

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

KÖPRÜ DOĞRULTUCU DEVRESİNİN
ÇIKIŞ FİLTRESİNE GÖRE
KARAKTERİZASYONU

Ali Alp YILMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2007

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

KÖPRÜ DOĞRULTUCU DEVRESİNİN
ÇIKIŞ FİLTRESİNE GÖRE
KARAKTERİZASYONU

Ali Alp YILMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr. Abdulkadir BALIKÇI

GEBZE

2007



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/08/2007 tarih ve 2007/28 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 16/10/2007 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ali Alp YILMAZ 'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir Balıkçı

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. N. Serdar Tunaboylu

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. M. Hakan Hocaoglu

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : Köprü Doğrultucu Devresinin Çıkış Filtresine Göre Karakterizasyonu

YAZAR ADI : Ali Alp Yılmaz

Tek fazlı güç elektroniği cihazlarının ürettikleri harmonikler küçük olmasına karşın bu cihazların çok sayıda olması ve aynı anda kullanılmaları sebebiyle bu tarz yüklerin ürettiği harmonikler önemli değerlere ulaşabilir. Bu tip cihazların çoğunda güç kaynağı devresinde filtreli köprü doğrultucu bulunmaktadır. Küçük kapasiteli bu tarz cihazların ürettikleri harmonikler alçak gerilim dağıtım sisteminde önemli bir paya sahiptir. Bu yüzden filtreli köprü doğrultucunun hat akımı ve yük gerilimi büyüklüklerini elde etmek önem taşımaktadır. Bu büyüklükleri elde etmenin bir yolu Spice, EMTP, MATLAB Simulink gibi tanınmış simülasyon programlarını kullanmaktır. Fakat ne yazık ki bu programlar güç elektroniği simülasyonları için tam olarak uygun değildir. Ana problem iletimde olmayan diyotlara seri bir endüktans bulunmasından kaynaklanan nümerik problemlerdir. Bu problem endüktansa paralel bir RC söndürücü ya da büyük bir R konularak halledilebilirse de devreye fazladan elemanlar eklemek sistemin doğruluk payını düşürmektedir. Bir başka zorluk ise simülasyonun sürekli hale geçebilmesi için simülasyonda birçok periyotun geçmesi gereğidir. Buna ek olarak, her çalışma noktası için ayrı bir simülasyon yapılması gereklidir ki ciddi bir analiz için bu binlerce simülasyon demektir. Bu sebeplerden dolayı matematiksel analitik bir çözüme ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada kaynağın sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan durumları için, hat akımı ve yük geriliminin dalga şekilleri, hat empedansı da dikkate alınarak, diferansiyel denklemler yardımıyla elde edilmiştir. Bu sayede hat akımı ve yük gerilimi dalga şekilleri, devre parametrelerinin herhangi bir değeri için simülasyonlara kıyasla, hızlı ve doğru şekilde elde edilmiş ve çıkış filtresi büyüklüklerinin hat akımı harmonikleri, giriş güç faktörü ve diğer harmonik büyüklükler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

SUMMARY

THESIS TITLE : Characterisation of Bridge Rectifier Circuit for Output Filter

AUTHOR NAME : Ali Alp Yılmaz

Although the amount of harmonics generated from single phase power electronic loads is small, the number of these loads is large and they are used at the same time so the harmonics generated from these loads can be significant. Most of these loads employ filtered full bridge rectifier in their power supply circuit. The harmonics generated from a small-capacity power supply of electronic equipments occupy a large fraction of harmonic interference in a low-voltage distribution system. So it's important to calculate the expressions of input currents and voltage waveforms of the filtered full bridge rectifier. One approach to determining the current and voltage waveforms for this circuit is to use one of the well known circuit analysis packages (Spice, EMTP, MATLAB, Simulink, etc.). Unfortunately these packages are not ideally suited to power electronic simulation. The principal problem in the circuit numerical problems caused by the presence of an inductor in series with non conducting diodes. Although this can be overcome by the addition of a large resistor (or an RC snubber) in parallel with the inductor the inaccuracy introduced by the additional components. Another difficulty is that many cycles of the supply voltage waveform is very time consuming. In addition to that, for every operating point, a discrete simulation is required, which means thousands of simulations in serious analysis. For these reasons analytical approach is needed. In this study, the current and voltage waveforms are determined for sinusoidal and nonsinusoidal conditions via differential equations and considering the effect of source impedance. By means of this, compared to simulations, for any values of circuit parameters, accurate and rapid results are obtained for current and voltage waveforms, and the effects of the values of output filter on line current harmonics, AC side power factor and other harmonic quantities are analyzed.

