekil 5.6. Çift ayarlı paralel pasif filtrenin frekans-empedans ilişkisi..... | 47 |
| Şekil 5.7. Aktif güç filtresi blok şeması..... | 48 |
| Şekil 5.8. Paralel aktif güç filtre blok diyagramı..... | 49 |
| Şekil 5.9. Seri aktif güç filtre blok diyagramı..... | 50 |
| Şekil 5.10. Hibrit aktif filtre blok diyagramı..... | 50 |
| Şekil 6.1. Akım ve gerilimdeki harmonik bozunumları belirleme yöntemi..... | 52 |
| Şekil 6.2. Örnek endüstriyel enerji sistemi..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Şekil 6.3. Endüstriyel sistemin MATLAB programındaki filtresiz benzetim çalışması..... | 3 |
| Şekil 6.4. Filtresiz sistemin akım dalga değişimi..... | 57 |
| Şekil 6.5. Filtresiz sistemin gerilim dalga değişimi | 57 |
| Şekil 6.6. Filtresiz sistemin akım ve gerilim harmonik dereceleri..... | 58 |
| Şekil 6.7. Filtreleme öncesi akım ve gerilimdeki FFT değerleri..... | 58 |
| Şekil 6.8. Filtreleme öncesi her bir fazın ayrı ayrı akım ve gerilim harmonik analizi | 58 |
| Şekil 6.9. Filtresiz sistemin güç faktörü ve THD değerleri..... | 59 |
| Şekil 6.10. Filtrelerin bağlantı şeması..... | 62 |
| Şekil 6.11. 3. ve 5. harmonik filtre bağlantı şeması | 63 |
| Şekil 6.12. Endüstriyel sistemin MATLAB programındaki filtreli benzetim çalışması..... | 64 |
| Şekil 6.13. Filtreli sistemin akım dalga değişimi | 65 |
| Şekil 6.14. Filtreli sistemin gerilim dalga değişimi | 65 |
| Şekil 6.15. Filtreli sistemin akım ve gerilim harmonik dereceleri | 66 |
| Şekil 6.16. Filtreleme sonrası akım ve gerilimdeki FFT değerleri | 66 |
| Şekil 6.17. Filtreleme sonrası her bir fazın ayrı ayrı akım ve gerilim harmonik analizi | 66 |
| Şekil 6.18. Filtreli sistemin güç faktörü ve THD değerleri..... | 67 |

TABLolar LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 1.1. Endüktif ve kapasitif enerji oranları | 7 |
| Tablo 2.1. Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000–2–2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri ($k=0.2+12.5/n$)..... | 23 |
| Tablo 2.2. Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar için) - ($k=0.2+12.5/n$) | 23 |
| Tablo 2.3. Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. sınıf elemanlar için) - ($m=5\sqrt{11/n}$) | 24 |
| Tablo 2.4. IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları | 24 |
| Tablo 2.5. IEEE'nin genel dağıtım sistemlerine ait akım için harmonik distorsiyon sınırları | 25 |
| Tablo 6.1. Elektrik tesisindeki doğrusal olmayan yüklerle ait akım genlikleri..... | 55 |
| Tablo 6.2. Filtreleme öncesi sistem değerleri | 59 |
| Tablo 6.3. Sisteme bağlanacak her bir paralel kolun kapasite değerleri..... | 61 |
| Tablo 6.4. Sisteme bağlanacak her bir paralel kolun endüktans değerleri..... | 61 |
| Tablo 6.5. Sisteme bağlanacak her bir paralel kolun direnç değerleri | 62 |
| Tablo 6.6. Filtreleme sonrası sistem değerleri | 67 |
| Tablo 6.7. Filtreleme öncesi ve sonrası sistem değerleri | 68 |

ÖZET

Anahtar kelimeler: Enerji Kalitesi, Reaktif Güç Kompanzasyonu, Harmonik Bozulma, Harmonik Filtre, Tek ayarlı Pasif Filtre

Günümüzde elektrik iletim sistemlerinin büyümesi ve daha karmaşık bir yapıya kavuşmasıyla çeşitli güç kalitesi sorunları da ortaya çıkmaktadır. İletim sistemi planlaması yapılırken sistemin ihtiyaçlarını karşılayacak enerji iletim hattı, transformatör merkezi v.b. genel çözümlerin yanında sistemin belirli kısımlarında meydana gelen, güç kalitesini ve arz güvenilirliğini etkileyen problemlerin de sistemi olumsuz yönde etkileyeceği hesaba katılarak yerel çözümler üzerinde de durulmalıdır.

Güç sistemlerindeki güç kalitesi problemleri kompanzasyon eksikliği ve harmonik bozulmalardan kaynaklanır. Harmonik bozulmalar, şebekelerde işletme güvenliği, enerji verimliliği ve enerjinin sürekliliğini etkileyen problemlerdir. Dağıtım şebekelerinde en sık rastlanan güç kalitesi olaylarından biridir. Yüklerin doğrusal olmayan karakteristikleri harmonik oluşumunun en önemli kaynağıdır.

Bu çalışmada MATLAB® Simulink® programında endüstriyel bir sistemde nonlineer yükler sebebiyle meydana gelen harmonik bozulmaların pasif yardımıyla harmoniklerden arındırılmasına yönelik bir uygulama gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sistemin reaktif güç ihtiyacı ve harmonik özellikleri incelenmiştir, daha sonra tek ayarlı filtre tasarımı için gerekli bağıntılar verilmiştir. Belirlenen harmonikler için pasif filtre tasarımı yapılmıştır. Her bir adımda dizayn edilen filtrelerin harmonik bozulmalara ve sistemin güç faktörüne olan etkileri incelenmiştir. Tasarlanan filtre baskın harmoniklere uygulandığında diğer harmonik genliklerinin de azaldığı görülmüştür. Sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

REACTIVE POWER COMPENSATION IN POWER SYSTEMS AND HARMONIC ANALYSIS

SUMMARY

Key Words: Energy Quality, Reactive Power Compensation, Harmonic Distortion, Harmonic Filter, Single Tuned Passive Filter

In recent years, as the electrical power systems are extending and incorporating complex structures some power quality problems start to come up. During transmission system planning, besides general system solutions like transmission line and substation investments that will perform the system requirements, it should be realized that some disturbances occurring locally, which affect the power quality and supply reliability may bring about problems for the whole system and some local precautions should be taken.

Power quality problems in power systems result from lack of compensation and harmonic distortions. Harmonic distortions are problems which affect continuity of energy, energy productivity and business security in networks. They are power quality incidents prevailed in distribution network. Characteristics of non-linear loads is the most important source of formation of harmonic.

In this thesis in MATLAB® Simulink® simulation program an application which is nonlinear loads in an industrial system with harmonic disruptions that occurred due to the passive by harmonics to decontaminate for has been realized.

At first it is examined the system reactive power necessity and harmonic characteristics, then it is given required relation for designing single tuned filter. In each steps, effects of designed filters harmonic distortion and power factor of system is examined. When designed filter implements dominant harmonics, it is also seen reducing other harmonic amplitudes. The results are presented in tables and charts.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyada nüfusun artması ve sanayideki gelişmelere bağlı olarak elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç her geçen gün fazlaşmaktadır. Yaşamın neredeyse en önemli parçası haline gelen elektrik enerjisine olan talep devamlı artmış hatta kullanılan elektrik enerjisi miktarı ülkelerin gelişmişlik düzeyinin bir göstergesi haline gelmiştir. Artan bu talebe karşılık enerjinin daha kaliteli ve güvenilir olması beklenmektedir. Bu da güç kalitesi terimini ortaya çıkarmıştır. Elektrik enerjisinin kesintisiz ve geriliminin, frekansının, güç faktörünün ve gerilimdeki harmonik miktarının istenilen değerlerde olması şeklinde tanımlayabileceğimiz enerji kalitesi yeni tanımlanan bir kavram gibi görünse de uzun yıllardır üzerinde çalışılmış bir konudur.

Enerji kalitesi konusunda yapılan çalışmalar genellikle gerilimdeki dalgalanmalar, çökmeler ya da kesintiler ve geçici olaylar üzerinde olmakla birlikte en çok reaktif güç kompanzasyonu ve harmonikler konularında yapılmaktadır. Elektrik enerji sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmanın, verimi arttırmanın ve enerji tasarrufu sağlamanın en etkin ve en kolay yöntemlerinden birisi reaktif güç kompanzasyonudur [3]. Reaktif güç kompanzasyonu, elektrik güç sistemlerinin planlanmasında ve işletilmesinde çok önemli bir yere sahiptir. Reaktif güç kompanzasyonu için en yaygın kullanılan yöntem, şebekedeki fazla reaktif gücü şebekeye reaktör bağlayarak, şebekenin reaktif güç ihtiyacını ise kondansatör bağlayarak çözmektir [5].

Enerji sistemlerinde akım ve gerilimin dalga şekilleri sinüzoidal değişime sahip olmalıdır. Bunun için sistemin sinüzoidal bir kaynaklar beslenmesi ve sistemde lineer devre elemanlarının bulunması gerekir. Ancak güç sistemlerinde kullanılan konverterler, güç elektroniği elemanları, ark fırınları, transformatörler, generatörler, statik VAR kompanzatorları gibi nonlineer elemanlar sistemdeki akım ve gerilimin nonsinüzoidal olmasına neden olabilirler. Son yıllarda yarı iletken elemanların kullanımının yaygınlaşmasıyla ve büyük güçlü nonlineer devre elemanlarının

kullanılmasıyla harmonik bileşenlerin sayısının ve büyüklüğünün artmasına neden olmaktadır. Bu harmonik bozulmalar enerji sisteminde ve sisteme bağlanan elemanlar üzerinde olumsuz etkiler oluşturur.

Harmonik bileşenlerin olumsuzluklarının incelenmesi ve ortadan kaldırılması için harmonikli sistemlerde analiz yapılması gerekmektedir. İlk yapılan araştırmalar yirminci yüzyılın başlarında transformatörler üzerinde yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada transformatörün nonlineer karakteristikli manyetik devresi ve nonlineer elemanlar tarafından üretilen harmoniklerin durumu incelenmiştir. İkinci dünya savaşından sonra yarı iletken elemanların gelişmesiyle doğrultucuların kullanımı artmış ve bunun sonucunda günümüzde kullanılan statik dönüştürücülerin harmonik etkileri incelenmiştir.

Harmoniklerle ilgili çalışmalar, elektrik enerjisinin kullanılmaya başlandığı tarihten günümüze kadar devam etmektedir. Kesintisiz ve kaliteli enerji harmonikler üzerinde yapılacak çalışmalarla sağlanabilir. Bu tez çalışmasında nonlineer elemanlar tarafından bozulmuş bir sinüsoidal dalganın reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirmek ve harmonik analizini yapıp pasif filtre kullanarak sistemi harmoniklerden arındırmaktır.

Birinci bölümde, temel güç kavramları, reaktif güç kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonun faydaları, reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi, reaktif güç çeken alıcılar ve kompanzasyonda kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, harmoniklerin sebepleri, meydana getirdiği etkiler, tespiti, sınırlanması ve harmonik standartları hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, harmoniklerin matematiksel analizi, fourier analizi ve katsayılarının bulunması), ayırık zamanlı fourier dönüşümü (DFT), temel güç bileşene göre güç hesaplamalarında kullanılan hızlı fourier dönüşümü (FFT) hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, harmonik büyüklüklere ait temel kavramlar olan distorsiyon gücü (D), güç faktörü (PF), toplam harmonik bozunumu (THD) ve toplam talep bozunumu (TTD) hakkında bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde, harmoniklerin filtrenmesinde kullanılan filtreler ve tasarım parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir.

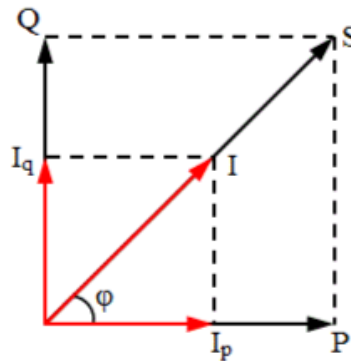
Altıncı bölümde, sistemin modellenmesinde kullanılan MATLAB® Simulink® dosyasının içeriği ve filtre tasarım parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Yedinci bölümde ise tez çalışmasının sonuçları hakkında bilgiler verilmiş ve bulunan değerler hakkında yorum yapılmıştır.

1.1. Aktif Güç, Reaktif Güç ve Güç Faktörü Tanımları

Tüketicilerin şebekeden çektiği görünür akım, aktif ve reaktif olarak iki bileşenden oluşur. Aktif akımın meydana getirdiği aktif güç, tüketici tarafından faydalı hale getirilir. Yani aktif güç, motorlarda mekanik güce, aydınlatmada ışık akısına gibi elektriğin faydalı hale dönüştürülmüş şeklidir [2].

Transformatör, motor, bobin, jeneratör gibi endüklenme prensibine göre çalışan elektrik elemanlarında gerekli manyetik akımı sağlayan mıknatıslanma akımına reaktif akım, çekilen güce de reaktif güç denir. Reaktif akım faydalı güce çevrilmez. Şebekeyi gereksiz yere yükler, ısı kayıplarına ve gerilim düşmesine neden olur [2].



Şekil 1.1. Akım ve güçlerin fazör diyagramda gösterilmesi [2]

Bir tüketicinin şebekeden çektiği güç ve akım yalnızca temel bileşen dikkate alındığında aşağıdaki bağıntılarla bulunabilir.

Görünür güç,

$$S = U.I \quad (1.1)$$

Aktif akım,

$$I_p = I.\cos\varphi \quad (1.2)$$

Aktif güç,

$$P = S.\cos\varphi = U.I.\cos\varphi \quad (1.3)$$

Reaktif akım,

$$I_q = I.\sin\varphi \quad (1.4)$$

Reaktif güç,

$$Q = S.\sin\varphi = U.I.\sin\varphi \quad (1.5)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir.

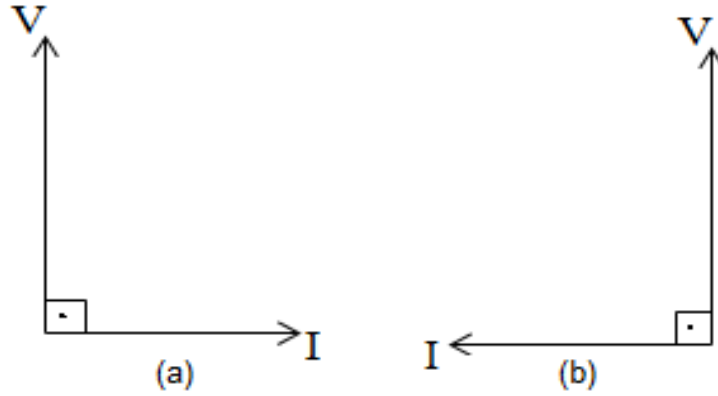
Görünür akım,

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (1.6)$$

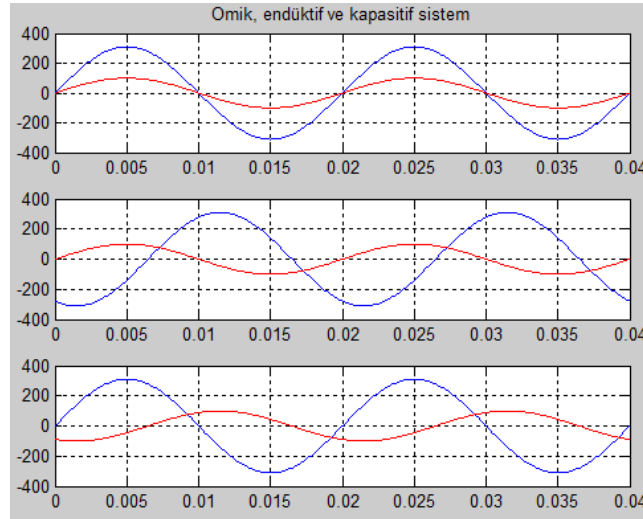
Görünür güç,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.7)$$

Yukarıda verilen denklemlerden de görüldüğü gibi aktif güç, görünür gücün $\cos\varphi$ değeri ile çarpılması ile elde edilir. Buradaki φ açısı akım ile gerilim arasındaki faz açısını ifade eder. Bu φ açısının kosinüs değeri de güç faktörü olarak adlandırılır. Omik karakterli bir sistemde akımla gerilim arasında faz farkı yoktur. Endüktif karakterli bir sistemde akım gerilimden 90° geridedir, kapasitif bir sistemde ise akım gerilimden 90° öndedir.



Şekil 1.2. (a) Endüktif sistem, (b) kapasitif sistem

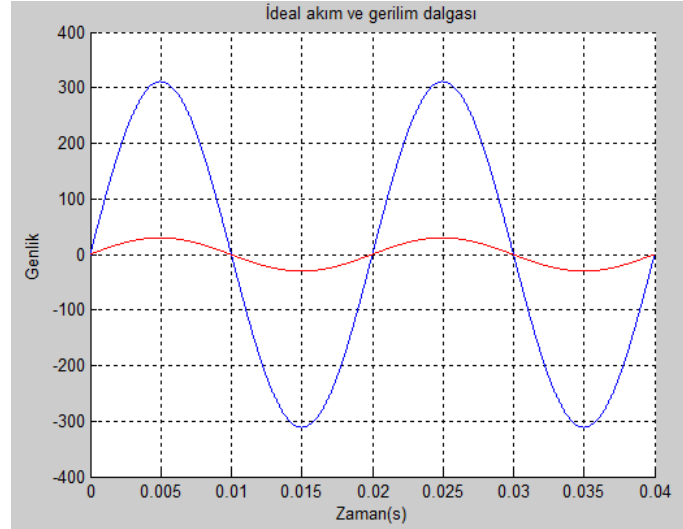


Şekil 1.3. Omik, endüktif ve kapasitif sistem

1.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu

Elektrik dağıtım sistemlerinde aktif güçle birlikte sistemin ihtiyacının karşılanması için reaktif güç akışı da olmaktadır. Aktif gücün enerji santrallerinde üretilip tüketiciye iletilmesi zorunlu olsa da reaktif güç için böyle bir zorunluluk yoktur. Reaktif güç,

ihtiyaç duyulan noktalarda istenildiği kadar değişik sistemlerle üretilebilir. Böylece enerji dağıtım sisteminin çalışması için şekil 1.4'deki gibi ideal koşullar oluşturulmuş olur.



Şekil 1.4. İdeal akım ve gerilim dalgası

Reaktif güç ihtiyacı, elektrik şebekesi dışındaki kaynaklarca da (kondansatörler, senkron jeneratörler) karşılanabilir. Reaktif enerjinin, istenilen yerde ve gerektiği kadar üretilmesine reaktif güç kompanzasyonu adı verilir. Bir başka ifadeyle, tüketicilerin normal olarak şebekeden çektikleri endüktif reaktif gücün kapasitif güç vermek suretiyle özel bir reaktif güç üreticisi tarafından dengelenmesine reaktif güç kompanzasyonu denir [3].

Saf sinüzoidal gerilim ile yük akımı arasındaki açının kosinüsü güç faktörü (PF) olarak adlandırılır. Bu açının sıfıra veya sıfıra mümkün olduğunca yaklaştırılması, reaktif güç kompanzasyonunun amacıdır. EPDK'nın 2010 tarihli elektrik iletim sistemi arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliğinin reaktif enerji kompanzasyonu başlıklı 11. Maddesine göre, 'İletim sistemine doğrudan bağlı tüketiciler ve dağıtım lisansına sahip tüzel kişiler tarafından; iletim sistemine bağlantıyla ilgili her bir ölçüm noktasında ve her bir uzlaşma periyodunda, sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı yüzde ondördü (% 14), sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise yüzde onu (%10) geçemez'' [18]. Verilen tanım aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Endüktif kapasitif enerji oranları

| |
|--|
| $\frac{\text{Sistemden çekilen endüktif reaktif enerji}}{\text{Sistemden çekilen aktif enerji}} \leq 14$ |
| $\frac{\text{Sisteme verilen kapasitif enerji}}{\text{Sistemden çekilen aktif enerji}} \leq 10$ |

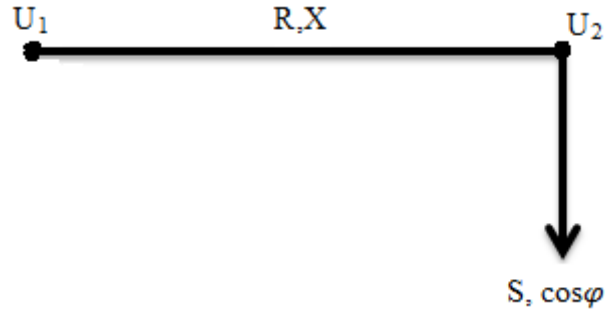
Reaktif güç kompanzasyonu ile tüketicinin güç faktörü düzeltilmiş olur. Ayrıca tüketicilerin reaktif güç için ceza ödemesi de önlenmiş olur. Dağıtım şebekesine bağlı kompanzasyonu yapılmamış bir yükte meydana gelen ani reaktif güç değişimleri şebekedeki gerilimin değişmesine yol açar. Gerilimdeki bu ani değişimler aynı noktaya bağlı olan diğer tüketicileri ve arızaya sebep olan asıl tüketiciyi olumsuz etkiler. Kompanzasyonun bir amacı da bu gerilim değişimlerini en aza indirmektir [3].

1.3. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Faydaları

Temel frekansta kapasitif reaktif güç ile endüktif reaktif güç arasında 180° faz farkı vardır. Vektörel olarak her iki reaktif güç aynı doğrultuda fakat birbirlerine ters yöndedir. Bu iki güç bir arada kullanıldığında kapasitif güç, endüktif gücü azaltarak kompanzasyon etkisi yapar. Kompanzasyonun faydalarını üretici ve tüketici açısından ayrı ayrı değerlendirebiliriz. Bir tesiste reaktif güç kompanzasyonu yapılmamışsa, tüketilen reaktif enerji için dağıtım şirketine reaktif enerji kullanım bedeli ödenir. Tüketici açısından kompanzasyonun en önemli faydası işe yaramayan bu enerjinin tüketiciyi reaktif enerji faturasından kurtarmasıdır. Ayrıca kompanzasyon ile sistem elemanları fazla yüklenmekten kurtulmuş olur. Sitemin boyutları küçültülebilir ya da sistemin kapasitesi arttırılabilir. Bu sayede tüketici gereksiz yatırım yapmaktan kurtulmuş olur. Üretici açısından kompanzasyonun faydaları üç ana başlık altında toplanır. Bunlar; sistemin kapasitesinin artması, ısı kayıpları ve gerilim düşümünün azalmasıdır [3].

