

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA TRANSFORMATÖR  
YÜKLENME KAPASİTESİNİ MAKSİMİZE ETMEK İÇİN  
PASİF HARMONİK FİLTRE TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EMİNE HÜMEYRA DEMİRCİOĞLU**

**BALIKESİR, EYLÜL - 2018**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA TRANSFORMATÖR  
YÜKLENME KAPASİTESİNİ MAKSİMİZE ETMEK İÇİN  
PASİF HARMONİK FİLTRE TASARIMI**

**YÜKSEK LISANS TEZİ**

**EMİNE HÜMEYRA DEMİRCİOĞLU**

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Murat Erhan BALCI (Tez Danışmanı)**

**Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI**

**Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUVAT**

**BALIKESİR, EYLÜL - 2018**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Emine Hümeysra DEMİRCİOĞLU** tarafından hazırlanan “**SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA TRANSFORMATÖR YÜKLENME KAPASİTESİNİ MAKSİMİZE ETMEK İÇİN PASİF HARMONİK FİLTRE TASARIMI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 14.09.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

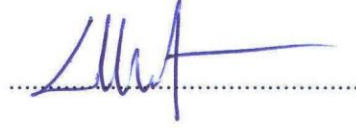
Danışman  
Doç. Dr. Murat Erhan BALCI



Üye  
Prof. Dr. Abdülkadir BALIKÇI



Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUVAT



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

## ÖZET

**SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA TRANSFORMATÖR  
YÜKLENME KAPASİTESİNİ MAKSİMİZE ETMEK İÇİN PASİF  
HARMONİK FİLTRE TASARIMI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
EMİNE HÜMEYRA DEMİRCİOĞLU  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. MURAT ERHAN BALCI)  
BALIKESİR, EYLÜL - 2018**

Günümüz modern güç sistemlerinde sinüzoidal olmayan (harmonik bileşenler içeren) akım çeken doğrusal olmayan güç elektroniği temelli yükler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yükler neticesinde hat akımları ve bara gerilimleri sinüzoidal dalga formundan uzaklaşmakta, bir başka ifadeyle önemli miktarda harmonik bozulmaya sahip olmaktadır.

Harmonik bozulmayı azaltmak için pasif, aktif veya hibrit (aktif ve pasif) filtreler kullanılmaktadır. Pasif filtreler, direnç, bobin ve kondansatör elemanlarından oluşur ve harmonik iyileştirme yetenekleri aktif filtrelere kıyasla kısıtlıdır, ancak daha düşük maliyetlidirler. Pasif filtrelerin tasarımında geleneksel olarak, her bir harmonik ve toplam harmonik bozulma miktarlarını ve güç faktörünü uluslararası standartlarda tavsiye edilen aralıklarda tutmanın yanı sıra akım ve/veya gerilim toplam harmonik bozulmasının minimizasyonu, güç faktörünün maksimizasyonu, filtre maliyeti ve filter kaybının minimizasyonu amaçlanmaktadır. Diğer taraftan, literatürde sunulan yeni çalışmalar, harmonik bozulma ve güç faktörü kısıtlarını dikkate almakla birlikte, pasif filtreleri transformatörlerin sinüzoidal olmayan şartlarda yüklenme kapasitesini maksimize etmek amacıyla tasarlamıştır.

Bu tez çalışmasında, öncelikle, basit kapasitif kompanzatör ve pratik yolla tasarlanmış C tipi pasif filtrenin transformatörün yüklenme kapasitesine ve harmonik bozulma seviyelerine etkileri analiz edilmiştir. İkinci olarak, çeşitli sezgisel optimizasyon yöntemlerinin transformatör yüklenme kapasitesinin maksimize edilmesini amaçlayan optimal C tipi filtre tasarım probleminin çözümünde hassasiyetleri ve iterasyon sayıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Son olarak, kaynak ve yük tarafı parametrelerinde meydana gelen değişimlerin optimal filtrenin performansına etkileri test edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** C tipi pasif filtre, harmonikler, transformatör yüklenme kapasitesi, sinüzoidal olmayan şartlar.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN OF PASSIVE HARMONIC FILTER FOR MAXIMIZATION OF TRANSFORMATOR LOADING CAPACITY UNDER NON-SINUSOIDAL CONDITIONS**

**MSC THESIS**

**EMİNE HÜMEYRA DEMİRCİOĞLU**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI)**

**BALIKESİR, SEPTEMBER 2018**

In today's modern power systems, nonlinear (power-electronic) based loads that draw non-sinusoidal or harmonically distorted currents are widely used. As a consequence of these loads, line currents and bus voltages diverge from the sinusoidal waveform, in other words, they have a significant amount of harmonic distortion.

Thus, passive, active, or hybrid (active and passive) filters are used to reduce harmonics distortion in the power systems. Passive filters consist of resistor, inductor and capacitor elements, and their harmonic mitigation capabilities are limited compared to active filters, but they are less costly. In the design of passive filters, it is conventionally intended to keep the individual and total harmonic distortion amounts and the power factor between the recommended intervals in international standards, as well as minimizing current and / or voltage total harmonic distortion, maximizing the power factor, minimizing filter cost and losses. However, new studies presented in the literature have designed passive filters to maximize transformer's loading capacity under non-sinusoidal conditions, while taking into account conventional harmonic distortion and power factor constraints.

In this thesis study, firstly, the effects of basic capacitive compensator and practically designed C-type passive filters on transformer's loading capacity and harmonic distortion levels are analyzed. Secondly, the sensitivity and the iteration numbers of various heuristic optimization methods are comparatively analyzed for the solution of the optimal C-type filter design problem, which aims to maximize the transformer's loading capacity. Finally, the performance of the optimal filter designs are tested under the variations of the source and load side parameters.

**KEYWORDS:** C-type passive filter, harmonics, transformer's loading capacity, non-sinusoidal conditions.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı ve Önemi .....	8
1.2 Tezin Sınırları .....	8
<b>2. TRANSFORMATÖRLERİN SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA YENİDEN BOYUTLANDIRILMASI</b> .....	<b>10</b>
2.1 Harmoniklerin Transformatör Kayıplarına Etkileri .....	10
2.1.1 Şebeke Gerilimi Harmoniklerinin Demir (Çekirdek) Kayıplarına Etkisi .....	11
2.1.2 Yük Akımı Harmoniklerinin Bakır (Sargı) Kayıplarına Etkisi ...	13
2.2 Transformatör Yeniden Boyutlandırma Yaklaşımları .....	16
2.2.1 IEEE C.57.110 Standardı Yaklaşımı .....	17
2.2.2 CENELEC/EN 50464-3 Standardı Yaklaşımı .....	18
2.3 Örnek Durum için Transformatörlerin Yeniden Boyutlandırılması ....	19
2.4 Sonuç.....	20
<b>3. TİPİK ENDÜSTRİYEL DAĞITIM SİSTEMİNİN HARMONİK TANIM BÖLGESİNDE MODELLENMESİ VE GÜÇ KALİTESİ İNDİSLERİNİN HESABI</b> .....	<b>21</b>
3.1 Sistemin Modellenmesi.....	22
3.2 Güç Kalitesi İndisleri Hesabı .....	24
3.3 Sonuç.....	25
<b>4. BASİT KAPASİTİF KOMPAZATÖR VE PRATİK YAKLAŞIMLA TASARLANMIŞ C TİPİ FİLTRE İÇİN ANALİZ SONUÇLARI</b> .....	<b>27</b>
4.1 Kompanze Edilmemiş Sistem için Transformatör Yüklenme Kapasitesi ve Harmonik Bozulma Seviyeleri .....	27
4.2 Basit Kapasitif Kompanzasyon için Analiz Sonuçları.....	28
4.3 Pratik Yaklaşımla Tasarlanmış C tipi Filtre için Analiz Sonuçları.....	30
4.4 Sonuç.....	32
<b>5. OPTİMAL PASİF FİLTRE TASARIM PROBLEMİNİN İFADE EDİLMESİ VE ÇÖZÜMÜ</b> .....	<b>33</b>
5.1 Optimal Filtre Tasarım Probleminin İfade Edilmesi .....	33
5.2 Problemin Çözümünde Kullanılan Çözüm Algoritmaları .....	34
5.2.1 Karınca Aslanı Algoritması .....	34
5.2.2 Yusufçuk Algoritması.....	37
5.2.3 Büyük Patlama Büyük Çöküntü Algoritması .....	41
5.3 Algoritmaların Karşılaştırmalı Analizi .....	44
5.3.1 Hassasiyet Analizi.....	44
5.3.2 Çözüm Hızı Analizi .....	45
5.4 Sonuç.....	46

<b>6. OPTİMAL PASİF FİLTRENİN PERFORMANSININ DEĞİŞKEN KAYNAK VE YÜK DURUMLARI İÇİN ANALİZİ .....</b>	<b>47</b>
6.1 Değişken $THDV_S$ Değerleri Altında Yapılan Analizler .....	47
6.2 Değişken $X_S/R_S$ Değerleri Altında Yapılan Analizler .....	48
6.3 Değişken $Z_S$ Değerleri Altında Yapılan Analizler .....	49
6.4 Değişken $THDI_Y$ Değerleri Altında Yapılan Analizler.....	50
6.5 Sonuç.....	52
<b>7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>53</b>
<b>8. KAYNAKLAR.....</b>	<b>56</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1:</b> Doğrusal olmayan yük durumunda güç sistemlerinde gerilim dalga şeklinin bozulması. ....	1
<b>Şekil 1.2:</b> Sinüzoidal olmayan bir işaretin farklı frekanslara sahip sinüzoidal işaretlerin toplamı biçiminde ifade edilmesi. ....	2
<b>Şekil 1.3:</b> (a) seri ve (b) paralel aktif filtrelerin şebekeye bağlantısı. ....	4
<b>Şekil 1.4:</b> (a) tek-ayarlı, (b) yüksek geçiren ve (c) C tipi pasif filtrelerin yapıları. ....	5
<b>Şekil 1.5:</b> (a) tek-ayarlı, (b) yüksek geçiren ve (c) C tipi filtrelerin empedans-frekans karakteristikleri [12]. ....	6
<b>Şekil 2.1:</b> Transformatörlerin zamanla manyetik akısındaki değişim ve mıknatıslanma akımı [26]. ....	11
<b>Şekil 2.2:</b> Farklı frekans değerleri için histeresiz (B-H) döngüleri [28]. ....	12
<b>Şekil 2.3:</b> (a) d.a., (b) 50 Hz ve (c) 250 Hz frekanslardaki akımlar için silindirik bir iletken kesitinde akım yoğunluğunun değişimi [29]. ....	15
<b>Şekil 2.4:</b> IEEE ve CENELEC/EN transformatör yeniden boyutlandırma aklaşımlarının uygulamasında dikkate alınan yük akımı harmonik spektrumu. ....	19
<b>Şekil 3.1:</b> Tipik bir endüstriyel güç sisteminin tek hat diyagramı. ....	21
<b>Şekil 3.2:</b> Tipik bir endüstriyel güç sisteminin h. harmonic numarası için tek faz eşdeğer devresi. ....	22
<b>Şekil 3.3:</b> C tipi filtrenin tek faz eşdeğer devresi. ....	23
<b>Şekil 4.1:</b> Basit kapasitif kompanzasyon ile (a) $DPF$ , (b) $THDI$ , (c) $THDV$ ve (d) $F_{HL}$ ve $S_{Maks}$ indislerinin değişimi. ....	29
<b>Şekil 4.2:</b> Farklı $q$ değerleri için C tipi filtrenin empedans-frekans (harmonik numarası) eğrileri. ....	31
<b>Şekil 5.1:</b> Karınca aslanı algoritmasının akış diyagramı. ....	37
<b>Şekil 5.2:</b> Yusufçuk böcek sürüsünün davranışları [20, 41]. ....	38
<b>Şekil 5.3:</b> Yusufçuk optimizasyon algoritmasının akış diyagramı. ....	41
<b>Şekil 5.4:</b> Büyük patlama büyük çöküntü optimizasyon algoritmasının akış diyagramı. ....	43
<b>Şekil 6.1:</b> $THDV$ , $THDI$ , $F_{HL}$ ve $S_{Maks}$ indislerinin $THDV_s$ 'ye bağlı değişimleri. ....	48
<b>Şekil 6.2:</b> $THDV$ , $THDI$ , $F_{HL}$ ve $S_{Maks}$ indislerinin $X_S/R_S$ 'ye bağlı değişimleri. ....	49
<b>Şekil 6.3:</b> $THDV$ , $THDI$ , $F_{HL}$ ve $S_{Maks}$ indislerinin $Z_S$ 'ye bağlı değişimleri. ....	50
<b>Şekil 6.4:</b> Kompanze edilmemiş (filtresiz) sistemde $F_{HL}$ ve $S_{Maks}$ indislerinin $THDI_Y$ 'ye bağlı değişimleri. ....	51
<b>Şekil 6.5:</b> $THDV$ , $THDI$ , $F_{HL}$ ve $S_{Maks}$ indislerinin $THDI_Y$ 'ye bağlı değişimleri. ....	51



## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 2.1:</b> IEEE yaklaşımı uygulama tablosu. ....	19
<b>Tablo 2.2:</b> CENELEC/EN yaklaşımı uygulama tablosu. ....	20
<b>Tablo 4.1:</b> Kaynak gerilimi harmonikleri ve primer tarafa indirgenmiş yük akımı harmonikleri. ....	27
<b>Tablo 4.2:</b> Modellenen system için IEEE std. 519. gerilim ve akım harmonik sınırları. ....	28
<b>Tablo 4.3:</b> Pratik yaklaşıma göre tasarlanan C tipi filtre parametreleri. ....	31
<b>Tablo 4.4:</b> Pratik yaklaşıma göre tasarlanan C tipi filtreler sisteme bağlandıktan sonra ulaşılan güç kalitesi indisleri ve transformatör yüklenme kapasitesi değerleri. ....	31
<b>Tablo 5.1:</b> C tipi filtrenin KAO, BPBÇ, YO ve BO algoritmaları kullanılarak bulunan optimal filtre parametre değerleri ile pratik yolla tasarlanan C tipi filtrenin parametre değerleri. ....	45
<b>Tablo 5.2:</b> Tasarlanan filtreler sisteme bağlandıktan sonra ulaşılan güç kalitesi indisleri ve transformatör yüklenme kapasitesi değerleri. ...	45
<b>Tablo 5.3:</b> Test sistemi için algoritmaların optimal filtre tasarım probleminin çözümü için iterasyon sayıları. ....	46

## SEMBOL LİSTESİ

$h$	: Harmonik numarası
$f_1$	: Temel frekans
$f_h$	: h. harmonik frekansı
$f$	: Frekans
$x(t)$	: Gerilim veya akım dalgasının zaman tanım bölgesi ifadesi
$X_0$	: $x(t)$ 'nin ortalama değeri (doğru akım bileşeni)
$X_h$	: $x(t)$ 'nin h. harmonik bileşeninin etkin değeri
$\alpha_h$	: $x(t)$ 'nin h. harmonik bileşeninin açısı
$B$	: Manyetik akı yoğunluğu
$P_H$	: Histeresiz kaybı
$P_F$	: Fuko (girdap akımı) kaybı
$\sigma_H$	: Histeresiz kaybı ile alakalı malzeme sabiti
$P_{Fe}$	: Demir kaybı
$P_{Feh}$	: h. harmonik gerilimi için demir kaybı
$B_h$	: h. harmonik gerilimi için manyetik akı yoğunluğu
$THDV_S$ ve $THDI_Y$	: Sırasıyla kaynak geriliminin ve yük akımının toplam harmonik bozulma değerleri
$THDI$ ve $THDV$	: Ortak bağlantı noktasında (OBN) ölçülen akım ve gerilim toplam harmonik bozulma değerleri
$DPF$	: Ortak bağlantı noktasında ölçülen temel frekans güç faktörü
$F_{HL}$ ve $F_{HL-STR}$	: Harmonik kayıp faktörü indisleri
$DF_{IEEE}$	: IEEE C.57.110 standardına göre hesaplanan azami yüklenme oranı veya deratasyon faktörü
$K$	: UL 1562 standardında tanımlı K faktörü indisi
Factor-K	: CENELEC/EN 50464-3 standardında tanımlı Faktör K indisi
$DF_{EN}$	: CENELEC/EN 50464-3 standardına göre hesaplanan azami yüklenme oranı veya deratasyon faktörü
$S_{Maks}$	: Transformator yüklenme kapasitesi
$I_h, V_h$	: Hat akımının ve OBN'de ölçülen gerilimin h. harmonik fazör değerleri
$V_h, I_h$	: Hat akımının ve OBN'de ölçülen gerilimin h. harmonik etkin değerleri
$\phi_h$	: h. harmonik OBN gerilimi ve hat akımı arasındaki faz farkı
$P_{LL}$ ve $P_{LL-R}$	: Transformatorün yükteki kaybı ve bu kaybın anma değeri
$P_{EC}$ ve $P_{EC-R}$	: Transformatorün sargı kaçak kaybı ve bu kaybın anma değeri
$P_{OSL}$ ve $P_{OSL-R}$	: Transformatorün diğer kaçak kaybı ve bu kaybın anma değeri
$P_{DC}$	: Transformatorün d.a. veya $I^2R$ kaybı
$P_1, S_1$	: OBN'de bir faz için ölçülen temel frekans aktif ve temel frekans görünür güçleri
OBN	: Ortak bağlantı noktası
BO	: Balina Optimizasyonu
KAO	: Karınca Aslanı Optimizasyonu
YO	: Yusufçuk Optimizasyonu
BPBÇ	: Büyük Patlama-Büyük Çöküntü

## ÖNSÖZ

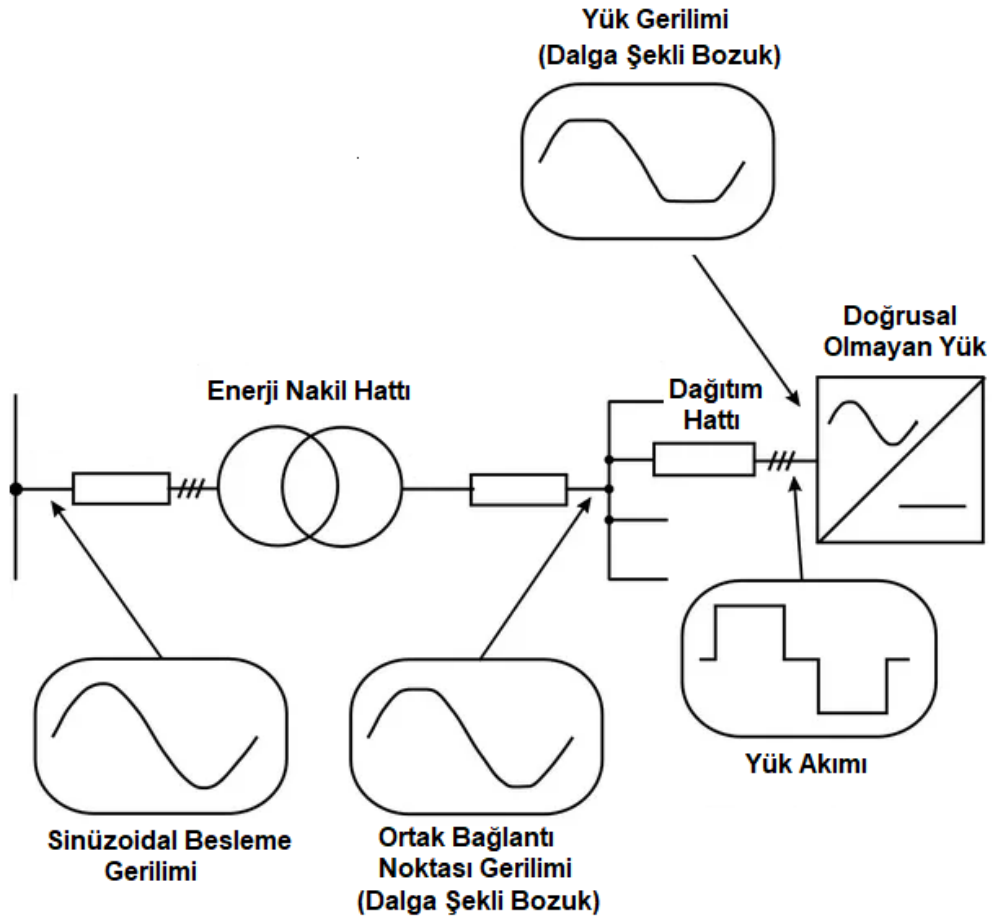
Tezimin beklenen yararı sağlaması dileğiyle, bu tez çalışmamın yapılması sırasında bilgi ve tecrübesi ile beni yönlendiren, ilmen ve fikren benden desteklerini esirgemeyen çok değerli hocam Doç. Dr. Murat Erhan BALCI'ya ve ayrıca tezime yardımlarından dolayı Alp KARADENİZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince en büyük destekçim olan eşim Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU'na ve bugünlere gelmemde büyük katkısı olan Aileme teşekkürü borç bilirim.



# 1. GİRİŞ

Alternatif akım ve doğru akım ayarlanabilir hız sürücüleri, invertörler vs. gibi güç elektroniği cihazları, günümüz modern güç sistemlerinde büyük güçlü yükleri kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak literatürde doğrusal olmayan yükler olarak adlandırılan, bu güç elektroniği temelli cihazlar vasıtasıyla kontrol edilen yükler, sinüzoidal olmayan akımları sistemden çeker. Şekil 1.1’de gösterildiği üzere doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu sistemlerde, sinüzoidal olmayan akımların hatlarda sinüzoidal olmayan gerilim düşümlerine sebep olması sonucu, ortak bağlantı noktası ve yük besleme gerilimleri de sinüzoidal dalga formundan uzaklaşırlar [1].