TEŞEKKÜRLER

Yüksek Lisans eğitimime başladığımdan bu yana, anlayış ve hoşgörülerıyla yardımlarını benden esirgemeyen, Sayın Yrd. Doç.Dr. M. Hakan HOCAOĞLU ve Sayın Yrd. Doç.Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya, verdiği destekle bu tezin hazırlanmasında büyük emeği olan değerli Arş. Görevlisi Murat Erhan BALCI 'ya Yüksek Lisans yapmam için beni teşvik eden, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve destekleyen annem Fazile SÜLAÇ ve sevgili arkadaşım Çisem VESKE' ye teşekkür ederim.

Ali Alp YILMAZ

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜRLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Arka Plan	2
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Tezin Sınırları	4
1.4 Tezin İçeriği	4
2 GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER	6
2.1 Giriş	6
2.2 Sinüsoidal Dalga Şekilleri	6
2.3 Sinüsoidal Olmayan Dalga Şekilleri	8
2.4 Sinüsoidal Olmayan Dalgaların Fourier Serileri ile Analizi	9
2.5 Harmonik Büyüklere Ait Tanım ve Kavramlar	13
2.5.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)	14
2.5.2 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)	15
2.5.3 Distorsiyon Güç Faktörü (DGF)	16
2.5.4 Şekil (Form) Faktörü	16
2.5.5 Tepe (Krest) Faktörü	17
2.5.6 Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)	17
2.5.7 Transformatör K-Faktörü ve F_{HL} Faktörü	17
2.6 Harmonik Üreten Kaynaklar	19
2.6.1 Ticari Yüklerin Oluşturduğu Harmonik Kaynaklar	19
2.6.2 Endüstriyel Yüklerin Oluşturduğu Harmonik Kaynaklar	19
2.6.2.1 Büyük Güçlü Statik Konverterler ve İletim Sistemindeki Güç Elektroniği Elemanları	20
2.6.2.2 Ark Prensibiyle Çalışan Cihazlar	20
2.6.2.3 Doyma Karakteristiğine Sahip Cihazlar	21

2.7	Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler	21
2.7.1	Kondansatörler	23
2.7.2	Transformatörler	25
2.7.3	Generatörler ve Motorlar	26
2.7.4	Telekomünikasyon Hatları	27
2.7.5	İletkenler	28
2.7.6	Koruma Cihazları	29
2.7.7	Aydınlatma Elemanları	29
2.7.8	Elektronik Elemanlar	30
2.7.9	Ölçü Aletleri	30
2.7.10	Sonuç ve Özet	30
2.8	Harmonik Standartları	31
2.8.1	IEEE Standartları	31
2.8.1.1	IEEE 519–1992 Standardı	31
2.8.1.2	Diğer IEEE Standartları	33
2.8.2	IEC Standartları	33
2.8.2.1	Sonuç	35
3	KONU VE ÖNEMİ	36
3.1	Giriş	36
3.2	Kapasitör Filtreli Doğrultucunun Hat Empedansı ile Harmonik Analizi	37
3.3	Dağıtılmış Tek Fazlı Güç Elektroniği Yüklerinin Harmoniklerinin Zayıflaması ve Diversitesi Üzerine Araştırma	38
3.4	Kaynak Gerilimi Harmoniklerinin Tek Fazlı Köprü Doğrultucu Yüklerine Ait Giriş Akımı Üzerindeki Etkisi	40
3.5	Düzeltilme Kondansatörü İçeren Doğrultucu Devrelerinde Kaynak Akımı Dalga Şekillerinin ve Harmoniklerinin Öngörülmesi	41
3.6	Gerilim Kaynaklı Evirici Tarafından Beslenen Sürücülerin Hat Akımının Harmonik Analizinin Analitik Modellenmesi	44
3.7	Tek Fazlı Doğrultucu Güç Kaynağı için Optimum Giriş ve Çıkış Filtreleri	45
3.8	Minimum Hat Akımı Harmonikleri ve Maksimum Güç Faktörü İçin Doğrultucu Dizaynı	48
3.9	Aşırı ve Kritik Endüktanslı Doğrultucu Filtre Sistemi Güç Faktörünün Zaman Domeninde Analizi	49
3.10	Sonuç ve Yorumlar	49