1.3.1. Sistem kapasitesinin artması

Reaktif gücün kompanse edilmesinden sonra dağıtım hatlarından akan reaktif akım sisteme bağlanan kompanzator tarafından karşılanacağından görünür akım azalır. Böylece sistemdeki aşırı yüklenmelerin önüne geçilebileceği gibi istek halinde ek kapasite de sağlanmış olur [19]. Bu durumu matematiksel olarak ifade etmek için sembolik bir dağıtım hattı ile bu hattan beslenen bir tüketici şekil 1.5'te verilmiştir [3].



Şekil 1.5. Dağıtım hattından beslenen tüketici

Yukarıda verilen şekilde U_1 ve U_2 sırasıyla hattın başındaki ve sonundaki faz-nötr gerilimleri, R ve X hattın reaktansları, S tüketicinin çektiği görünür güç ve $\cos\phi$ ise tüketicinin güç faktörüdür. Burada ilk olarak P aktif gücünün sabit kalması istenirse bu durumda kompanzasyondan önce çekilen görünür güç,

$$S_1 = \frac{P}{\cos\phi_1} \quad (1.8)$$

kompanzasyon yapıldıktan sonra görünür güç,

$$S_2 = \frac{P}{\cos\phi_2} \quad (1.9)$$

olur. Elde edilen iki güç arasındaki fark aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (1.10)$$

Elde edilen bu değer kompanzasyon öncesi S_1 değerine oranlanırsa,

$$\% \Delta S = \left(\frac{\Delta S}{S_1} \right) 100 = \left(1 - \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \right) 100 \quad (1.11)$$

elde edilir. Bu durumda kompanzasyon sayesinde tesisin yükü $\% \Delta S$ oranında azalır veya gerektiği takdirde tesis aşırı yüklenmeden $\% \Delta S$ oranında kapasite arttırılabilir [3].

1.3.2. Isı kayıplarının azalması

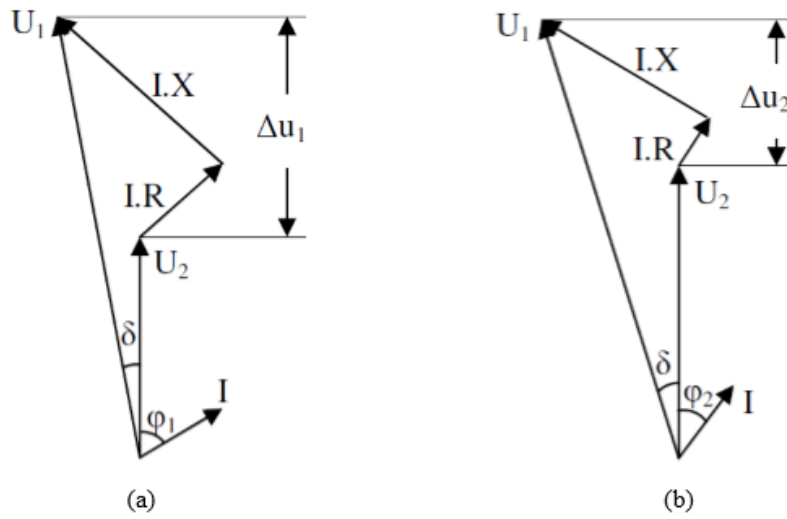
Elektrik tesislerinde meydana gelen enerji kayıpları aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_K = I^2 \cdot R \quad (1.12)$$

Bu kayıplar puant ve minimum yük saatlerine, iletken kesitlerine ve uzunluklarına bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle toplam enerjinin $\%5$ 'i kadar bir değer tutmaktadır. Denklem 1.12'de görüldüğü gibi kayıplar akımın karesiyle orantılıdır. Akım da güç faktörü ile değiştiğinden dolayı ısı kayıpları güç faktörünün karesinin tersi ile orantılıdır [2]. Kompanzasyon ile hattan çekilen toplam akım azaldığı için buna bağlı olarak ısı kayıpları da azalır.

1.3.3. Gerilim düşümlerinin azalması

Enerji dağıtım sistemlerinde gerilim kontrolü öncelikle generatörleri ve trafoların kademelerini ayarlayarak yapılmalıdır. Bu ayarlar yetersiz kalırsa güç faktörünün iyileştirilmesi yoluna gidilmelidir. Bu amaçla, kompanzasyonda kullanılan kondansatörlerin gerilimi yükseltici etkisinden faydalanılabilir [19]. Endüktif bir direnç üzerinden kapasitif bir akım geçerse çıkış gerilimi, giriş geriliminden daha yüksek olur. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisinin fazör diyagramları ile gösterilmesi istenirse şekil 1.6'daki diyagramlar kullanılabilir. Burada kondansatör kullanımının gerilimi yükselttiği açıkça görülmektedir [3].



Şekil 1.6. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisi [3]

Yukarıda verilen şekilde a, kompanzasyon öncesi durumu gösterirken b, kompanzasyon sonrası durumu gösterir. R ve X hattın aktif ve reaktif dirençleri, U_1 hat başı gerilimi, U_2 hattın sonundaki gerilimi, Δu boyuna gerilim düşümünü ve φ faz açısını gösterir. Şekilden de görüldüğü gibi kompanzasyon öncesi gerilim değeri kompanzasyon sonrası gerilim değerinden daha büyüktür. Bu da gerilim düşümlerinin kompanzasyon sonrasında azaldığını göstermektedir.

1.4. Reaktif Güç Çeken Alıcılar

Enerji sarfiyatı bakımından tüketicilerde manyetik ve statik alanla çalışan tüketiciler vardır. Bu tüketici grubundaki elemanlar elektrik makineleri, balastlı lambalar ve elektrik enerjisini istenilen enerjiye dönüştürürler. Bu cihazlar yapısı gereği şebekeden aktif güç yanında reaktif güç de çekerler. Endüstride, reaktif güç kompanzasyonu gerektiren yüklerden bazıları aşağıda verilmiştir.

- Elektrik makineleri,
- Bobinler,
- Balastlar,
- Havai hatlar,
- Endüksiyon fırınları,
- Doğrultucular,

- Kaynak makineleri,
- Ark ocakları,

Yukarıda verilen bu yükler işletmede harmonik oluşumuna ve akım darbelerine neden olurlar. Bu tip yüklerde reaktif güçteki değişim çok hızlıdır ve çektikleri reaktif güç değerleri de büyük değerler arasında değişmektedir. Dolayısıyla, kullanılacak reaktif güç kompanzasyon sistemleri çok kısa zamanda büyük değerlerde değişimleri karşılamalıdır [1].

1.5. Reaktif Güç Kompanzasyonundan Beklenen Özellikler

Bir reaktif güç kompanzasyon sisteminin tasarımı sırasında göz önüne alınacak önemli noktalar aşağıda verilmiştir [23].

- Tesisin aşırı yüklenme sınırı ve süresi,
- Maksimum reaktif güç gereksinimi,
- Aşılmaması gereken gerilim değerleri,
- Gerilim ayarı,
- Frekans ve değişimi,
- Reaktif güç kompanzasyon sisteminin tepki verme süresi,
- Maksimum harmonik bozulmaları,
- İşletmenin ileriye dönük genişleme imkanları,
- Güvenilirlik ve bakım,
- Çevresel faktörler, gürültü seviyesi, sıcaklık, nem, soğutma sistemi.

Kurulacak bir reaktif güç kompanzasyon sisteminden beklenen özellikler aşağıda verilmiştir [23].

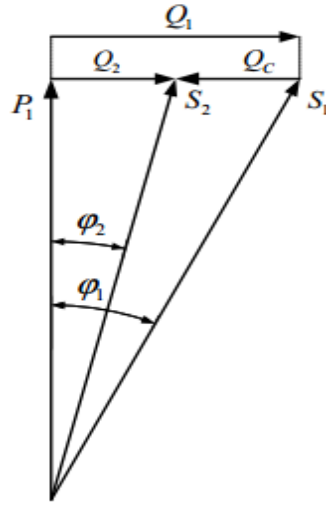
- Yük ile paralel bağlanabilmeli,
- Güç faktörü 1'e yaklaştırabilmeli,
- Gerilimi kontrol eden ve bağlı olduğu noktada sabit bir gerilim sağlayabilmeli,
- Üç fazı da birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edebilmeli,
- Yük akımlarını ya da faz gerilimlerini dengeleyebilmelidir.

1.6. Reaktif Güç İhtiyacının Belirlenmesi

Bir tüketicinin çekeceği reaktif gücün bulunabilmesi için, şebekeden çekilen S_1 gücüyle buna ait $\cos\varphi_1$ ve yeni güç faktörü $\cos\varphi_2$ değerinin bilinmesi gereklidir. Reaktif güç kompanzasyon sistemi için gerekli olan reaktif güç iki yöntemle hesaplanır. Bu yöntemlerden birincisi aktif gücün (P_1) sabit tutulması halinde yapılan hesaplama, ikincisi de görünür gücün (S_1) sabit tutulması halinde yapılan hesaplama. Genel olarak bir tesiste kurulacak kompanzasyon sisteminin tipi sistemdeki yük dağılımına, reaktif güç ihtiyacının değişimine ve tesisteki harmoniklerin miktarına bağlıdır [3].

1.6.1. Aktif gücün sabit olması durumu

P_1 gücünün sabit olması durumunda yapılan reaktif güç kompanzasyonuna ait fazör diyagramı şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. İletilen görünür gücün azaltılması durumundaki fazör diyagramı [6,16]

Fazör diyagramından da anlaşılacağı gibi sistemden çekilen görünür güç azalmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonundan önceki reaktif güç,

$$Q_1 = P_1 \cdot \tan\varphi_1 \quad (1.13)$$

olarak ifade edilirken reaktif güç kompanzasyonundan sonraki güç de,

$$Q_2 = P \cdot \tan\varphi_2 \quad (1.14)$$

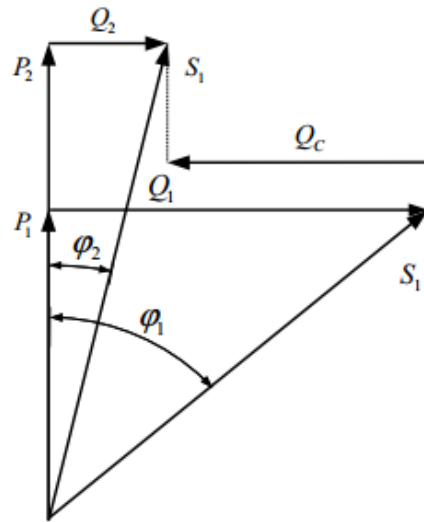
olarak ifade edilir. Buna göre sisteme eklenmesi gereken kondansatör gücü,

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (1.15)$$

olarak bulunur [6].

1.6.2. Görünür gücün sabit olması durumu

S_1 gücünün sabit olması durumunda yapılan reaktif güç kompanzasyonunda sistemden çekilen aktif güç artmaktadır. Bu durum fazör diyagramı ile şekil 1.8'deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 1.8. İletilen aktif gücün azaltılması durumundaki fazör diyagramı [6,16]

Yukarıda verilen şekilden de görüleceği gibi reaktif güç kompanzasyonundan önceki reaktif güç,

$$Q_1 = S \cdot \sin\varphi_1 \quad (1.16)$$

olarak ifade edilirken reaktif güç kompanzasyonundan sonraki reaktif güç de,

$$Q_2 = S \cdot \sin\varphi_2 \quad (1.17)$$

olarak ifade edilir. Bu duruma göre gerekli kondansatör gücü,

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = S(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) \quad (1.18)$$

olarak bulunur [6].

1.7. Reaktif Güç Kompanzasyon Yöntemleri

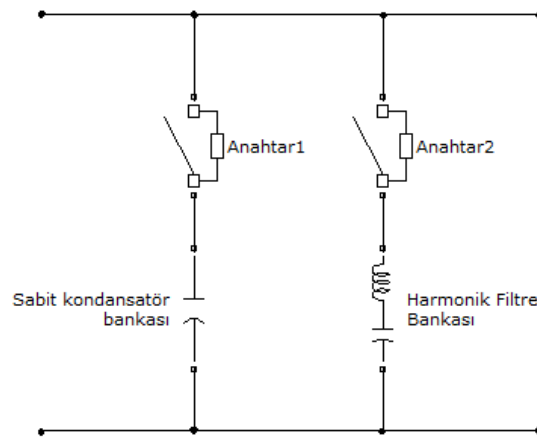
Alternatif akımlı bir kaynak tarafından üretilen reaktif güç, bir çevrimin $\frac{1}{4}$ süresi içinde kapasitör veya reaktörde depolanır, bir sonraki çeyrekte ise tekrar şebekeye geri gönderilir. Bilindiği gibi mıknatıslanma akımı, endüktif karakterli bir akımdır. Bu akım manyetik alan oluşması esnasında şebekeden çekilir ve alan ortadan kalkarken, bu akım tekrar şebekeye iade edilir. Bu yüzden reaktif güç, AA kaynak ile kapasitör veya reaktör arasında nominal frekansın (50 veya 60 Hz) iki katı bir frekansta salınır. Bu nedenle, reaktif güç, kaynakla yük arasında gidip gelmeden, VAr üreticileri tarafından kompanze edilebilir. Reaktif güç kompanzasyonu paralel veya seri bağlanan VAr üreticileri tarafından gerçekleştirilebilir [22].

Reaktif güç kompanzasyonunda en ideal yöntem, reaktif akımların kendilerini tüketen cihazlara en yakın noktada üretilmesidir. Böyle bir durumda abonelerden başlayarak dağıtım hatlarından itibaren üretim kaynağına kadar söz konusu cihazlar için gerekli reaktif enerjinin sistemden taşınmasına gerek kalmaz. Ancak ekonomik ve teknik nedenlerden dolayı, her cihaz başına kompanzasyon kurulması pratik değildir. Aboneler müstakil kompanzasyon yapabildiği gibi, birçok tüketicinin bulunduğu bir tesiste, tüketicilerin topluca bir kompanzasyon tesisi tarafından beslenmesi daha pratik ve ekonomik sonuçlar verebilir. Buna grup kompanzasyonu adı verilir.

Reaktif güç kompanzasyonu, dağıtım şebekesinin hem orta gerilim (OG) tarafında hem de alçak gerilim (AG) tarafında yapılabilmektedir. Çoğunlukla, OG tarafta yapılan reaktif güç kompanzasyonu kVAr başına birim maliyet açısından AG kompanzasyondan daha ucuzdur. AG kompanzasyon tesislerinin kurulumu ve

işletilmesi, OG kompanzasyon tesislerinin kurulumu ve işletilmesine göre daha kolaydır.

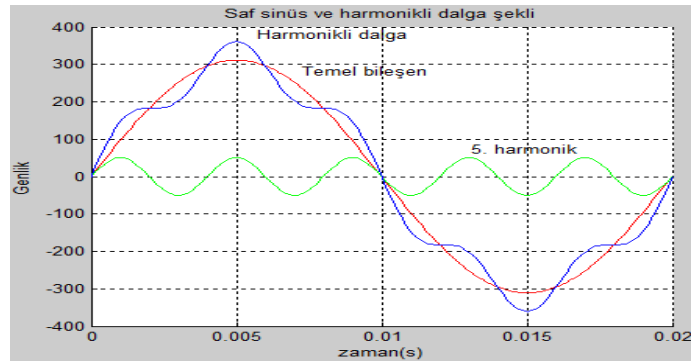
Reaktif güç üretiminde statik faz kaydırıcı adı verilen kondansatörler önemli bir yer tutarlar. Şönt kondansatörler ilk olarak 1914 yılında, güç faktörü düzeltme yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır [22]. Kondansatörlerin aktif kayıpları nominal gücünün %0.5'inin altındadır ve bakım masrafları oldukça düşüktür. Günümüzde kullanılan en yaygın kompanzasyon yöntemi sabit veya kademeli kondansatör bankalarıdır. Öte yandan orta gerilimde kapasitif bir yükün anahtarlanması oldukça zordur. Anahtarlama sayısı çok sık olmamak koşulu ile kondansatör bankaları kademeli olarak devreye alınıp çıkartılabilir. Öte yandan kondansatör bankalarına seri olarak bağlanan harmonik süzgeç reaktörleri ile akort edilmiş frekanstaki harmonikleri süzmek mümkündür. Bu şekilde tasarlanan sistemler pasif harmonik süzgeç olarak adlandırılır. Kondansatörlerin devreye sokulduğu an pratik olarak bir kısa devreye tekabül eder. Bu anda, kondansatörün üzerinde nominal akımının 30 katına kadar çıkabilen akım darbeleri oluşabilir. Bununla birlikte süzgeç reaktörü, anahtarlama sırasında kondansatörün üzerinde meydana gelebilecek aşırı akımları sınırlar. Kondansatörlerin harmonik süzgeç reaktörü ile birlikte kullanılmadığı durumda, aşırı akımların önlenmesi için akım sınırlama bobinleri kullanılması tercih edilir. Bu bobinler aşırı akımı sınırlandırarak sistemin güvenli bir biçimde çalışmasına devam etmesini sağlar. Aşağıda sabit kondansatör bankası ve harmonik filtre bankasının tek hat şeması gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Sabit kondansatör ve harmonik filtre bankası tek hat şeması

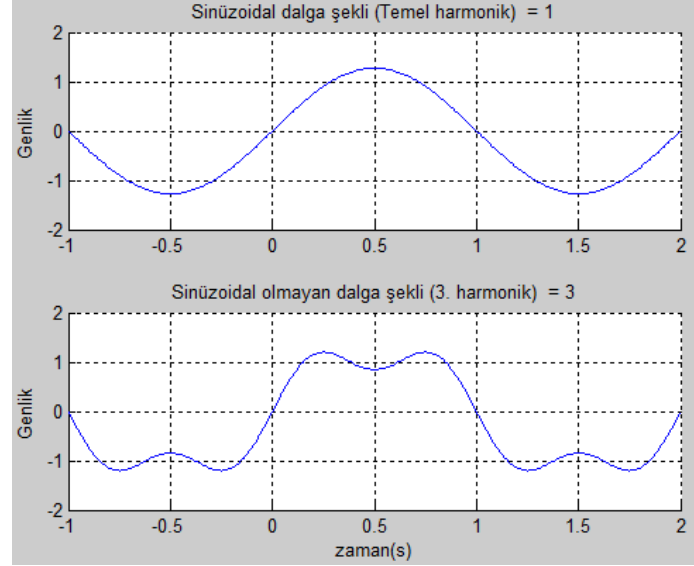
BÖLÜM 2. HARMONİKLER

Elektrik sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılmasında gerilim ve akım dalga şeklinin sinüs eğrisi şeklinde olması istenir. Enerji kalitesini belirleyen etkenlerden biri olan bu durum, işletmedeki bazı nedenlerden dolayı sağlanamayıp, gerilim ve akım dalga şekilleri sinüs eğrisi şeklinden uzaklaşır. Tam sinüzoidal gerilimden sapma, genellikle harmonik adı verilen bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir. Harmonikler, genel olarak nonlineer elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüzoidal dalga olarak adlandırılır. Fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinde ifade edilebilir. Bu analiz ile nonsinüzoidal dalgalar, frekansları farklı sinüzoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Harmonik, temel sinüzoidal dalga (50 Hz) dışındaki dalga şekillerine denir. Başka bir deyişle temel bileşen olarak adlandırılan dalga 50 Hz frekansında olup bunun dışındaki frekanslarda olan diğer dalgalar harmonik olarak adlandırılır. Harmonikli akım ve gerilimde saf sinüs olan dalganın şekli sinüs özelliğinden uzaklaşmaktadır. Buna göre 150 Hz üçüncü harmonik, 250 Hz beşinci harmonik, 350 Hz yedinci harmonik bileşen olarak adlandırılır.



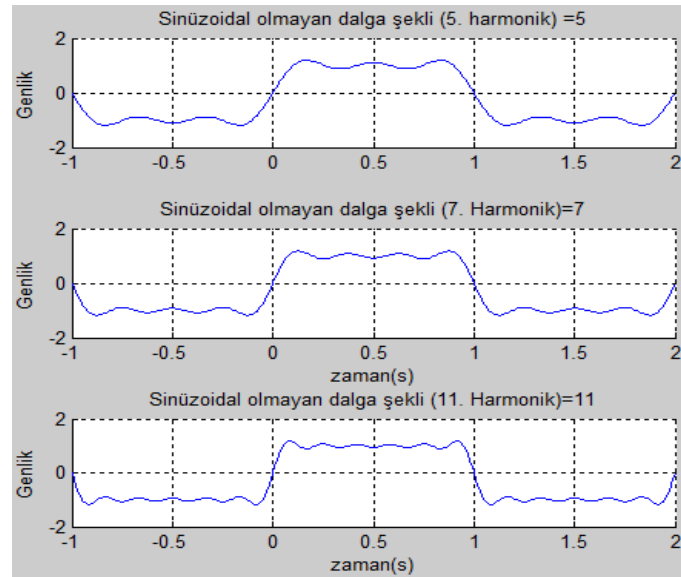
Şekil 2.1. Saf sinüs (temel bileşen) ve 5. harmonikli dalga şekli

Yukarıda verilen grafikte harmonikli dalga şeklinin matematiksel ifadesi $f(t) = V_1 \cdot \sin(\omega t) + V_5 \cdot \sin(5\omega t)$ eşitliği ile verilebilir.