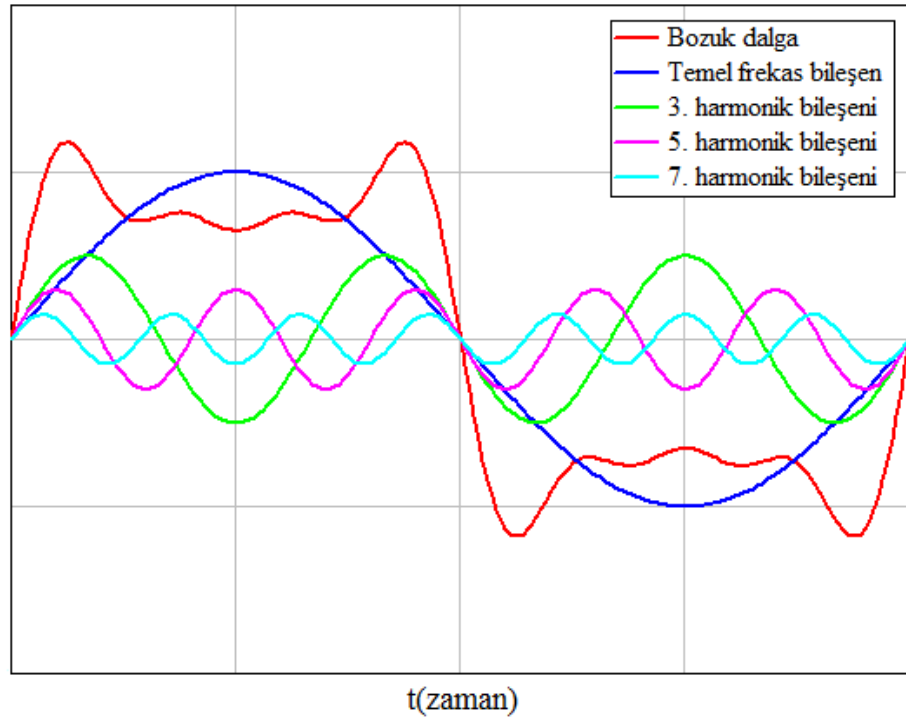


Şekil 1.1: Doğrusal olmayan yük durumunda güç sistemlerinde gerilim dalga şeklinin bozulması.

Alternatif akım devrelerinde sürekli hal şartlarında gerilim ve akım hesabı için kullanılan fazör tanımı sinüzoidal şartlar için geçerlidir. Dolayısıyla, sinüzoidal olmayan dalga şekline sahip kaynak gerilimleri ve yük akımlarının bulunduğu sistemlerde gerilim ve akım hesabı için, bu bozuk gerilimler ve akımlar Fourier serisine açılarak şebeke frekansının katlarına sahip sinüzoidal bileşenlere (harmonik bileşenlere) ayrılır. Böylece her bir frekans için fazör tanımı uygulanarak gerilim ve akım hesabı yapılır. Daha sonra ihtiyaç duyulduğu takdirde; bu gerilim ve akımların zaman tanım bölgesi ifadelerine geri dönülür. Fourier dönüşümüne göre bozulmuş bir gerilim veya akımın zaman tanım bölgesi ifadesi  $x(t)$ ; d.a. bileşeni ( $X_0$ ), h. harmonik etkin değeri ( $X_h$ ), h. harmonik faz açısı ( $\alpha_h$ ), temel dalga frekansı ( $f_1$ ) ve zaman ( $t$ ) cinsinden aşağı verilen biçimde yazılabilir [1]:

$$x(t) = X_0 + \sum_h \sqrt{2} X_h \sin(2\pi h f_1 t + \alpha_h) \quad (1.1)$$

Şekil 1.2'de temel frekans bileşeni yanında 3., 5. ve 7. harmoniklere sahip bozulmuş bir dalga formu görülmektedir.



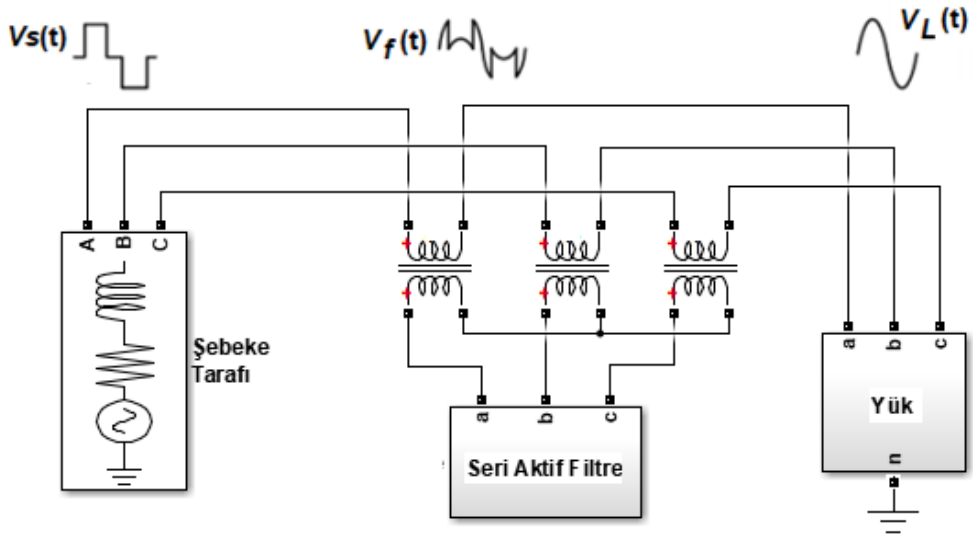
**Şekil 1.2:** Sinüzoidal olmayan bir işaretin farklı frekanslara sahip sinüzoidal işaretlerin toplamı biçiminde ifade edilmesi.

Bozulmuş gerilimler ve akımlar, sistemdeki elemanların kayıplarının artmasına ve aşırı ısınmasına, ölçüm ve koruma elemanlarının hatalı çalışmasına ve dönen elektrik makinalarında tork dalgalanmalarına sebep olur [1, 2]. Bu problemleri önlemek için gerilim ve akım harmonikleri pasif, aktif ve hibrit (pasif+aktif) filtrelerle azaltılmaktadır [3].

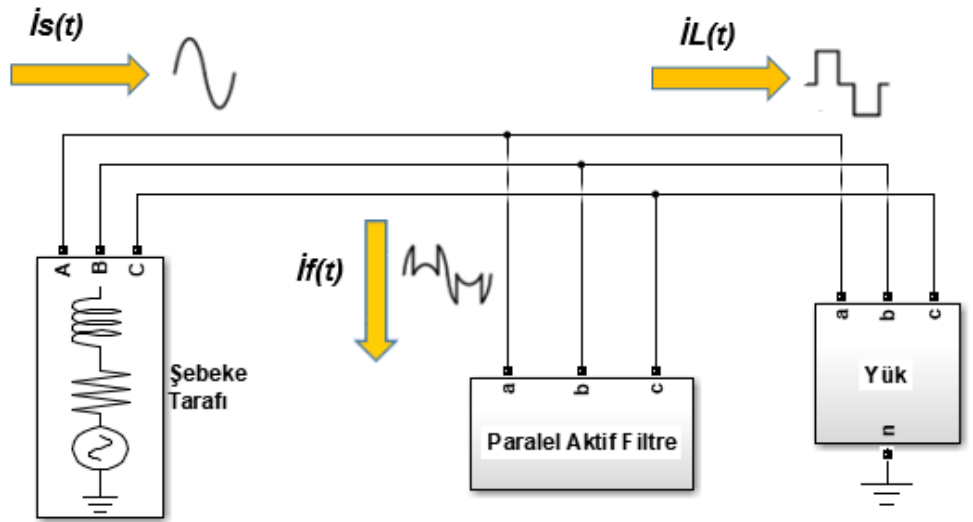
Aktif filtreler, sisteme bağlanma şekline göre seri ve paralel olmak üzere iki tipe sahiptir [4]. Bu iki aktif tip filtrenin şebekeye bağlantısı Şekil 1.3'de gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, seri aktif filtreler, kaynak ile yük arasındaki enerji hattına seri bağlanırlar ve harmonik gerilim kaynağı gibi kontrol edilen güç elektroniği cihazlarıdır. Şekil 1.3 (a)'dan görüldüğü üzere seri aktif filtreler şebeke gerilimindeki harmonik bozulmayı süzer böylece yük uçlarındaki gerilim saf sinüzoidal dalga formuna sahip olur. Böylece, bozulmuş gerilim formunun yük üzerindeki olumsuz etkileri engellenmiş olur. Paralel aktif filtreler yüke paralel olarak sisteme bağlanırlar ve harmonik akım kaynağı şeklinde kontrol edilen güç elektroniği devreleridir. Paralel aktif filtrelerin şebekeye enjekte edeceği akım, tam kompanzasyon ve sinüzoidal akım anlık güç teorileriyle belirlenir. Tam kompanzasyon stratejisinde, aktif filtre şebekeye akım enjekte ettiğinde hat akımının dalga şekli bağlantı noktası gerilimiyle aynı dalga şeklinde olur bir başka deyişle hattın akan akım her frekansta sadece aktif bileşen içerir. Ancak bu durumda, eğer bağlantı noktası gerilimi bozulmuş dalga formunda ise hat akımı da bozulmuş dalga formuna sahip olur. Sinüzoidal akım stratejisinde, aktif filtre şebekeye akım enjekte ettiğinde hattın saf sinüzoidal dalga formunda akım akar. Bu strateji, temel frekansta reaktif güç kompanzasyonunu amaçlar; buna göre hattın temel akımı reaktif bileşen içermez. Şekil 1.3 (b)'den sinüzoidal akım stratejisine göre çalışan bir paralel aktif filtrenin, yükün çektiği akımın harmonik bozulmaya sahip parçasını şebekeye enjekte ettiği ve sonuç olarak hat akımının sinüzoidal dalga formunda olduğu görülmektedir.

Aktif filtreler, pasif filtrelerle karşılaştırıldığında, harmonik azaltma ve reaktif güç kompanzasyonu bakımlarından üstün performansa sahiptirler. Bununla birlikte, aynı güç seviyesi için, aktif filtrelerin yüksek maliyetleri vardır. Dolayısıyla, pasif filtreler, günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Direnç, bobin ve kondansatör elemanlarından oluşan pasif filtreler, aktif filtreler gibi sisteme bağlantı şekline göre, seri ve paralel olarak iki sınıfa ayrılırlar [5]. Seri pasif filtreler, kaynak ve yük tarafları arasında harmonik akımı akışını engellemek için ayarlandıkları harmonik frekansında yüksek değerde empedans gösterirler. Paralel pasif filtreler ise, yük akımı harmoniklerinin şebekeye geçişini engellemek ve toprağa akmasını sağlamak için ayarlandıkları harmonik frekansında çok düşük değerde empedans gösterirler.



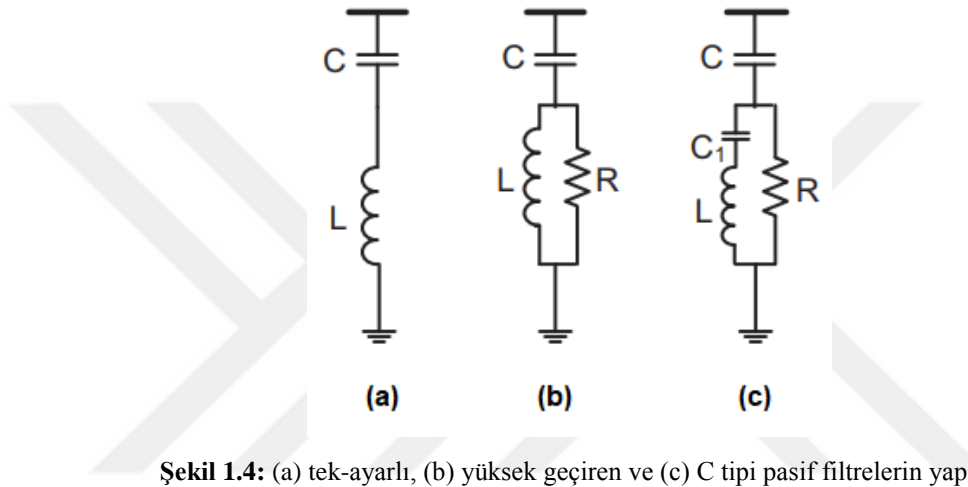
(a)



(b)

Şekil 1.3: (a) seri ve (b) paralel aktif filtrelerin şebekeye bağlantısı.

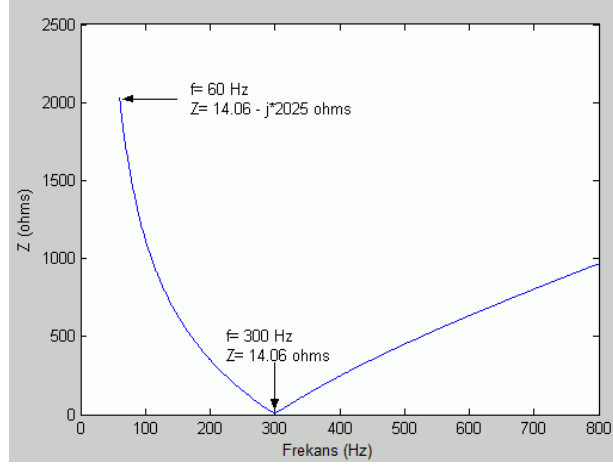
Paralel pasif filtreler, harmoniklerin bastırılması yanı sıra güç faktörünün iyileştirilmesine katkıları sebebiyle, seri pasif filtrelerden daha çok tercih edilir [3]. Paralel pasif filtreler empedans-frekans karakteristiklerine göre; tek ayarlı, çift ayarlı, üç ayarlı, sönümlü- çift ayarlı, birinci dereceden yüksek geçiren, ikinci dereceden yüksek geçiren ve C tipi filtreler olarak isimlendirilen çeşitli türleri vardır [5]. Şekil 1.4'de literatürde en çok kullanılan pasif filtreler olan tek-ayarlı, yüksek geçiren ve C tipi filtrelerin yapıları, Şekil 1.5'de ise aynı filtrelerin empedans-frekans karakteristikleri verilmiştir.



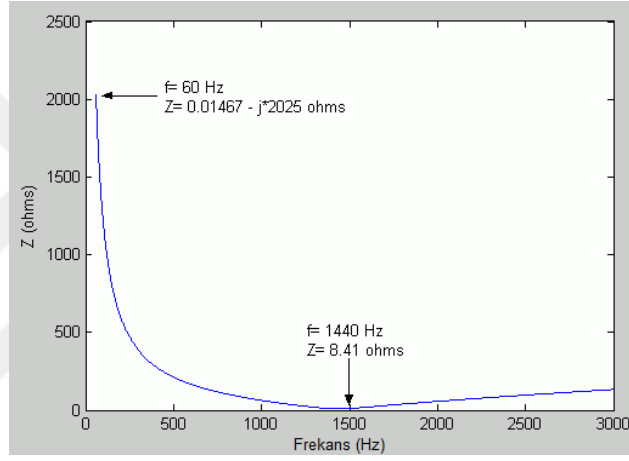
Şekil 1.4: (a) tek-ayarlı, (b) yüksek geçiren ve (c) C tipi pasif filtrelerin yapıları.

Pasif filtreler şebekeye bağlandıktan sonra ortak bağlantı noktasında ölçülen akım toplam harmonik bozulma (THDI), gerilim toplam harmonik bozulma (THDV) ve güç faktörü (PF) parametreleri birbirine zıt şekilde davranabilir. Birbaşka deyişle, pasif filtre bu parametrelerden birini iyileştirirken diğerini kötüleştirebilir. Bu sebeple, literatürde, THDI, THDV, PF, filtre kaybı (FL) ve filtre maliyeti (FC) indisleri dikkate alınarak pasif filtrelerin optimal tasarımları gerçekleştirilmiştir. PF'nin maksimizasyonu ve THDV, THDI, FL ve FC'nin minimizasyonu, optimal pasif filtre tasarım problemlerinde geleneksel olarak hedeflenmiştir [6-10]. Aynı çalışmalarda uluslararası güç kalitesi standartlarında tanımlı olan harmonik bozulma sınırlamaları ile tavsiye edilen PF aralıkları, optimal filtre tasarım problemlerinin kısıtları olarak dikkate alınmıştır. Bu tasarım amaçlarına ilaveten, [11]'de güç elektroniği devreleri üzerinden şebekeye bağlanan DG ünitelerinin ve doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu bir sistemin DG barındırma kapasitesini maksimize etmek için pasif filtre tasarımı çalışılmıştır.

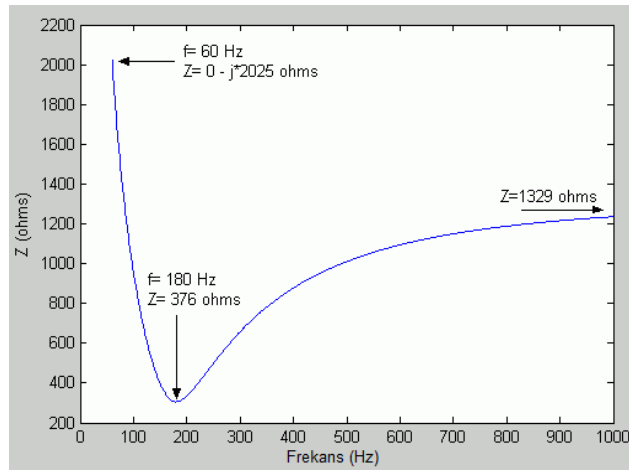




(a)



(b)



(c)

**Şekil 1.5:** (a) tek-ayarlı, (b) yüksek geçiren ve (c) C tipi filtrelerin empedans-frekans karakteristikleri [12].

Geleneksel harmonik bozulma ölçüm indisleri olan THDI ve THDV, akım ve gerilim dalga şekli bozulma miktarının ölçülmesi için kullanılan indislerdir. Bu iki indis akım ve gerilim harmoniklerinin frekanslarını dikkate almazlar [13]. Ancak, transformatör sargı kayıplarının akım harmoniklerinin sadece genliğine değil aynı zamanda frekansına da bağlı olduğu literatürde iyi bilinmektedir [14]. Bu sebeple, THDI indisi transformatörlerin harmonikli akımlar altında yüklenme kapasitesinin hesabında yetersizdir. Dolayısıyla, IEEE standart C57.110 [14], sinüzoidal olmayan koşullar altında transformatörlerin yüklenme kapasitesini belirlemek için harmonik kayıp faktörü indisini ( $F_{HL}$ ) tanımlamıştır. Sinüzoidal akım şartlarında  $F_{HL}$  indisi 1 değerinde olup transformatör bu şartlarda plakasında belirtilen gücü besleme kapasitesine sahiptir. Sinüzoidal olmayan (harmonikli) yük akımı şartlarında ise  $F_{HL}$  indisi 1'den büyük değerlere sahip olur ve  $F_{HL}$  değeri büyüdükçe transformatörün yüklenme kapasitesi düşer.

Harmoniklerin bu olumsuz etkisi dikkate alınarak, [15] ve [16]'da, harmonik bozulmaya sahip kaynak gerilimi olan tipik bir endüstriyel güç sisteminde, doğrusal olmayan yükleri besleyen transformatörün yüklenme kapasitesini maksimize etmek için tek-ayarlı ve C tipi pasif filtre tasarımları çalışılmıştır. Her iki optimal tasarımın amaç fonksiyonu yüklenme kapasitesiyle ters orantılı olan  $F_{HL}$  indisini minimize etmektir. Bu tasarım çalışmalarında, IEEE standart 519 [17]'de tanımlı gerilim ve akım harmonik sınırlamaları ile aynı standartta önerilen temel frekans güç faktörü aralığı optimizasyon probleminin kısıtları olarak ele alınmıştır.

Ayrıca, [18]'de tek-ayarlı, çift-ayarlı, üç ayarlı, sönümlü çift-ayarlı ve C tipi filtrelerin transformatörlerin harmonikli sistemlerde azami yüklenme kapasitesinin artırılmasına katkıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada sunulan sonuçlardan filtre tipinin transformatör yüklenme kapasitesinin iyileştirilmesine önemli etkisinin olduğu belirtilmiştir. Bu makalede ayrıca, transformatör yüklenme kapasitesini iyileştirme performansları bakımından filtreler en iyiden en kötüye; üç-ayarlı, sönümlü çift-ayarlı, çift-ayarlı, C tipi ve tek-ayarlı filtreler olarak sıralanmıştır. Aynı çalışmada, balina optimizasyon ve parçacık sürü optimizasyon algoritmaları problemin çözümüne uygulanmıştır. Böylece, algoritmaların sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü, ancak balina optimizasyon algoritmasının parçacık

sürü optimizasyon algoritmasına göre daha az iterasyon sayısı ile problemi çözdüğü sonucuna varılmıştır.

## 1.1 Tezin Amacı ve Önemi

Bu tezde amaçlanan çıktılar sırasıyla;

- Harmonikli şartlarda transformatörlerin yüklenme kapasitesinin iyileştirilmesine katkıları bakımından, basit kapasitif kompanzasyon, pratik yolla tasarlanmış C tipi filtre ve [16]'de sunulmuş optimal C tipi filtre tasarımının karşılaştırılması olarak analiz edilmesi,
- Balina [18], Karınca Aslanı [19], Yusufçuk [20] ve Büyük Patlama-Büyük Çöküntü [21] optimizasyon algoritmalarının, [16]'da sunulmuş optimal C tipi filtre tasarım probleminin çözümünde, sonuç ve iterasyon sayısı bakımından karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi,
- Kaynak geriliminin toplam harmonik bozulması ( $THDV_S$ ), hat empedansının  $X_S/R_S$  oranı, hat empedansının genliği ( $Z_S$ ) ve yük akımının toplam harmonik bozulmasında ( $THDI_Y$ ) meydana gelen değişimlerin, transformatör yüklenme kapasitesini maksimize etmek için tasarlanan optimal C tipi filtrenin performansına etkilerinin analiz edilmesidir.