4 TEK FAZLI KÖPRÜ DOĞRULTUCUNUN ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ	51
4.1 Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı Lineer Olmayan Yük Durumu	51
4.1.1 İletim (Şarj) Periyodu ($t_1 \leq t \leq t_2$)	52
4.1.2 Kesim (Deşarj) Periyodu ($0 \leq t \leq t_1, t_2 \leq t \leq T_f / 2$)	56
4.2 Filtre Endüktansının ve Kapasitesinin Harmonik Büyüklüklere Etkisi	60
4.3 Sonuç	75
5 SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR	76
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_n, B_n	:	Gerilim ve akımın analitik ifadelerinde verilen gerilim kaynağının n.harmoniğinden meydana gelen katsayılar.
C	:	Kondansatörün sığası.
C_i	:	Kaynak tarafı kondansatörünün sığası.
CF	:	Krest faktör.
$c1_n, c2$	:	Gerilim kaynağının n.harmoniğinden meydana gelen geçici hal katsayıları.
D_H	:	Üretilen harmonik gücü.
D_1, D_2	:	Karakteristik denklemin kökleri.
f	:	Frekans
f_c	:	Rezonans frekansı.
F_{HL}	:	Harmonik kayıp faktörü.
φ	:	Faz açısı.
φ_n	:	n. harmonik faz açısı.
$g.f$	:	Güç faktörü.
I	:	Akımın etkin değeri.
I_{da}	:	Akımın doğru akım bileşeni.
I_n	:	Akımın n.harmoniğinin etkin değeri.
I_m	:	Akımın azami değeri.
I_{max}	:	Transformatörün sinüzoidal olmayan şartlarda verdiği azami akım
I_{ort}	:	Akımın ortalama değeri
I_R	:	Transformatörün anma akımı.
$i(t)$	:	Akımın zamana bağlı ifadesi.
$i_h(t)$	:	Hat akımının zamana bağlı ifadesi.
$i_y(t)$	:	Yük akımının zamana bağlı ifadesi.
K	:	C57.110.1998 standardında geçen bir indistir.
L	:	Endüktans.
L_h	:	Hattın endüktansı.
L_{kr}	:	Kritik endüktans değeri
P_1	:	Temel harmonik aktif gücü.
P	:	Aktif güç.