Şekil 2.2. Sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan dalga şekilleri

Yukarıdaki şekilde üstte verilen grafikte şebeke frekansındaki (50 Hz) akım dalga şekli sinüzoidal formdadır. Altta ki grafik ise 3. harmonik etkisinde ortaya çıkan akım dalga şekli sinüzoidal dalga şeklinden bozuktur.



Şekil 2.3. 5, 7 ve 11. harmonik derecesinde meydana gelen bozulmalar

Yukarıdaki şekilde üstte verilen grafikte ise 5., 7., 11. harmoniğin dalga şekli görülmektedir. Elektrik şebekelerindeki dalga şekillerinin simetri özelliklerinden dolayı çift katsayılı harmonik (2., 4., 6. harmonik) bileşenler ile karşılaşılmaz.

2.1. Harmoniklerin Sebepleri

Harmoniğe sebep olan etkenleri şu şekilde sıralayabiliriz. Endüstriyel sistemlerde bulunan güç elektroniği elemanları, lineer olmayan yükler, bilgisayarlar, deşarj lambaları, elektronik balastlar, kesintisiz güç kaynakları, enerji tasarrufu amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemler, manyetik devrelerde doyma, yarıiletken kontrollü cihazlar, motor hız kontrol düzenleri, akü şarj sistemleri, statik VAR jeneratörleri, doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin doyma akımı, doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, gerilim regülatörleri, frekans çeviriciler, momenti büyük hızı küçük motorlar, doğru akım ile enerji nakli (HVDC), senkron makinelerde ani yük değişimlerinin manyetik akı dalga, elektrik makinelerindeki diş ve olukların meydana getirdiği etkiler gibi bozulmalar harmonik oluşumuna neden olurlar.

2.2. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler

Harmonikler genel olarak lineer olmayan elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüzoidal dalga olarak adlandırılır. Harmonikler güç sistemlerinde ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar. Sinüzoidal alternatif akım uygulanan bir alıcının şebekeden harmonikli akım çekmesi bu alıcının yapısı gereğidir. Alıcı normal çalışma sırasında harmonik meydana getirecek akım çekebilir. Harmonik üreten bu alıcılardan başka, karakteristikleri itibarıyla lineer oldukları halde harmonikli akımlara sebebiyet veren alıcılarda vardır. Bu durum ise alıcıya uygulanan gerilimin nonsinüzoidal olmasından kaynaklanmaktadır. Alternatif akımın üretilmesi sırasında alternatiflerde yapılan gerekli iyileştirici önlemler yardımıyla elektrik enerjisi mümkün olduğunca sinüzoidal'e yaklaştırılmaktadır. Fakat lineer bir alıcıya aynı şebekeye bağlı diğer lineer olmayan yükler tarafından etki

edilmektedir. Harmoniklerin varlığı, elektrik sistemlerinin çalışmayacağı anlamına gelmez. Bir fabrika yüksek harmoniklerin kaynağı olurken, diğer bir taraftan ise normal çalışmasına devam edebilir. Harmonik kirlenme çoğu kez şebeke elektrik dağıtım sistemi üzerinden taşınabilir ve aynı sistemde ondan daha duyarlı komşu tesisleri de etkileyebilir. Enerji sistemlerinde harmoniklerin sebep olduğu gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir [21].

- Gerilim düşümünün artması,
- Jeneratör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Elektromekanik cihazlarda ve kablolarda ısınma,
- Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı akım ve gerilimler,
- Enerji kayıplarının artması,
- Kompanzasyon tesisinin aşırı reaktif yüklenmeden zarar görmesi,
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları,
- Elektrikli cihazların ömrünün kısalması,
- Kesici ve şalterlerde açma,
- Elektronik kart arızaları,
- Röle sinyallerinde bozulma ve anormal çalışma,
- Toprak kısa devre akımlarının daha büyük değerlere ulaşması,
- Güç üretimi, iletimi ve dağıtımında verimin düşmesi,
- Yalıtım malzemesinin zorlanması ve delinmesi.

2.2.1. Harmoniklerin kullanıcılarda etkileri

Harmonikler, güç kullanıcılarında elektrik şebekesine, cihazların yüklenmesine ve mevcut elektrik gücüne etki ederler. Harmoniklerin elektrik şebekesine etkisinde alternatörlerde, kablolarda, transformatörlerde ve kapasitörlerde belirgin bir aşırı ısınmaya yol açarak şebekeyi olumsuz etkilerler. Bu tip cihazlarda oluşan hasarın maliyeti çok yüksek olabilir. Harmoniklerin cihazların yüklenmesine etkisinde güç kaybına yol açarlar. Güç elemanlarının yıpranmasından dolayı cihazlar bozulabilir veya ömrü kısalabilir. Harmoniklerin mevcut elektrik gücüne etkisinde harmonikler tarafından çekilen akım tamamen kayıptır ve %30'luk fazla tüketime yol açabilir.

Kullandığımız güç daha az olmasına rağmen daha çok güç kullanılmış gibi ek faturalar ödenir.

2.2.2. Harmoniklerin elemanlar üzerindeki etkileri

Harmonikler güç sisteminde ve güç sistemine bağlanan elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirirler. Harmonikler, motorlar, jeneratörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında ilave kayıplara neden olurlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına yol açabilirler. Ayrıca harmonikler nedeniyle sistemde çeşitli frekanslar bulunacağından rezonans meydana gelme olasılığı artacaktır. Rezonans sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler işletmedeki elemanlara önemli zararlar verecektir.

Harmoniklerin iletim hatları üzerindeki etkisinde, harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların artmasına dolayısıyla da ısınmanın artmasına sebep olurlar. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birinci etkisi, deri etkisi olarak bilinen, harmonik frekansının artmasına bağlı olarak akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşması sonucu etkin direncin artmasıyla meydana gelen ek artıştır. İkinci etkisi ise tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı 4 telli nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesidir. Transformatörde üç ve üçün katı harmonikler yıldız noktasının toprağa bağlanması durumunda nötr iletkeninden geçeceğinden nötr iletkeninin ısınmasına neden olur [21]. Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı dengeli bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmazsa, üç ve üçün katı harmonik akımları geçmez. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden üç ve üçün katı frekanslı akım, nötr üzerinden de bunların toplamı olan üç katı değerinde akım geçer. Nötr akımının değeri faz akımı değerinin 1,7 katına kadar çıkabilir [21].

Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkisinde, güç katsayısının düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler, ancak sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Harmonikler kondansatörler üzerinde hem aşırı reaktif yüklenmeye hem de dielektrik kayıplardaki

artış sonucunda ısı artışına neden olurlar. Harmoniklerin yol açtığı ısı artışı ve aşırı yüklenme sonucu kondansatörlerin ömrü kısalmır. Harmoniklerin motor ve jeneratörler üzerindeki etkisinde, harmonik gerilim ve akımların en büyük etkisi, harmonik frekanslarındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinenin ısısının artmasıdır. Bu demir ve bakır kayıplarının artışı, dönen makinenin verimi ile momentinin düşmesine ve sinüzoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha gürültülü çalışmasına neden olurlar. Ayrıca indüksiyon motorlarındaki hava aralığında bileşke akı üretmesinden dolayı, motorun kalkış yapamaması veya senkronlanma sağlayamaması gibi durumlar görülebilir.

Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkisinde, transformatörler harmoniklerden iki şekilde etkilenir. Birincisi, akım harmonikleri sonucunda bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarındaki artıştır. İkincisi ise gerilim harmonikleri sonucunda demir kayıplarındaki artıştır. Bu kayıp artışları transformatörde ek ısınma ve gürültü artışlarına sebep olmaktadır [21].

2.2.3. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi

Güç faktörü devredeki aktif gücün reaktif güce oranıdır. Reaktif güç bedelini belirleyen, akımla gerilim arasındaki faz farkını işaret eden $\cos\phi$ değerinden farklı olarak güç faktörü (PF), akım ve gerilimler arasındaki faz farkıdır. Harmonikli bir sistemde güç faktörü, $\cos\phi$ değerinden daha düşük çıkacağından, tüketici sisteminde kompanzasyon yapmış olsa bile daha önce ödemek zorunda olmadığı reaktif güç bedelini, güç faktörünün yasal sınırın (0,96) altına düşmesinden dolayı ödemek zorunda kalabilmektedir [18].

2.3. Harmoniklerin Tespiti, Sınırlanması ve Harmoniklerin Tespiti

Elle kumanda edilebilen harmonik analizörler bilinen harmonik problemlerinin tespitinde faydalı olabilir. Bunun yanı sıra, işletmenin faaliyeti esnasında veya komşu ya da aynı şebekeden beslenen işletmeler içerisinde ortaya çıkan farklı güçler açılıp kapatılacağı için harmonik değerler gün içerisinde sıkça değişebilmektedir. Bu durum bir harmonik monitörün ya da harmonik ölçme ve kaydetme kabiliyetine sahip güç

kalite analizörünün kullanılmasını gerektirir. Mümkün olan yerde, faz gerilimi ve akımlarının yanı sıra nötr-toprak gerilimi ve nötr akımı da izlenmelidir. Bu işlem, problemler için ipucu verebilecek olup marjinal sistemleri de yakın takibe alabilecektir. Nötralityeyi izleme sıkça yüksek üçüncü harmonik değerini gösterecektir. Bu da işletmede lineer olmayan bir yüke işaret etmektedir. Harmoniklerin tespitinde en iyi metot arızalara ihtimal vermeden sistemde harmonik ölçümü yapılmasıdır. Sistemde harmoniklerin varlığı aşağıdaki gibi durumlarla karşılaşıldığında anlaşılabilir [21].

- Kondansatör sıklıkla değiştirilmek zorunda kalınıyor ise,
- Besleme şalterleri rezonans olayları ile belirsiz zamanda açma yaparak işletmeyi durduruyor ise,
- Nötr kablosu çok yükleniyor ve ısınıyorsa,
- Ölçüm cihazları hatalı ölçüm yapıyorlarsa.

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerin miktarını sınırlamak için iki ayrı yöntem vardır. Bu yöntemlerden birincisi uluslararası elektroteknik komisyonu (International Electrotechnic Commission, -IEC) tarafından tercih edilen herhangi bir lineer olmayan yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir. İkinci yöntem ise, birden fazla nonlineer yükün beslendiği bir veya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir. IEC tarafından öngörülen sınırlamada, her bir yükten kaynaklanan harmoniklerin sınırlandırılması söz konusudur. Böylece harmoniklerin toplamsal etkisinin de sınırlandırılacağı kabulüne dayanır. IEEE tarafından öngörülen değerler, hem akım hem de gerilim harmoniklerine sınırlar getirmeleri bakımından daha etkin ve sınırlayıcı olarak görünmektedir.

Normal veya kabul edilebilir harmonik seviyesini tespit etmek için çeşitli uluslararası organizasyonlar tarafından geliştirilmiş pek çok sayıda standart mevcuttur. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519 – 1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000 – 3 – 2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim bozunumunun ve müşteriler için nonlineer yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadır [4]. IEEE – 519 standardında, şebeke gücünün bir fonksiyonu olarak akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin, temel

bileşene oranları verilmiştir. IEC – 555, elektronik ev aletleri donanımı ile ilgili harmonik standartları içerir. Bu standartta, cihazların sınıflandırılmasına göre akım harmoniklerinin kabul edilebilir seviyesi verilmiştir. IEC harmonik sınırlamasını çeşitli yükler için sınıflandırmış ve bunlara ait tablolarda sınır değerleri vermiştir. IEC 61000 – 2 – 2 konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir. Yine IEC tarafından endüstri için ikinci sınıf olarak verilen IEC 61000 – 2 – 4 ‘te gerilim harmonik distorsiyon (bozunum) limitleri verilmiştir [21].

Tablo 2.1. Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000–2–2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri ($k=0.2+12.5/n$) [4,21]

| Tek harmonikler | | Çift harmonikler | | 3 ve 3’ün katı harmonikler | |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| n | % V _n | n | % V _n | n | % V _n |
| 5 | 6 | 2 | 2 | 3 | 5 |
| 7 | 5 | 4 | 1 | 9 | 1.5 |
| 11 | 3.5 | 6 | 0.5 | 15 | 0.3 |
| 13 | 3 | 8 | 0.5 | ≥21 | 0.2 |
| 17 | 2 | 10 | 0.5 | | |
| 19 | 1.5 | ≥12 | 0.2 | | |
| 23 | 1.5 | | | | |
| 25 | 1.5 | | | | |
| ≥29 | k | | | | |

Tablo 2.2. Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar için) - ($k=0.2+12.5/n$) [4,21]

| Tek harmonikler | | Çift harmonikler | | 3 ve 3’ün katı harmonikler | |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| n | % V _n | n | % V _n | n | % V _n |
| 5 | 6 | 2 | 2 | 3 | 5 |
| 7 | 5 | 4 | 1 | 9 | 1.5 |
| 11 | 3.5 | 6 | 0.5 | 15 | 0.3 |
| 13 | 3 | 8 | 0.5 | ≥21 | 0.2 |
| 17 | 2 | 10 | 0.5 | | |
| 19 | 1.5 | ≥12 | 0.2 | | |
| 23 | 1.5 | | | | |
| 25 | 1.5 | | | | |
| ≥29 | k | | | | |

Tablo 2.3. Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. sınıf elemanlar için) - ($m=5\sqrt{11/n}$) [4,21]

| Tek harmonikler | | Çift harmonikler | | 3 ve 3'ün katı harmonikler | |
|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| n | %V _n | n | %V _n | n | %V _n |
| 5 | 8 | 2 | 3 | 3 | 6 |
| 7 | 7 | 4 | 1.5 | 9 | 2.5 |
| 11 | 5 | ≥6 | 1 | 15 | 2 |
| 13 | 4.5 | | | 21 | 1.75 |
| 17 | 4 | | | ≥27 | 1 |
| 19 | 4 | | | | |
| 23 | 3.5 | | | | |
| 25 | 3.5 | | | | |
| ≥29 | m | | | | |

IEEE'nin harmonik sınır standartları aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Bu tablolarda I_K sistemin kısa devre akımını, I_L yüke ait maksimum talep akımını (ortalama 15 veya 30 dakikalık), TTD ise toplam talep distorsiyonunun değerini göstermektedir.

Tablo 2.4. IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları [4,21]

| Bara gerilimi(V _n) | Tekil harmonik büyüklüğü(%) | Toplam harmonik distorsiyonu THD _{V_n} (%) |
|--------------------------------|-----------------------------|---|
| V _n ≤69 kV | 3 | 5 |
| 69 kV<V _n ≤161 kV | 1.5 | 2.5 |
| V _n >161 kV | 1 | 1.5 |

Tablo 2.5. IEEE'nin genel dağıtım sistemlerine ait akım için harmonik distorsiyon sınırları [4,21]

| $V_n \leq 69 \text{ kV}$ | | | | | | |
|---|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|--------|
| I_k/I_L | $n < 11$ | $11 \leq n < 17$ | $17 \leq n < 23$ | $23 \leq n < 35$ | $n \geq 35$ | TTD(%) |
| <20 | 4 | 2 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5 |
| 20-50 | 7 | 3.5 | 2.5 | 1 | 0.5 | 8 |
| 50-100 | 10 | 4.5 | 4 | 1.5 | 0.7 | 12 |
| 100-1000 | 12 | 5.5 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| >1000 | 15 | 7 | 6 | 2.5 | 1.4 | 20 |
| $69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$ | | | | | | |
| <20 | 2 | 1 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| 20-50 | 3.5 | 1.75 | 1.25 | 0.5 | 0.25 | 4 |
| 50-100 | 5 | 2.25 | 2 | 0.75 | 0.35 | 6 |
| 100-1000 | 6 | 2.75 | 2.5 | 1 | 0.5 | 7.5 |
| >1000 | 7.5 | 3.5 | 3 | 1.25 | 0.7 | 10 |
| $V_n > 161 \text{ kV}$ | | | | | | |
| <50 | 2 | 1 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| ≥ 50 | 3 | 1.5 | 1.15 | 0.5 | 0.22 | 4 |

BÖLÜM 3. HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

Lineer olmayan elemanlar ile nonsinüsoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasıyla sistemde akım ve gerilim dalga şekli bozulmuştur. Bozulan bu dalga şekillerine Fourier Analizi olarak bilinen analiz yöntemi uygulanarak bu dalgaların analizi yapılabilir.

3.1. Fourier Katsayılarının Bulunması

Fransız fizikçi ve matematikçisi J. Fourier, sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların, genlik ve frekansları farklı birçok sinüzoidal dalgaların toplamından oluştuğunu, diğer bir ifadeyle sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları değişik (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüzoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir. Fourier serisini elde etmeye, dalga analizi veya harmonik analizi de denir. Periyodik fonksiyonlar Fourier serisine açıldıklarında birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve cosinüslerinden oluşan bir seri halinde yazılabilir.

Bir $f(t)$ fonksiyonu Dirichlet şartları olarak bilinen ve aşağıda verilen üç şartı sağladığında o fonksiyon Fourier serisine açılabilir. Bir $f(t)$ fonksiyonu;

- Sonlu sayıda minimum ve maksimum noktası mevcutsa,
- Ortalaması sonlu bir değere sahip olabilirse,
- İçinde sonlu sayıda süreksizlik barındırıyorsa,

bu $f(t)$ fonksiyonu Fourier serisine açılabilir. Fourier'e göre, T periyot boyunca sinüsten farklı bir dalga şekline sahip $f(t)$ fonksiyonu yukarıda verilen Dirichlet şartlarını sağladığında

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \dots + A_n \cos nt + B_1 \sin t + B_2 \sin 2t + B_3 \sin 3t + \dots + B_n \sin nt \quad (3.1)$$

veya

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir. Verilen bu denklemlerde,

n : 1, 2, 3, ..., n (pozitif tam sayı) harmonik derecesidir.

t : Bağımsız değişken (elektrik devrelerinde ωt olarak kullanılır)

$A_0 = '0'$ indisi ile gösterilen sabit terim (doğru veya ortalama değer olup literatürde A_0 yerine $A_0/2$ 'de kullanılabilir.)

'1' indisi ile gösterilen birinci terime temel bileşen adı verilir. Temel bileşen aynı zamanda tam sinüzoidal dalgaya karşılık gelen dalgayı belirtir. 2, 3, 4, ..., n indisi ile gösterilen bileşenlere ise harmonik denir. $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n, B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ katsayıları ise $f(t)$ fonksiyonunun Fourier katsayılarıdır.

Fourier'e göre, T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen $f(t)$ dalgası yukarıda verilenlerden farklı olarak,

$$f(t) = C_0 + C_1 \sin(t \pm j_1) + C_2 \sin(2t \pm j_2) + C_3 \sin(3t \pm j_3) + \dots + C_n \sin(nt \pm j_n) \quad (3.3)$$

veya

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt \pm j_n) \quad (3.4)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Burada C katsayıları aşağıdaki gibi verilebilir.

C_0 : Sabit terim

$C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$: Harmonik genlikleri

$$C_0 = \sqrt{A_0^2 + B_0^2} \quad (3.5)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (3.6)$$

olarak verilmektedir. Yukarıda verilen denklemlerde j , harmoniklerin faz açılarıdır ve aşağıdaki bağıntıyla bulunur.

$$j_1 = \tan^{-1}\left(\frac{B_1}{A_1}\right) \quad (3.7)$$

$$j_n = \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (3.8)$$

Fourier açılımı yukarıda verildiği gibi trigonometrik şekilde ifade edilebileceği gibi üstel şekilde de ifade edilebilir. Üstel gösterim çok kullanılmaz. Fourier integrali ve bilgisayar destekli frekans domeni analizlerinde kullanılır.

$$\sin nwt = \frac{e^{jnwt} - e^{-jnwt}}{2j} \quad (3.9)$$

$$\cos nwt = \frac{e^{jnwt} + e^{-jnwt}}{2} \quad (3.10)$$

eşitlikleri Fourier serisine açılmış olan denklem (3.2)'deki $f(t)$ fonksiyonunda yerine konulursa,

$$f(wt) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left(\frac{e^{jnwt} + e^{-jnwt}}{2} \right) + B_n \left(\frac{e^{jnwt} - e^{-jnwt}}{2j} \right) \quad (3.11)$$

denklemini elde edilir. (3.11) denklemini düzenlenirse,

$$f(wt) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{A_n - jB_n}{2} \right) e^{jnwt} + \left(\frac{A_n + jB_n}{2} \right) e^{-jnwt} \quad (3.12)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemde gerekli düzenlemeler yapılırsa aşağıdaki (3.13) denklemini elde edilir.

$$f(t) = \dots + D_{-2}e^{-2j\omega t} + D_{-1}e^{-j\omega t} + A_0 + D_1e^{j\omega t} + D_2e^{2j\omega t} + \dots \quad (3.13)$$

T periyot boyunca sinüs formdan farklı şekilde değişen $f(t)$ dalgasında D_n aşağıda verilen bağıntıyla bulunur.

$$D_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (3.14)$$

3.2. Analitik Yöntemle Fourier Katsayılarının Bulunması

T periyot boyunca sinüzoidal olmayan bir şekilde değişen $f(t)$ fonksiyonunun Fourier katsayıları (A_0, A_n, B_n) analitik yöntemle aşağıda verilen formüllerle bulunabilir.