Sonuçlar, IEEE 519 standardında verilen ve optimal pasif filtre tasarımıyla alakalı bir çok çalışmada [6, 7, 15, 16] test sistemi olarak kullanılmış tipik endüstriyel güç sistemi için simüle edilmiştir. Simülasyonlarda, sistem elemanlarının literatürde yaygın olarak dikkate alınan harmonik modelleri kullanılmıştır [22-25].

## 1.2 Tezin Sınırları

Bu tez çalışmasında yapılan analizlerde,

- Test sisteminde üç faz gerilimleri ve akımları dengeli olmaları sebebiyle sistemin tek faz eşdeğer devresi kullanılmıştır,

- Sistem geriliminin toplam harmonik bozulması %10 değerinin altında olması sebebiyle hassasiyet bakımından ihmal edilebilir hatalara yol açabilecek ve uygulaması pratik olan harmonik akım kaynağı modeli doğrusal olmayan yüklerin modellenmesinde kullanılmıştır,
- Transformatör her bir harmonik numarası için kısa devre empedansı olarak modellenmiştir, kısa devre empedansının direnç kısmı sargı direncinin d.a. değeri ve harmonik numarasının karesiyle doğru orantılı olarak artan eddy akımı veya fuko kaybı direncinin toplamı şeklinde ifade edilmiştir, kısa devre reaktansının harmonik numarasıyla doğrusal olarak büyüdüğü kabul edilmiştir,
- Transformatör azami yüklenme kapasitesi IEEE C.57.110 standardında tanımlı yöntemle göre hesaplanmıştır,
- Literatürde birçok sezgisel optimizasyon yöntemi bulunmaktadır, bu algoritmaların yeni tarihli olanları analizlerde dikkate alınmıştır.

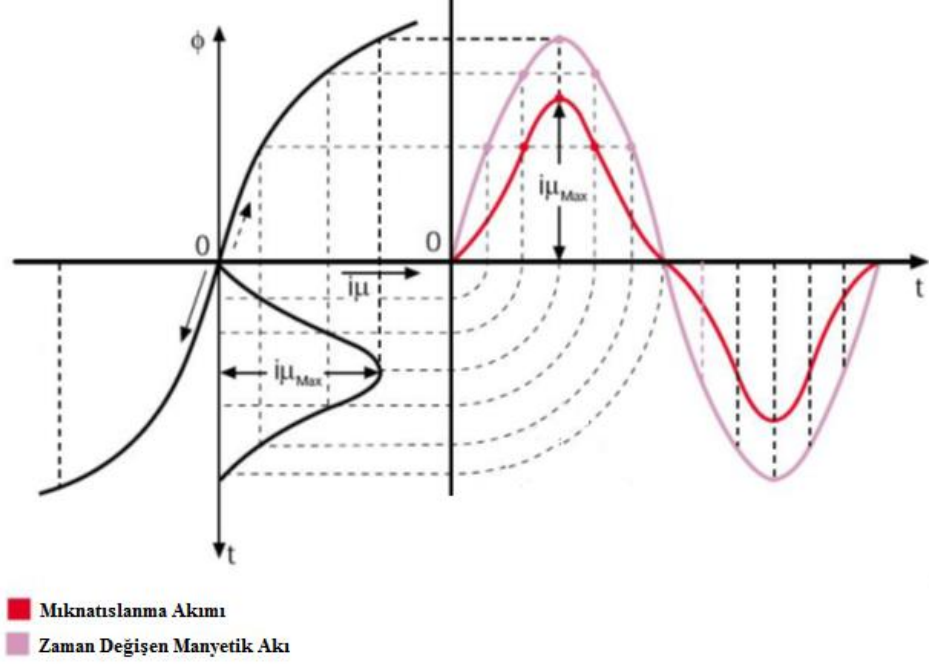
## **2. TRANSFORMATÖRLERİN SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA YENİDEN BOYUTLANDIRILMASI**

Bu bölümde, harmoniklerin transformatör kayıplarına etkileri incelendikten sonra harmonikli şartlarda transformatörlerin yeniden boyutlandırılması veya yüklenme kapasitesinin belirlenmesine ilişkin standartlarda yer alan pratik yöntemler sunulmuştur.

### **2.1 Harmoniklerin Transformatör Kayıplarına Etkileri**

Güç elektroniği devreleriyle kontrol edilen modern yükler güç sistemlerinde yer alan baskın harmonik kaynaklarıdır. Ancak, generatörler ve transformatörler gibi elektrik makinaları en eski harmonik kaynakları olarak bilinmektedir. Bu elemanların demir çekirdeklerinin mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olmamasına yani çekirdeklerinin doymasına bağlı olarak; uyartım akımları sinüzoidal olmayan dalga formuna diğer bir deyişle harmonik bozulmaya sahiptir [1]. Bir transformatörün zamanla manyetik akısındaki değişim ve mıknatıslanma akımı Şekil 2.1'den görülmektedir.

Transformatörler bir harmonik kaynağı olma özelliklerinin yanında harmoniklerden önemli derecede olumsuz etkilenen güç sistemi elemanlarıdır. Bu olumsuz etki; akım harmoniklerine bağlı olarak sargı kayıplarının artması ve gerilim harmoniklerine bağlı olarak çekirdek kayıplarının artması neticesinde aşırı ısınması dolayısıyla beklenen ömürlerinin kısalmasıdır [1, 2].



Şekil 2.1: Transformatörlerin zamanla manyetik akısındaki değişim ve mıknatıslanma akımı [26].

### 2.1.1 Şebeke Gerilimi Harmoniklerinin Demir (Çekirdek) Kayıplarına Etkisi

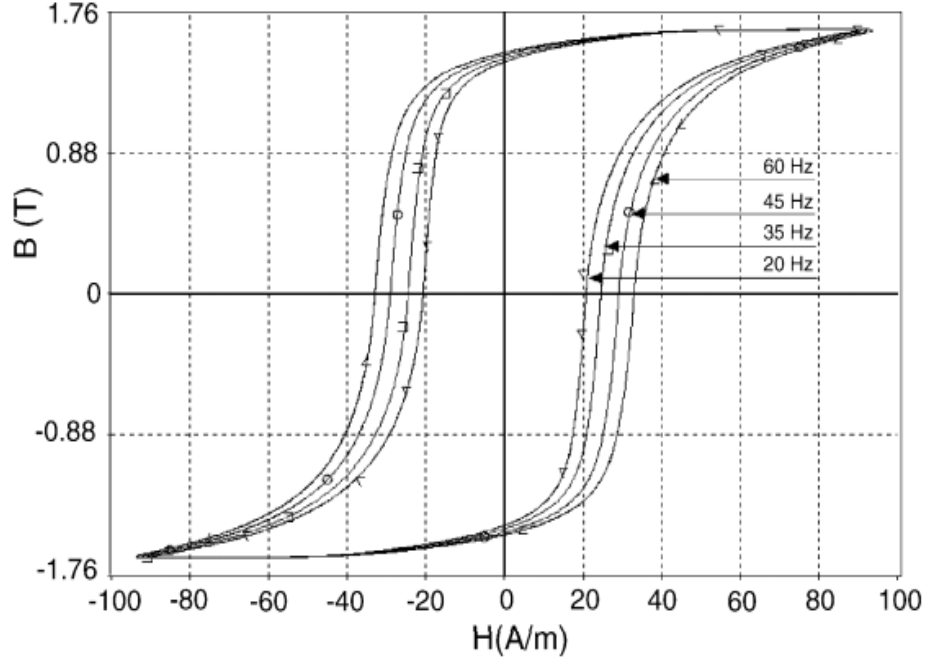
Transformatörlerde demir kayıpları yük akımının artışıyla ihmal edilebilir miktarda değişen dolayısıyla literatürde boştaki kayıplar olarak da isimlendirilen kayıplardır. Demir kayıpları histeresiz ve fuko akımı kayıpları olmak üzere ikiye ayrılır [27].

Histeresiz kaybı alternatif akım uyarım gerilimi uygulandığında demir çekirdeğin mıknatıslanmasında meydana gelen değişim sırasında harcanan güçtür. Histeresiz kaybının herhangi bir  $f$  uyarım frekansı,  $B$  manyetik akı yoğunluğu ve malzeme sabiti  $\sigma_H$  cinsinden ifadesi;

$$P_H = \sigma_H \frac{f}{100} \left( \frac{B}{10000} \right)^2 \quad (\text{Watt/Kg}) \quad (2.1)$$

biçiminde yazılabilir [1]. Bu ifadeden görüldüğü üzere, Histeresiz kaybı frekans ile orantılıdır, bir başka deyişle yüksek frekanslı uyarım gerilimleri için Histeresiz kaybı daha büyük olur.

Bu durum, Şekil 2.2’de sunulan farklı frekanslar için elde edilmiş manyetik akı yoğunluğu (B) – manyetik alan şiddeti (H) döngüleri yani Histeresiz döngüleri dikkate alınarak pratik bir biçimde izah edilebilir [28]. Bu şekilde, frekans ile döngülerin alanının arttığı görülmektedir. Histeresiz döngüsünün alanı ile Histeresiz kaybının orantılı olduğu göz önüne alınırsa, yüksek frekanslı uyartım gerilimlerinde Histeresiz kaybının artacağı açıkça ifade edilebilir [27].



Şekil 2.2: Farklı frekans değerleri için histeresiz (B-H) döngüleri [28].

Demir çekirdekte akan girdap şeklindeki akımların sebep olduğu demir kayıplarına ise Fuko kaybı denir [27]. Fuko kayıplarının kuvvet çizgilerinin dengeli yayıldığı ortamlar için  $f$ ,  $B$  ve malzeme sabiti ( $\sigma_F$ ) cinsinden ifadesi ise;

$$P_F = \sigma_F \left( \frac{f}{100} \right)^2 \left( \frac{B}{10000} \right)^2 \text{ (Watt/Kg)} \quad (2.2)$$

olarak yazılabilir [1]. Bu ifade Fuko kaybının frekansın karesiyle orantılı olduğunu, dolayısıyla bu kaybın Histeresiz kaybına göre gerilim harmoniklerinden daha fazla etkilendiğini göstermektedir.

h. harmonik besleme gerilimi ( $V_h$ ) için çekirdekteki manyetik akı yoğunluğu ( $B_h$ ), h. harmonik frekansı ( $f_h=h.f_1$ ), çekirdek kesit alanı (S) ve çekirdek üzerine sarılı bobinin sarım sayısı (N) cinsinden,

$$B_h = \frac{V_h}{\sqrt{3} \times 4.44 \times f_h \times S \times N \times 10^{-8}} \quad (2.3)$$

ifade edilerek, h. harmonik demir kaybı ( $P_{Feh}$ ) ve harmoniklerin tümü için toplam demir kaybı ( $P_{Fe}$ ), sırasıyla

$$P_{Feh} = \left[ \sigma_H \frac{f_h}{100} + \sigma_F \left( \frac{f_h}{100} \right)^2 \right] \left( \frac{B_h}{10000} \right)^2 \quad (\text{Watt/Kg}) \quad (2.4)$$

$$P_{Fe} = \sum_h P_{Feh} \quad (2.5)$$

biçiminde ifade edilebilir [1].

### 2.1.2 Yük Akımı Harmoniklerinin Bakır (Sargı) Kayıplarına Etkisi

Bakır kaybı transformatör boşa iken ihmal edilebilir değerdedir. Bu sebeple bakır kaybı yükteki kayıp olarak isimlendirilir [27]. Yükteki kayıp d.a. veya ohmik kayıplar ( $P_{DC}$ ), sargı kaçak kaybı ( $P_{EC}$ ) ve diğer kaçak kayıplardan ( $P_{OSL}$ ) oluşur [1, 29, 30]:

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2.6)$$

Ohmik kayıplar, sargıların d.a. direnci ( $R_{DC}$ ) ile yük akımının bütün harmonikleri dikkate alınarak hesaplanan toplam etkin değerinin ( $I_{te}$ ) karesinin çarpımı biçiminde ifade edilebilir:

$$P_{DC} = I_{te}^2 R_{DC} \quad (2.7)$$



Harmonik bozulmaya sahip yük akımının toplam etkin değeri ise harmonik bileşenlerin etkin değerlerinin vektörel toplamıdır:

$$I_{te} = \sqrt{\sum_h I_h^2} \quad (2.8)$$

Sargılardaki kaçak kayıp, deri ve yakınlık etkisi sebebiyle sargının alternatif akım altındaki direncinin d.a. direncinden büyük olması neticesi meydana gelen kayıplardır. Sargıların  $f$  frekansına sahip bir alternatif akıma gösterdiği direnç ( $R_{ACf}$ ) ile d.a. direnci ( $R_{DC}$ ) arasındaki ilişki Denklem (2.9)'da verilmiştir [1]:

$$R_{ACf} = f^2 R_{DC} \quad (2.9)$$

Burada konuyu daha iyi açıklayabilmek için d.a., 50 Hz ve 250 Hz frekanslardaki akımlar için silindirik bir iletken kesitinde akım yoğunluğunun değişimi Şekil 2.3'de sunulmuştur [29]. Bu şekilden, deri etkisi sonucu frekansa bağlı olarak akımın yüzeye yakın daha küçük bir kesit alandan akma eğilimini gösterdiği dolayısıyla frekans artışına bağlı olarak sargı direncindeki büyüme meydana geleceği görülmektedir.

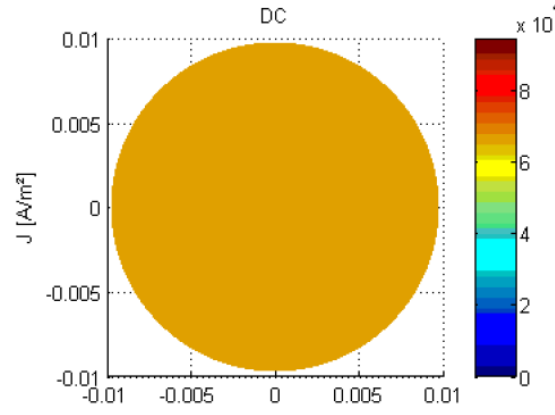
Bütün bu veriler doğrultusunda, sinüzoidal anma akımı şartlarındaki sargı kaçak kaybı ( $P_{EC-R}$ ) ile harmonik bozulmaya sahip akımlar altındaki sargı kaçak kaybı ( $P_{EC}$ ) arasındaki ilişki Denklem (2.10)'da verilen biçimde ifade edilebilir [30]:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_h \left( \frac{I_h}{I_{te}} \right)^2 h^2 \quad (2.10)$$

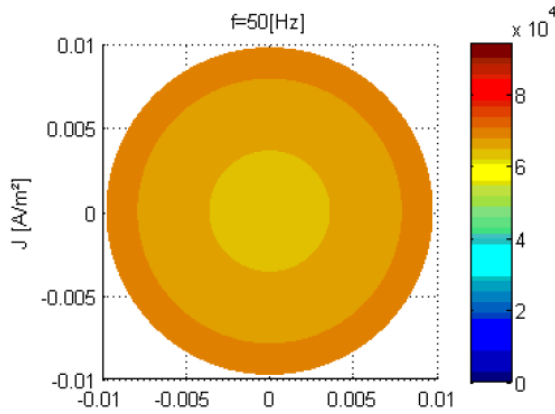
Diğer kaçak kayıplar olarak isimlendirilen kayıplar ( $P_{OSL}$ ), yüklenme durumunda sargılar dışındaki transformatör parçalarında meydana gelen kaçak kayıplardır. Bu kayıplar sargılardaki kaçak kayıplar gibi frekansa bağımlıdır. Sinüzoidal anma akımı şartlarındaki diğer kaçak kayıplar ( $P_{OSL-R}$ ) ile harmonik bozulmaya sahip akımlar altındaki diğer kaçak kayıplar ( $P_{OSL}$ ) arasındaki ilişki, IEEE C.57.110 standardında Denklem (2.11)'de verilen biçimde ifade edilmiştir [14, 30]:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_h \left( \frac{I_h}{I_{te}} \right)^2 h^{0.8} \quad (2.11)$$

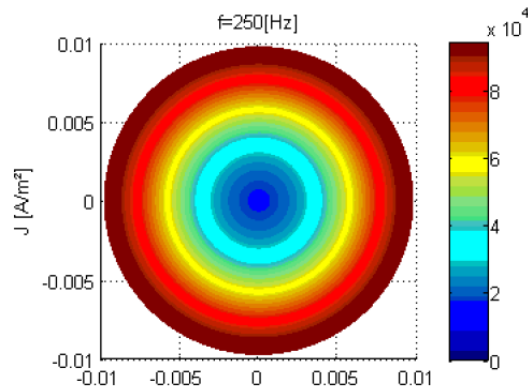
Bu ifadeden, diğerk kaçak kayıpların frekansın 0.8 üssü ile orantılı olduğu görölmektedir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 2.3:** (a) d.a., (b) 50 Hz ve (c) 250 Hz frekanslardaki akımlar için silindirik bir iletken kesitinde akım yoğunluğunun değışimi [29].

## 2.2 Transformatör Yeniden Boyutlandırma Yaklaşımları

Buraya kadar sunulan literatür taramasından, harmoniklerin transformatörlerde ekstra kayıplara yol açtığı görülmektedir. Bunun neticesinde, anma gücünde harmonik üreten (doğrusal olmayan) yükleri besleyen transformatörlerin anma kayıplarından daha yüksek kayıplara sahip olacağı ve aşırı ısınacağı açıktır.

Bu aşırı ısınma durumuna bağlı transformatörlerin ömür kaybını önlemek için literatürde “deratasyon (derating)” veya “yeniden boyutlandırma” olarak isimlendirilen bir metot uygulanmıştır [29-38]. Yeniden boyutlandırma, “transformatörlerin sinüzoidal olmayan şartlardaki kaybının anma kaybını geçmeyecek şekilde azami yüklenme oranının belirlenmesi” olarak açıklanabilir. Buna göre, transformatörlerin sinüzoidal olmayan şartlarda transfer edebileceği azami gücün anma gücüne oranı azami yüklenme oranı veya deratasyon faktörü (DF) olarak ifade edilmiştir.

Literatürde, transformatörlerin sinüzoidal olmayan şartlarda azami yüklenme oranı yaygın olarak dört farklı yöntemle hesap edilmiştir. Bu yöntemler; (i) IEEE C.57.100 standardında kuru ve yağlı tip transformatörler için tanımlı harmonik kayıp faktörü ( $F_{HL}$ ) metodu [14], (ii) UL 1562 standardında kuru tip transformatörler için tanımlı K-faktör metodu [1, 39], (iii) harmoniklere bağlı kayıpların ölçümüne dayalı metotlar [31, 32] ve (iv) harmoniklere bağlı kayıpların transformatör modelleriyle hesabına dayanan metotlardır [33, 38].

Bunlara ilaveten, EN/CENELEC 50464-3 standardında [40] tanımlı faktör-K yöntemi literatürde son zamanlarda yapılan çalışmalarda [29, 30] dikkate alınmaya başlanmıştır. IEEE C.57.110, UL 1562 ve EN/CENELEC 50464-3 standartlarında sunulan metotlar azami yüklenme oranının hesabı için pratik olarak uygulanabilen kapalı ifadelerle sahiptir. Diğer metotlar ise; transformatörlerin sinüzoidal olmayan test şartlarındaki toplam kaybının anma kayıp değerleriyle karşılaştırılması, böylece anma kayıp değerinin aşılmadığı yüklenme oranının azami yüklenme oranı veya deratasyon faktörü (DF) olarak belirlenmesi prensibine dayanmaktadır.

Aşağıda IEEE ve CENELEC/EN uluslararası standartlarında sunulan yeniden boyutlandırma yaklaşımları detaylı olarak sunulmuştur:

### 2.2.1 IEEE C.57.110 Standardı Yaklaşımı

IEEE C57.110 standardı, gerilim harmoniklerinin ihmal edilebilir olduğu sistemler için yük akımı harmoniklerine bağlı kayıpları dikkate alarak, harmonik kayıp faktörü indisini ( $F_{HL}$ ) tanımlamış ve bu indis temelli pratik bir azami yüklenme oranı hesap yöntemi ortaya koymuştur.

Bu yöntemle göre, azami yüklenme oranı ifadesi kuru ve yağlı tip transformatörler için sırasıyla,

$$DF_{IEEE} = \frac{I_{azami}}{I_R} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}(pu)}{1 + F_{HL}P_{EC-R}(pu)}} \quad (\text{Kuru tip}) \quad (2.12)$$

$$DF_{IEEE} = \frac{I_{azami}}{I_R} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu)}{1 + F_{HL}P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR}P_{OSL-R}(pu)}} \quad (\text{Yağlı tip}) \quad (2.13)$$

olup bu ifadelerde yer alan  $F_{HL}$  ve  $F_{HL-STR}$  indisleri,

$$F_{HL} = \frac{\sum_h h^2 I_h^2}{\sum_h I_h^2} = \frac{\sum_h h^2 I_h^2}{I_{te}^2} \quad (2.14)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_h I_h^2 h^{0.8}}{\sum_h I_h^2} = \frac{\sum_h I_h^2 h^{0.8}}{I_{te}^2} \quad (2.15)$$

olarak tanımlanmıştır [14, 25, 29, 30]. Azami yüklenme oranı ifadelerindeki  $P_{EC-R}(pu)$  ve  $P_{OSL-R}(pu)$  sargı kaçak kayıpları ile diğer kaçak kayıpların anma değerlerinin anma omik kaybı ( $P_{DC-R}$ ) baz alınarak hesaplanmış birim değerleridir.