Q_1	:	Temel harmonik reaktif gücü.
Q_C	:	Kapasitif reaktif güç.
Q_L	:	İndüktif reaktif güç.
R	:	Ohmik direnç.
R_h	:	Hattın direnci.
R_y	:	Yükün direnci.
S	:	Görünür güç.
T	:	Saniye olarak zaman
T_f	:	Temel harmonik periyodu.
t_1	:	Diyotun pozitif alternansta ilettime girdiği zaman.
t_2	:	Diyotun pozitif alternansta kesime girdiği zaman.
T_{tepe}	:	Hat akımının tepe değerine ulaştığı zaman.
TIF	:	Telefon etkileşim faktörü.
THD_x	:	Akım ya da gerilimin toplam harmonik bozulması.
V_m	:	Gerilimin azami değeri
V	:	Gerilimin etkin değeri.
V_{da}	:	Gerilimin doğru akım bileşeni.
V_n	:	Gerilimin n.harmoniğinin etkin değeri.
V_{m_n}	:	Gerilimin n.harmoniğinin azami değeri.
V_{ort}	:	Gerilimin ortalama değeri.
$v(t)$	:	Gerilimin zamana bağlı ifadesi.
$v_y(t)$	:	Yük akımının zamana bağlı ifadesi.
$v_{kay}(t)$	:	Kaynak geriliminin zamana bağlı ifadesi.
v_{kay_n}	:	Kaynak geriliminin n.harmonik için değeri.
ω	:	Açısal frekans.
ω_n	:	n.harmoniğin açısal frekansı.

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Alternatif akım oluşumu	6
2.2 Enerjinin iletimi ve dağıtımı	8
2.3 Bozulmuş dalga formunun Fourier serileri ile gösterimi	10
2.4 Aynı direkte bulunan iletişim hatları ile enerji hatlarının etkileşimi	27
2.5 İndüksiyon yoluyla etkileşimin ekranlı kablo tarafından ortadan kaldırılması	28
2.6 Direkt iletkenlik ile haberleşme hattının etkilenmesi	28
2.7 Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi	29
3.1 Makalede kullanılan eşdeğer devre	38
3.2 Makalede kullanılan eşdeğer devre	39
3.3 Makalede kullanılan eşdeğer devre	40
3.4 Makalede kullanılan eşdeğer devre	42
3.5 Makalede kullanılan eşdeğer devre	44
3.6 Makalede kullanılan eşdeğer devre	46
3.7 Şekil 3.6' daki devrenin süreksiz mod 1' de çalışması (C_i ihmal)	46
3.8 Şekil 3.6' daki devrenin süreksiz mod 2' de çalışması (C_i ihmal)	47
3.9 Şekil 3.6' daki devrenin sürekli modda çalışması (C_i ihmal)	47
3.10 Makalede kullanılan eşdeğer devre	48
4.1 Çıkış filtresi endüktans ve kapasitörden oluşan tek fazlı köprü doğrultucu devresinin hat empedansının da dahil edildiği eşdeğer devresi	51
4.2 İletim (şarj) periyodu için eşdeğer devre	52
4.3 Kesim (deşarj) periyodu için eşdeğer devre	56
4.4 Şekil 4.1' deki devrenin EMTP' de oluşturulmuş modeli	58
4.5 Sinüsoidal olmayan gerilim kaynağı-lineer olmayan yük için EMTP sonuçları ile analitik hesaplama sonucunun karşılaştırılması	59
4.6 Sinüsoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük için EMTP sonuçları ile analitik hesaplama sonucunun karşılaştırılması	59
4.7 THD_v % 0 ve THD_v % 5.05 için güç faktörünün L_f ve C ' ye göre değişimi	61

4.8 THD_v % 0 ve THD_v % 5.05 için hat akımının toplam harmonik distorsiyonunun (THD_i) L_f ve C ' ye göre değişimi	62
4.9 (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için yük gerilimi ve hat akımının C ' ye göre değişimi	63
4.10 (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için hat akımının C ' ye göre değişimi	64
4.11 (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için yük gerilimi ve hat akımının L_f 'e göre değişimi	66
4.12 (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için hat akımının L_f 'e göre değişimi	68
4.13 L_f değeri sabit 0.5 mH ve C değeri sabit $750 \mu F$ iken (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için hat akımının değişimi	69
4.14 Hat akımının güç faktörünün sırası ile C ve L_f ' e bağlı olarak değişimi	70
4.15 Hat akımının form faktörünün sırası ile C ve L_f ' e bağlı olarak değişimi	71
4.16 Hat akımının krest faktörünün sırası ile C ve L_f ' e bağlı olarak değişimi	72
4.17 Hat akımının % THD_i ' sinin sırası ile C ve L_f ' e bağlı olarak değişimi	73
4. 18 Yük direncine göre değişim	74