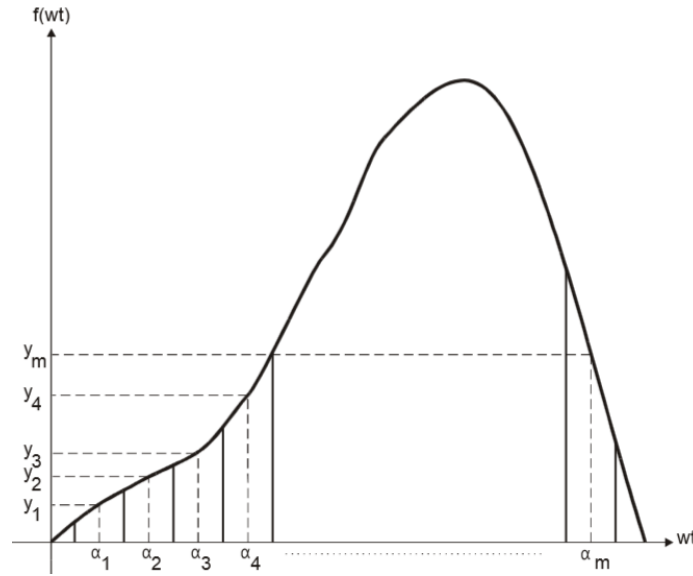
$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) dt \quad (3.15)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos n\omega t dt \quad (3.16)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin n\omega t dt \quad (3.17)$$

3.3. Grafiksel Yöntemle Fourier Katsayılarının Bulunması

T periyot boyunca sinüzoidal olmayan bir şekilde değişen $f(t)$ fonksiyonunun Fourier katsayılarının diğer bir bulunma yöntemi grafik yöntemidir. Bu yöntem çoğunlukla analizi yapılacak fonksiyonun sayısal değerinin bilinmeyip fonksiyon grafiğinin bulunduğu durumlarda kullanılır. Grafiksel yöntemde, osiloskop çıktısı alınan fonksiyonun yarım periyodu şekil 3.1'deki gibi parçalara ayrılır ve her parçanın orta noktası için alınan α ve β değerleri, ilgili sinüs ve cosinüs fonksiyonlarının toplamını içeren denklemler kullanılarak fonksiyonun Fourier açılımı bulunur. Kullanılan bu yöntemde güvenilir bir sonuç elde edebilmek için verilen fonksiyonun grafiği mümkün olduğunca çok parçaya ayrılmalı ve bu parçalara ait α ve β değerleri büyük bir doğrulukla tespit edilmelidir.



Şekil 3.1. Grafiksel metotla fourier analizi [7]

Şekil 3.1’de x eksenini boyunca m adet aralığa bölünmüş bir simetrik sinüzoidal olmayan bir dalganın pozitif yarı dalgası görülmektedir. Her bir aralığın orta noktası için alınan α ve y değerleri kullanılarak temel bileşen için Fourier eşitlikleri,

$$A_1 = \frac{2}{m} (y_1 \cos \alpha_1 + y_2 \cos \alpha_2 + y_3 \cos \alpha_3 + \dots + y_m \cos \alpha_m) \quad (3.18)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} (y_1 \sin \alpha_1 + y_2 \sin \alpha_2 + y_3 \sin \alpha_3 + \dots + y_m \sin \alpha_m) \quad (3.19)$$

denklemleriyle bulunur. Verilen bu denklemleri aşağıdaki gibi basitleştirebiliriz.

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos \alpha_i) \quad (3.20)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin \alpha_i) \quad (3.21)$$

3.4. Ölçme Yöntemiyle Fourier Katsayılarının Bulunması

Sinüzoidal olmayan periyodik bir dalganın Fourier katsayılarının ölçme yoluyla tespit edilmesi için değişik ölçme düzenleri geliştirilmiştir. Bu ölçme düzenlerinin çoğunun kullandığı yaygın yol, çok dar bantlı ve orta frekansı değiştirilebilen bir filtre ile

harmoniklerin süzülerek bir voltmetre ile ölçülmesi temeline dayanır. Bu tür düzenler ‘harmonik genlik analizörü’ ya da ‘dalga analizörü’ olarak adlandırılırlar. Harmoniklerin ölçülmesi için kullanılan ölçme düzenlerinin bir kısmı da dijital harmonik analizörleridir. Bu analizörün diğer analizörlere göre üstünlüğü, incelenecek işaretin sadece bir periyodunun ele alınmasının yeterli oluşudur. Yöntemin başarılı olabilmesi için işaret/gürültü oranının çok büyük olması gerekir. Başka bir ifadeyle bir periyotta alınan örneklerin diğer periyotlardakilerle aynı olup olmadığı ya da örnek alma sırasında geçici bir bozulma olup olmadığı problemi vardır. Bu problemi gidermek için sadece bir periyot değil de birkaç periyot incelenerek ortalaması alınır.

3.5. Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü ve Hızlı Fourier Dönüşümü

Ayrık-zamanlı Fourier dönüşümü mutlak toplanabilir diziler için frekans bölgesi gösterimini sağlamaktadır. Ancak Fourier dönüşümü sonsuz uzunlukta bir dizi için tanımlıdır ve daha önemlisi sürekli bir değişken olan ω açısal frekansının bir fonksiyonudur. MATLAB kullanırken dizilerin sınırlandırılması ve sınırlı sayıda nokta için değerlendirme yapılması gerekir. Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) bu sorunları ortadan kaldırmaktadır. Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü (DFT), ayrık zamanlı sinyal işleme algoritma ve sistemlerinin analizi, tasarımı, gerçekleştirilmesi ile doğrusal filtreleme, korelasyon analizi ve spektrum analizi gibi sinyal işleme uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. DFT’nin bu öneme sahip olmasının arkasındaki temel neden DFT’yi hesaplamakta kullanılan verimli algoritmaların bulunmasıdır.

DFT, Fourier dönüşümünün eşit aralıklı frekanslardaki örneklerine eşdeğerdir.. Sonuç olarak N-noktalı bir DFT’nin hesaplanması Fourier dönüşümünün N örneğinin, N eşit aralıklı frekanslarla ($w_k = 2\pi k/N$), z-düzlemindeki birim çember üzerinde N nokta ile hesaplanmasına karşılık gelir. Buradaki amaç N -noktalı DFT’nin hesaplanması için verimli algoritmaların kullanılmasıdır. Bu algoritmalar ortak olarak hızlı Fourier dönüşümü (FFT) algoritmaları adını alır.

3.5.1. Ayrık zamanlı fourier dönüşümü (DFT)

Bir ayrık zaman işaretinin ayrık zamanlı Fourier dönüşümü,

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{-\infty}^{\infty} x[n]. e^{-j\omega n} \quad (3.22)$$

olarak verilmektedir. Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü, bir ayrık zaman işaretinin farklı frekanslardaki karmaşık üstel işaret bileşenlerini vermektedir. Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü bir ayrık zaman işaretini, sürekli frekans bileşenlerine ayrıştırmaktadır. Bu sebepten dolayı bir ayrık zamanlı işaretin ayrık zamanlı Fourier dönüşümü, frekansa bağlı sürekli bir fonksiyondur. Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü 2π periyodu ile periyodiktir, bu nedenle sadece 2π temel aralıkta incelenmesi yeterlidir.

Bir işaretin ters ayrık zamanlı Fourier dönüşümü,

$$x[n] = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}). e^{-j\omega n}. d\omega \quad (3.23)$$

olarak tanımlanmaktadır. Ters ayrık zamanlı Fourier dönüşümü bir ayrık zaman işaretinin farklı frekanslardaki karmaşık üstel işaret bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilmektedir.

Herhangi bir işaretin frekans spektrumu hesaplanırken 2π ile periyodik olan ayrık zamanlı frekansın bir periyodunun dikkate alınması yeterlidir. Frekans spektrumu hesabı 32 sırasında N adet frekans değeri için hesaplama yapılacaksa eğer bu frekans değerlerinin 2π 'lik temel frekans bölgesinde N adet eşit aralıklı frekans değeri,

$$\omega = \frac{2\pi}{N} k \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3.24)$$

olarak hesaplanır. Ayrık frekans dönüşümünün, N adet ayrık frekans değeri için hesaplanması,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\omega n} \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3.25)$$

şeklinde verilir. Ters ayrık Fourier dönüşümü ise,

$$X[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cdot e^{-j\omega n} \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3.26)$$

bağıntısıyla verilmektedir.

3.5.2. Hızlı fourier dönüşümü (FFT)

Ayrık Fourier dönüşümünün hızlı bir biçimde hesaplanmasını sağlayan yöntemler hızlı Fourier dönüşümü olarak adlandırılmaktadır. Hızlı Fourier dönüşümü, ayrık Fourier dönüşümünün işaret işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Bir işaretin ayrık Fourier dönüşümü,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\omega n} \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3.27)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu durumda dönüşümün her k değeri için N adet karmaşık çarpma ve $N-1$ adet karmaşık toplama işlemi yapılması gerekmektedir. N noktalı bir ayrık Fourier dönüşümü için N^2 ile orantılı bir hesap yükü anlamına gelmektedir. Ayrık Fourier dönüşümündeki faz faktörü (W_N),

$$W_N = e^{-j(2\pi/N)} \quad (3.28)$$

olarak ifade edilir. Faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliği vardır. Bu simetri ve periyodiklik özellikleri kullanılarak, ayrık Fourier dönüşümünün daha verimli ve daha doğru hesaplanabilmesi mümkündür. Faz faktörünün simetri özelliği aşağıda gösterilmiştir.

$$W_N^{k+N/2} = -W_N^k \quad (3.29)$$

Faz faktörünün periyodiklik özelliği de,

$$W_N^{k+N} = W_N^k \quad (3.30)$$

şeklinde verilebilir [12].

Hızlı Fourier dönüşümü, ayrık Fourier hesabı için faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliğinden faydalanılarak hızlı bir hesaplama sağlamaktadır. Hızlı fourier dönüşümü zamanda örnek seyreltme ve frekansta örnek seyreltme yöntemi olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir.

3.5.2.1. Zamanda örnek seyreltme

N noktalı bir ayrık Fourier dönüşümü,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot W_N^{kn} \quad k=0,1,2,\dots,N \quad (W_N = e^{-j(2\pi/N)}) \quad (3.31)$$

olarak tanımlanmaktadır. İşaretin çift ve tek sayılı örneklerine ayrıştırılmasıyla ayrık Fourier dönüşümü,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2n]W_N^{k(2n)} + \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2n+1]W_N^{k(2n+1)} \quad (3.32)$$

şeklinde yazılabilir. W_N^k faz faktörü n 'e bağlı olmadığından ifadenin dışına alındığında elde edilen yeni denklem,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2n]W_N^{k(2n)} + W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2n+1]W_N^{k(2n)} \quad (3.33)$$

haline gelir. $W_N^{k(2n)} = W_{N/2}^{kn}$ eşitliğinden dolayı faz faktörleri $N/2$ noktalı ayrık Fourier dönüşümüne göre dönüştürüldüğünde,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2n]W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2n+1]W_{N/2}^{kn} \quad (3.34)$$

elde edilir. Elde edilen son denklemde $x_1[n] = x[2n]$ ve $x_2[n] = x[2n+1]$ ifadeleri kullanılırsa,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x_1[n]W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x_2[n]W_{N/2}^{kn} \quad (3.35)$$

$$X[k] = X_1[k] + W_N^k \cdot X_2[k] \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3.36)$$

ifadeleri elde edilir. Faz faktörünün simetri özelliği olan ve $W_N^{k+N/2} = -W_N^k$ eşitliğiyle verilen bağıntı göz önüne alındığında $X[k]$ 'nin ilk $N/2$ değeri,

$$X[k] = X_1[k] + W_N^k \cdot X_2[k] \quad k=0,1,2,\dots,(N/2)-1 \quad (3.37)$$

sonraki $N/2$ değeri de,

$$X[k] = X_1[k] - W_N^k \cdot X_2[k] \quad k=0,1,2,\dots,(N/2)-1 \quad (3.38)$$

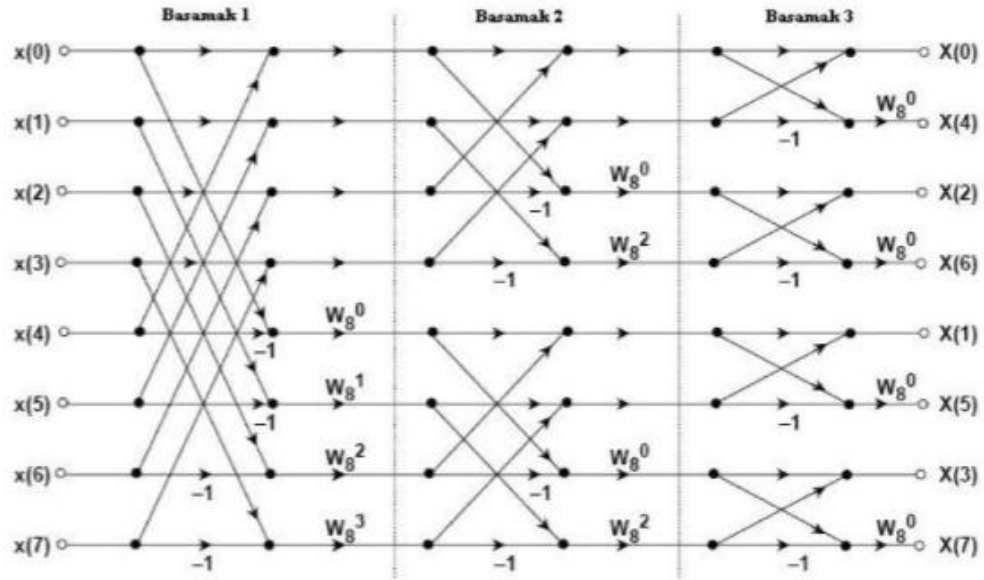
olarak elde edilmektedir.

Örnek seyreltme ile hızlı Fourier dönüşümü hesabında, en alt seviyede sadece iki örnekten oluşan diziler elde edilinceye kadar ilk $x[n]$ işareti sürekli çift ve tek sayılı örneklerine ayrılmaktadır. En alt seviyede iki noktalı ayrık Fourier dönüşümleri hesaplanmaktadır. Bu dönüşümler denklem (3.37) ve (3.38) doğrultusunda birleştirilirse bir üst seviyenin ayrık Fourier dönüşümü elde edilmiş olur. Aynı işlem tekrarlanarak bir üst seviyeye çıkılmaktadır. Sürekli olarak Fourier dönüşümleri benzer şekilde birleştirilerek üst seviyeye çıkılmasıyla en üst seviyede $x[n]$ işaretinin Fourier dönüşümü elde edilmiş olur.

3.5.2.2. Frekansta örnek seyreltme

Kurulan sistemlerin hesap yükünün azaltılması için giriş işaret örneklerinin seyreltilmesi yerine ayrık Fourier dönüşümü çıkışı $X[k]$, çift ve tek sayılı frekans örneklerine ayrıştırılabilmektedir. Zamanda örnek seyreltme algoritmasında olduğu gibi çift ve tek frekans örneklerini kapsayan dizilerin tekrar kendi aralarında tek ve çift frekanslarına ayrılmasına devam edilir. Bu durum için işaret sürekli olarak ikiye bölünerek işaretin birinci yarısı ile ikinci yarısı ile toplamı ve farkı hesaplanıp fark

işareti gerekli faz faktörü ile çarpılmaktadır. En alt seviyede sadece iki noktalı bir ayrık Fourier dönüşümü (DFT) hesabı ile işaretin hızlı Fourier dönüşümü (FFT) elde edilmektedir. Alt seviyelerde hesaplanan ayrık fourier dönüşümlerinin birleştirilmesi gösteriminde genellikle kelebek olarak adlandırılan akış grafikleri kullanılmaktadır [7].



Şekil 3.2. Frekansta seyreltilmiş 8 noktalı FFT algoritması [7]

BÖLÜM 4. HARMONİK BÜYÜKLÜKLERE AİT TEMEL KAVRAMLAR

Harmonikli akım veya gerilim barındıran elektrik tesislerinde, sinüzoidal akım ve gerilim barındıran sistemlerden farklı olarak birtakım farklı matematiksel ifadelerin tanımlarının yapılması gerekmektedir. Bu tanımlamalar, distorsiyon gücü (D), harmonik bozunum (HD), toplam harmonik bozunumu (THD), toplam talep bozunumu (TTD) ve güç faktörü (PF) şeklinde verilebilir.

4.1. Distorsiyon Gücü (D)

Akım ve gerilimi sinüzoidal bir biçimde değişen lineer bir devrede güçler arasında,

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (4.1)$$

denklemi sağlanır. Ancak sistemde sinüzoidal geri beslemeli nonlineer devreler, nonsinüzoidal gerilim beslemeli lineer devreler ve nonsinüzoidal gerilim beslemeli nonlineer devreler şeklinde verilen durumlardan herhangi biri sağlanıyorsa sistemde (4.1) numaralı denklem sağlanmaz. Harmonikli akım veya gerilim içeren sistemlerde güç ifadeleri,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (4.2)$$

şeklinde verilebilir. Verilen bu bağıntıdaki D ifadesi distorsiyon gücü olarak tanımlanır ve aşağıda verilen bağıntıyla bulunur.

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (4.3)$$

Yukarıda verilen bağıntıda S ; görünür gücü (VA), P ; aktif gücü (W), Q ; reaktif gücü (VAr) ve D ; distorsiyon gücünü (VAr) göstermektedir.

4.2. Tekil Harmonik Bozunum (HD)

Harmonik derecesi n olan akım ve gerilim için tekil harmonik bozunum,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (4.4)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (4.5)$$

bağıntılarıyla bulunur. Bu bağıntılarda HD_V ; gerilimin tekil harmonik distorsiyonunu, HD_I ; akımın tekil harmonik distorsiyonunu göstermektedir. [4].

4.3. Toplam Harmonik Bozunum (THD)

Sistemdeki harmoniklerin sınırlandırılmasını amaçlayan standartlarda yaygın olarak kullanılan Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD), akım ve gerilim için ayrı ayrı verilmektedir. Gerilim için,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (4.6)$$

şeklinde verilirken akım için,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (4.7)$$

şeklinde tanımlanır. Verilen bağıntılarda,

THD_V : Gerilimin toplam harmonik distorsiyonu,

THD_I : Akımın toplam harmonik distorsiyonu,

- V_n : Devreye uygulanan gerilimin n . derecesindeki harmoniğinin etkin değeri,
 I_n : Devreden geçen akımın n . derecesindeki harmoniğinin etkin değeri,
 V_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değeri,
 I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değeri,

olarak tanımlanmaktadır. Akım ve gerilim için tanımlanan THD değerleri genel olarak yüzde cinsinden ifade edilirler. (4.6) ve (4.7) denklemlerinden elde edilen sonuçlar 100 ile çarpılarak sistemin THD değerleri elde edilir. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüzoidal dalga için THD değeri sıfırdır [4].

4.4. Toplam Talep Bozunumu (TTD)

Toplam Talep Distorsiyonu (TTD), bir yüke ait değer olup yıl boyunca yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalamasıdır.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (4.8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Verilen denklemde I_L yük tarafından şebeke sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen temel frekanslı maksimum akımdır. TTD kavramı IEEE 'Standard 519' uygulamasında özellikle belirtilmiştir [10].

4.5. Güç Faktörü (PF)

Sistemin aktif gücünün görünür gücüne oranıdır.

$$PF = \frac{P}{S} \quad (4.9)$$

Reaktif güç bedelini belirleyen, akım ve gerilim arasındaki faz farkını gösteren $\cos\varphi$ değerinden farklı olarak güç faktörü, akım ve gerilimler arasındaki faz farkıdır [7].

BÖLÜM 5. HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ VE FİLTRE TASARIMI

Elektrik enerji sistemleri üzerinde oluşturdukları olumsuz etkilerinden dolayı harmoniklerin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi gerekmektedir. Bunu gerçekleştirebilmek için iki farklı yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden birincisi, harmonik üreten elemanların üretimi sırasında elemanların yapısının harmonik üretmeyecek veya çok az üretecek şekilde tasarlanması veya şebekeye bağlantılarının doğru bir şekilde yapılmasıdır. İkinci yöntem ise harmoniklerin üretildikten sonra yok edilmesidir. Bu yöntem harmoniklerin filtrelenmesi olarak adlandırılır.

Harmoniklerin meydana getirdiği zararlı etkileri önleyebilmek için tasarım sırasında alınabilecek tedbirler yeterli değildir. Tasarım sırasında alınabilecek önlemlerin yanında harmonik akımlarının şebekeye geçmesini engellemek de harmonikleri engellemenin bir diğer yoludur. Bunun için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır. Elektrik enerji sistemlerine yerleştirilen ve istenilen harmonik akımlarının eliminasyonunu sağlayan bu devreler 'Harmonik Filtresi' olarak adlandırılır. Harmonik filtrelerinin amacı akım veya gerilimdeki harmonik mertebelerinin etkilerini azaltmaktır [4]. Pasif ve aktif filtre olmak üzere iki çeşit harmonik filtre bulunmaktadır.

5.1. Pasif Filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok etmek için tasarlanmış, kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı gereken durumlarda direnç (R) elemanlarından oluşan devrelerdir. Pasif filtreler, harmonik filtreleme özelliklerinin yanında reaktif güç kompanzasyonu ihtiyacını karşılayabilme özellikleri ve düşük maliyetleri sebebiyle geniş uygulama alanında tercih edilmektedir. Pasif filtrelerde amaç yok edilmek istenilen harmonik bileşen frekansında rezonansa

gelecek L ve C değerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için rezonans değeri farklı olduğu için yok edilmek istenen harmonik derecesini rezonansa getirecek ayrı bir filtre konulması gerekir. Pasif filtreler endüktif veya kapasitif reaktansları birbirine eşit yapan frekansa ayarlanabilir [4]. Pasif filtreler elektrik şebekelerindeki rezonans problemlerini önleyemezler ve şebeke empedansı ile paralel rezonans noktası oluştururlar. Pasif filtre elemanlarının değerleri zamanla, sıcaklıkla ve aşırı yüklenme koşulu ile değişebilir. Bu durumda pasif filtrenin ayarlandığı frekanslarda da değişimler oluşur ve pasif filtrelerin harmonikleri filtreleme performansı da değişir.