Sinüzoidal akım şartlarında  $F_{HL}$  indisi 1 değerinde olup transformatör bu şartlarda plakasında belirtilen gücü besleme kapasitesine sahiptir. Sinüzoidal olmayan (harmonikli) yük akımı şartlarında ise  $F_{HL}$  indisi 1'den büyük değerlere sahip olur.  $F_{HL}$  değeri büyüdükçe transformatörün yüklenme kapasitesi düşer [16].

UL 1562 standardında tanımlı K faktör indisi ile  $F_{HL}$  indisi arasındaki ilişki ise;

$$K = \frac{\sum_h h^2 I_h^2}{I_R^2} = \left( \frac{I_{te}}{I_R} \right)^2 F_{HL} \quad (2.16)$$

biçiminde ifade edilebilir [30]. Bu ifadede  $I_R$  transformatörün anma akımıdır. Buradan, anma akım şartları için hesap edilen  $F_{HL}$  değerinin K faktör değerine eşit olduğu sonucuna varılır.

### 2.2.2 CENELEC/EN 50464-3 Standardı Yaklaşımı

CENELEC/EN 50464-3 standardında, doğrusal olmayan yükleri besleyen transformatörlerin azami yüklenme oranının hesabında sargı kayıplarındaki harmonik akımlarına bağlı artış dikkate alınmış ve bu hesap için Factor-K indisi tanımlanmıştır [29, 30, 40]:

$$Factor - K = \left( 1 + \frac{e}{1+e} \left( \frac{I_1}{I_{te}} \right)^2 \times \sum_{h \geq 2} \left( h^q \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

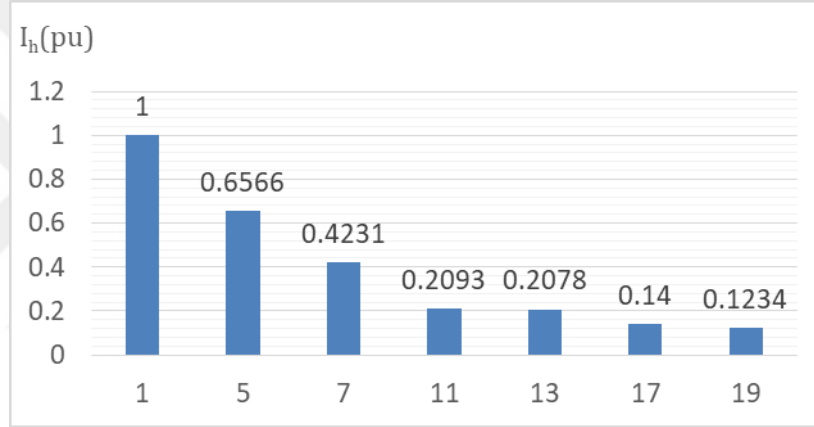
Bu denklemde q, sargı tipine ve frekansa bağlı bir parametredir. İfadedeki e parametresi  $P_{EC-R}(\text{pu})$ 'dur. Sargılarında dikdörtgen veya yuvarlak kesitli iletken bulunduran transformatörler için q'nun tipik değeri 1.7'dir. Eğer transformatörün alçak gerilim tarafı folyo biçiminde sargıya sahipse q katsayısı 1.5 alınabilir.

Böylece, aynı standart, transformatörün azami yüklenme oranını (deratasyon faktörünü) Denklem (2.18)'de verilen biçimde tanımlamıştır:

$$DF_{EN} = \frac{I_{azami}}{I_R} = \frac{1}{Factor-K} \quad (2.18)$$

### 2.3 Örnek Durum için Transformatörlerin Yeniden Boyutlandırılması

Bu kısımda yukarıda detaylı bir şekilde özetlenen iki uluslararası standardın önerdiği yeniden boyutlandırma yaklaşımlarının örnek bir durum için uygulaması yapılacaktır. Örnek durumda ele alınan transformatör, kuru tip 2 MVA gücünde 6300 V / 400 V anma gerilimlerine sahip yıldız/yıldız bağlı bir güç transformatörüdür. Bu transformatörün  $P_{EC}(pu)$  değeri 0.231'dir. Transformatörün beslediği yükün harmonik spektrumu Şekil 2.4'de sunulmuştur. Bu akım harmonik spektrumu için IEEE C.57.110 ve CENELEC/EN 50464-3 standartlarında önerilen yeniden boyutlandırma yaklaşımlarının sonuçları Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de özetlenmiştir.



Şekil 2.4: IEEE ve CENELEC/EN transformatör yeniden boyutlandırma yaklaşımlarının uygulamasında dikkate alınan yük akımı harmonik spektrumu.

Tablo 2.1: IEEE yaklaşımı uygulama tablosu.

$h$	$[I_h(pu)]^2$	$h^2 [I_h(pu)]^2$
1	1.0000	1.0000
5	0.4311	10.7789
7	0.1790	8.7755
11	0.0438	5.3024
13	0.0431	7.2997
17	0.0196	5.6692
19	0.0152	5.5055
$\Sigma$	1.7318	44.33
$F_{HL}$		25.62
$I + P_{EC-R}(pu)$		1.231
$I + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)$		6.918
$DF_{IEEE}(\%)$		42.18

**Tablo 2.2:** CENELEC/EN yaklaşımı uygulama tablosu.

$h$	$[I_h(pu)]^2$	$h^q [I_h(pu)]^2$
1	1.0000	-
5	0.4311	6.6501
7	0.1790	4.8924
11	0.0438	2.5813
13	0.0431	3.3743
17	0.0196	2.4211
19	0.0152	2.2684
$\Sigma$	1.7318	22.1876
$\frac{P_{EC}(pu)}{1 + P_{EC}(pu)} \left(\frac{I_1}{I_{te}}\right)^2$	0.1084	
Factor-K	1.8459	
$DF_{EN}(\%)$	54.17	

Bu tablolardan, örnek durum için IEEE yaklaşımının %42.18 ve CENELEC/EN yaklaşımının %54.17 azami yüklenme oranı sonucunu verdiği görülmektedir.

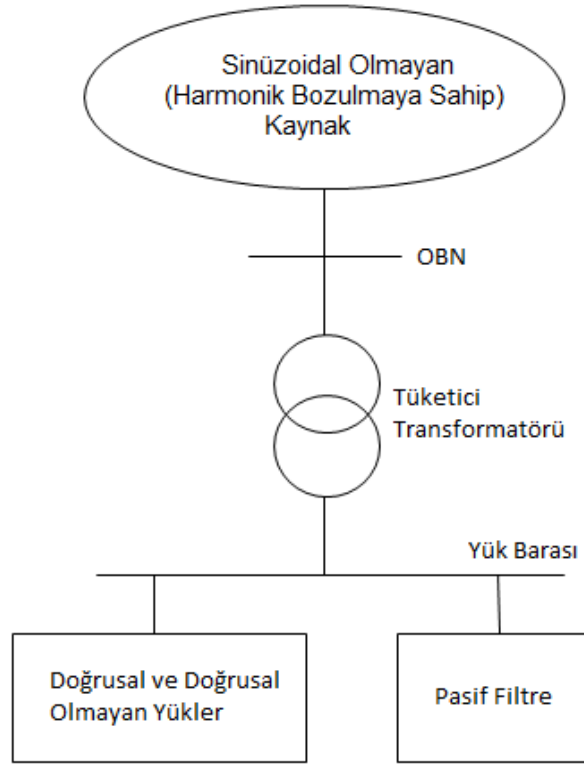
## 2.4 Sonuç

Bu bölümde sunulan niteliksel ve niceliksel analizlerden,

- Harmoniklere bağlı kayıp artışının transformatörlerin aşırı ısınmasına dolayısıyla ömürlerinde düşüşe yol açtığı,
- Harmoniklere bağlı ömür kaybını önlemek için literatürde çeşitli yeniden boyutlandırma veya deratasyon yöntemlerinin uygulandığı,
- IEEE C.57.110, UL 1562 ve EN/CENELEC standartlarında sunulan yöntemlerin, deratasyon faktörü veya azami yüklenme oranı hesabı için pratik olarak uygulanabilen kapalı ifadelerle sahip olduğu,
- IEEE C.57.110 ve UL 1562 standartlarında tanımlı deratasyon indisleri olan  $F_{HL}$  ve K faktörün anma akımı şartlarında birbirine eşit olduğu,
- Son olarak; IEEE C.57.110 ve EN/CENELEC yaklaşımlara göre hesaplanan azami yüklenme oranlarının önemli derecede birbirinden farklı olduğu, sonuçlarına varılmıştır.

### 3. TİPİK ENDÜSTRİYEL DAĞITIM SİSTEMİNİN HARMONİK TANIM BÖLGESİNDE MODELLENMESİ VE GÜÇ KALİTESİ İNDİSLERİNİN HESABI

Tipik bir endüstriyel güç sisteminin tek hat diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere, sistem üç fazlı doğrusal ve doğrusal olmayan yükler, ortak bağlantı noktasından (OBN) tüketiciye enerji taşıyan tüketici transformatörü ve yük barasına bağlı pasif filtreden oluşmaktadır.



Şekil 3.1: Tipik bir endüstriyel güç sisteminin tek hat diyagramı.

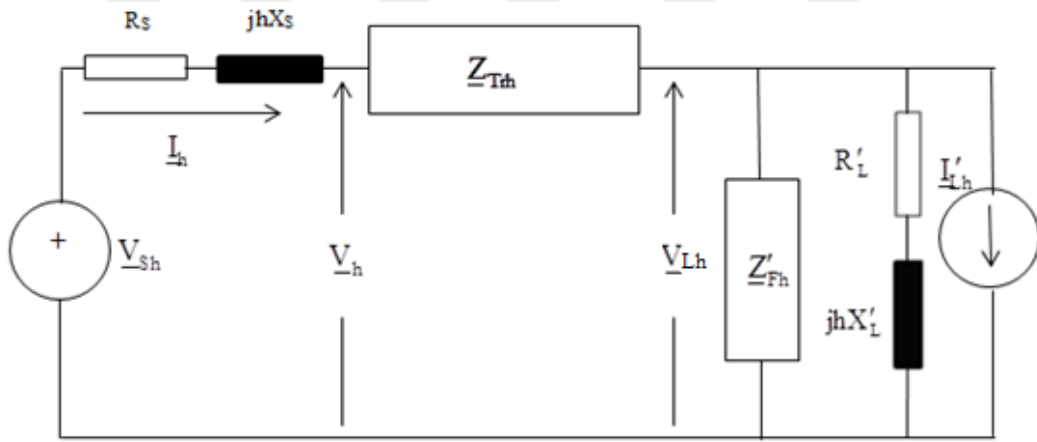
Aşağıda sırasıyla bu test sisteminin modellenmesi ve optimal filtre tasarım probleminin ifade edilmesinde ihtiyaç duyulacak güç kalitesi indislerinin hesabı sunulmuştur:



### 3.1 Sistemin Modellenmesi

Şekil 3.2’de verilen h. harmonik tek faz eşdeğer devre, dikkate alınan tipik dağıtım sisteminin akım, gerilim ve güç ifadelerini yazmak için pratik olarak kullanılabilir. Bu pratik çözüm, incelenen sistem dengeli olduğu için geçerlidir. Sistemdeki doğrusal olmayan yükler, sabit harmonik akım kaynağı ( $I'_{Lh}$ ) olarak, doğrusal yükler ise empedans ( $R'_L + jhX'_L$ ) olarak, modellenmiştir [22-24].

Bu yük parametreleri, transformatörün primer tarafından görülen akım ve empedans parametreleridir. Yük tarafında ölçülen toplam harmonik bozulma (THDV) seviyesinin % 10'dan az olması sebebiyle; sabit harmonik akım kaynağı modeli sistemdeki doğrusal olmayan yükleri analiz etmek için yeterli hassasiyettedir [23]. Sistemde kaynak tarafı ise, her harmonik numarası için bir Thevenin eşdeğer gerilim kaynağı ( $V_{Sh}$ ) ve bir Thevenin eşdeğer empedansı ( $Z_{Sh} = R_S + jhX_S$ ) olarak modellenmiştir.



Şekil 3.2: Tipik bir endüstriyel güç sisteminin h. harmonik numarası için tek faz eşdeğer devresi.

Test sisteminde, harmonik modelleme ve simülasyon üzerine çalışmalar [22, 24] göz önüne alınarak, tüketici transformatörü pratik olarak primer taraftan görülen harmonik kısa devre empedansı olarak modellenmiştir:

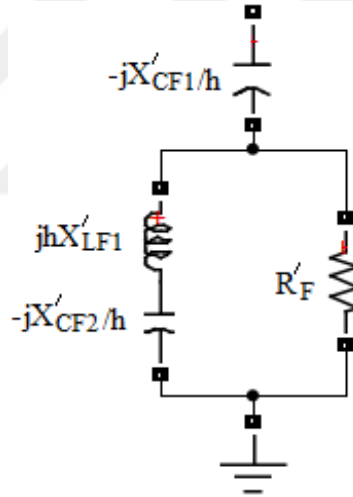
$$Z_{Trh} = R_{Trh} + jhX_{Tr} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de  $X_{Tr}$  sargının temel harmonik endüktif reaktansı ve  $R_{Th}$  sargıların harmonik direncini göstermektedir. Literatürdeki [14] ve [25] çalışmalarına göre,  $R_{Th}$  sargının d.a. direnci ( $R_{dc}$ ) ve sargı kaçak kaybına ( $R_{ec}$ ) karşılık gelen eşdeğer direnç cinsinden ifade edilebilir:

$$R_{Th} = R_{dc} + h^2 R_{ec} \quad (3.2)$$

Bununla birlikte, tek faz eşdeğer devresi Şekil 3.3'de verilen C tipi pasif harmonik filtrenin transformatörün primer tarafından görülen harmonik empedansı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Z'_{Fh} = -j \frac{X'_{CF1}}{h} + \frac{R'_F j (hX'_{LF1} - X'_{CF2}/h)}{R'_F + j (hX'_{LF1} - X'_{CF2}/h)} \quad (3.3)$$



Şekil 3.3: C tipi filtrenin tek faz eşdeğer devresi.

Filtrenin reaktansları arasındaki ilişkiler Denklem (3.4)'de verilen şekilde yazılabilir [7, 16, 18]:

$$X'_{CF1} = X'_{CF2} (h_t^2 - 1), X'_{LF1} = X'_{CF2} \quad (3.4)$$

Bu ifade de,  $h_t$  filtrenin ayarlandığı harmonik numarasıdır.

C tipi filtrenin parametrelerinin pratik olarak hesabında izlenen adımlar aşağıda sıralanmıştır [7]:

- İlk olarak; filtre sistemde olmadığı (sistem kompanze edilmemiş) durumda OBN’de ölçülen temel frekans güç faktörü ( $DPF_g$ ), temel frekans aktif gücü ( $P_1$ ) ve temel frekans güç faktörünün istenen değeri ( $DPF_i$ ) cinsinden, kompanze edilmesi gereken temel frekans reaktif gücü ( $Q_{C1}$ ) hesaplanır. Bu reaktif güç değeri ve OBN’de ölçülen temel frekans geriliminin etkin değeri cinsinden, ana kondansatörün reaktansı ( $X'_{CF1}$ ) bulunur:

$$X'_{CF1} = \frac{V_1^2}{Q_{C1}}, \quad Q_{C1} = P_1 \left( \tan(\cos^{-1}(DPF_g)) - \tan(\cos^{-1}(DPF_i)) \right) \quad (3.5)$$

- İkinci olarak; yardımcı kondansatörün ve bobinin temel frekans reaktansları ( $X'_{CF2}$  ve  $X'_{LF1}$ ),  $X'_{CF1}$  ve  $h_t$  dikkate alınarak Denklem (3.4)’den hesaplanır. Burada şu belirtilmelidir ki geleneksel olarak  $h_t$ , yük akımının baskın harmoniklerinden en küçük dereceli olanı civarında seçilir.
- Son olarak,  $R'_F$  değeri,  $h_t$ ,  $X'_{LF1}$  ve filtrenin kalite faktörü ( $q$ ) cinsinden Denklem (3.6)’da verilen ifadeye göre belirlenir:

$$R'_F = \frac{h_t X'_{LF1}}{q} \quad (3.6)$$

### 3.2 Güç Kalitesi İndisleri Hesabı

Buraya kadar sunulan modelleme yaklaşımları kullanılarak, Süperpozisyon ilkesi vasıtasıyla  $h$ . harmonik için hat akımı ( $I_h$ ) ve OBN gerilimi ( $V_h$ ) Denklem (3.7) ve (3.8)’de verilen biçimde yazılabilir:

$$I_h = \frac{V_{Sh}}{\underline{Z}_{Sh} + \underline{Z}_{Trh} + \underline{Z}'_{FLh}} + \frac{\underline{Z}'_{FLh}}{\underline{Z}_{Sh} + \underline{Z}_{Trh} + \underline{Z}'_{FLh}} I'_Lh \quad (3.7)$$

$$V_h = V_{Sh} - I_h \underline{Z}_{Sh} \quad (3.8)$$

Burada (  $\underline{Z}'_{FLh} = \left( \frac{1}{\underline{Z}'_{Fh}} + \frac{1}{R'_L + jhX'_L} \right)^{-1}$  ), yükün  $h$ . harmonik empedansı ( $R'_L + jhX'_L$ ) ve pasif filtrenin  $h$ . harmonik empedansının ( $\underline{Z}'_{Fh}$ ) paralel eşdeğeridir. Bu ifadelerde, alt simge ( $\underline{\quad}$ ) ilgili gerilim, akım ve empedansların fazör değerlerini belirtir.

OBN'de ölçülen  $THDV$  ve  $THDI$  değerleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3.9)$$

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (3.10)$$

Temel frekans güç faktörü ( $DPF$ ), temel harmonik aktif gücü ( $P_1 = V_1 I_1 \cos(\phi_1)$ ) ve temel harmonik görünür gücü ( $S_1 = V_1 I_1$ ) cinsinden Denklem (3.11)'de verilen ifadeyle bulunur:

$$DPF = \frac{P_1}{S_1} \quad (3.11)$$

Gerilim harmoniklerinin etkisi ihmal edilerek, IEEE C.57.110 standardına göre azami yüklenme oranı bulunur:

$$S_{Maks} (\%) \approx DF_{IEEE} \cdot 100 = \frac{1 + P_{EC-R} (pu)}{\sqrt{1 + F_{HL} P_{EC-R} (pu)}}, \quad F_{HL} = \frac{\sum h^2 I_h^2}{I_{te}^2} \quad (3.12)$$

### 3.3 Sonuç

Bu bölümde analizler sırasında kullanılacak, C tipi filtre ile kompanze edilmiş tipik bir endüstriyel dağıtım sistemi tanıtılmış, sistemde yer alan elemanlar harmonik tanım bölgesinde modellenmiş ve analizlerde dikkate alınacak güç kalitesi indislerinin ifadeleri sunulmuştur.

Modelleme alışmaları sırasında, çözümü basitleştirmek için sistemin dengeli olduğu göz önüne alınarak tek faz eşdeğer devre tercih edilmiştir. Sistem geriliminin toplam harmonik bozulması %10 değerinin altında olması sebebiyle hassasiyet bakımından ihmal edilebilir hatalara yol açabilecek ve uygulaması pratik olan harmonik akım kaynağı modeli doğrusal olmayan yüklerin modellenmesinde kullanılmıştır.

Ayrıca bu eşdeğer devrede, transformatör her bir harmonik numarası için kısa devre empedansı olarak modellenmiştir, kısa devre direncinin hesabında sargı kaçak kaybının frekans bağımlılığı dikkate alınmıştır.



## 4. BASİT KAPASİTİF KOMPANZATÖR VE PRATİK YAKLAŞIMLA TASARLANMIŞ C TİPİ FİLTRE İÇİN ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde, basit kapasitif kompanzator ve pratik yaklaşımla tasarlanmış çeşitli C tipi filtrelerin, bir önceki bölümde modellenen tipik dağıtım sisteminde, transformatör yüklenme kapasitesine ve harmonik kirliliğe etkileri analiz edilmiştir.