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Temel harmonik akım limitleri	32
2.2 IEEE 519–1992’ e göre gerilim harmonik distorsiyon sınırları	32
4.1 Bir periyot boyunca diyotların durumu ve o aralık için yük gerilimi denklemlerinin çözüm yöntemi	56
4.2 Bir periyot boyunca diyotların durumu ve o aralık için hat akımı denklemlerinin çözüm yöntemi	57
4.3 Gerilim kaynağının sinüsoidal olmayan şartlar için harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulması	58
4.4 Sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan kaynak değerleri	60

1 GİRİŞ

Günümüzde temel enerji kaynağı olan elektrik enerjisi yaşamımızın her alanına girmiştir. Tüketiciler açısından bu enerji, her an kullanıma hazır bir enerji olarak değerlendirilmekte ve insanlığın bu enerjiye talebi katlanarak artmaktadır. Elektrik üreticileri, her ne kadar elektriğin kullanımına başlanılmasından beri daha güvenli ve “kaliteli” enerji üretmek için uğraşıyor olsalar da, talepteki bu artış güç kalitesi kavramı üzerinde yoğun bir ilgi yaratmıştır. Güç kalitesi kavramının adeta bir fenomen haline gelmesinin diğer sebepleri aşağıdaki gibi özetlenebilir [1]:

- i. Elektrik ekipmanları gerilim bozulmalarına karşı daha hassas hale gelmişlerdir.
- ii. Günümüzde kullanılan ekipmanlar, hassas olmalarının yanında kendileri de gerilim bozulmalarına yol açmaktadırlar.
- iii. Artan ihtiyaç ve taleplerle birlikte standardizasyon gereksinimi doğmuştur.
- iv. Üreticiler iyi ve temiz enerji sunmak istemektedirler.
- v. Güç kalitesi artık ölçülebilir bir kavramdır.

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü [IEEE] standardı olan IEEE–1100 güç kalitesini “hassas elektronik ekipmanların, bu ekipmanlara uygun şekilde enerjilendirilmesi ve topraklanması kavramı” olarak tanımlamaktadır. Başka bir tanım ise bir ekipmanın amaçlandığı şekilde, herhangi bir performans kaybı yahut ortalama ömründe bir kısalma olmaksızın çalışabildiği elektriksel sınır olarak ifade etmiştir [2].

Her ne kadar hakkında farklı tanımlamalar olsa da, kaliteli bir elektrik enerjisi denince enerjinin sürekliliği, gerilim ve frekansın sabitliği, güç faktörünün bire yakınlığı, faz gerilimlerinin dengeli olması, gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüsoidale yakın olması gibi unsurlar akla gelir [3].

Pratikte ise, bu türde bir enerjinin elde edilmesinde bir takım zorluklarla karşılaşılabilir. Elektrik sistemlerinde şebeke geriliminin sinüsoidal değişimini bozarak enerjinin kalitesini düşüren önemli etkenler, güç sistemine bağlanan başta güç elektroniği elemanları olmak üzere konvertörler, ark fırınları, statik VAr kompazatörleri, motorlar, trafolar ve generatörler gibi lineer olmayan elemanların oluşturdukları harmoniklerdir.

Bu harmonikler, motorlar, generatörler, kondansatörler, trafolar ve enerji hatlarında ilave kayıplara, koruma elemanlarının hatalı çalışmasına ve hatta sistemdeki diğer elemanlara çok büyük zararlar verebilen rezonans olayına sebep olabilirler.

İşte bu sebeplerden dolayı, harmoniklerin analizi ve güç sistemlerine etkisinin incelenmesi büyük bir önem taşımaktadır.