Pasif filtrelerin kalite faktörü (Q), filtrenin ayar keskinliğini belirler. Kalite faktörüne bağlı olarak filtreler yüksek Q ya da düşük Q tipinde olabilir. Kalite faktörü yüksek filtrelerde Q değeri 60 ile 100 arasında değerler alırken, düşük filtrelerde 0.5 ile 5 arasında değerler almaktadır [1]. Sistemin Q kalite faktörü,

$$Q = \frac{X_r}{R} \quad (5.1)$$

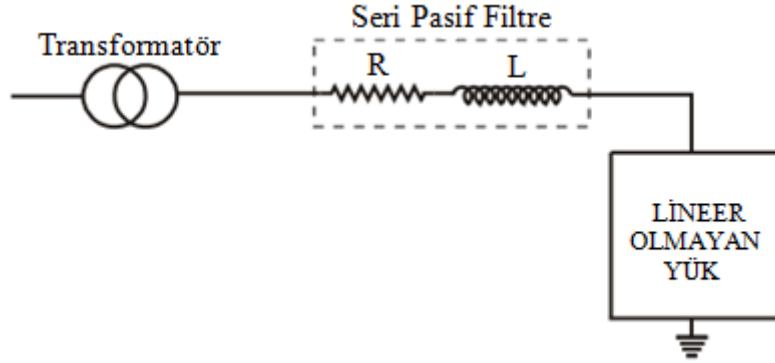
olarak tanımlanır [9]. Verilen bağıntıdaki X_r , rezonans frekansındaki reaktansı ve R endüktanstaki direnci göstermekte olup küçük bir değere sahiptir.

5.1.1. Seri pasif filtreler

Seri pasif filtreler, kaynak ile harmonik üreten eleman arasına seri olarak bağlanan endüktans (L) elemanından oluşmaktadır. Bu filtreler harmonik akışına yüksek empedans gösterirler. Bu sebepten seri filtrelerin ayarlandıkları frekansta yüksek empedans vardır. Seri filtreler belli bir frekans değeri için ayarlandıklarından dolayı yalnızca o frekans bileşenine karşı yüksek empedans gösterir. Filtreye seri bağlanan bu empedans,

$$X_L = 2\pi fL \quad (5.2)$$

bağıntısına göre harmonik frekanslarına yüksek empedans göstererek onların geçişlerini engeller. Seri filtreler temel frekansta ise düşük empedans gösterirler. Seri filtre uygulamasına örnek bir devre şekil 5.1’de verilmiştir.

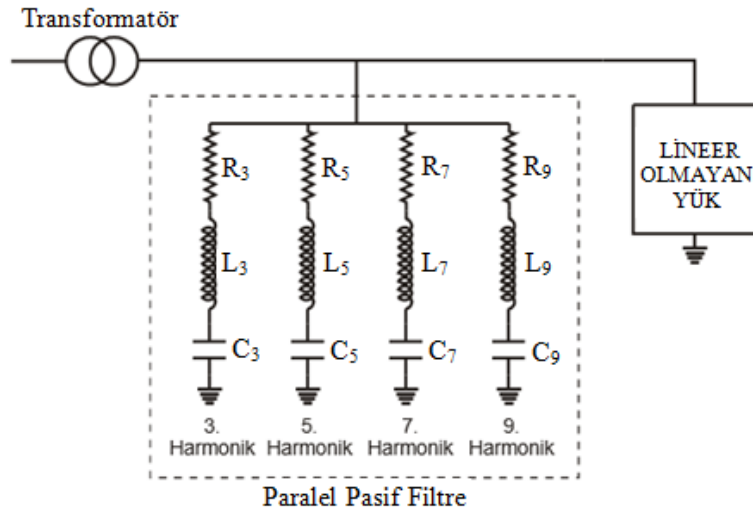


Şekil 5.1. Seri pasif filtre

Seri filtreler, AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin önlerinde kullanılır. Seri filtrelerde tüm yük akımı filtre üzerinden geçtiğinden dolayı gerilim düşümüne sebep olmaktadır. Ayrıca filtre tam hat gerilimleri için yalıtılmalıdır.

5.1.2. Paralel pasif filtreler

Paralel pasif filtreler, harmonik kaynağı ile şebeke arasına kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı gereken durumlarda direnç (R) elemanlarının paralel olarak bağlanmasından oluşan devrelerdir. Paralel pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik frekansı için rezonansa gelecek L ve C değerleri hesaplayarak bu devreyi güç sistemine bağlamaktır. Her bir harmonik frekansı için ayrı rezonans kolları oluşturularak bu kolların devreye bağlanması gerekmektedir. Ancak bu işlem genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Her harmonik bileşeni için ayrı bir rezonans kolu oluşturmak optimum bir çözüm olmayacağından sadece genlik değeri yüksek harmonik frekansları için rezonans kolu oluşturulmalıdır. Genliği yüksek olmayan harmonik frekansları için ise bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterlidir [4]. Paralel pasif filtre için örnek bir devre (tek ayarlı paralel pasif filtre) şekil 5.2’de görülmektedir.

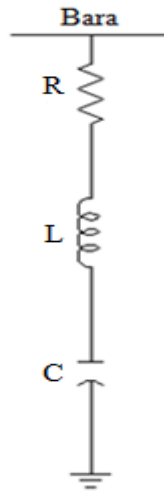


Şekil 5.2. Paralel pasif filtre (Tek ayarlı paralel pasif filtre)

Yukarıda verilen şekilde R_n , n . harmonik derecesi için rezonansa getirilen endüktans ve kapasitenin iç direncini gösterir. X_{Ln} , n . harmonik derecesi için kondansatör ile rezonansa giren endüktansı gösterir. X_{Cn} , n . harmonik derecesi için endüktans ile rezonansa giren kapasitansı gösterir. Paralel pasif filtrelerin kullanılmasının en büyük sakıncası, güç sistemiyle paralel rezonansa girebilmesidir [1]. Bu yüzden güç sistemine paralel pasif filtre uygulanmadan önce sistemin ayrıntılı bir analizinin yapılması gerekmektedir [4].

5.1.2.1. Tek ayarlı filtreler

Tek ayarlı filtreler ayarlandığı harmonik akımlarını etkin bir şekilde bastırmak için düşük bir empedans yolu olarak rol oynarlar. Düşük empedans veya kısa devre oluşturarak ayarlanan frekanstaki harmonik akımının bastırılmasını sağlarlar. Bu işlem genellikle tek bir frekans değeri için yapılır. Tek ayarlı filtreler seri RLC devresinden meydana gelmektedirler [1].



Şekil 5.3. Tek ayarlı paralel pasif filtre

Tek ayarlı filtrenin, temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarındaki filtre empedansı,

$$Z_F = R + j(X_L - X_C) \quad (5.3)$$

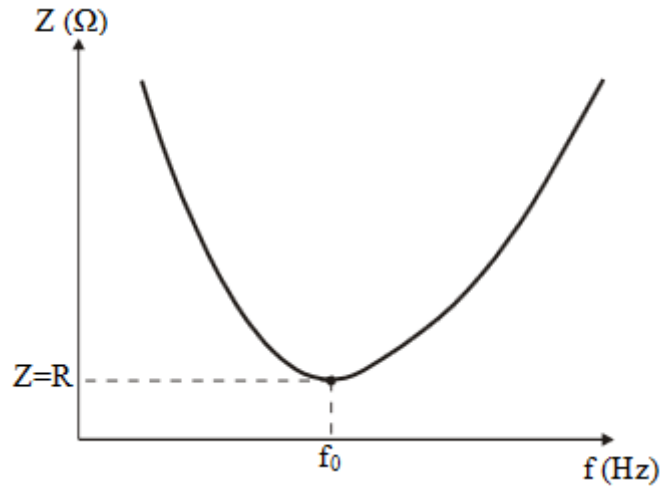
bağıntısı ile ifade edilir. Denklem (5.3)'te X_L ve X_C ifadeleri yerine yazılırsa,

$$Z_F = R + j[2pf_nL - (1/2pf_nC)] \quad (5.4)$$

ifadesi elde edilir. Tek ayarlı filtrenin çalışma prensibi, istenen harmonik frekansında filtrenin rezonansa gelerek $X_L = X_C$ şartının sağlanmasıdır. Bu durumda filtre empedansı,

$$Z_S = R \quad (5.5)$$

olarak elde edilir. Filtre, ayarlanan frekans için minimum empedans değerini gösterir ve ayarlanan frekanstaki harmonik filtre üzerinden toprağa akar. Tek ayarlı filtrenin frekans-empedans ilişkisi şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4. Tek ayarlı paralel pasif filtrenin frekans-empedans ilişkisi [4]

Yukarıda verilen bağıntılarda Z_F ; temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarında tek ayarlı filtrenin empedansını (Ω), R ; tek ayarlı filtredeki endüktans ve kapasitansın iç direncini (Ω), X_L ; tek ayarlı filtrenin endüktif reaktansını (Ω), X_C ; tek ayarlı filtrenin kapasitif reaktansını (Ω), f_n ; n. harmonikteki frekansı (Hz), L ; tek ayarlı filtrenin endüktansı (H), C ; tek ayarlı filtrenin kapasitansı (F), Z_S ; tek ayarlı filtrenin istenilen harmonikte rezonansa gelmesi sonucu oluşan empedansı (Ω), f_0 ; tek ayarlı filtrenin ayarlandığı harmonik frekansını, yani rezonans frekansını göstermektedir.

Tek ayarlı filtre seri rezonans ilkesine göre çalıştığından dolayı bu filtrelerde $X_L = X_C$ şartı aranmaktadır. Bu X_L ve X_C değerleri sisteme uygun seçilmelidir. Tek ayarlı filtreler sisteme uygulandığında filtredeki kapasite, sistemin temel frekansı ve ayarlanan harmonik frekansı dışındaki frekanslarda sistemde kompanzasyon etkisi göstereceğinden filtre değerleri hesaplanırken, filtrede kullanılacak kapasite değeri sistemin kompanzasyon ihtiyacını karşılayacak değerde belirlenmeli ve daha sonra bu değerle rezonansa gelecek endüktans değeri hesaplanmalıdır [4].

İlk olarak sistemin reaktif güç gereksinimi belirlenmelidir. Sistemin reaktif güç ihtiyacı,

$$Q = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (5.6)$$

bağıntısıyla bulunur. Verilen (5.6) denkleminde Q ; sistemin istenilen güç faktörü değerine ulaşabilmesi için sisteme bağlanması gereken kondansatör gücünü (VAr), P ; sistemin aktif gücünü (W), $\tan\varphi_1$; sistemin kompanzasyon yapılmadan önceki güç açısının tanjantını, $\tan\varphi_2$; sisteme kompanzasyon uygulandıktan sonra elde edilmek istenen güç açısının tanjantını göstermektedir.

Sistem için gerekli kompanzasyon gücü (5.6) denklemiyle hesaplandıktan sonra sisteme bağlanması gereken kondansatörün kapasitif reaktansı aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$X_T = \frac{U^2}{Q} \quad (5.7)$$

Verilen (5.7) denkleminde X_T ; sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değerini (Ω), U ; sistemin çalışma gerilimini göstermektedir.

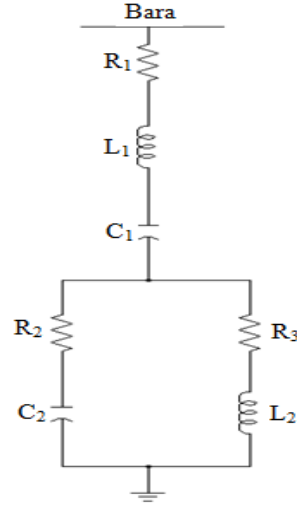
Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri hesaplandıktan sonra bu değer sistemdeki etkin harmonik derecelerine göre ayrı ayrı ayarlanan tek ayarlı filtreler, üzerlerinden akacak akımlara göre orantılı olarak dağıtılmalıdır [4]. Daha sonra her filtre kademesi için bilinen X_C değerine karşılık gelen X_L değeri filtrenin ayarlandığı harmonik frekansına göre hesap edilerek sisteme eklenmelidir. Tek ayarlı filtreye ait hesap örneği ve benzetim çalışması 6. bölümde verilmiştir.

Tek ayarlı filtrelerde sisteme sonradan eklenmiş bir direnç yoksa kayıpları çok azdır. Bu filtreler ayarlanan harmonik frekansı için harmonik akımına sifıra yakın bir empedans gösterirler. Filtre edilecek birden fazla harmonik akımı için birden fazla filtre sisteme ilave edilerek kullanılabilir.

5.1.2.2. Çift ayarlı filtreler

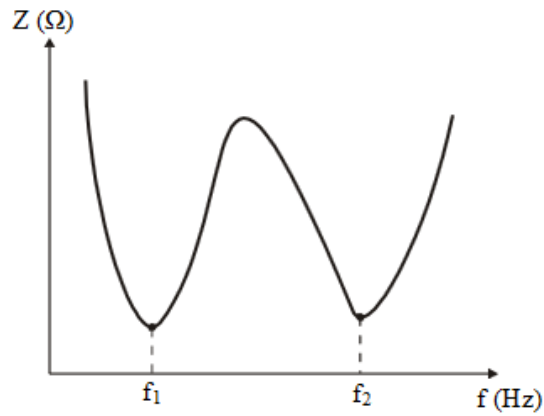
Çift ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı iki adet tek ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı ile aynıdır. Çift ayarlı filtre iki farklı harmoniğin eliminasyonunda kullanılır. Çift ayarlı filtreler, tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının

az olması bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Çift ayarlı filtre örneği şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Çift ayarlı paralel pasif filtre

Çift ayarlı filtrelerin frekans-empedans ilişkisi şekil 5.6’da verilmiştir. Çift ayarlı filtre, iki tane tek ayarlı filtrenin birleşiminden meydana geldiğinden dolayı iki farklı rezonans noktası vardır.



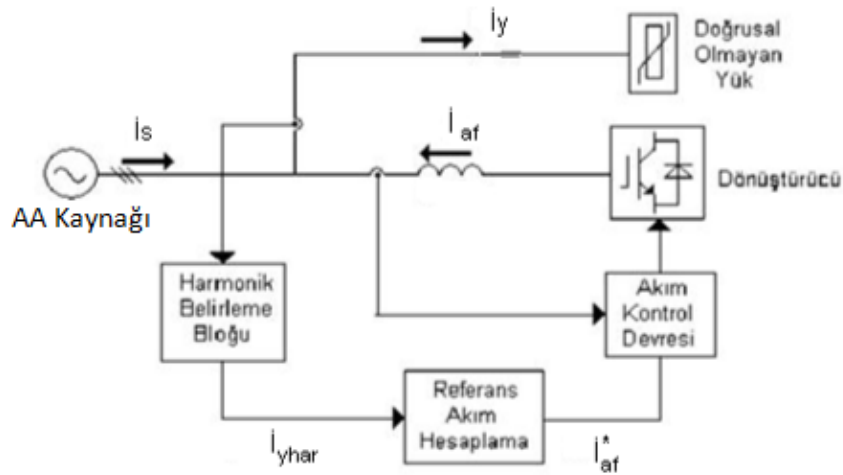
Şekil 5.6. Çift ayarlı paralel pasif filtrenin frekans-empedans ilişkisi [4]

5.2. Aktif Filtreler

Aktif güç filtreleri, doğrusal olmayan yükün ürettiği akım harmoniklerini ve/veya doğrusal olmayan kaynak geriliminin ürettiği gerilim harmoniklerini yok etmek için

güç elektroniği elemanlarının anahtarlamalarını kullanarak harmonikli yük akımına ve/veya kaynak gerilimine ters fazda fakat eşit büyüklükte harmonik akım ve/veya gerilim üreterek sisteme enjekte eden elemanlardır [20]. Başka bir deyişle aktif filtreler, güç elektroniği tabanlı ileri teknoloji kompanzasyon sistemleridir. Aktif filtrelerde, pasif devre elemanlarına (direnc, kondansatör) ilaveten transistör ve tüm devre gibi yarıiletken devre elemanları da kullanılır. Aktif güç filtreleri harmonik akım kompanzasyonunun yanında reaktif güç kompanzasyonu ve nötr akımı kompanzasyonu içinde kullanılmaktadır. Aktif filtreler pasif filtrelere göre daha pahalı olmakla birlikte aynı anda birden fazla harmonik frekansı için tasarlanabilir ve enerjinin kalitesini etkileyen sorunları ortadan kaldıracırlar [1].

Aktif güç filtreleri, etkin ve dinamik filtreleme, reaktif güç kompanzasyonu, akım ve gerilimdeki dengesizlikler, gerilim dalgalanması, gerilim kırışması gibi birçok güç kalitesi problemini ortadan kaldırırlar. Aktif güç filtresi geniş bir frekans aralığında filtre yapabildiğinden mevcut güç sisteminde değişiklikler yapıldığında bile etkili bir şekilde harmonik kompanzasyonuna devam eder. Aktif güç filtre devresi, dönüştürücü, akım denetim devresi ve harmonik belirleme bloku olmak üzere şekil 5.7’de gösterilen kısımlardan oluşmaktadır.

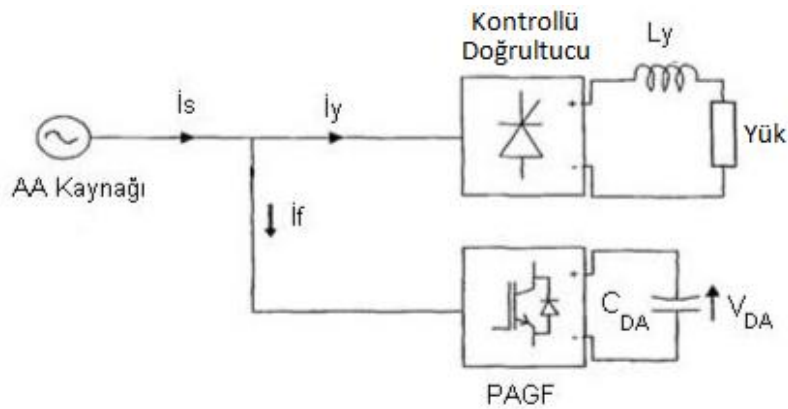


Şekil 5.7. Aktif güç filtresi blok şeması [25]

Aktif güç filtreleri topolojik yapısına göre paralel, seri ve hibrit güç kalitesi düzenleyicileri olarak 3 bölüme ayrılır.

5.2.1. Paralel aktif güç filtreleri (PAGF)

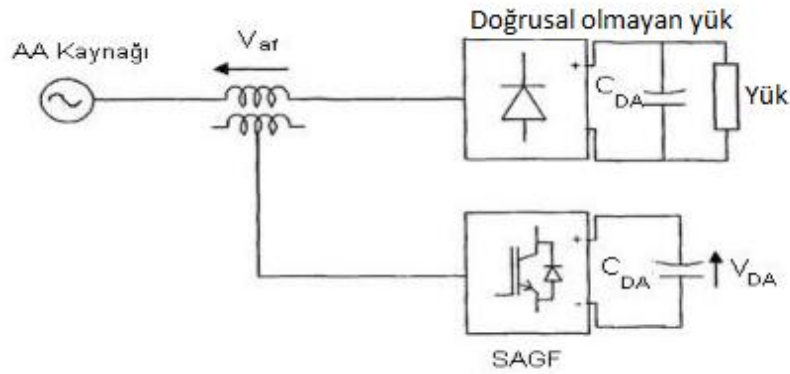
Paralel aktif güç filtreleri, yüke paralel bağlanarak yük akımının harmoniklerini yok etmek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak için sisteme ters fazda ve eşit büyüklükte akımlar verir. Böylece kaynaktan çekilen akımların dalga şekli sinüzoidal forma gelir. Aşağıda şekil 5.8’de paralel aktif güç filtresi blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Paralel aktif güç filtre blok diyagramı [25]

5.2.2. Seri aktif güç filtreleri (SAGF)

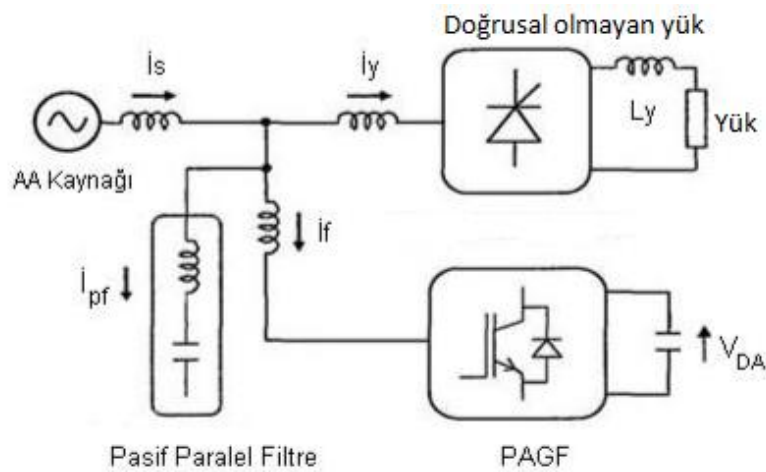
Seri aktif güç filtreleri, gerilim harmoniklerini yok etmek için sisteme ters fazda ve eşit büyüklükte harmonik gerilimler vererek sistemdeki harmonikleri ortadan kaldırırlar. Harmonik gerilim kaynağı gibi davranan doğrusal olmayan yükler için seri aktif güç filtreleri çok daha etkilidir. Seri aktif güç filtreleri şebekeye bir uyarılama trafosu ile bağlanır. Seri aktif güç filtresi gerilim kompanzasyonu (gerilim dengesizliği, düzensizliği ve regülasyonları) ile yük gerilimini dengelemek için kullanılır. Seri aktif güç filtreleri yük ile kaynak arasına seri bağlandığı için harmonik akımlarına karşı yüksek empedans gösterir [20]. Dolayısıyla kaynak ile yük arasında harmonik izolasyon meydana getirmiştir. Aşağıda şekil 5.9’da seri aktif güç filtresi blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Seri aktif güç filtre blok diyagramı [25]

5.2.3. Hibrit aktif güç filtreleri (HAGF)

Hibrit aktif-pasif güç filtreleri, aktif güç filtreleri ile paralel pasif güç filtrelerinin birlikte kullanılması ile oluşturulan filtre sistemleridir. HAGF ile özellikle 3, 5, 7, vb. düşük dereceli harmonikleri kompanse etmek için tasarlanmıştır. Bu filtreler aktif güç filtresinin maliyetini azaltmakta ve verimini yükseltmektedir [25]. Hibrit aktif güç filtresinde düşük dereceli harmonikler (5. ve 7.) PAGF ile kompanse edilirken diğer yüksek dereceli harmonikler ise paralel pasif güç filtresi ile kompanse edilmektedir [25]. Şekil 5.10'da PAGF ve paralel pasif güç filtresinden oluşan hibrit aktif güç filtresi görülmektedir.