### 4.1 Kompanze Edilmemiş Sistem için Transformatör Yüklenme Kapasitesi ve Harmonik Bozulma Seviyeleri

Simüle edilen sistemin temel frekans kaynak gerilimi ve kısa devre gücü sırasıyla, 6345 V (hatlar arası) ve 210 MVA'dır. Sistemin tek faz eşdeğer devresi için, kaynak empedansı parametreleri ve yük empedansı parametreleri  $R_S = 0.0189 \Omega$ ,  $X_S = 0.189 \Omega$ ,  $R_L' = 13.85 \Omega$  ve  $X_L' = 13.18 \Omega$ 'dur. Sistemde, 2 MVA ve 6300 V / 400 V anma değerlerine sahip yıldız-yıldız bağlı kuru tip bir tüketici transformatörü bulunmaktadır. Transformatörün  $R_{dc}$ ,  $R_{ec}$ ,  $X_{Tr}$  ve  $P_{EC-R}$  parametreleri, 0.104  $\Omega$ , 0.024 $\Omega$ , 0.882  $\Omega$  ve 0.231 pu'dur. Bu sistem için kaynak gerilimi ve primer tarafa indirgenmiş yük akımı harmonikleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

**Tablo 4.1:** Kaynak gerilimi harmonikleri ve primer tarafa indirgenmiş yük akımı harmonikleri.

$h$	$\underline{V}_{Sh} (V)$	$\underline{I}'_{Lh} (A)$
5	36.64 $\angle 0^\circ$	14.30 $\angle 5 \cdot -45^\circ$
7	27.48 $\angle 0^\circ$	13.20 $\angle 7 \cdot -45^\circ$
11	23.82 $\angle 0^\circ$	12.10 $\angle 11 \cdot -45^\circ$
13	20.15 $\angle 0^\circ$	11.00 $\angle 13 \cdot -45^\circ$
17, 19, 23, 25	11.00 $\angle 0^\circ$	7.70 $\angle h \cdot -45^\circ$
29, 31, 35, 37	3.66 $\angle 0^\circ$	5.50 $\angle h \cdot -45^\circ$
41, 43, 47, 49	1.85 $\angle 0^\circ$	3.30 $\angle h \cdot -45^\circ$

OBN’de ölçülen  $THDV$ ,  $THDI$  ve  $F_{HL}$  değerleri % 3.45, % 16.19 ve 10.34’tür. Bu durumda,  $S_{Maks}$  % 60.27 değerine sahiptir. Yükün  $DPF$  ve üç faz için toplam  $P_I$  değeri 0.7051 ve 1410 kW’dır.

IEEE std. 519 [17]’da, test sisteminin sahip olduğu gerilim seviyesi ve yük akımı/kısa devre akımı oranı için Tablo 4.2’de verilen gerilim ve akım harmonik sınırları tanımlıdır. Bu tabloda sunulan harmonik sınırlamalar dikkate alındığında OBN’de ölçülen  $THDV$  değerinin IEEE std. 519’da belirtilen %5 sınır değerine uyduğu ancak hat akımının  $THDI$  değerinin aynı standartta tanımlı %15 değerini aştığı açıkça görülmektedir. Diğer taraftan, sistem için  $S_{Maks}$  ve  $DPF$  değerlerinin düşük seviyelerdedir.

**Tablo 4.2:** Modellenen system için IEEE std. 519. gerilim ve akım harmonik sınırları.

Her bir harmonik numarası için sınırlamalar (temel harmoniğin yüzdesi cinsinden)						THD Sınırı
Harmonik numarası	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	
Hat akımı	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
OBN gerilimi	3.0					5.0

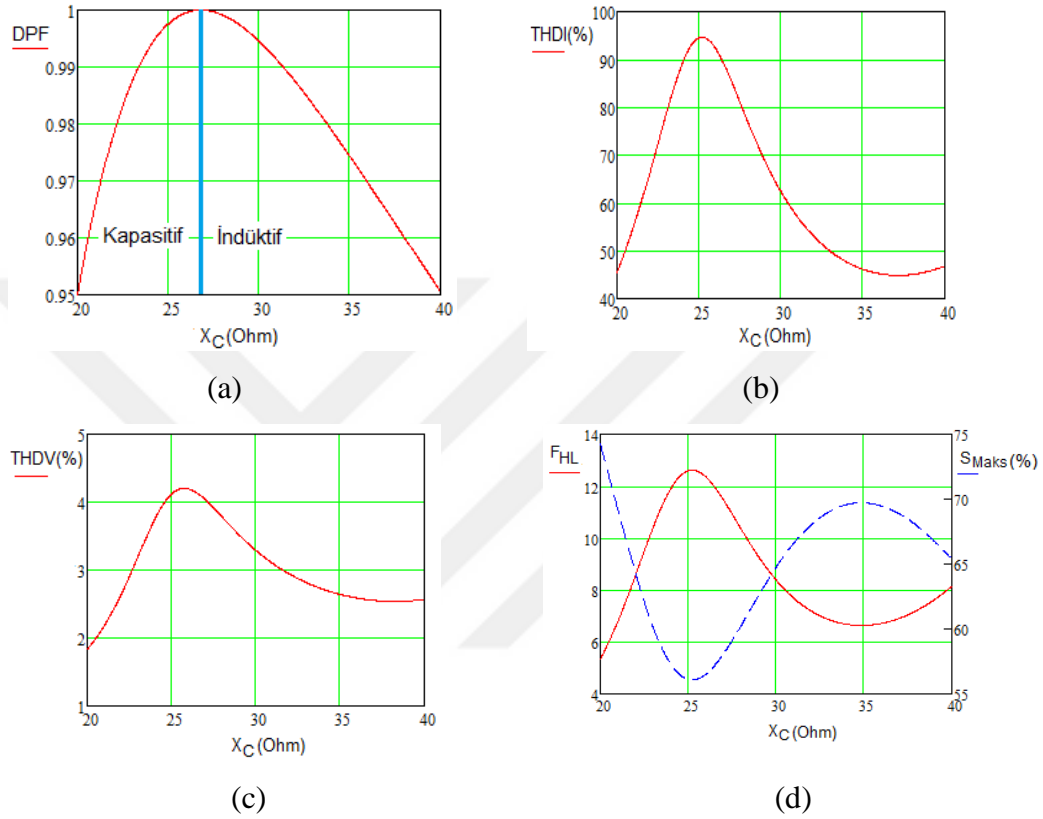
Buna göre, aşağıda sırasıyla basit kondansatör ve pratik yaklaşımla tasarlanmış C tipi filtre ile kompanze edilmiş sistem durumları için transformatör yüklenme kapasitesi ve güç kalitesi parametreleri analiz edilmiştir.

## 4.2 Basit Kapasitif Kompanzasyon için Analiz Sonuçları

Bu sistemde filtre yerine basit bir kondansatör ( $Z'_{Fh} = -jhX_C$ ) kullanılacak olsaydı,  $X_C$ 'nin  $20\Omega$  ile  $40\Omega$  aralığı için gözlemlenen  $DPF$ ,  $THDI$ ,  $THDV$ ,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$ 'ın değişimleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

Şekil 4.1 (a)’dan  $X_C$ 'nin  $20\Omega$  ile  $40\Omega$  aralığında  $DPF$ 'nin kapasitif 0.95 ve indüktif 0.95 aralığında değiştiği,  $X_C = 27\Omega$  civarında  $DPF$ 'nin 1.00 değerine

yaklaştığı bir başka ifadeyle bu kapasitif reaktans değerinde temel frekans için tam kompanzasyonun gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4.1 (b) ve (c) ise taranan  $X_C$  aralığı için OBN’de ölçülen  $THDV$  ve  $THDI$ ’nin en yüksek değerlerinin sırasıyla %4 ve %95 civarında olduğunu, ayrıca bu en yüksek değerlerin  $X_C = 25 \Omega$  civarında meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.1: Basit kapasitif kompanzasyon ile (a)  $DPF$ , (b)  $THDI$ , (c)  $THDV$  ve (d)  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  indislerinin değişimi.

Bununla birlikte, Şekil 4.1 (d)’den  $F_{HL}$ ’nin en yüksek ve en düşük değerlerinin yaklaşık olarak 13 ve 7 olduğu, bu değerlere  $X_C$ ’nin sırasıyla  $25 \Omega$  ve  $35 \Omega$  değerlerinde ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca, bu  $F_{HL}$  değerleri için hesaplanan  $S_{Maks}$  değerleri ise %56 ve %70 civarlarındadır. Son olarak, gözlemlenen en iyi  $S_{Maks}$  değeri (%70) için  $THDV$ ,  $THDI$  ve  $DPF$  değerleri ise sırasıyla %2.6, %46 ve 0.97 (indüktif)’dir.



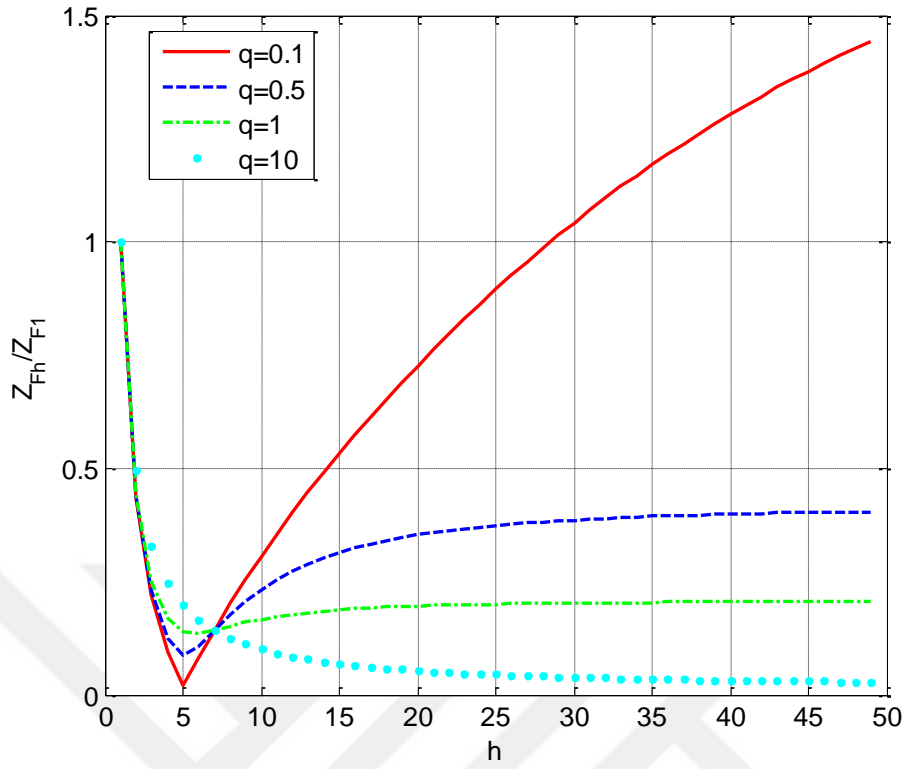
Yukarıda verilen sonuçlardan, basit kapasitif kompanzasyonun  $S_{Maks}$ ,  $THDI$ ,  $F_{HL}$  ve  $THDV$ 'de önemli derecede kötüleşmelere yol açtığı, dolayısıyla kompanzasyon için pasif ve/veya aktif filtre kullanımının gerektiği ifade edilebilir.

### 4.3 Pratik Yaklaşımla Tasarlanmış C tipi Filtre için Analiz Sonuçları

Pratik C tipi filtre tasarım yaklaşımına göre, Denklem (3.4) ile (3.6) arası verilen ifadeler dikkate alınarak; ana kapasite ( $X'_{CF1}$ ),  $DPF$ 'yi yaklaşık olarak 1.00 yapacak şekilde 27.000  $\Omega$  değerinde seçilebilir. Ayrıca; baskın yük akımı harmoniklerinden en düşük dereceli olan 5. harmonik, filtrenin ayarlanacağı harmonik numarası ( $h_i$ ) olarak belirlenir. Buna göre;  $X'_{CF2}$  ve  $X'_{LF1}$  reaktansları 1.125  $\Omega$  değerinde hesap edilmiştir.

Diğer taraftan, üçüncü tasarım parametresi olan kalite faktörünün ( $q$ ), 0.1, 0.5, 1 ve 10 değerleri için C tipi filtrenin empedans ( $Z_{Fh}/Z_{F1}$ ) -frekans karakteristik eğrisi ( $h$ ) Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu şekilden,  $q$ 'nun küçük değerlerinde (0'a yaklaştıkça) filtrenin tek ayarlı bir filtre gibi davrandığı, büyük (1'den büyük) değerlerinde ise yüksek geçiren bir filtre gibi davrandığı görülmektedir. 0 ile 1 arası  $q$  değerlerinde ise C tipi filtrenin tipik empedans-frekans karakteristiği elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, son durumda filtre hem tek-ayarlı hem de yüksek geçiren filtre karakteristiklerini birlikte göstermektedir.

Şekil 4.2'de verilen empedans-frekans karakteristiklerinden yola çıkarak, C tipi filtrenin üç tasarım durumu; (i) tek ayarlı filtre gibi davranan C tipi filtre ( $q=0.1$ ), (ii) yüksek geçiren filtre gibi davranan C tipi filtre ( $q=10$ ) ve (iii) her iki filtre özelliğini gösteren C tipi filtre ( $q=0.5$ ) için Tablo 4.3'de filtre parametreleri ve Tablo 4.4'de filtreli sisteme ait güç kalitesi indisi değerleri ile transformatör yüklenme kapasiteleri verilmiştir.



Şekil 4.2: Farklı  $q$  değerleri için C tipi filtrenin empedans-frekans (harmonik numarası) eğrileri.

Tablo 4.3: Pratik yaklaşıma göre tasarlanan C tipi filtre parametreleri.

	Durum i	Durum ii	Durum iii
$X'_{CF1} (\Omega)$	27.000	27.000	27.000
$X'_{CF2} = X'_{LF1} (\Omega)$	1.125	1.125	1.125
$R'_F (\Omega)$	56.25	0.563	11.25

Tablo 4.4: Pratik yaklaşıma göre tasarlanan C tipi filtreler sisteme bağlandıktan sonra ulaşılan güç kalitesi indisleri ve transformatör yüklenme kapasitesi değerleri.

	Durum i	Durum ii	Durum iii
$THDI(\%)$	9.49	54.09	9.09
$THDV(\%)$	1.90	2.91	1.72
$DPF$	0.99	0.99	0.99
$F_{HL}$	4.11	6.87	2.26
$S_{Maks}(\%)$	79.42	68.96	89.87

Tablo 4.4'den, C tipi filtreyle ulaşılan  $THDI$ ,  $THDV$ ,  $DPF$ ,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  değerlerinin sırasıyla durum i için %9.49, %1.90, 0.99, 4.11 ve %79.42, durum ii için %54.09, %2.91, 0.99, 6.87 ve %68.96, durum iii için %9.09, %1.72, 0.99, 2.26 ve %89.87 olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlardan, C tipi filtrenin kalite faktörünün,  $THDI$ ,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  değerlerine önemli derecede etki ettiği görülmektedir. Bununla birlikte, i ve iii nolu C tipi filtre tasarımları, basit kapasitif kompanzatrden daha iyi transformatör yüklenme kapasitesi ve harmonik bozulma seviyelerine ulaşmıştır. Ancak, aynı sonuç, ii nolu tasarım için geçerli değildir. Ayrıca, ii nolu tasarım, IEEE std. 519'da tanımlı  $THDI$  sınırlamasına uymamaktadır.

#### 4.4 Sonuç

Bu bölümde yapılan analizlerden, kapasitif kompanzasyonun harmonik bozulmayı arttırdığı, bunun yanı sıra transformatör azami yüklenme kapasitesini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür.

Yapılan analizler, pratik yolla hesaplanan üç farklı C tipi filtre tasarımından, transformatör yüklenme kapasitesi ve güç kalitesi indislerinin farklı şekillerde etkilendiğini göstermiştir. Böylece, IEEE std. 519'da tavsiye edilen temel frekans güç faktörü aralığı ile harmonik bozulma sınırlamalarını sağlayan ve transformatör yüklenme kapasitesini maksimize eden C tipi filtre tasarımının elde edilmesinin bir optimizasyon problemi olduğu sonucuna varılmıştır.

## 5. OPTİMAL PASİF FİLTRE TASARIM PROBLEMİNİN İFADE EDİLMESİ VE ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde, öncelikle sinüzoidal olmayan gerilim ve akım şartlarında transformatörlerin yüklenme kapasitesini maksimize etmek için optimal filtre tasarım probleminin formülasyonu sunulmuştur. Daha sonra, bu problemin çözümünde uygulanacak Karınca Aslanı [19], Yusufçuk [20] ve Büyük Patlama Büyük Çöküntü [21] sezgisel algoritmaları tanıtılmıştır. Son olarak, bu algoritmaların verdiği sonuçlar ve algoritmaların çözüm için gerektirdiği iterasyon sayıları modellenen tipik endüstriyel sistem için karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Analizler sırasında, [18]'de aynı problemin çözümü için uygulanmış Balina optimizasyon algoritmasının sonuçları referans alınmıştır. Ayrıca, optimal C tipi filtreye elde edilen sonuçlar, daha önceki bölümlerde pratik yolla tasarlanmış C tipi filtreye elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### 5.1 Optimal Filtre Tasarım Probleminin İfade Edilmesi

Transformatörlerin yüklenme kapasitesi ile ters orantılı olan  $F_{HL}$  indisinin minimize edilmesi, literatürdeki daha önce yapılmış çalışmalar [15, 16, 18] dikkate alınarak optimal filtre tasarım problemi için amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Böylece, pratikte, harmonikli şartlarda transformatörün yüklenme kapasitesinin maksimizasyonu amaçlanmıştır.

Ortak bağlantı noktası (OBN) gerilimi ve hat akımının her bir harmonik bileşeni ( $V_h$  ve  $I_h$ ) ve toplam harmonik bozulma değerleri ( $THDV$  ve  $THDI$ ) için IEEE 519 standardında belirtilen sınırlamalar problemin kısıtları olarak tanımlanmıştır. Böylece optimal filtrenin IEEE 519 standardına uyumlu olması hedeflenmiştir. Burada ayrıca belirtilmelidir ki, harmonik kısıtları, filtre sebebiyle meydana gelmesi olası, rezonans durumlarını da otomatik olarak önleyecektir. Filtre bağlandıktan sonra reaktif güç kompanzasyonunun istenilen seviyede olması için

problemin son kısıtı olarak,  $DPF$ 'nin 0.95 ile 1.00 aralığında ve indüktif olması tanımlanmıştır.

Yukarıda belirtilen amaç ve kısıtlara göre, C-tipi filtre için optimal tasarım probleminin ifadesi aşağıda verilen biçimde yazılabilir:

Bul: Filtrenin direnç ve reaktans parametreleri (fp),

$$\text{Amaç Fonksiyonu: Min } F_{HL} (fp) \quad (5.1)$$

Sınırlar:

$$V_h (fp) \leq \text{Maks}V_h \quad (5.2)$$

$$I_h (fp) \leq \text{Maks}I_h \quad (5.3)$$

$$\text{THDV}(fp) \leq \text{MaksTHDV} \quad (5.4)$$

$$\text{THDI}(fp) \leq \text{MaksTHDI} \quad (5.5)$$

$$0.95 \leq \text{DPF}(fp) \leq 1.00 \text{ (geri)} \quad (5.6)$$

Burada, Denklem (5.1) ve Denklem (5.2) - (5.6) sırasıyla problem formülasyonunun amaç fonksiyonu ve kısıtlarıdır. Eşitsizlik kısıtlarında  $\text{MaksTHDI}$  ve  $\text{MaksTHDV}$ , IEEE standart 519'da tanımlı izin verilen maksimum  $\text{THDI}$  ve  $\text{THDV}$  değerleridir.  $\text{Maks}V_h$  ve  $\text{Maks}I_h$ , aynı standartta tanımlı izin verilen maksimum gerilim ve akım harmonik bileşen değerlerini belirtir.

## 5.2 Problemin Çözümünde Kullanılan Çözüm Algoritmaları

Bu kısımda, yukarıda verilen optimal filtre tasarım probleminin çözümünde uygulanan, Karınca Aslanı [19] , Yusufçuk [20] ve Büyük Patlama Büyük Çöküntü [21] algoritmaları tanıtılmıştır.

### 5.2.1 Karınca Aslanı Algoritması

Karınca Aslanı algoritması, karınca aslanlarının avlanma tekniğini taklit eden bir optimizasyon algoritmasıdır [19]. Bu avlanma tekniğini kısaca açıklamak gerekirse; karınca aslanı larvaları; bir koni şeklinde dairesel bir yol çizerek karıncalar

için tuzaklarını oluştururlar. Bu koloninin gözükmeyen en alt sivri ucuna kendilerini gömerler ve avları olan karıncaları beklemeye başlarlar. Karıncalar gelip, tuzağa girdikleri zamanda tuzaktan çıkmasını engellemek ve tuzağın dibine karıncaları çekmek için, karıncalara kum fırlatmaya başlarlar. Yakaladıkları karıncaları ise çeneleri büyük olduğu için hemen yutarlar ve tuzağını tekrar kurup yeni bir karınca gelmesini beklemeye başlarlar.