Şekil 5.10. Hibrit aktif filtre blok diyagramı [25]

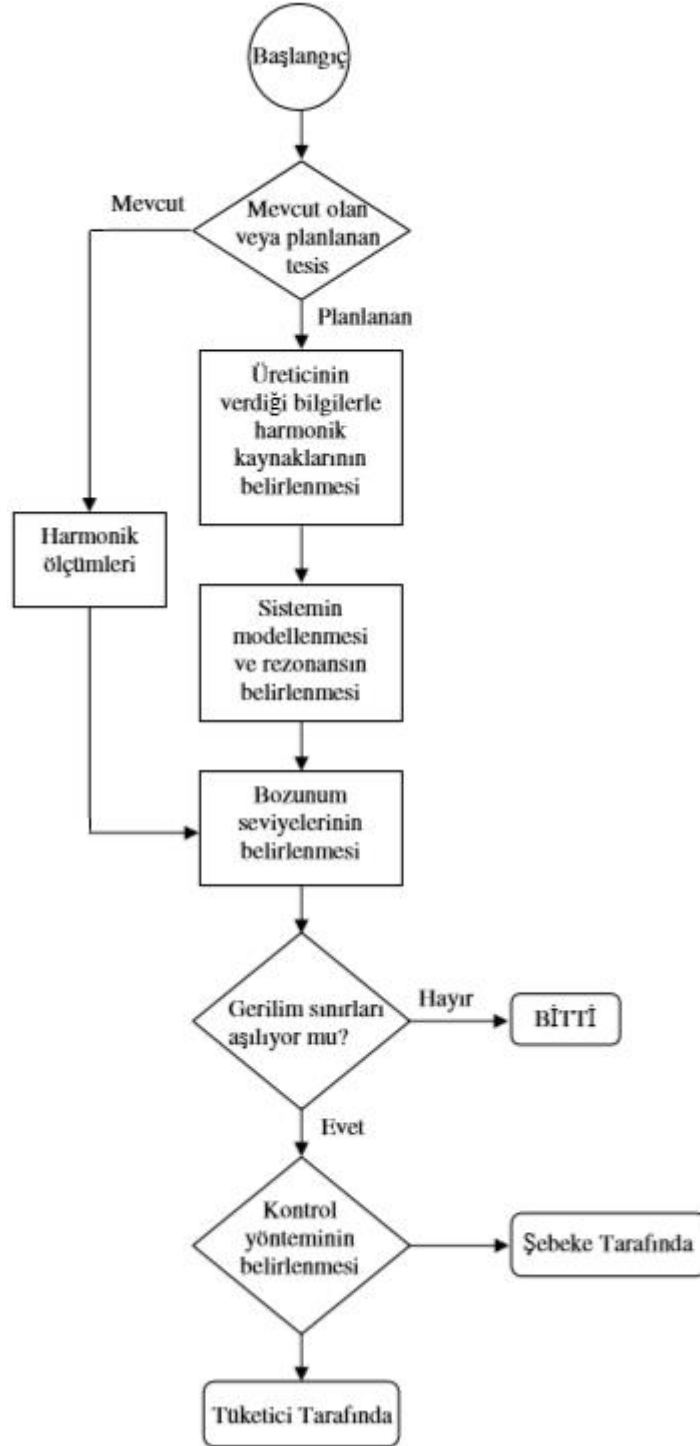
BÖLÜM 6. FİLTRE TASARIMI VE BENZETİM ÇALIŞMASI

Harmonik filtre tasarımı için enerji sisteminin yanında filtrenin kullanılacağı ortam hakkında da bilgi sahibi olmak gerekir. Bunun için sistemin nominal faz-faz gerilimi, temel frekans ve gerilimdeki izolasyon seviyeleri gibi sistem karakteristikleri ile ortam sıcaklığı, rüzgar yükü gibi ortam bilgilerinin bilinmesi gerekir. Harmonik filtre tasarımı, enerji sisteminin temel özelliklerinin yanında lokal harmonik üretimine ait bilgilerin de bilinmesini gerektirir. Bunlar; sistem konfigürasyonu, eleman empedansları, nominal ve maksimum gerilim, yükün gücü ile güç faktörü ve harmonik üretimidir. Sistemdeki yükler kurulu ise, harmonikleri belirlemek için ölçüm yapmak en doğru sonuçları sağlar; yükler kurulu değilse, üretici firma gerekli harmonik bilgilerini vermelidir [9].

Şekil 6.1’de bir dağıtım sisteminde harmoniklerden dolayı akım ve gerilimde meydana gelen bozunum seviyesinin belirlenmesi için izlenecek yöntem grafik halinde gösterilmiştir. Grafığe bakıldığında ilk olarak yeni kurulan bir tesis veya mevcut bir tesis için mi yapıldığı anlaşılmaktadır. Mevcut bir tesis için ise harmonik ölçümler yapılarak sistemin harmonik bozunumları belirlenir. Belirlenen bu değerlere göre sistemin akım ve gerilim sınırlarının aşılp aşılmadığına bakılır. Eğer sınırlar aşılmıyorsa sistem normal olarak çalışıyor demektir. Bu sınırlar aşılyorsa tüketici veya üretici tarafında uygulanacak kontrol yöntemi belirlenir.

Yeni planlanan bir tesis ise üreticinin verdiği bilgilere göre tesis için tasarlanacak olan filtre için harmonik kaynakları belirlenir. Daha sonra sistem modellenir. Daha sonra sistemin akım ve gerilim sınırlarının aşılp aşılmadığına bakılır. Eğer sınırlar aşılmıyorsa sistem normal olarak çalışıyor demektir. Bu sınırlar aşılyorsa tüketici veya üretici tarafında uygulanacak kontrol yöntemi belirlenir.

Bu yöntem hem planlama aşamasında olan hem de mevcut durumda çalışan tesisler için geçerlidir [15]. Aşağıdaki bölümlerde ise bir harmonik filtre tasarımı için yapılması gerekenler adımlar anlatılmaktadır.



Şekil 6.1. Akım ve gerilimdeki harmonik bozunumları belirleme yöntemi [3]

Harmonik filtreler, asıl görevi olan harmonikleri filtrelemenin yanında sisteme kompanzasyon için gereken ve ağır yüklerde gerilimin dengelenmesini sağlayan kapasitif reaktif gücü de verir. Bu nedenle filtre tasarımında öncelikle sistemin ihtiyaç duyduğu reaktif güç miktarı belirlenmelidir. Belirlenen bu kapasitif reaktif güç, filtrenin efektif gücünün de bilinmesini sağlar.

Sistemin kompanze edilmeden önceki güç faktörü $\cos\varphi_1 = 0,44$ olarak ölçülmüştür. Sistemde görmek istediğimiz güç faktörü $\cos\varphi_2 = 0,9995$ olarak belirlenmiştir. Sistemin aktif gücü $P = 40 \text{ kW}$ olarak verilmiştir. İlk olarak sistemin reaktif güç ihtiyacı belirlenir. Bunun için,

$$Q = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (6.1)$$

formülünden $Q = 217765,59 \text{ VAR}$ olarak hesaplanmıştır. Filtrede bulunan kondansatörlerin reaktansı, filtrenin reaktif güç değeri ile belirlenir. Buna göre istenen frekansta kondansatörle seri rezonansa girecek endüktif reaktans değeri seçilir. Böylece istenen harmoniklerin süzülmesi için düşük empedanslı bir yol sağlanmış olur. Harmonik mertebesi n olan frekansa ayarlanmış bir harmonik filtrenin kapasitif reaktansını belirlemek için aşağıdaki denklem (6.2) kullanılır.

$$X_C = \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)X_{eff} \quad (6.2)$$

denkleminde X_{eff} değeri harmonik filtrenin efektif reaktansını göstermektedir ve aşağıdaki (6.3) denklemiyle hesaplanır.

$$X_{eff} = \frac{V_{ff}^2}{Q} \quad (6.3)$$

Sistemin endüktif reaktansı ise,

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (6.4)$$

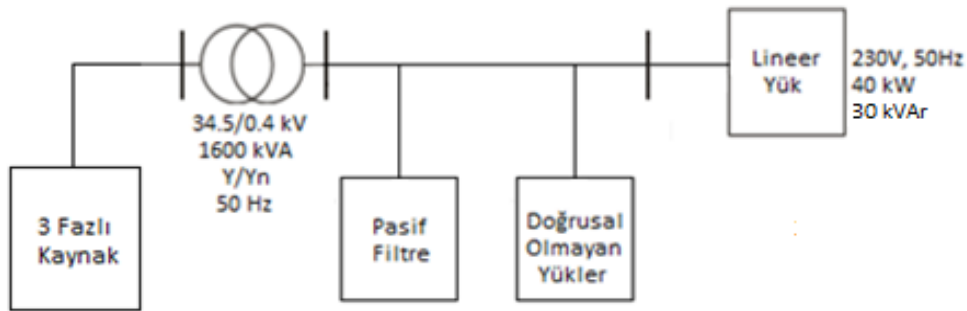
bağıntısıyla bulunur. Verilen bu denklemlerde kullanılan Q ; filtrenin gücünü, V_{ff} ; sistemin faz-faz arası nominal gerilimini, X_C ve X_L ; sırasıyla temel frekanstaki kondansatör ve reaktörün reaktansını, n ; harmonik derecesini ifade etmektedir.

6.1. Filtreye Ait Benzetim Çalışması Devreleri

Endüstriyel bir elektrik enerji sistemi üzerine, tek ayarlı (bant geçiren) pasif filtre işlemi uygulanarak sistemin bu filtreye karşı cevapları ayrı ayrı incelenmiştir. Bu inceleme; sistemin akıma ve gerilime ait FFT (Fast Fourier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) değerleri, akıma ve gerilime ait THD değerleri, sistemin güç faktöründe oluşan değişiklikler, sistemin reaktif güç ihtiyacındaki değişimler üzerinde MATLAB® Simulink® programı kullanılarak yapılmıştır.

Benzetim çalışması yapılacak filtre sistemi, şekil 6.2’de tek hat şeması ve elektriksel büyüklükleri verilen sistem üzerine uygulanmıştır. Bu sistemdeki doğrusal olmayan yükler akım kaynağı ile modellenmiştir.

6.1.1. Örnek endüstriyel sistem



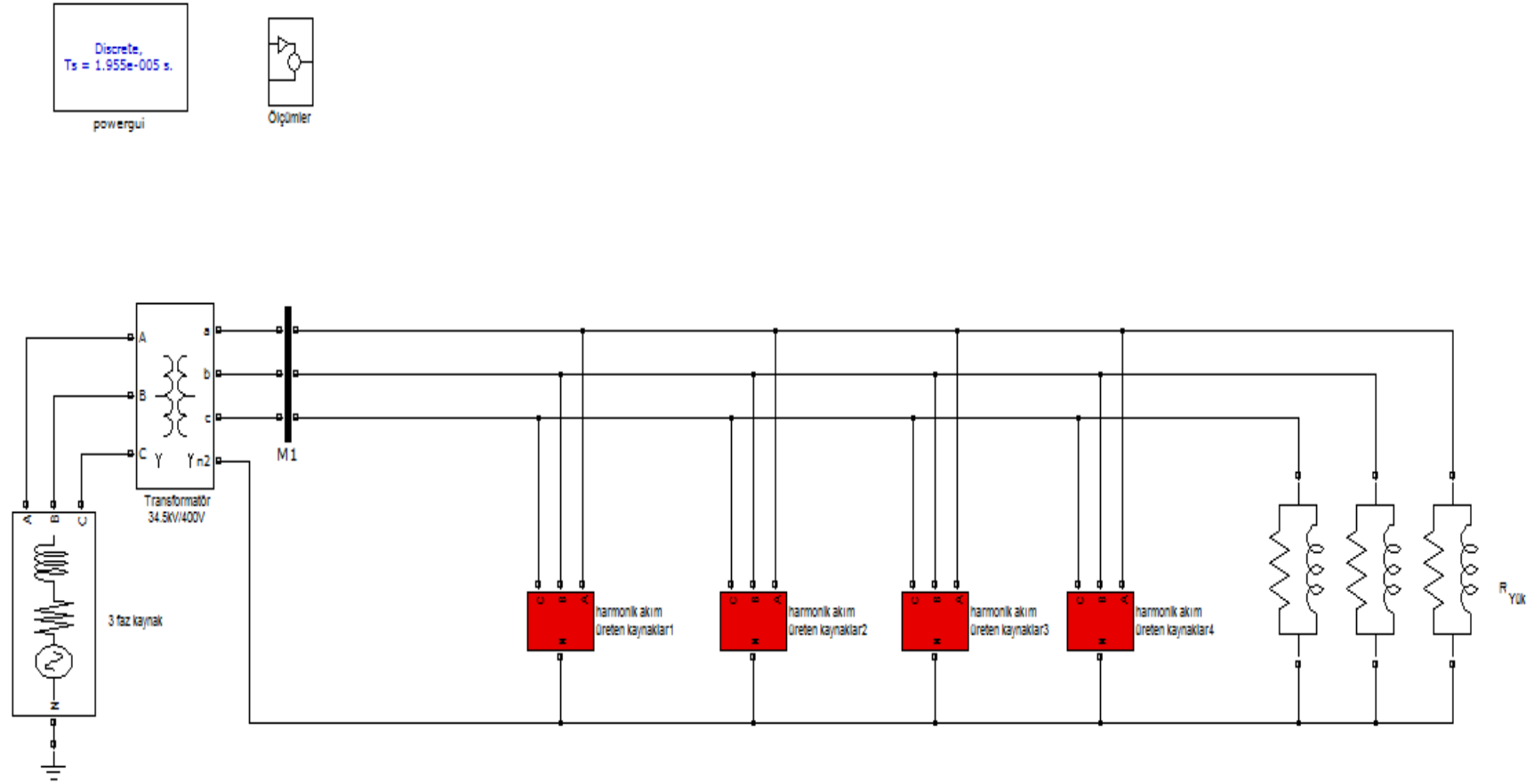
Şekil 6.2. Örnek endüstriyel enerji sistemi

Sistemde 3., 5., 7., ve 11. harmoniklerin olduğu kabul edilmiştir ve bu doğrusal olmayan yüklere ait akım genlikleri aşağıda tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Elektrik tesisindeki doğrusal olmayan yüklerle ait akım genlikleri

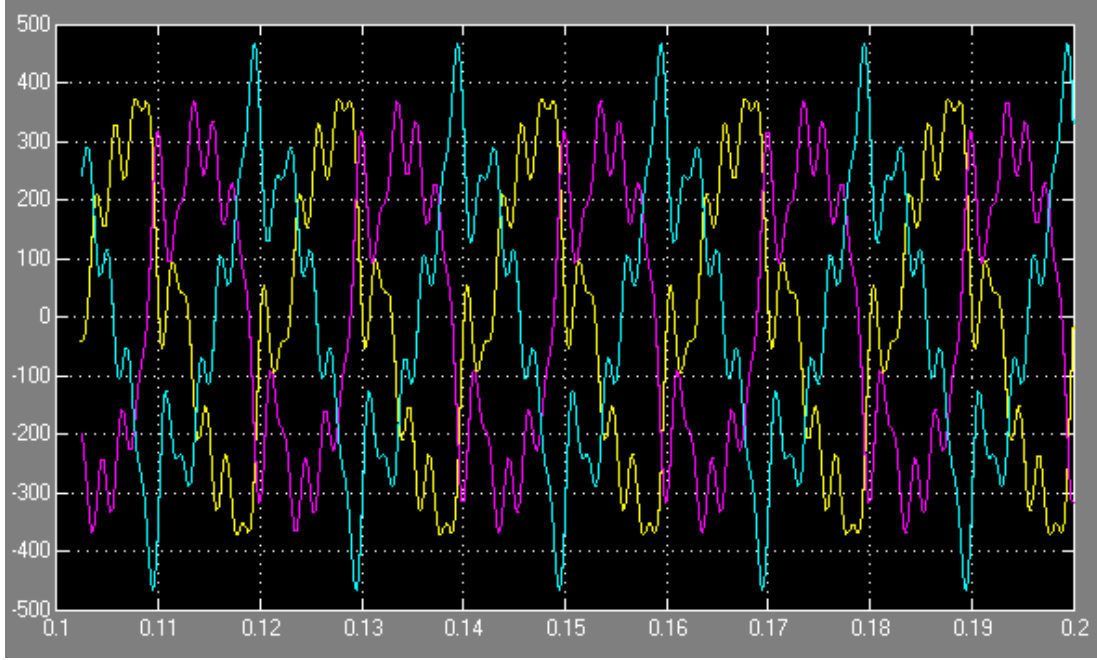
| Akımdaki Harmonik Derecesi | Genlik (A) |
|-----------------------------------|-------------------|
| I_3 | 50 |
| I_5 | 75 |
| I_7 | 50 |
| I_{11} | 50 |

Endüstriyel sisteminin MATLAB'ta hazırlanmış benzetim çalışması devresi şekil 6.3'te verilmiştir. Bu devrede, “Ölçüm Bloğu” ve “Harmonik akım üreten kaynaklar1,2,3,4” isimli bloklar birer kapalı bloktur. “Ölçüm Bloğu” isimli kapalı bloğun içerisinde gerekli olan bütün büyüklükleri (her fazın ayrı ayrı akımı ve gerilimi, akım ve gerilime ait THD büyüklükleri, akım ve gerilime ait FFT değerleri, sistemin aktif ve reaktif güç değerleri vb.) ölçmek mümkündür.

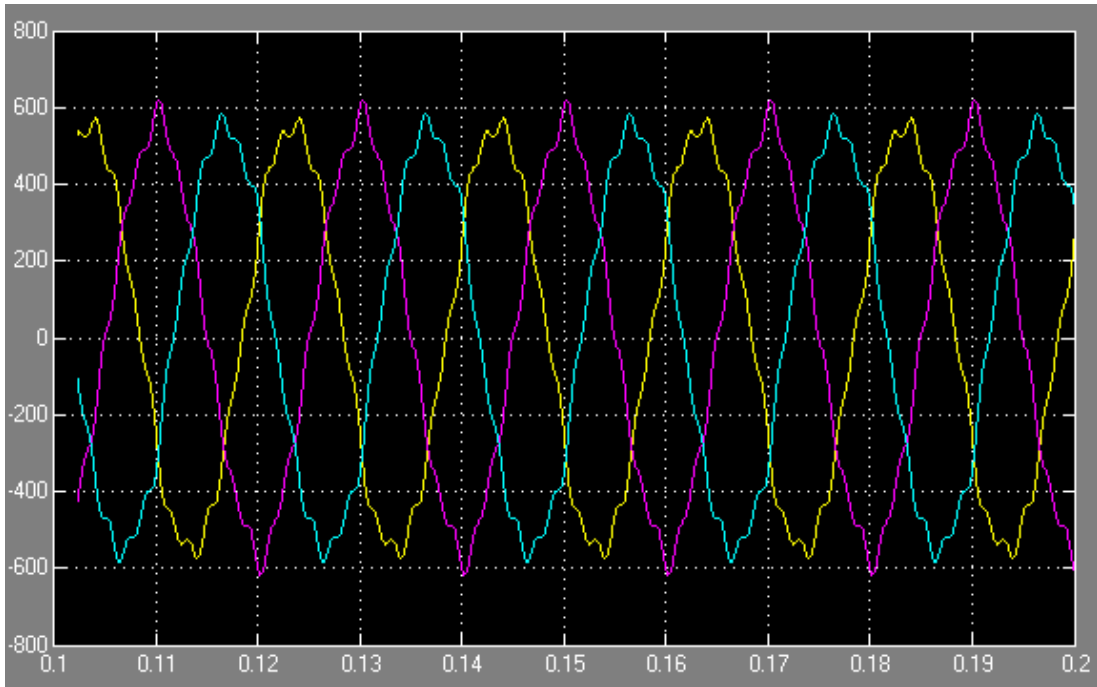


Şekil 6.3. Endüstriyel sistemin MATLAB programındaki filtresiz benzetim çalışması

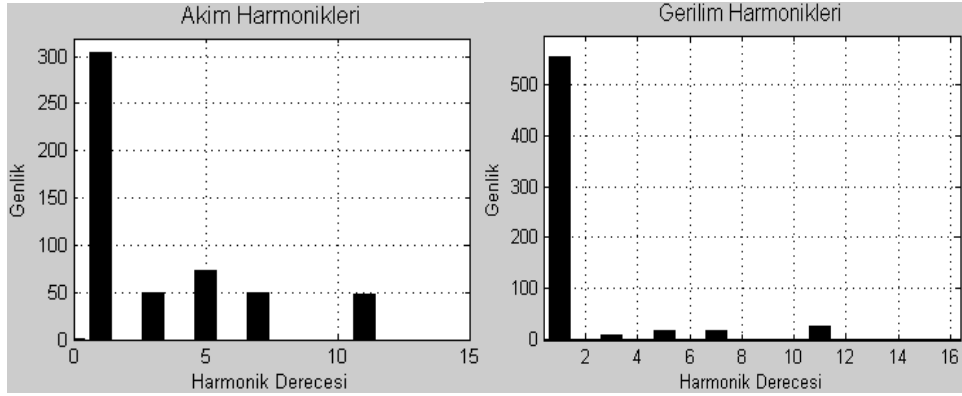
Sisteme filtre uygulanmadan önce sistemin akım dalga değişimi Şekil 6.4'te, gerilim dalga değişimi Şekil 6.5'da, filtresiz sistemin akım ve gerilim için harmoniklerin dereceleri Şekil 6.6'de ve filtresiz sistemin akım ve gerilimdeki FFT değerleri Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



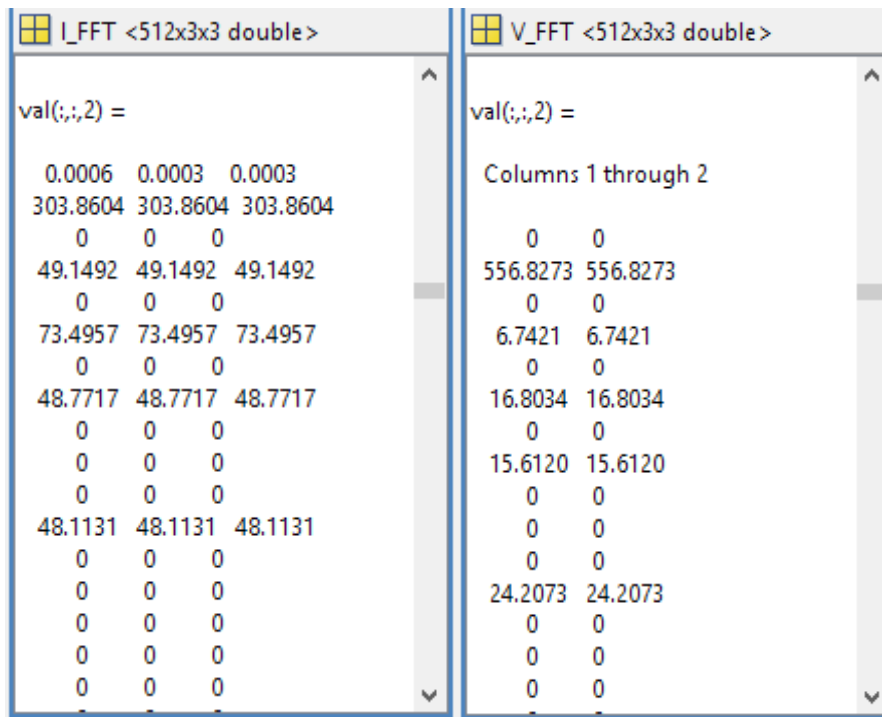
Şekil 6.4. Filtresiz sistemin akım dalga değişimi



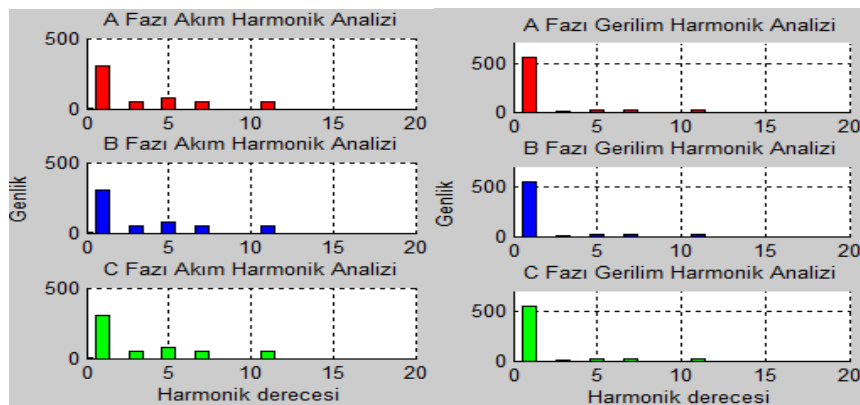
Şekil 6.5. Filtresiz sistemin gerilim dalga değişimi



Şekil 6.6. Filtresiz sistemin akım ve gerilim harmonik dereceleri

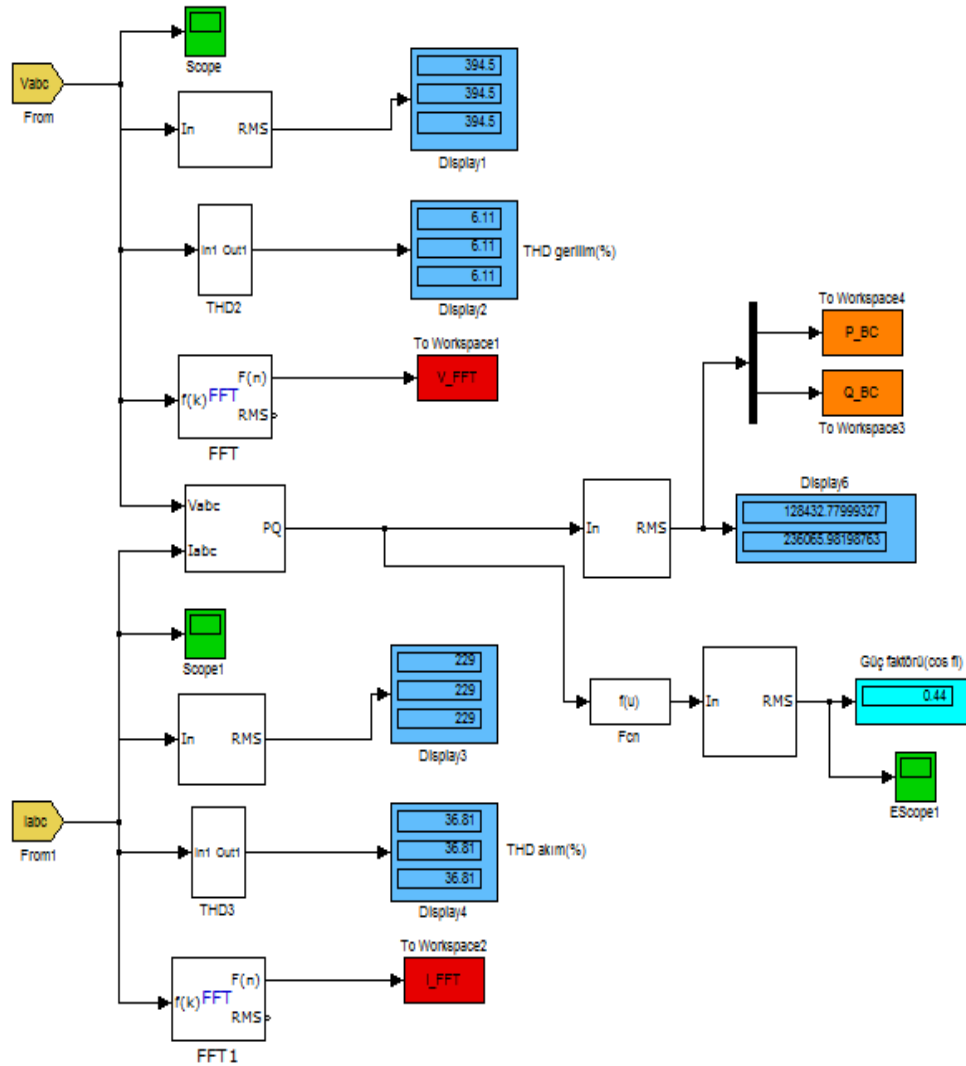


Şekil 6.7. Filtreleme öncesi akım ve gerilimdeki FFT değerleri



Şekil 6.8. Filtreleme öncesi her bir fazın ayrı ayrı akım ve gerilim harmonik analizi

Sisteme filtre uygulanmadan önce sistemin güç faktörü ($\cos\varphi$), akım ve gerilime ait THD (%) değerleri, aktif ve reaktif güç değerleri şekil 6.9 ve tablo 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Filtresiz sistemin güç faktörü ve THD değerleri

Tablo 6.2. Filtreleme öncesi sistem değerleri

| Gerilim (V) | THD _V (%) | Akım (A) | THD _I (%) | $\cos(\varphi)$ | P (kW) | Q (kVAr) |
|----------------|----------------------|-------------|----------------------|-----------------|-----------|-------------|
| 394,5 | 6,11 | 229 | 36,81 | 0,44 | 128,43 | 236,065 |

Şekil 6.9’da sistemin güç faktörü, akım ve gerilime ait THD değerleri görülmektedir. Buna göre sistemin güç faktörü 0,44, akımdaki THD değeri % 36,81, gerilimdeki THD değeri ise % 6,11 olarak görülmektedir. Uluslararası IEC 519-1992’ye göre standartlar

içinde kabul edilen harmonik bozulma değerleri (THD), gerilim için %3, akım için %5 olarak belirlenmiştir [10]. Bu limit değerlerinin üzerinde bulunan harmonik oranlarında, elektrik sistemleri için tehlikeli ve büyük maddi zararlar oluşturabilecek problemler meydana gelmektedir. Elektrik enerji kalitesinin bozulma oranının tespiti için standartlarla belirlenmiş olan bazı bağıntılar kullanılabilir. Bu kabul edilebilir sınırların oldukça üstündedir. Bu sebepten sisteme filtre uygulanarak THD seviyelerinin istenilen seviyeye getirilmesi ve güç faktörünün iyileştirilmesi gerekmektedir.

6.1.2. Endüstriyel sisteme tek ayarlı pasif filtrenin uygulanması

Şekil 6.3'te benzetim çalışması hazırlanan sisteme tek ayarlı pasif filtre uygulanarak sistemin bu etkiye olan cevabı incelenecektir. Bu filtre uygulanırken filtre içinde kullanılan kapasite elemanlarının, sisteme gerekli olan kompanzasyon gücünü de karşılaması gerekmektedir.

Sistemin mevcut güç katsayısı 0,44 olup bu değeri 0,9995'e çıkartabilmek için gerekli olan kondansatör gücü 217,7656 kVAr olarak hesaplanmıştır. Bu değer, standart kondansatör güç değerleri göz önüne alındığından bundan sonraki hesaplamalarda 220 kVAr olarak alınmıştır. Bu reaktif güç değerine göre sisteme bağlanması gereken kondansatörlerin kapasitif reaktansları 0,541 Ω olarak bulunur. Buradan sisteme bağlanacak toplam kapasite değeri ise 1,6791 mF olarak hesaplanır.

Örnek alınan endüstriyel sistemde, 3., 5., 7. ve 11. harmonikler etkin genlik değerlerine sahip olduklarından bu harmonikler tasarlanan filtre yardımıyla süzülecektir. Her bir harmonik derecesi için R, L ve C elemanlarından oluşan paralel kollar tasarlanacaktır. Ancak her harmonik derecesinin genlik değeri farklı olduğundan her bir paralel kol, tasarlandığı harmonik derecesinin genlik değerindeki akımı taşıyabilecek kapasitede tasarlanmalıdır. Bu sebepten sisteme bağlanması gereken toplam C değerinin kollara paylaşılması gerekmektedir [15]. Bunun için,

$$C_n = C \frac{I_n}{I_T} \quad (6.5)$$

denklemini kullanılmaktadır. Bu denklemde C_n ; n . harmoniği elimine edecek paralel kolun kapasitesini (F), C ; sisteme bağlanacak toplam kapasite değerini (F), I_n ; n . harmonik akımının genlik değerini (A), I_T ; sistemdeki bütün harmonik akımların toplamını (A) göstermektedir.

Denklem (6.5) kullanılarak yapılan hesaplara göre sisteme bağlanması gereken her bir koldaki kapasite değerleri aşağıdaki tablo 6.3'te gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Sisteme bağlanacak her bir paralel kolun kapasite değerleri

| C_3 (F) | C_5 (F) | C_7 (F) | C_{11} (F) |
|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 0,001017 | 0,000344 | 0,000186 | 0,000122 |

Paralel kollar için hesaplanan kapasite değerleri ve paralel kolların ayar edilmek istendiği harmonik derecesinin frekansı referans alınarak kolların endüktans değerleri,

$$L_n = \frac{1}{4\pi^2 f_n^2 C_n} \quad (6.6)$$

formülüne göre hesaplanır [9]. Bu bağıntıda L_n ; n . harmoniği elimine edecek paralel kolun endüktansını (H), f_n ; n . harmoniğin frekansını (Hz), C_n ; n . harmoniği elimine edecek paralel kolun kapasitesini (F) göstermektedir. Denklem (6.6) kullanılarak yapılan hesaplamalara göre sisteme bağlanacak her bir paralel kolun endüktans değerleri tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Sisteme bağlanacak her bir paralel kolun endüktans değerleri

| L_3 (H) | L_5 (H) | L_7 (H) | L_{11} (H) |
|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 0,001107 | 0,001178 | 0,001114 | 0,000688 |

Sisteme bağlanması gereken dirençlerin değerleri ayarlama keskinliğinin ölçüsü olan kalite faktörüne (Q) bağlıdır. Matematiksel olarak kalite faktörü,

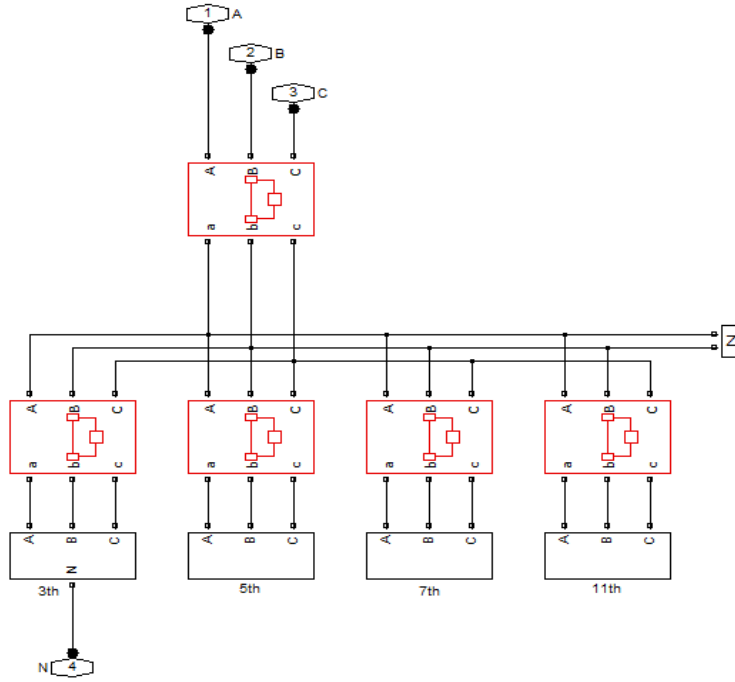
$$Q = \frac{\sqrt{LC}}{R} \quad (6.7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [9]. Bu direnç değeri, $60 < Q < 100$ aralığında kalite faktörüne uygun bir değer seçilerek elde edilebilir. Bu aralıktan kalite faktörü 70 alınarak direnç değeri bulunur. Denklem (6.7) kullanılarak yapılan hesaplamalara göre sisteme bağlanacak her bir paralel kolun direnç değeri tablo 6.5'te verilmiştir.

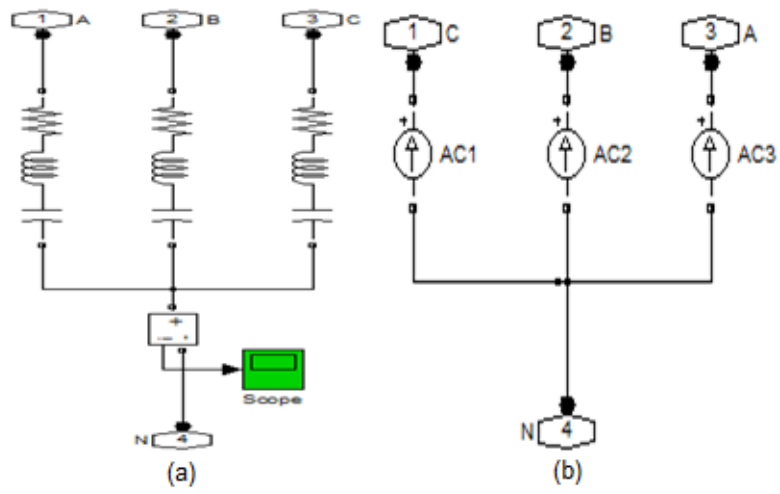
Tablo 6.5. Sisteme bağlanacak her bir paralel kolun direnç değeri

| R_3 (Ω) | R_5 (Ω) | R_7 (Ω) | R_{11} (Ω) |
|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 0,014908 | 0,026425 | 0,035004 | 0,033949 |

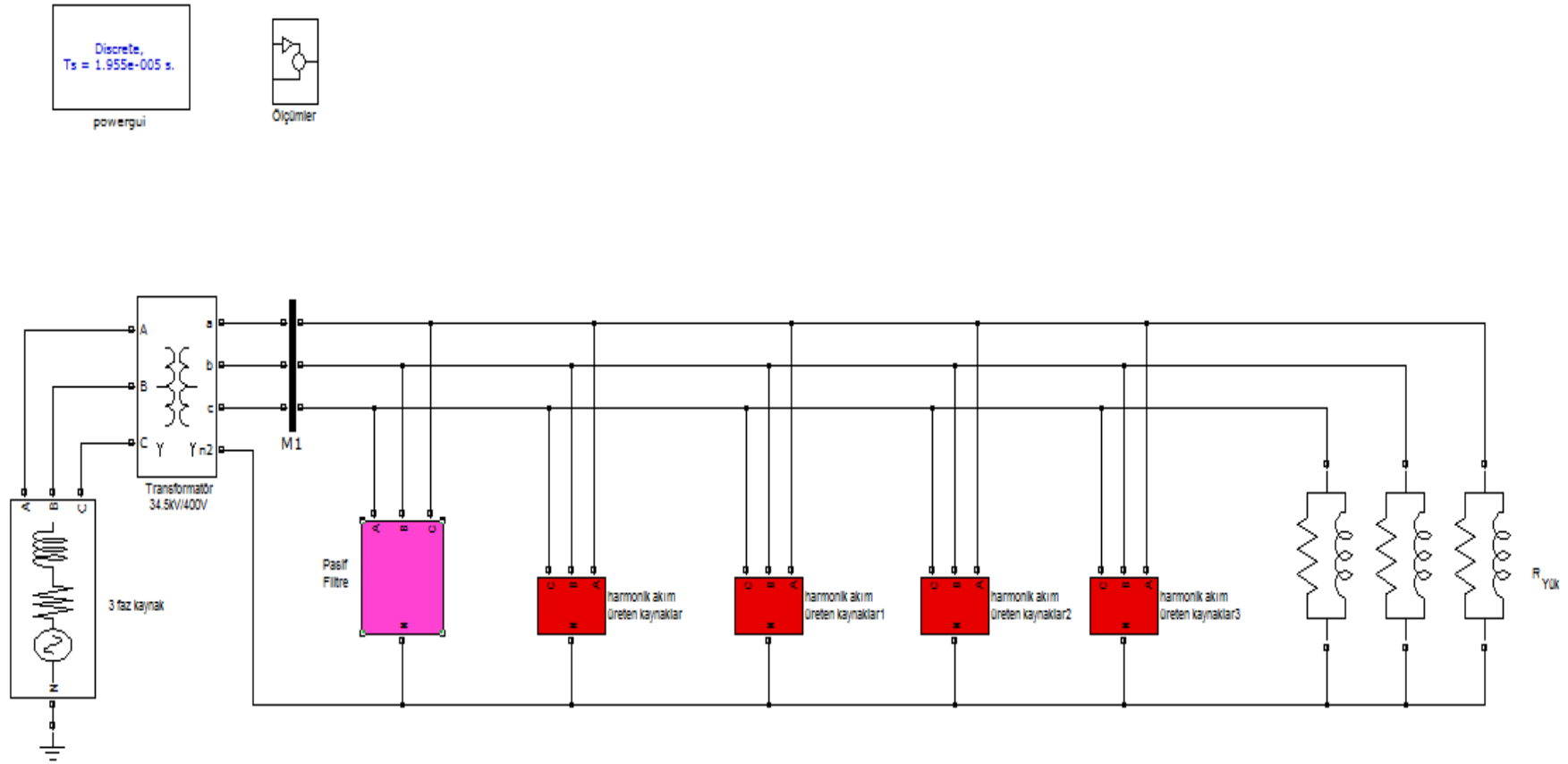
Her paralel kol için hesaplanan R, L ve C değerlerine göre oluşturulan filtreler ve bu filtrelerin MATLAB'ta hazırlanan bağlantı şeması devresi şekil 6.10'da görülmektedir. Sistemdeki 3. ve 5. harmonik filtreleri için tasarlanan bağlantı şeması da şekil 6.11'de görülmektedir.