Buna göre algoritma oluşturulurken, öncelikle karıncaların rasgele yürüyüşlerinin matematiksel modeli Denklem (5.7)'de verilen biçimde ifade edilmiştir. Bu denklemde,  $n$  maksimum iterasyon sayısını,  $t$  rasgele yürüyüş adımlarını (iterasyon sayısını),  $cumsum$  adımların kümülatif toplam değerini ve  $r(t)$  bir rastgelelik fonksiyonunu ifade etmektedir.  $r(t)$  rastgelelik fonksiyonu ise Denklem (5.8)'de verilen biçimde yazılabilir. Bu ifadeye göre,  $rand$ 'ın 0.5'den küçük eşit olduğu durumlarda  $r(t)$ 'nin değeri sıfır,  $rand$ 'ın 0.5'den büyük olduğu durumlarda  $r(t)$ 'nin değeri 1'dir.

$$X(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ cumsum(2r(t_1)-1) \\ cumsum(2r(t_2)-1) \\ \vdots \\ cumsum(2r(t_n)-1) \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

$$r(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } rand > 0.5 \\ 0 & \text{if } rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (5.8)$$

Diğer taraftan, karıncaların rasgele yürüyüşe başladıklarında konumlarını güncellerken arama uzayı sınırlarının dışına çıkılmaması için Denklem (5.9)'da verilen ifadeye göre konumları normalize edilir. Bu denklemde,  $i$  değişken sayısını,  $a$   $i$ 'nci değişkenin minimum rasgele yürüyüşünü,  $b$   $i$ 'nci değişkenin maksimum rasgele yürüyüşünü,  $c$  ve  $d$  ise her bir iterasyon da güncellenen karınca aslanı pozisyonlarının sırasıyla minimum ve maksimum değerlerini ifade etmektedir.

$$X_i^t = \frac{(X_i^t - a_i)(d_i - c_i^t)}{d_i^t - a_i} + c_i \quad (5.9)$$

Karıncaların tuzağa girdikleri an, karınca aslanının onları tuzağın dibine çekmek için gerçekleştirdiği kum fırlatma hareketinin matematiksel modellenmesi ise Denklem (5.10)-(5.13) arasında sunulmuştur. Bu denklemlerde yer alan,  $I$  kaydırma oranını ifade etmektedir.

$$c_{i=}^t = Antlion_j^t + c^t \quad (5.10)$$

$$d_{i=}^t = Antlion_j^t + d^t \quad (5.11)$$

$$c^t = \frac{c^t}{I} \quad (5.12)$$

$$d^t = \frac{d^t}{I} \quad (5.13)$$

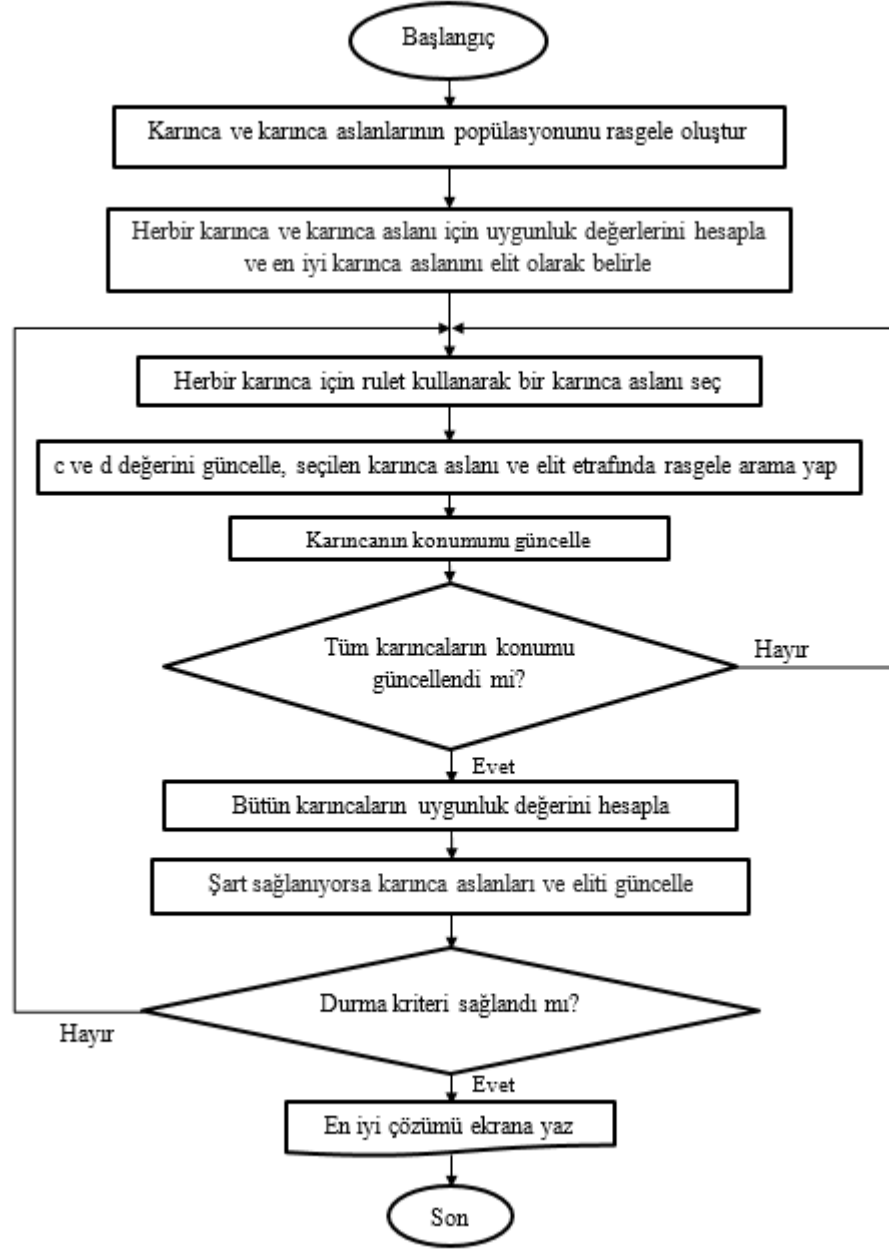
Yukarıda verilen denklemlere ilaveten, rulet tekerleği ile seçilen karınca aslanı ve elit karınca aslanı etrafında yürüyen karıncaların yeni pozisyonları Denklem (5.14)'de verilen ifade kullanılarak bulunabilir. Bu ifadede,  $Ant_i^t$   $t$ . iterasyondaki  $i$ . karınca için; karıncaların yeni pozisyonunu,  $R_A^t$   $t$ . iterasyondaki rulet tekerleği tarafından seçilen karınca aslanı çevresindeki rasgele yürüyüşü,  $R_E^t$  ise  $t$ . iterasyondaki elit karınca aslanı etrafında rastgele yürüyüşü ifade eder.

$$Ant_i^t = \frac{R_A^t + R_E^t}{2} \quad (5.14)$$

Son aşamada ise karınca aslanları tuzağın dibine düşürdükleri karıncaları yedikten sonra kendi pozisyonlarını Denklem (5.15)'de verilen ifadeye göre güncellerler. Bu ifadede,  $Antlion_j^t$   $t$ . iterasyondaki  $j$ . karınca aslanını ifade eder.

$$Antlion_j^t = Ant_i^t \quad \text{if} \quad f(Ant_i^t) < f(Antlion_j^t) \quad (5.15)$$

Buraya kadar detaylı bir şekilde açıklanan karınca aslanı algoritmasının akış diyagramı Şekil 5.1'de sunulmuştur.



Şekil 5.1: Karınca aslanı algoritmasının akış diyagramı.

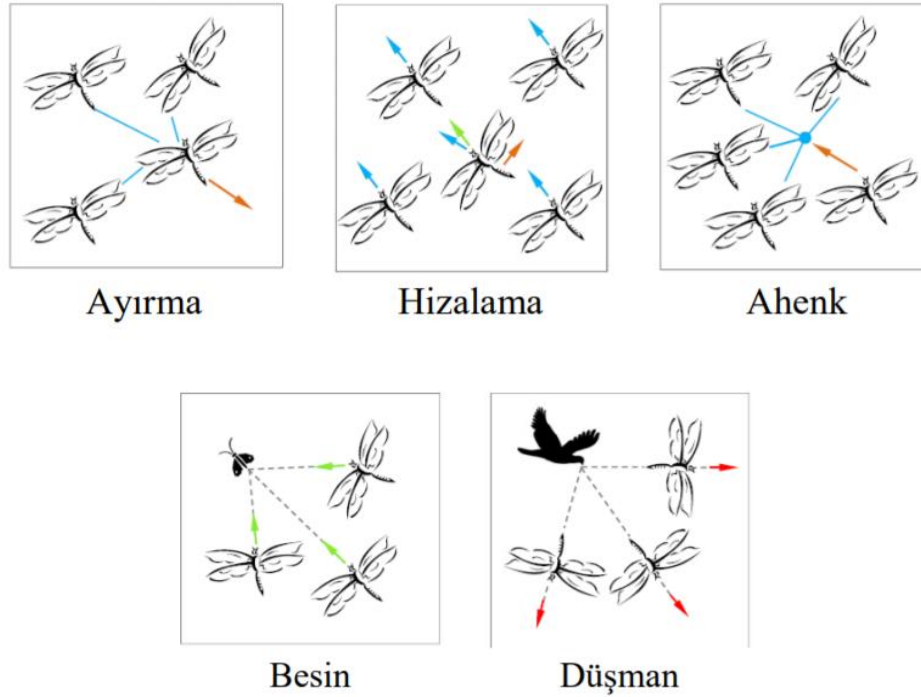
## 5.2.2 Yusufçuk Algoritması

Yusufçuk algoritması, Yusufçuk böceklerinin avlanma davranışını taklit eden sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır [20]. Bu algoritmanın çalışma prensibini



izah etmek için öncelikle yusufçuk böceklerinin avlanma aşamasını açıklamak faydalı olacaktır. Bu yusufçuk sürülerinin davranışları; Ayırma, Hizalama, Ahenk, Besin ve Düşman öğeleri üzerinden açıklanabilir [41].

Bu öğelerden ilki olan Ayırma; sürü içerisindeki diğer yusufçuklarla çarpışmayı önlemek için gereklidir. İkinci öğe olan Hizalama; sürü içerisindeki diğer yusufçuklarla hız uyumu için önem arz etmektedir. Diğer öğeler sırasıyla, Ahenk; sürü merkezine doğru bireylerin eğilimini, Besin; bireylerin gıda kaynaklarına doğru yönelmesini ve Düşman ise; sürünün düşmanlardan kaçma eğilimini ifade eder. Algoritma mantığı bakımından ele alındığında, Besin optimum çözüme yönelimi, Düşmandan kaçış ise tarama alanının artması manalarına gelmektedir. Yusufçuk böcek sürüsünün, bu bahsedilen beş farklı durumda sergiledikleri davranışları Şekil 5.2’de gösterilmiştir [20, 41].



Şekil 5.2: Yusufçuk böcek sürüsünün davranışları [20], [41].

Bu algoritma oluşturulurken öncelikle, yusufçuk böceklerinin yukarıda belirtilen davranışları modellenmiştir. Bu modellerden ilki Denklem (5.16)’da yazılan ayırma ifadesidir. Bu ifadede  $S_i$ ; ayırma indisi,  $X$  mevcut bireyin pozisyonunu,  $X_j$   $j$ . komşu bireyin pozisyonunu,  $N$  ise komşu bireylerin sayısını ifade etmektedir.

$$S_i = - \sum_{j=1}^N X - X_j \quad (5.16)$$

Hizalama, ahenk, besin kaynağına çekim ve düşman tehdidi karşısında dışa doğru kaçış davranışlarının modelleri ise sırasıyla Denklem (5.17)-(5.20)'de verilmiştir. Bu ifadelerde,  $A_i$ ; hizalama indisini,  $V_j$  ise  $j$ . komşu bireyin hızını,  $C_i$  ahenk indisini,  $F_i$ ; besin kaynağına doğru çekim indisini,  $X^+$  ifadesi besin kaynağının pozisyonunu,  $E_i$  bir düşman tehdidi karşısında dışa doğru davranış indisini ve  $X^-$  tehdit eden düşmanın pozisyonunu temsil etmektedir.

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N} \quad (5.17)$$

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} - X \quad (5.18)$$

$$F_i = X^+ - X \quad (5.19)$$

$$E_i = X^- + X \quad (5.20)$$

Yusufçuk böceklerinin  $t+1$ . iterasyondaki pozisyonları ( $X_{t+1}$ ),  $t$ . iterasyondaki pozisyonlarına ( $X_t$ ) göre  $\Delta X_{t+1}$  adım aralığıyla güncellenir:

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \quad (5.21)$$

$t+1$ . iterasyondaki adım aralığının ( $\Delta X_{t+1}$ ) ifadesi,  $s$  ayırma,  $a$  hizalama,  $c$  uyum,  $f$  besin,  $e$  düşman faktörlerinin ağırlık değerleri ile bu davranışlara ilişkin indisler,  $t$ . iterasyondaki adım aralığı  $\Delta X_t$  ve bu adım aralığına ilişkin  $w$  atalet ağırlığı cinsinden Denklem (5.22)'de yazılmıştır:

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_t \quad (5.22)$$

Ayrıca; bu algoritmada rasgelelik davranışı ve yapay yusufçukların keşif özelliklerini iyileştirmek için yusufçuk böceklerinin pozisyon denklemi Le'vy uçuşu olarak ifade edilen rastsal yürüyüş cinsinden ifade edilebilir:

$$X_{t+1} = X_t + Le'vy(d) * X_t \quad (5.23)$$

Bu denklemde,  $t$  mevcut döngüyü,  $d$  ise pozisyon vektörünün boyutunu temsil etmektedir. Le'vy uçuşunun ifadesi,  $r_1$  ve  $r_2$  ile gösterilen iki rasgele sayı,  $\beta$  sabiti,  $\sigma$  fonksiyonu cinsinden Denklem (5.24)'de verilen biçimde yazılabilir:

$$Le'vy(x) = 0.01 * \frac{r_1 * \sigma}{|r_2|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (5.24)$$

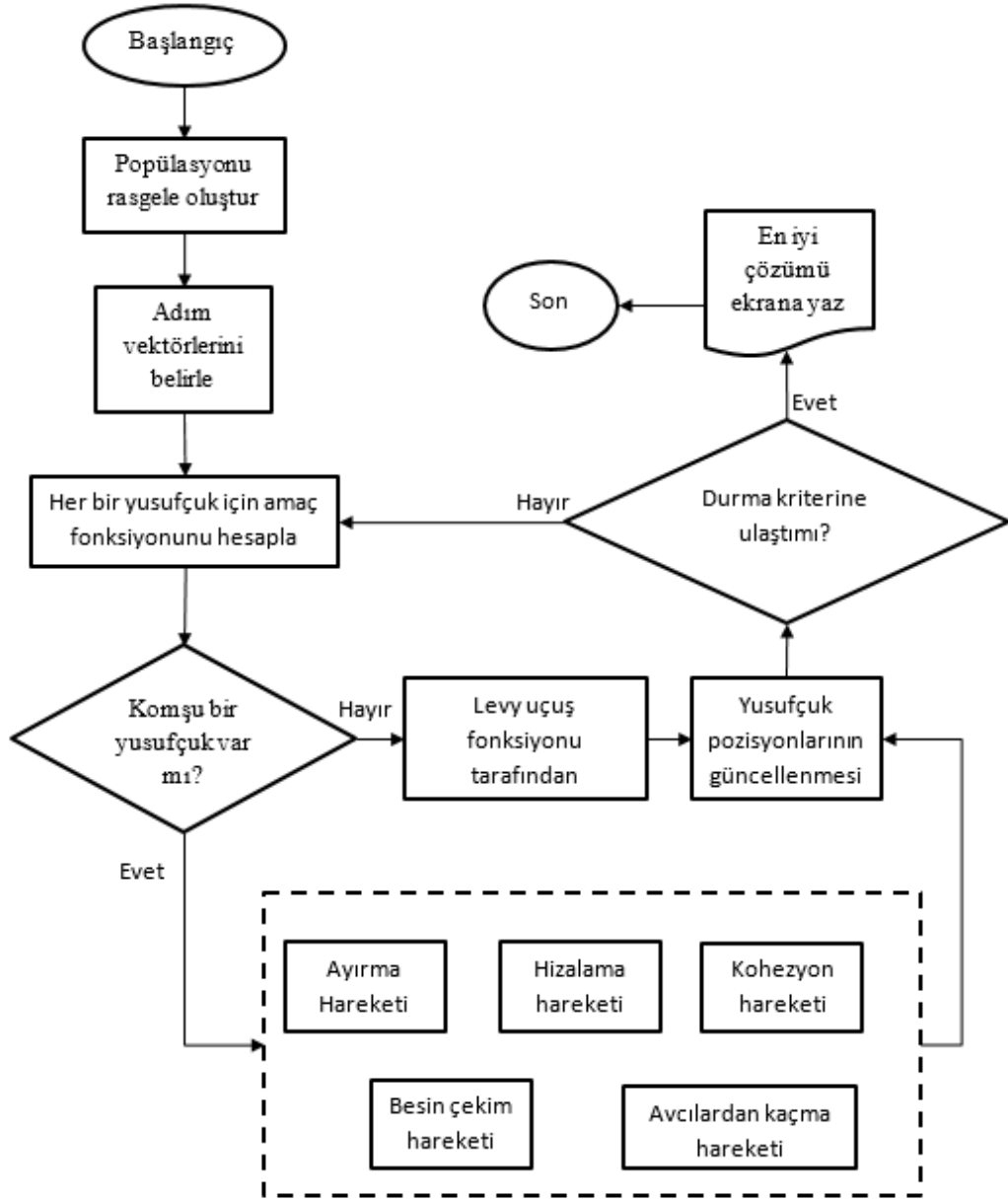
Denklem (5.24)'de yer alan  $\sigma$  fonksiyonu ise;

$$\sigma = \left( \frac{\Gamma(1+\beta) * \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) * \beta * 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (5.25)$$

olup burada yazılı Gama fonksiyonunun ( $\Gamma(x)$ ) ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$\Gamma(x) = (x - 1)! \quad (5.26)$$

Buraya kadar detaylı bir şekilde açıklanan yusufçuk optimizasyon algoritmasının akış diyagramı Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3: Yusufçuk optimizasyon algoritmasının akış diyagramı.

### 5.2.3 Büyük Patlama Büyük Çöküntü Algoritması

Büyük Patlama Büyük Çöküntü algoritması, büyük patlama ve büyük çöküntü olarak isimlendirilen iki fazdan oluşmaktadır [21]. İlk fazda çözüm uzayına rasgele bir şekilde çözüm adayları dağıtılır. Bununla birlikte, diğer evrimsel algoritmalara benzer şekilde, başlangıçta (ilk büyük patlama fazında) çözümler, arama alanının her yerine düzgün bir şekilde yayılır. Bu algoritmayı oluştururken, Erol ve Eksin [21] büyük patlamanın rasgele doğasının enerji yayılımıyla ilişkisini

dikkate almıştır. Bu durum algoritma perspektifinden bakıldığında, düzenli bir durumdan (yakınsak bir çözümden) kaos durumuna (yeni çözüm adayları grubuna) geçiş manasına gelmektedir.

İkinci faz (büyük çöküntü fazı) ise bir yakınsama operatörüdür. Bu operatörün birçok girdisi yanında kütle merkezi olarak isimlendirilen tek çıktısı vardır. Kütle merkezi, Denklem (5.27)'de verilen ifadeyle hesap edilir. Bu denklemde,  $\vec{x}^c$  kütle merkezini,  $\vec{x}^i$  n-boyutlu uzayda bir çözüm noktası,  $f^i$  uyum fonksiyonunun  $\vec{x}^i$  noktasındaki değeri,  $Np$  ise büyük patlama fazında oluşturulan popülasyon büyüklüğünü ifade eder.

$$\vec{x}^c = \frac{\sum_{i=1}^{Np} \frac{1}{f^i} \vec{x}^i}{\sum_{i=1}^{Np} \frac{1}{f^i}} \quad (5.27)$$

Algoritma akışında, bu kütle merkezinin en iyi çözüm olduğu varsayılp bir sonraki adımda Denklem (5.28) ve (5.29) kullanılarak yeni çözümler bu kütle merkezi etrafına yakınsanarak oluşturulur:

$$x_i^{new} = X^c + \sigma \quad (5.28)$$

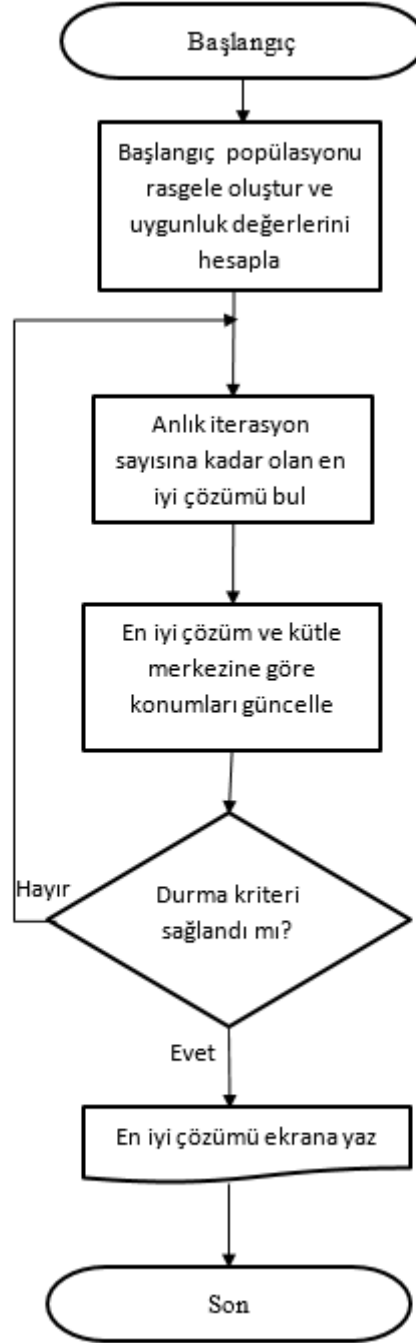
$$\sigma = \frac{r\alpha(x_{max}-x_{min})}{k} \quad (5.29)$$

Bu iki denklemde,  $\sigma$  arama uzayını sınırlandırmak için kullanılan parametre,  $r$  standart rastgele oluşturulmuş sayı,  $x_{max}$  ve  $x_{min}$  üst ve alt sınır değerleri,  $k$  adım sayısını ifade eder.

Bu patlama ve toplanma işlemleri durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder. Denklem (5.30)'da verilen ifade kullanılarak kütle merkezi ve global en iyi çözüm cinsinden daha iyi yeni çözümler bulunabilir. Bu ifadede  $\beta$  global en iyi çözümün kütle merkezine göre öncelik katsayısını,  $X^{(k+1,i)}$  yeni adımda üretilen çözüm adaylarını temsil etmektedir.

$$X^{(k+1,i)} = \beta X^{c(k)} + (1 - \beta) X^{gbest(k)} + \sigma \quad (5.30)$$

Bu tez çalışmasında yapılan analizlerde,  $\beta = 0.2$  ve  $\alpha = 1$  değerlerinde seçilmiştir. Buraya kadar detaylı bir şekilde açıklanan büyük patlama büyük çöküntü algoritmasının akış diyagramı Şekil 5.4’de sunulmuştur.