Şekil 6.10. Filtrelerin bağlantı şeması

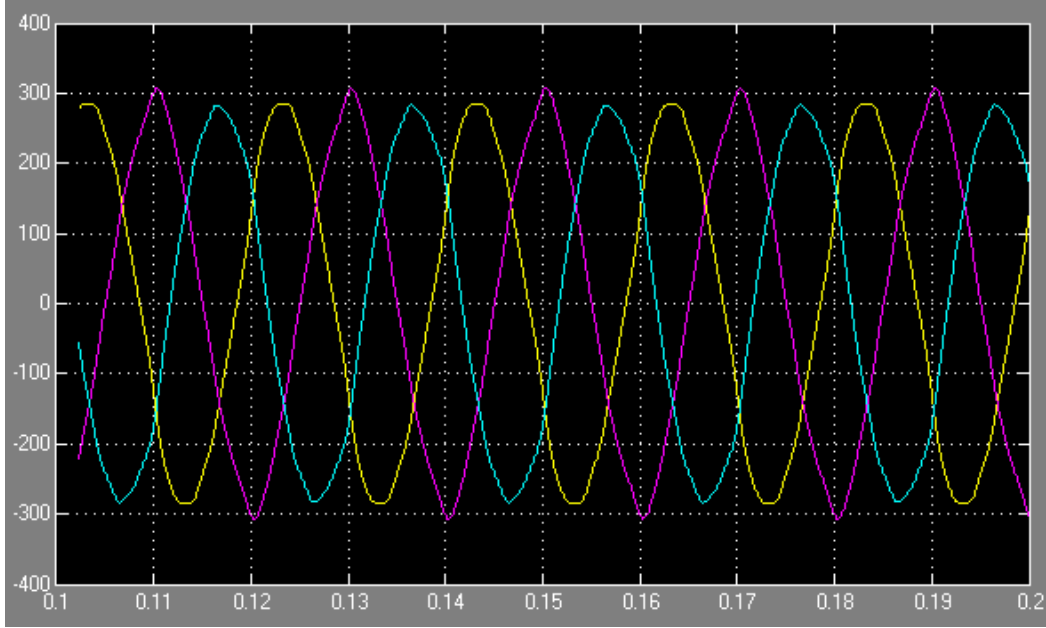


Şekil 6.11. 3. harmonik filtre(a) ve 3. harmonik üreten kaynaklar(b) bağlantı şeması

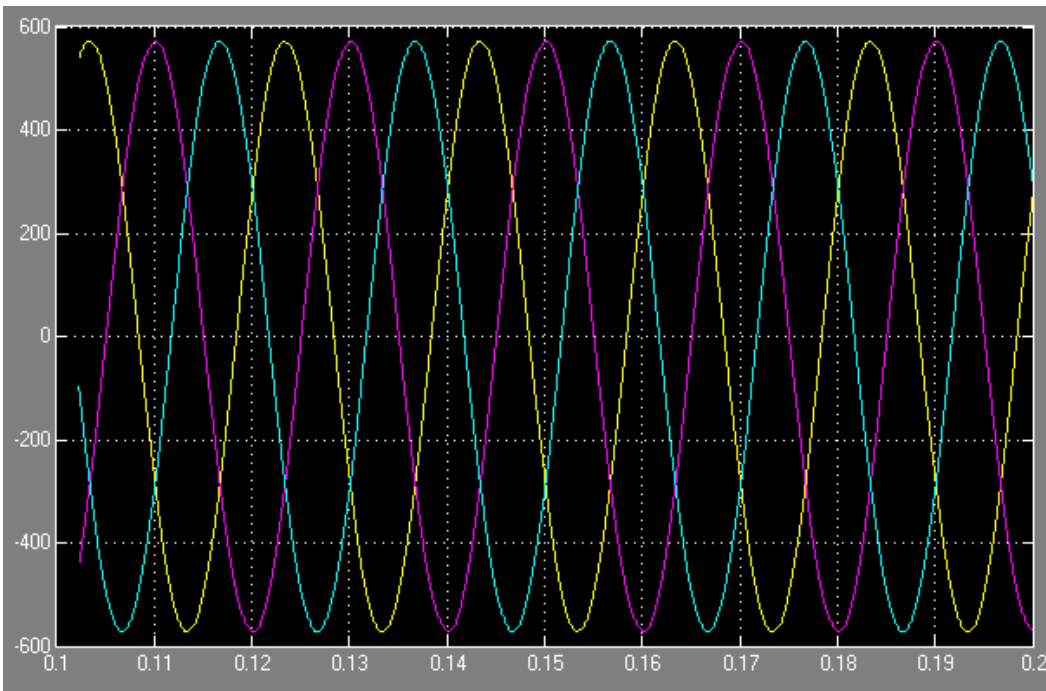


Şekil 6.12. Endüstriyel sistemin MATLAB programındaki filtreli benzetim çalışması

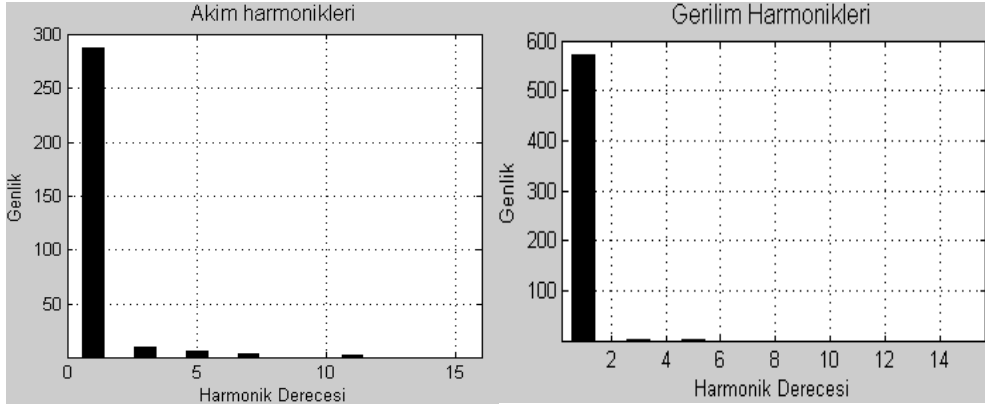
Şekil 6.12'deki endüstriyel sisteme ait filtreli benzetim çalışması devresinin çalıştırılması sonucunda sistemin akım dalga değişimi şekil 6.13'te, gerilim dalga değişimi şekil 6.14'te, filtreli sistemin akım ve gerilim için harmoniklerin dereceleri şekil 6.15'te, filtreli sistemin akım ve gerilimdeki FFT değerleri şekil 6.16'da gösterilmiştir.



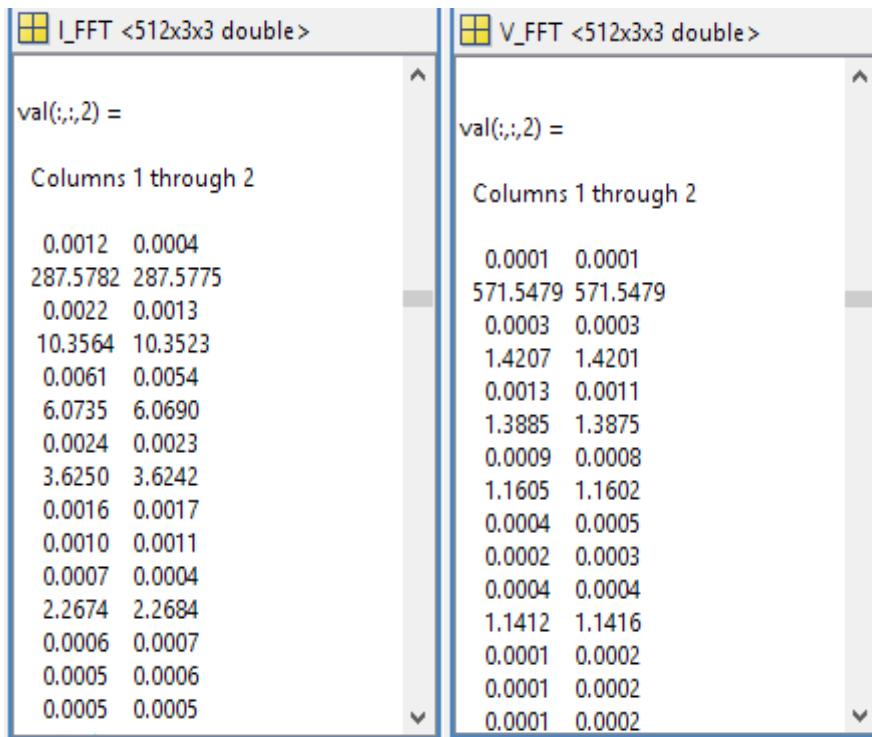
Şekil 6.13. Filtreli sistemin akım dalga değişimi



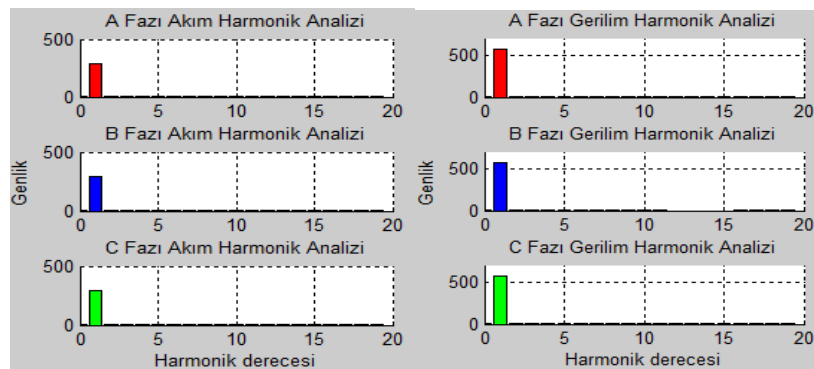
Şekil 6.14. Filtreli sistemin gerilim dalga değişimi



Şekil 6.15. Filtreli sistemin akım ve gerilim harmonik dereceleri

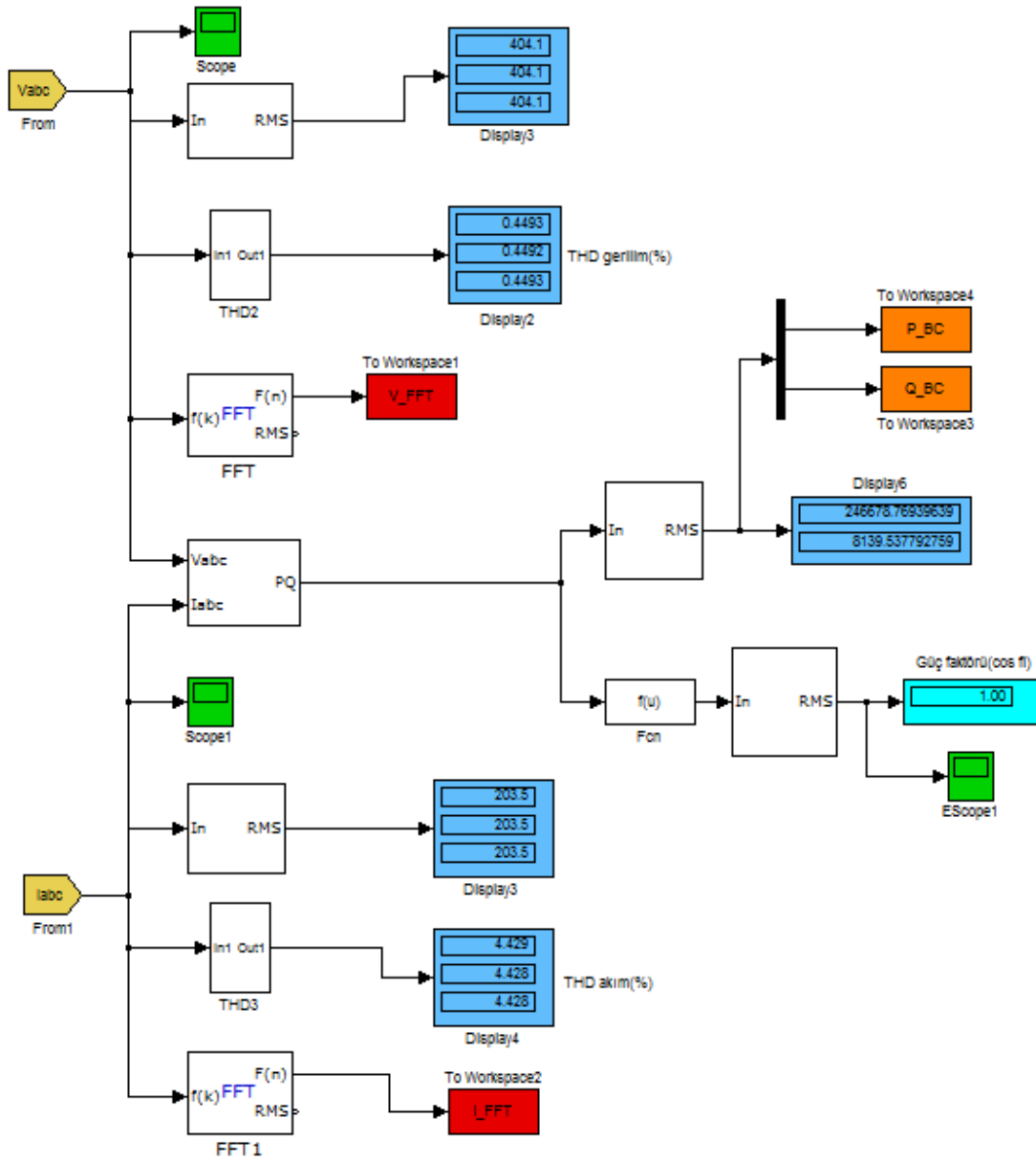


Şekil 6.16. Filtreleme sonrası akım ve gerilimdeki FFT değerleri



Şekil 6.17. Filtreleme sonrası her bir fazın ayrı ayrı akım ve gerilim harmonik analizi

Sisteme filtre uygulandıktan sonra sistemin güç faktörü ($\cos\varphi$), akım ve gerilime ait THD (%) değerleri, aktif ve reaktif güç değerleri şekil 6.18 ve tablo 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.18. Filtreli sistemin güç faktörü ve THD değerleri

Tablo 6.6. Filtreleme sonrası sistem değerleri

| Gerilim (V) | THD _v (%) | Akım (A) | THD _i (%) | $\cos(\varphi)$ | P (kW) | Q (kVAr) |
|----------------|----------------------|-------------|----------------------|-----------------|-----------|-------------|
| 404,1 | 0,4493 | 203,5 | 4,428 | 0,9995 | 246,678 | 8,139 |

Tek ayarlı filtre uygulanmadan önce akımdaki THD değeri %36,81 iken tek ayarlı filtre uygulandıktan sonra bu değer %4,228 değerine düşmüştür. Gerilimin THD değeri ise %6,11 değerinden %0,4493 değerine düşmüştür. Akım ve gerilimde elde edilen bu THD değerleri kabul edilebilir seviyededir. Buradan görülmektedir ki her bir harmonik derecesi için ayarlanan paralel kollar, ayar edildikleri frekanslarda elemanların iç dirençleri ihmal edilirse sıfıra yakın empedans göstermişlerdir. Bununla beraber filtre uygulanmayan harmonik genliklerinin de filtresiz sisteme göre azaldığı gözlenmektedir. Tek ayarlı filtrenin temel frekansta yaptığı kompanzasyon etkisi şekil 6.9 ve şekil 6.18'de net bir biçimde görülmektedir. Filtresiz sistemde akım değeri 303,8604 A iken filtreler uygulandıktan sonra bu değer 287,5782 A olmaktadır. Kompanzasyonla beraber beklenildiği gibi akımın azaldığı görülmektedir. Sistemin reaktif güç değeri filtrelemeden önce 236,065 kVAr iken filtrelemeden sonra bu değer 8,139 kVAr'a düşmüştür. Gerilimin etkin değerinin ise 556,8273 V değerinden 571,5479 V değerine yükseldiği görülmektedir. Bununla beraber filtresiz sistemde 0,44 olan güç faktörü değeri artarak 0,9995 olmuştur. Sisteme filtreler eklendiğinde akım ve gerilim harmonik genlikleri giderek azaldığı şekil 6.6 ve şekil 6.15'te görülmektedir. Sistemin filtreleme öncesi ve sonrası elde edilen değerler tablo 6.7'de birlikte verilmiştir.

Tablo 6.7. Filtreleme öncesi ve sonrası sistem değerleri

| | Gerilim (V) | THD_v(%) | Akım (A) | THD_i(%) | cosφ | P (kW) | Q (kVAr) |
|-------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|-------------|-------------------|---------------------|
| Filtreleme Öncesi | 394,5 | 6,11 | 229 | 36,81 | 0,44 | 128,43 | 236,065 |
| Filtreleme Sonrası | 404,1 | 0,4493 | 203,5 | 4,428 | 0,9995 | 246,678 | 8,139 |

BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Güç elektroniği elemanlarının gelişmesi ile birlikte bozulma oluşturan veya bozulmalardan etkilenen yüklerin daha yaygın kullanılmaya başlanması, kullanıcılar için her geçen gün daha fazla kayıp ve hasara yola açan güç kalitesi problemlerinin üzerinde daha titizlikle durulması gerekliliğini doğurmuştur.

Elektrik tesislerindeki harmonikler, sinüzoidal bir kaynağa doğrusal olmayan bir yükün bağlanmasıyla veya sinüzoidal olmayan bir kaynağa doğrusal ya da doğrusal olmayan bir yükün bağlanmasıyla meydana gelmektedir. Enerjinin kalitesini önemli ölçüde etkileyen ve sistemde bulunan birçok olumsuz etkiye neden olan harmoniklerin etkilerinin ortadan kaldırılabilmesi için öncelikle sisteme zarar veren bu harmoniklerin tespit edilip gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada güç kalitesini arttırmak amacıyla endüstriyel bir güç sistemi için reaktif güç kompanzasyonu, harmonik analizi ve eliminasyonu, tek ayarlı pasif filtre tasarımı ve MATLAB ortamında benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir.

Sistemde üç fazlı nonlinear ve linear yüklerden oluşan sistemde akım harmonikleri ve bağlantı noktalarındaki gerilim hızlı fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak tespit edilmiştir. Tasarlanan tek ayarlı filtreler sisteme uygulanmıştır. Filtreleme işleminin sonucunda filtre uygulanmayan harmonik genliklerinin de azaldığı görülmüştür. Filtrelerin uygulanması ile akım ve gerilimdeki THD değerleri kabul edilebilir seviyelere gelmiştir. Güç faktöründeki düzelme de sistemin reaktif güç kompanzasyonunun da yapıldığını göstermektedir. Tasarlanan filtre ile hem sistemde oluşan harmoniklerin eliminasyonu hem de reaktif güç kompanzasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] KOCATEPE, C., UZUNOĞLU, M., YUMURTACI, R., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, pp. 6.1-7.2, 13.2-13.5-13.7, İstanbul, 2003.
- [2] BAYRAM, M., Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu. Birsen Yayınevi, İstanbul, 254s., 2000.
- [3] ENGİN, B., Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü. İstanbul. 16-19, 2008.
- [4] SUCU, M., Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 2-5, 9-12, 28-30, 33-34, 2003.
- [5] ARİFOĞLU, U., Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi. Alfa Yayınları, İstanbul, 464s., 2002.
- [6] ŞEKKELİ, M., Hassas Bir Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Gerekli Güçlerin Hesabında Temel Bileşenlerin Kullanılması, KSÜ, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 2006.
- [7] ŞENYURT, Ö., Elektrik Tesislerinde Hızlı Fourier Dönüşümü ile Harmonik Analizinin Yapılması. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara. 32-57, 2006.
- [8] ÇORAPSIZ, M.H., Pasif Harmonik Filtrelemede Pratik Yaklaşımlar, 3E Dergisi , Sayı116: 104-106, 2004.
- [9] YOUSİF SNAL, WANİK MZC, MOHAMED A. Implementation of different passive filter designs for harmonic mitigation. Power and Energy Conference 229-34, 2004.
- [10] TUĞ, L., YAVUZ, C., Alçak Gerilimde Aktif Filtre ile Akım Harmoniklerinin Etkisinin Azaltılması, A(12): 618-626, 2013.
- [11] P.P. WIN, Harmonic Mitigation Techniques in Industrial Power System, GMSARN International Conference on Sustainable Development. Issues and Prospects for the GMS 12-14 Nov, 2008.

- [12] HEATH, M.H. Parallel Numerical Algorithms-Fast Fourier Transform, Illinois University, 16-18, 2004.
- [13] SEVGİ L., EMC, Güç Kalitesi ve Harmonik Analizi, Endüstriyel Otomasyon Dergisi , Sayı 100, 4-6, 2005.
- [14] ADAK, S., Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyunun Azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 21- 25, İstanbul, 2003.
- [15] AY, S., Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri ve Filtre Tasarımı, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:95, Kasım-Aralık, 1996.
- [16] ERSAMUT, R., Statik VAR Kompanzasyonu Sistemlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 9-12, (2009).
- [17] TUNÇALP, K., SUCU, M., Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinde Pasif Filtre ve Filtreli Kompanzasyonun Kullanımı ve Simülasyon Örnekleri, Politeknik Dergisi, Cilt: 9 Sayı: 4 s.263-269,2006.
- [18] Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği Ve Kalitesi Yönetmeliği, T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2010.
- [19] GÜLER, Ö., Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Sakıncaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1995.
- [20] BOZABALI, M., Üç Fazlı Sistemlerde Paralel Aktif Güç Filtre tasarımı ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009.
- [21] ŞENYURT, Ö., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Yüksek Lisans Semineri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 19-24, 2005.
- [22] KARA, A., YALÇINÖZ T. Esnek AC İletim Sistemlerinde Kullanılan Cihazlar ve TCR, SVC, TSR Yapılı Paralel Kompanzatorlerin Yük Gerilimine Etkisinin Matlab Ortamında İncelenmesi. II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul. (2005).

EKLER

Şekil 2.3. grafik çizdirme komutları;

```

N=input('N sayısını giriniz:'); %Harmonik derecesi
M=input('M sayısını giriniz:'); %Harmonik derecesi
K=input('K sayısını giriniz:'); %Harmonik derecesi
wo = pi; c0 = 0;
t = -1:0.01:2;
clf; %Şekil penceresinin içeriğini sıfırla
figure(1)
yt = 0; %Döngü başlangıç değeri
for n = 1:2:N
    cn = 2/(j*n*wo);
    yt = yt + 2*abs(cn)*cos(n*wo*t+angle(cn));
end
subplot(3,1,1);
hold on; plot(t,yt); grid on; ylabel('Genlik');
deger = ['Sinüzoidal olmayan dalga şekli (5. harmonik) =', num2str(N)];
title(deger); hold on;

yt = 0; %Döngü başlangıç değeri
for n = 1:2:M
    cn = 2/(j*n*wo);
    yt = yt + 2*abs(cn)*cos(n*wo*t+angle(cn));
end
subplot(3,1,2);
hold on; plot(t,yt); grid on; xlabel('zaman(s)'); ylabel('Genlik');
deger = ['Sinüzoidal olmayan dalga şekli (7. Harmonik) =', num2str(M)];
title(deger); hold on;

yt = 0; %Döngü başlangıç değeri
for n = 1:2:K
    cn = 2/(j*n*wo);
    yt = yt + 2*abs(cn)*cos(n*wo*t+angle(cn));
end
subplot(3,1,3);
hold on; plot(t,yt); grid on; xlabel('zaman(s)'); ylabel('Genlik');
deger = ['Sinüzoidal olmayan dalga şekli (11. Harmonik) =', num2str(K)];
title(deger); hold on;

```

ÖZGEÇMİŞ

Zeynel Baş, 20.01.1989'da Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2005 yılında Adapazarı Atatürk Lisesi'nden mezun oldu. 2007 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünü 2012 yılında bölüm 1.si olarak bitirdi. Şu anda Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.