Şekil 5.4: Büyük patlama büyük çöküntü optimizasyon algoritmasının akış diyagramı.

### 5.3 Algoritmaların Karşılaştırmalı Analizi

Bu kısımda, modellenen tipik endüstriyel güç sistemi için, C tipi filtrenin transformatörlerin sinüzoidal olmayan koşullar altında yüklenme kapasitesinin maksimize edilmesi amacıyla optimizasyonunda, sezgisel algoritmaların hassasiyet ve iterasyon sayısı performansları karşılaştırılacaktır.

Karşılaştırmalı analizlerde, bu tez çalışmasında uygulanmayan ancak [18]'de aynı problemin çözümünde kullanılan Balina Optimizasyon algoritmasının sonuçları referans alınmıştır.

#### 5.3.1 Hassasiyet Analizi

Balina Optimizasyon (BO), Karınca Aslanı optimizasyon (KAO), Yusufçuk Optimizasyon (YO) ve Büyük Patlama-Büyük Çöküntü (BPBÇ) sezgisel algoritmalarının, tipik endüstriyel dağıtım sistemi için elde ettiği optimal filtre tasarımları ile bu tasarımlar sisteme bağlandıktan sonra hesap edilen güç kalitesi indisleri ve transformatör yüklenme kapasitesi değerleri sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de sunulmuştur. Aynı tablolarda, optimal tasarımın önemini göstermek amacıyla pratik yolla tasarlanan iii nolu C tipi filtreye ait sonuçlar da verilmiştir.

Tablo 5.1'den sezgisel algoritmaların birbirine çok yakın  $X'_{CF1}$  ve  $X'_{CF2} = X'_{LF1}$  değerlerini bulduğu görülmektedir. Bu parametre değerleri  $X'_{CF1}=27.960 \Omega$  ve  $X'_{CF2} = X'_{LF1}=1.09 \Omega$ 'dur. Diğer taraftan, bulunan optimal filtre tasarımları  $R'_F$  bakımından farklılık göstermektedir. KAO ve BO algoritmalarının bulduğu  $R'_F$  değerleri yaklaşık olarak  $6.02 \Omega$ 'dur. Bu değerlerden farklı olarak, BPBÇ ve YO algoritmalarının bulduğu  $R'_F$  değerleri sırasıyla  $5.939 \Omega$  ve  $5.992 \Omega$ 'dur. Pratik yolla tasarlanan filtre ise optimal tasarımların yaklaşık iki katı değerinde  $R'_F$  direncine sahiptir. Bununla birlikte, Tablo 5.2'den bütün algoritmaların bulduğu optimal filtre tasarımlarının sağladığı  $THDI$ ,  $THDV$ ,  $DPF$ ,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  değerleri arasında ihmal edilebilir farklar olduğu görülmektedir. Filtrelerin ulaştığı  $THDI$ ,  $THDV$ ,  $DPF$ ,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  değerleri yaklaşık olarak, %12.9, %1.7, 0.99, 1.97 ve %91.96'dır. Bu sonuçlar, bütün algoritmaların tespit ettiği optimal filtre tasarımlarının

transformatörlerin harmonikli şartlarda yüklenme kapasitesinin iyileştirilmesi, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim ve akım toplam harmonik bozulma miktarlarının azaltılması bakımlarından birbirine yakın hassasiyette olduğunu işaret etmektedir.

Ancak, pratik yolla tasarlanan filtrenin ulaştığı  $THDI$ ,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  değerlerinin (%9.09, 2.26 ve %89.87) optimal tasarımların ulaştığı aynı indis değerlerine göre dikkate değer derecede farklıdır. Buradan, pratik tasarımın transformatörün yüklenme kapasitesini iyileştirmekten ziyade akım toplam harmonik bozulmasını azaltmaya yönelik olduğu görülmektedir. Optimal tasarımlar pratik tasarımla karşılaştırıldığında, transformatör yüklenme kapasitesini %2 civarında daha iyileştirmiştir.

**Tablo 5.1:** C tipi filtrenin KAO, BPBÇ, YO ve BO algoritmaları kullanılarak bulunan optimal filtre parametre değerleri ile pratik yolla tasarlanan C tipi filtrenin parametre değerleri.

	KAO	BPBÇ	YO	BO [18]	Pratik Yol (Durum iii)
$X'_{CF1} (\Omega)$	27.960	27.960	27.960	27.960	27.000
$X'_{CF2} = X'_{LF1} (\Omega)$	1.090	1.0933	1.0908	1.0914	1.125
$R'_f (\Omega)$	6.019	5.939	5.992	6.017	11.250

**Tablo 5.2:** Tasarlanan filtereler sisteme bağlandıktan sonra ulaşılan güç kalitesi indisleri ve transformatör yüklenme kapasitesi değerleri.

	KAO	BPBÇ	YO	BO [18]	Pratik Yol (Durum iii)
$THDI(\%)$	12.92	12.83	12.91	12.98	9.09
$THDV(\%)$	1.74	1.74	1.74	1.74	1.72
$DPF(\%)$	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
$F_{HL}$	1.97	1.97	1.97	1.97	2.26
$S_{Maks}(\%)$	91.96	91.96	91.96	91.96	89.87

### 5.3.2 Çözüm Hızı Analizi

Test sistemi için algoritmaların optimal C tipi filtre probleminin çözümü için iterasyon sayıları Tablo 5.3'de sunulmuştur.



**Tablo 5.3:** Test sistemi için algoritmaların optimal filtre tasarım probleminin çözümü için iterasyon sayıları.

Algoritma	İterasyon Sayısı
KAO	59
BPBÇ	99
YO	66
BO [18]	21

Tablo 5.3'den görüldüğü üzere, BO, KAO, YO ve BPBÇ algoritmaları; test sistemi için 21, 59, 66 ve 99 iterasyon sayılarında çözüme ulaşmışlardır. Bu sonuçlardan, transformatör yüklenme kapasitesinin maksimizasyonunu amaçlayan optimal C tipi filtre tasarım probleminin çözümünde, hız bakımından en iyiden en kötüye algoritmalar, BO, KAO, YO ve BPBÇ olarak sıralandığı görülmektedir.

#### 5.4 Sonuç

Bu bölümde, algoritmalar arası yapılan karşılaştırmalı analizlerden,

- Algoritmaların bulduğu optimal C tipi filtrelerin transformatörlerin azami yüklenme kapasitesinin iyileştirilmesi bakımından aynı performansa sahip olduğu,
- Pratik tasarımın transformatörün yüklenme kapasitesini iyileştirmekten ziyade akım toplam harmonik bozulmasını azaltmaya yönelik olduğu
- Optimal C tipi filtre tasarım probleminin çözümünde, iterasyon sayısı bakımından en küçükten en büyüğe algoritmaların, BO, KAO, YO ve BPBÇ algoritmaları olarak sıralandığı,

sonuçlarına varılmıştır.

## 6. OPTİMAL PASİF FİLTRENİN PERFORMANSININ DEĞİŞKEN KAYNAK VE YÜK DURUMLARI İÇİN ANALİZİ

Bu bölümde, BPBÇ algoritması kullanılarak elde edilen optimal C tipi filtre sisteme bağlıyken;

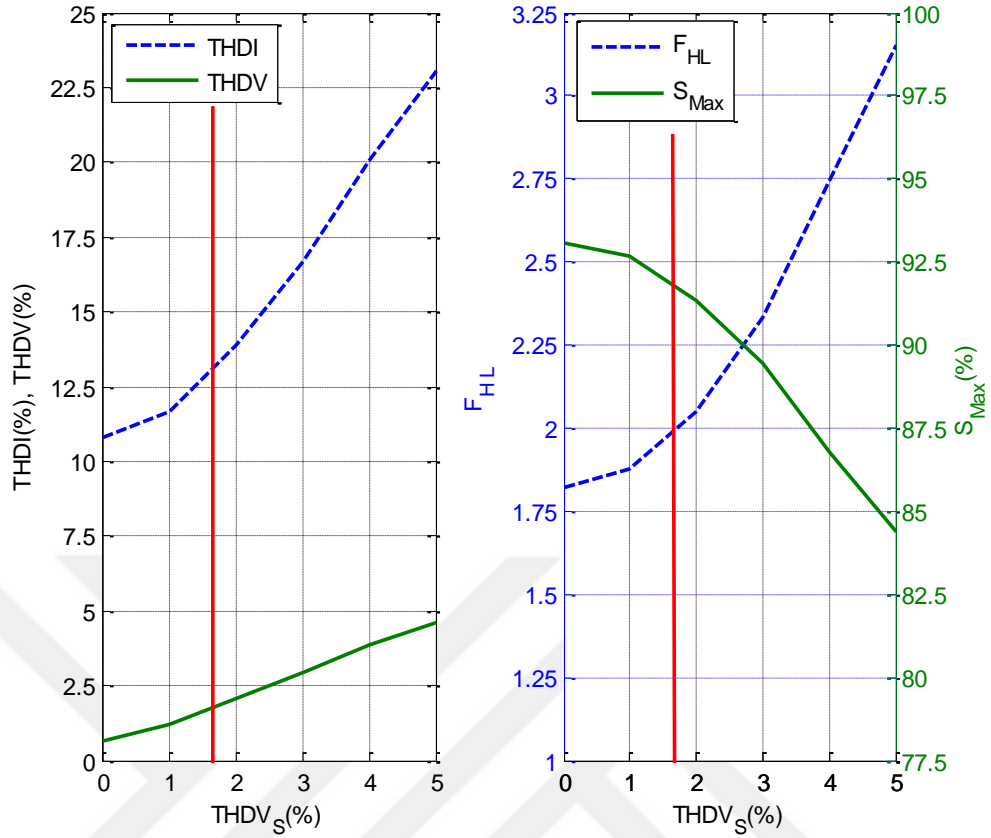
- Kaynak geriliminin toplam harmonik bozulması (THDV<sub>S</sub>),
- Hat empedansının  $X_S/R_S$  oranı,
- Hat empedansının genliği ( $Z_S$ ),
- Ve yük akımının toplam harmonik bozulmasında (THDI<sub>Y</sub>) meydana gelen değişimlerin,

OBN geriliminin ve hat akımının toplam harmonik bozulma değerlerine (THDV ve THDI), hat akımının  $F_{HL}$  değeri ile transformatörün yüklenme kapasitesi ( $S_{Maks}$ ) üzerine etkileri analiz edilecektir. DPF değeri bu bahsi geçen analizlerde ihmal edilebilir değişim gösterdiği için analizler sırasında irdelenmemiştir.

### 6.1 Değişken THDV<sub>S</sub> Değerleri Altında Yapılan Analizler

Test sisteminde, IEEE std. 519 dikkate alınarak, THDV<sub>S</sub> değeri %0 ile %5 aralığında değiştirilmiştir. Bu THDV<sub>S</sub> aralığı için filtresiz sistemde,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  sırasıyla 10.4 ve %60 etrafında ihmal edilebilir değişimler göstermiştir. Diğer taraftan, optimal filtre tasarımı sisteme bağlıyken, THDV<sub>S</sub>'nin %0 ile %5 aralığı için THDV, THDI,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$ 'ın değişimleri Şekil 6.1'de verilmiştir.

Bu şekilde kırmızı çizgi ile işaretli THDV<sub>S</sub> optimal filtrenin tasarlandığı durumdaki kaynağın toplam harmonik bozulmasıdır. Bu sonuçlara göre, THDV<sub>S</sub>'nin artışıyla, THDV'nin kabaca aynı değer aralığında, THDI'nin %10.5'dan %22.5'a ve  $F_{HL}$ 'nin 1.8'den 3.2'ye arttığı görülmektedir.  $F_{HL}$ 'deki bu artışa bağlı olarak  $S_{Maks}$  %93'ten %84'e düşmüştür.



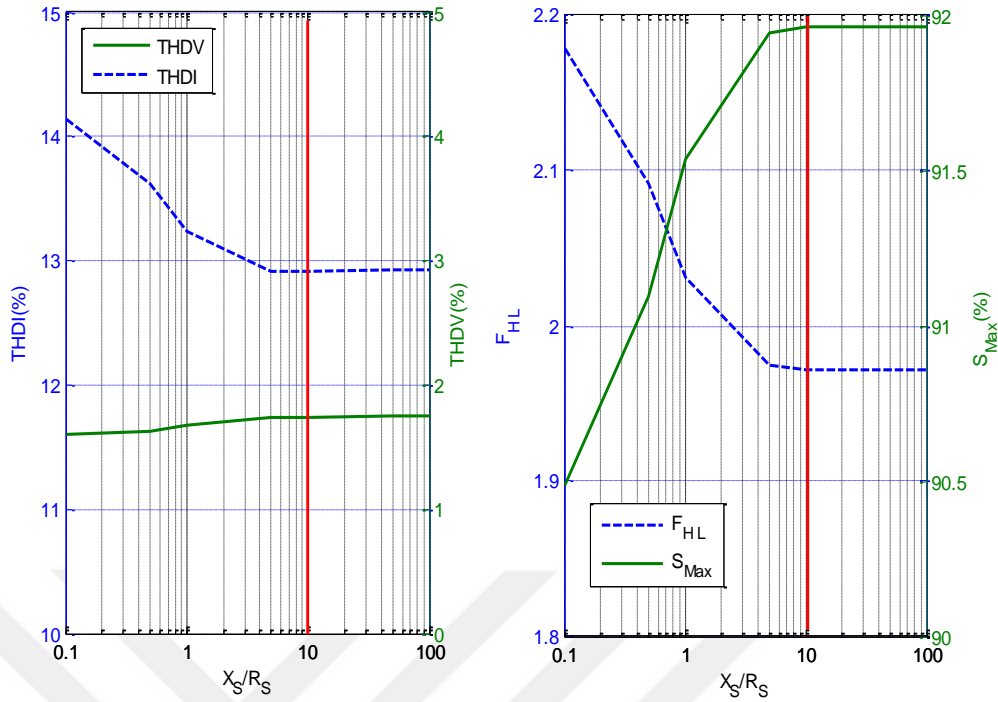
Şekil 6.1: THDV, THDI,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  indislerinin  $THDV_S$ 'ye bağlı değişimleri.

## 6.2 Değişken $X_S/R_S$ Değerleri Altında Yapılan Analizler

Analizler sırasında, test sisteminde, hat empedansının  $X_S/R_S$  oranı 0.1 ile 100 aralığında değiştirilmiştir. Bu  $X_S/R_S$  aralığı için filtresiz sistemde,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  sırasıyla 10.4 ve %60 etrafında ihmal edilebilir değişimler göstermiştir.

Diğer taraftan, optimal filtre tasarımı sisteme bağlıyken,  $X_S/R_S$ 'nin 0.1 ile 100 aralığı için THDV, THDI,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$ 'in değişimleri Şekil 6.2'de verilmiştir. Bu şekilde kırmızı çizgi ile yatay eksende işaretli değer ( $X_S/R_S = 10$ ), optimal filtrenin tasarlandığı durumdaki  $X_S/R_S$  oranıdır.

Bu şekilden,  $X_S/R_S$  oranının 1 ile 10 aralığında artışıyla, kabaca, THDI'nın %14'den %13'e düştüğü,  $F_{HL}$ 'nin 2.2'den 1.9'a düştüğü ve  $S_{Maks}$ 'in %90.5'dan %92'ye yükseldiği görülmektedir. Bununla birlikte,  $X_S/R_S$  oranının 10 ile 100 aralığı için bu üç indiste ihmal edilebilir bir değişim meydana gelmiştir. Ayrıca, THDV,  $X_S/R_S$  oranının tüm test aralığı için ihmal edilebilir bir değişim göstermiştir.

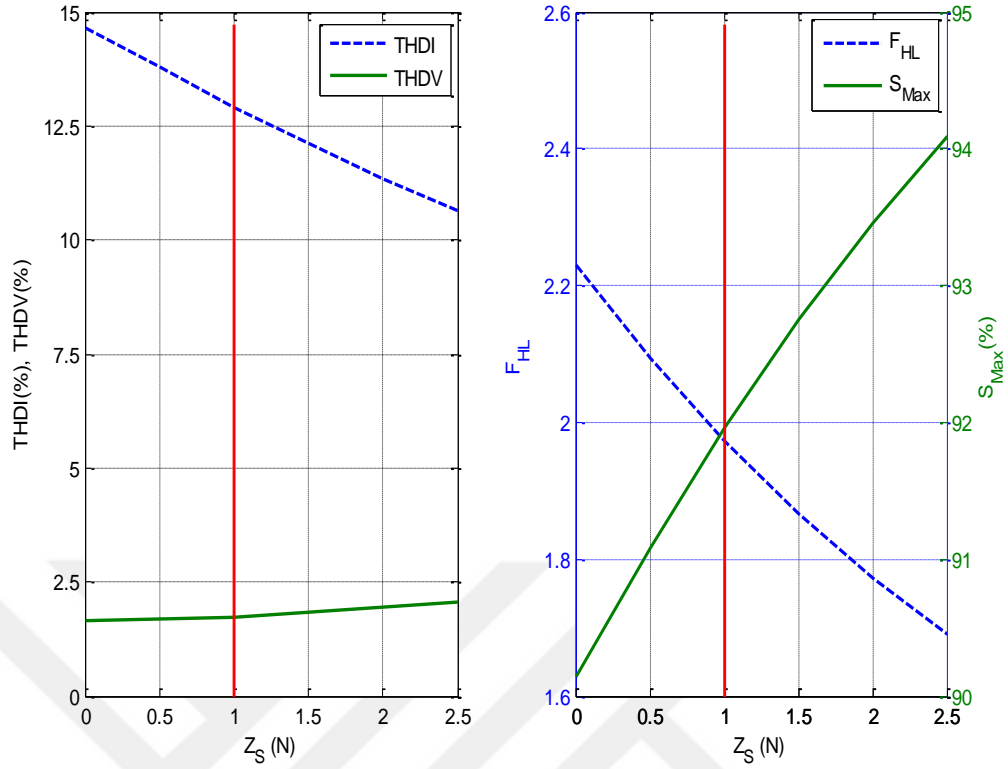


Şekil 6.2: THDV, THDI,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  indislerinin  $X_s/R_s$ 'ye bağlı değişimleri.

### 6.3 Değişken $Z_s$ Değerleri Altında Yapılan Analizler

Analizler sırasında, test sisteminde,  $Z_s$ 'nin normalize edilmiş değeri 0 ile 2.5 aralığında değiştirilmiştir.  $Z_s$ 'nin normalize değerinin 1 olduğu durum, optimal filtrenin tasarlandığı durumdur. Tüm  $Z_s$  aralığı için filtresiz sistemde,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  sırasıyla 10.4 ve %60 etrafında ihmal edilebilir değişimler göstermiştir.

Diğer taraftan, optimal filtre tasarımı sisteme bağlıken,  $Z_s$ 'nin test aralığı için THDV, THDI,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$ 'in değişimleri Şekil 6.3'de verilmiştir. Bu şekilden  $Z_s$ 'nin artışıyla, THDI'nın %15'den %10'a düştüğü,  $F_{HL}$ 'nin 2.2'den 1.7'ye düştüğü ve  $S_{Maks}$ 'in %90'dan %94'e yükseldiği görülmektedir.

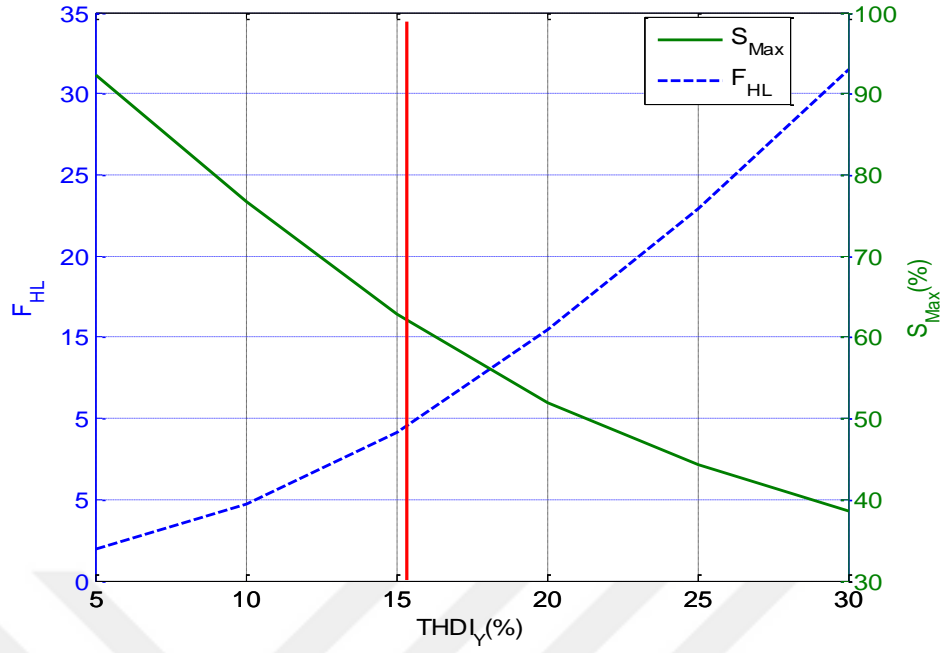


Şekil 6.3: THDV, THDI,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  indislerinin  $Z_S$ 'ye bağlı değişimleri.

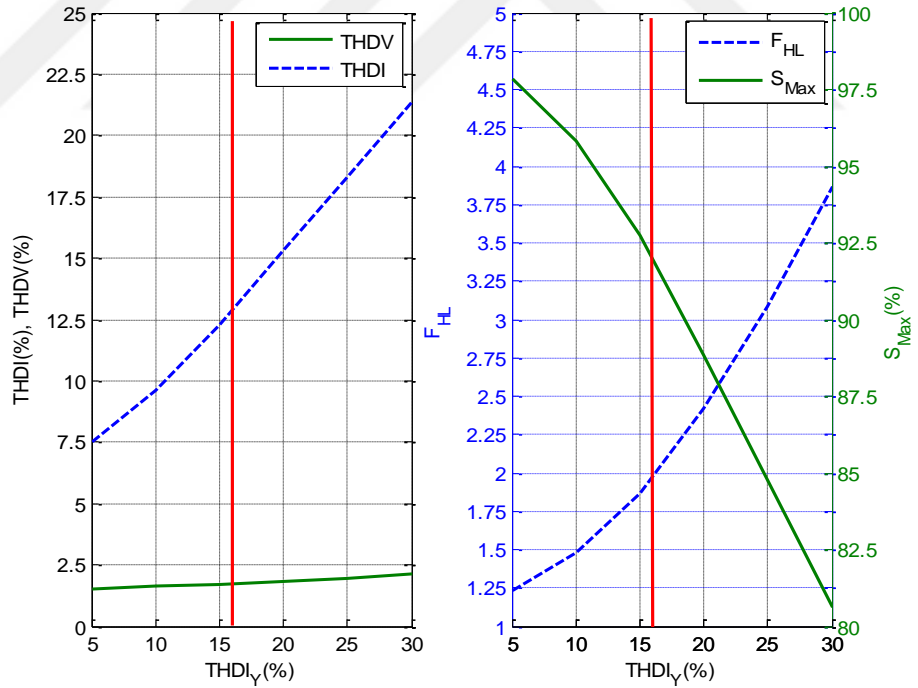
#### 6.4 Değişken $THDI_Y$ Değerleri Altında Yapılan Analizler

Analizler sırasında, test sisteminde,  $THDI_Y$ 'nin değeri %5 ile %30 aralığında değiştirilmiştir. Testlerde dikkate alınan  $THDI_Y$  aralığı için kompanze edilmemiş (filtresiz) sistemde,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  indislerinin değişimi Şekil 6.4'de sunulmuştur.

Diğer taraftan, optimal filtre tasarımı sisteme bağlıyken,  $THDI_Y$ 'nin %5 ile %30 aralığı için THDV, THDI,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$ 'ın değişimleri Şekil 6.5'de verilmiştir. Her iki şekilde yatay ekseninde kırmızı çizgi ile işaretlenen  $THDI_Y$  değeri (%16) optimal filtrenin tasarlandığı durumdur.



Şekil 6.4: Kompanze edilmemiş (filtresiz) sistemde  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  indislerinin  $THDI_Y$ 'ye bağlı değişimleri.



Şekil 6.5: THDV, THDI,  $F_{HL}$  ve  $S_{Maks}$  indislerinin  $THDI_Y$ 'ye bağlı değişimleri.

Şekil 6.4'den filtresiz sistemde,  $THDI_Y$ 'nin artışıyla  $F_{HL}$ 'nin 2'den 32'ye yükseldiği ve buna bağlı olarak  $S_{Maks}$ 'ın %92'den %38'e düştüğü görülmektedir. Şekil 6.5'den filtreli sistemde,  $THDI_Y$ 'nin artışıyla, THDV'nin önemli bir artış

göstermediği ve IEEE std. 519'da belirtilen sınır değerin (%5) altında olduğu görülmektedir. Aynı şekil, THDI<sub>Y</sub>'nin artışıyla, hat akımına ait THDI'nın %7.5'den %22.5'a ve F<sub>HL</sub>'nin 1.25'den 3.75'e arttığını göstermektedir. Ayrıca, F<sub>HL</sub>'deki bu artışa bağlı olarak S<sub>Maks</sub> %97.5'ten %80'e düşmüştür.

## 6.5 Sonuç

Bu bölümde optimal C tipi filtre sisteme bağlıyken kaynak geriliminin toplam harmonik bozulmasında (THDV<sub>S</sub>), hat empedansının X<sub>S</sub>/R<sub>S</sub> oranında, hat empedansının genliğinde (Z<sub>S</sub>) ve yük akımının toplam harmonik bozulmasında (THDI<sub>Y</sub>) meydana gelen değişimlerin, ortak bağlantı noktası (OBN) geriliminin ve hat akımının toplam harmonik bozulma değerleri (THDV ve THDI), hat akımının F<sub>HL</sub> değeri ile transformatörün azami yüklenme oranı (S<sub>Maks</sub>) üzerine etkileri tipik endüstriyel dağıtım sistemi için analiz edilmiştir.

Sunulan analiz sonuçlarından; öncelikle, THDV<sub>S</sub>'nin artışıyla, filtrenin THDI indisini IEEE 519 standardında belirtilen sınır değer altında tutamadığı görülmüştür. Ancak, analizler bu durumun THDV indisini için söz konusu olmadığını, ayrıca, test edilen bütün THDV<sub>S</sub> değerlerinde, filtrenin F<sub>HL</sub> indisini azalttığını ve S<sub>Maks</sub>'ı iyileştirme görevini yerine getirdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, kompanze edilmiş sistemde, THDV<sub>S</sub>'nin artışının S<sub>Maks</sub>'ı olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir.

Analizlerde görülen ikinci husus, test edilen tüm X<sub>S</sub>/R<sub>S</sub> ve Z<sub>S</sub> aralıklarında, filtrenin, F<sub>HL</sub>'yi azalttığı ve S<sub>Maks</sub>'ı iyileştirdiğidir. Analizler, filtreli sistemde, X<sub>S</sub>/R<sub>S</sub> ve Z<sub>S</sub> artışıyla, daha yüksek S<sub>Maks</sub> değerlerine ulaşıldığını işaret etmektedir.

Analizlerde görülen son husus ise; test edilen sistem için yük akımının toplam harmonik bozulmasının (THDI<sub>Y</sub>) artışıyla, filtrenin THDI indisini IEEE 519 standardında belirtilen sınır değer altında tutamadığıdır. Ayrıca, analizlerde dikkate alınan THDI<sub>Y</sub> aralığı için, THDV'nin aynı standartta tanımlı sınır değeri aşmadığı, filtrenin F<sub>HL</sub>'yi azaltma ve S<sub>Maks</sub>'ı iyileştirme görevini yerine getirdiği ifade edilebilir. Diğer taraftan, hem filtreli hem de filtresiz sistem için THDI<sub>Y</sub> artışının S<sub>Maks</sub> değerini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.

## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Literatürde, akım toplam harmonik bozulma, gerilim toplam harmonik bozulma, güç faktörü, filtre kaybı ve filtre maliyeti parametreleri dikkate alınarak optimal pasif filtre tasarımlarının gerçekleştirildiği çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, güç faktörünün maksimize edilmesi ile toplam harmonik bozulma, filtre kayıpları ve filtre maliyetinin minimize edilmesi, amaç fonksiyonları geleneksel olarak hedeflenmiştir.

Bu geleneksel tasarım çalışmalarından farklı olarak, [15, 16]'da, harmonikli kaynak gerilimine sahip tipik bir endüstriyel güç sisteminde, doğrusal olmayan yük besleyen bir transformatörün yüklenme kapasitesini ( $S_{Maks}$ ) iyileştirmek için tek-ayarlı ve C tipi pasif filtre tasarımları çalışılmıştır. Her iki optimal tasarımın amaç fonksiyonu, IEEE standard C57.110'da tanımlanmış ve transformatörün yüklenme kapasitesiyle ters orantılı olan harmonik kayıp faktörü indisini ( $F_{HL}$ ) minimize etmektir. Bu tasarım çalışmalarında, IEEE standardı 519 [17]'de tanımlı gerilim ve akım harmonik sınırlamaları ile aynı standartta tavsiye edilen temel frekans güç faktörü aralığı optimizasyon probleminin kısıtları olarak ele alınmıştır. Bu önerilen optimal filtre tasarımının, geleneksel optimal filtre tasarımlarına göre daha yüksek yüklenme kapasitesi değerlerine ulaştığı simülasyon temelli analizlerle gösterilmiştir.

Ayrıca, [18]'de tek-ayarlı, çift-ayarlı, üç ayarlı, sönümlü-çift ayarlı ve C tipi filtrelerin transformatörlerin harmonikli sistemlerde yüklenme kapasitesinin artırılmasına katkıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışma da sunulan sonuçlarda filtre tipinin transformatör yüklenme kapasitesinin iyileştirilmesine önemli etkisinin olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, sunulan sonuçlardan, transformatör yüklenme kapasitesini iyileştirme performansları bakımından, filtrelerin en iyiden en kötüye; üç-ayarlı, sönümlü çift-ayarlı, çift-ayarlı, C tipi ve tek-ayarlı olarak sıralandığı görülmüştür. Aynı çalışmada, balina optimizasyon ve parçacık sürü optimizasyon algoritmaları problemin çözümüne uygulanmıştır. Böylece, algoritmaların sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü, ancak balina optimizasyon



algoritmasının parçacık sürü optimizasyon algoritmasına göre daha az iterasyon sayısı ile problemi çözdüğü sonucuna varılmıştır.

Bu tezde amaçlanan çıktılar sırasıyla;

- Harmonikli şartlarda transformatörlerin yüklenme kapasitesinin iyileştirilmesine katkıları bakımından, basit kapasitif kompanzasyon, pratik yolla tasarlanmış C tipi filtre ve [16]'da sunulmuş optimal C tipi filtre tasarımının karşılaştırılması olarak analiz edilmesi,
- Çeşitli optimizasyon algoritmalarının, bu optimal C tipi filtre tasarım probleminin çözümünde, sonuç ve iterasyon sayısı bakımından karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi,
- Kaynak geriliminin toplam harmonik bozulması (THDV<sub>S</sub>), hat empedansının X<sub>S</sub>/R<sub>S</sub> oranı, hat empedansının genliği (Z<sub>S</sub>) ve yük akımının toplam harmonik bozulmasında (THDI<sub>Y</sub>) meydana gelen değişimlerin, transformatör yüklenme kapasitesini maksimize etmek için tasarlanan optimal C tipi filtrenin performansına etkilerinin analiz edilmesidir.

Analizlerden öncelikle, kapasitif kompanzasyonun harmonik bozulmaya arttırdığı bunun yanı sıra transformatör yüklenme kapasitesini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bununla birlikte, analiz sonuçları, pratik bir şekilde tasarlanan C tipi filtrelerin kalite fatörlerine bağlı olarak farklı transformatör azami yüklenme oranlarına ulaştığını dolayısıyla, IEEE std. 519'da tavsiye edilen temel frekans güç faktörü aralığı ile harmonik bozulma sınırlamalarını sağlayan ve transformatör azami yüklenme kapasitesini en iyi değere ulaştıran C tipi filtre tasarımının elde edilmesinin bir optimizasyon problemi olduğunu göstermiştir.

Analizlerden ikinci olarak, çalışılan sezgisel optimizasyon algoritmalarının bulduğu optimal C tipi filtrelerin transformatörlerin yüklenme kapasitesinin iyileştirilmesi bakımından aynı performansa sahip olduğu, diğer taraftan çözüm için harcadıkları iterasyon sayısı bakımından en iyiden en kötüye bu algoritmaların, Balina, Karınca Aslanı, Yusufçuk ve Büyük Patlama-Büyük Çöküntü algoritması olarak sıralandığı görülmüştür.

Sunulan analiz sonuçlarından; son olarak,  $THDV_S$ 'nin artışıyla, hat akımının THDI değerini IEEE 519 standardında belirtilen sınır değer altında tutamadığı görülmüştür. Ancak, analizler bu durumun ortak bağlantı noktasında (OBN) ölçülen THDV indisi için söz konusu olmadığını, ayrıca, test edilen bütün  $THDV_S$  değerlerinde, filtrenin  $F_{HL}$  indisini azalttığını ve  $S_{Maks}$ 'ı iyileştirme görevini yerine getirdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, kompanze edilmiş sistemde,  $THDV_S$ 'nin artışının  $S_{Maks}$ 'ı olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Test edilen tüm  $X_S/R_S$  ve  $Z_S$  aralıklarında, filtrenin,  $F_{HL}$ 'yi azalttığı ve  $S_{Maks}$ 'ı iyileştirdiğidir. Analizler, filtreli sistemde,  $X_S/R_S$  ve  $Z_S$  artışıyla, daha yüksek  $S_{Maks}$  değerlerine ulaşıldığını işaret etmektedir. Test edilen sistem için yük akımının toplam harmonik bozulmasının ( $THDI_Y$ ) artışıyla, filtrenin THDI indisini IEEE 519 standardında belirtilen sınır değer altında tutamadığıdır. Ayrıca, analizlerde dikkate alınan  $THDI_Y$  aralığı için,  $THDV$ 'nin aynı standartta tanımlı sınır değeri aşmadığı, filtrenin  $F_{HL}$ 'yi azaltma ve  $S_{Maks}$ 'ı iyileştirme görevini yerine getirdiği ifade edilebilir. Diğer taraftan, hem filtreli hem de filtresiz sistem için  $THDI_Y$  artışının  $S_{Maks}$  değerini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O., *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsen Yayınevi, (2003).
- [2] Srividhya, J. P., Sivakumar, D. and Shanmathi, T., “A Review on causes, effects, and detection techniques of harmonics in the power system”, *In IEEE International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation*, 680-686, doi:10.1109/ICCPEIC.2016.7557309, (2016).
- [3] Peng, F. Z., “Harmonic sources and filtering approaches”, *IEEE Trans. on Industry Applications Magazine*, 7, 18-25, doi:10.1109/2943.930987, (2016).
- [4] Akagi, H., Watanebe, E. H. and Aredes, M., “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning”, *2nd ed. United States of America: Wiley-IEEE Press*, (2017).
- [5] Das, J. C., “Power System Harmonics and Passive Filter Designs”, *1st ed. United States of America: Wiley-IEEE Press.*, doi:10.1002/9781118887059, (2015).
- [6] Zeineldin, H. H. and Zobaa, A. F., “Particle swarm optimization of passive filters for industrial plants in distribution networks”, *Elec. Pow. Comp. Syst.* 39, 1795-1808, doi:10.1080/15325008.2011.615795, (2011).
- [7] Balci, M. E. ve Karacaoglan, A. D., “Optimal design of C-type passive filters based on response surface methodology for typical industrial power systems”, *Elec Pow Comp Syst.*, 41, 653-668, doi:10.1080/15325008.2013.763310, (2013).
- [8] Zacharia, P., Menti, A., and Zacharias, T.h., “Genetic algorithm-based optimal design of shunt compensators in the presence of harmonics”, *Electr Power Syst Res.*, 78, 728-735, doi:10.1016/j.epsr.2007.05.016, (2008).
- [9] Abdel, Aleem, S. H. E., Zobaa, A. F. and Balci, M. E., “Optimal resonance-free third-order high-pass filters based on minimization of the total cost of the filters using Crow Search Algorithm”, *Electr Power Syst Res.*, 151, 381-394, doi:10.1016/j.epsr.2017.06.009, (2017).
- [10] Chang, Y. P., Low, C. and Wu, C.J., “Optimal Design of Discrete-Value Passive Harmonic Filters Using Sequential Neural-Network Approximation

- and Orthogonal Array”, *IEEE Trans on Power Deliv.*, 1813-1821, doi:10.1109/TPWRD.2007.899780, (2007).
- [11] Sakar, S., Balci, M. E., Abdel, Aleem, S. H. E. and Zobaa, A. F., “Increasing PV hosting capacity in distorted distribution systems using passive harmonic filtering.”, *Electr Power Syst Res.*, 148, 74-86, doi:10.1016/j.epsr.2017.03.020, (2017).
- [12] Matlab Simulink Online Documentation, (10 June 2018), <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephaseharmonicfilter.html>, (2018).
- [13] Heydt, C. T. and Jewell, W. T., “Pitfalls of electric power quality indices”, *IEEE Trans. on Power Deliv.*, 13, 570-578, doi:10.1109/61.660930, (1998).
- [14] “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents”, ANSI/IEEE Standard C.57.110-2008, (2008).
- [15] Balci, M. E. and Sakar, S., “Optimal design of single-tuned passive filters to minimize harmonic loss factor”, *Middle-East J Sci Res.*, 21, 2149-2155, doi:10.5829/idosi.mejsr.2014.21.11.21665, (2014).
- [16] Balci, M. E., “Optimal C-type filter design to maximize transformer’s loading capability under non-sinusoidal conditions”, *Electr Pow Compo Sys.*, 42, 1565-1575, doi:10.1080/15325008.2014.943827, (2014).
- [17] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE*, 519, (2014).
- [18] Karadeniz, A. and Balci, M. E., “Comparative evaluation of common passive filter types regarding maximization of transformer’s loading capability under non-sinusoidal conditions”, *Electric Power Systems Research*, (158), 324-334, (2018).
- [19] Mirjalili, S., “The Ant Lion Optimizer”, *Advances in Engineering Software*, (83), 80-98, (2015).
- [20] Mirjalili, S., “Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems”, *Neural Computing and Applications.*, doi:10.1007/s00521-015-1920-1, (2015).
- [21] Erol, K. O. and Eksin, I., “A new optimization method: Big Bang-Big Crunch”, *Advances in Engineering Software*, (37), 2, 106-111, (2006).

- [22] “Task Force Harmonic Modeling and Simulation. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks Part I: Concepts, models, and simulation techniques”, *IEEE Trans. on Power Deliv.*, 11, 452-465, doi:10.1109/61.484130, (1996).
- [23] McGranaghan, M. F., Dugan, R.C., King, J. A. and Jewell, W. T., “Distribution feeder harmonic study methodology”, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-103: 3663–3671, doi:10.1109/TPAS.1984.318419, (1984).
- [24] Xu, W., “Component modeling issues for power quality assessment”, *IEEE Power Engineering Review*, 21, 12-17, doi:10.1109/MPER.2001.961998, (2001).
- [25] Arslan, E., Balci, M. E. and Hocaoglu, M. H., “An analysis into the effect of voltage harmonics on the maximum loading capability of transformers”, *16th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Bucharest, Romania, 616-620, doi:10.1109/ICHQP.2014.6842925, (2014).
- [26] Arslan, E., “Sinüzoidal Olmayan Sistemler için Güç Transformatörü Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, (2014).
- [27] Mergen, F. ve Zorlu, S., “Elektrik Makinaları I Transformatörler”, *Birsen Yayınevi*, (2005).
- [28] Chandrasena, W., McLaren, P.G., Annakkage, U.D., Jayasinghe, R.P., Muthumuni, D. and Dirks, E., “Simulation of hysteresis and eddy current effects in a power transformer”, *Electric Power Systems Research*, (76), 8 634-641, (2006).
- [29] Dias, C. M., “Comparative study of the derating of distribution transformers”, Lisboa: Nov. (2015).
- [30] Cazacu, E., Petrescu, L. and Ionita, V., "Derating of power distribution transformers serving nonlinear industrial loads", *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Brasov: 2017, (90-95), (2017).
- [31] Fuchs, E. F., Yildirim, D. and Batan, T., “Innovative procedure for measurement of losses of transformers supplying nonsinusoidal loads”, *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib.*, (146), 6, 617-625, (1999).

- [32] Fuchs, E. F., Lin, D., Martynaitis, J., "Measurement of three-phase transformer derating and reactive power demand under nonlinear loading conditions", *IEEE Trans. on Power Del.*, (21), 2, 665 -672, (2006).
- [33] Sharifian, M. B. B., Faiz, J., Fakheri, S. A., Zraatparvar, A., "Derating of distribution transformers for non-sinusoidal load currents using finite element method", *Proc. 10th IEEE Int. Conf. Electronics, Circuits and Systems*, (2), 754 -757, (2003).
- [34] Sharifian, M. B. B., Faiz, J., "Derating of a distribution transformer for non-linear loads", *Eur. Trans. Elect. Power*, (16), 2, 189 -203, (2006).
- [35] Faiz, J., Ebrahimi, B. M., Ghofrani, M., "Mixed derating of distribution transformers under unbalanced supply voltage and nonlinear load conditions using TSFEM", *IEEE Trans. on Power Del.*, (25), 2, 780-789, (2010).
- [36] Njafi, A., Iskender, I., Genc, N., "Evaluating and derating of three-phase distribution transformer under unbalanced voltage and unbalance load using finite element method," *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International*, 160-165, (2014).
- [37] Moses, P. S. and Masoum, M. A. S., "Three-Phase Asymmetric Transformer Aging Considering Voltage-Current Harmonic Interactions, Unbalanced Nonlinear Loading, Magnetic Couplings, and Hysteresis", *IEEE Transactions on Energy Conv.*, (27), 2, 318-327, (2012).
- [38] Masoum, M. A. S., Moses, P. S., Masoum, A. S., "Derating of asymmetric three-phase transformers serving unbalanced nonlinear loads", *IEEE Trans. on Power Del.*, (23), 4, 2033-2041, (2008).
- [39] UL 1562 Standard, "Dry-Type General Purpose and Power Transformers", (1994).
- [40] CENELEC -EN Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV; Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents, BS EN 50464-3:2007, (2007).
- [41] Katırcıoğlu, F., "Renkli Görüntüler İçin Yusufçuk Algoritması Kullanılarak Benzerlik Görüntüsüne Dayalı Eşikleme", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 506-523, (2017).