Lineer olmayan yükler şebekeden temel dalga frekansında aktif ve reaktif akım çekerken çeşitli frekanslarda harmonik dalgaları üretirler. Bu tip yüklerin üretmiş oldukları harmonik dalgaları devrelerini şebekede bulunan alıcılar üzerinden tamamlar ve başlangıçta santrallerde saf sinüsoidal olan şebekenin gerilim dalga şeklini bozarlar. Örneğin TV'ler, kişisel bilgisayarlar, ayarlanabilir hızlı sürücüler gibi yüklerin güçleri küçük olsa bile sistemde çok sayıda oldukları ve aynı anda kullanıldıkları varsayılırsa bu tarz yükler önemli birer harmonik kaynağıdır. Bu sebeple tek fazlı bu cihazların güç kaynaklarında sıklıkla kullanılan filtreli köprü doğrultucu devresini incelemek büyük önem taşımaktadır.

1.1 Arka Plan

Tv, bilgisayar gibi tek fazlı güç elektroniği yüklerinin ürettikleri harmonik akımları küçük olmasına karşın, bu tip yüklerin çok yaygın oldukları ve aynı anda kullanıldıkları hesaba katıldığında güç sisteminde ek kayıpların, harmonik gerilimlerinin ve bozulmaların yüksek değerlere ulaşması kaçınılmazdır. Bu yüzden bu tip yüklerin çoğunda güç kaynağı olarak kullanılan filtreli köprü doğrultucu devresinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde filtreli köprü doğrultucu devresi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Bu çalışmalarda köprü doğrultucu devresinin kullanım alanları belirtilerek devrenin harmonik üreten bir kaynak olduğu vurgulanmıştır. Doğrultucunun çalışma rejimi hat akımı ve yük gerilimi dalga şekilleri elde edilerek incelenmiştir. İncelemeler bu dalga şekillerini etkileyen parametreler üzerinde yoğunlaşmıştır. Doğrultucunun hat akımı ve yük gerilimi dalga şekillerini belirleyen en önemli unsurlardan biri hiç şüphesiz ki çıkış filtresi büyüklükleridir. Bazı çalışmalarda çıkış filtresi olarak sadece kapasitör bulunurken [4], [5], [6], [7], [8] bazılarında ise çıkış filtresi olarak endüktans ve kapasitör birlikte kullanılmıştır [9], [10], [11]. Çıkışa konulan filtrenin amacı gerilim dalgalılığını azaltarak, daha düzgün bir gerilim elde edilmesidir. Bunu elde ederken güç faktörünün maksimum olması hedeflenirken hat akımı harmonikleri de minimum seviyelere çekilmek istenmektedir. Birçok çalışmada daha gerçekçi sonuçların elde edilmesi amacıyla hat empedansı, özellikle endüktansı, çözüme dahil edilmiştir.

Köprü doğrultucu devresinin akım ve gerilim dalga şekillerini elde etmek için bir yol olan simülasyon programlarının sıkıntılarından dolayı matematiksel analitik bir çözüme ihtiyaç duyulmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Tek fazlı bir sistemde gerçekçi, lineer olmayan bir yük modeli kullanılarak ve kaynak empedansının devre üzerine etkisini de dikkate alarak

- i. Filtreli köprü doğrultucu devresinin tam bir analitik modelini elde etmek ve çıkış filtresi büyüklüklerinin hat akımına ve yük gerilimine etkisini incelemek,
- ii. Klasik harmonik analiz metotlarını kullanarak harmonik büyüklükleri hesaplamak, bu büyüklükleri grafiklerle birlikte yorumlamak,
- iii. Çalışılan aralıkta çıkış filtresi endüktansının ve kapasitesinin değerleri ile oynayarak minimum hat akımı harmonikleri ve maksimum güç faktörü için devreyi optimize etmektir.

1.3 Tezin Sınırları

Tez içerisinde incelenilen konular ve bu konularla alakalı analizlerde

- i. Çok fazlı sistemlerle ilgilenilmeyecek,
- ii. Analizi yapılan devredeki elemanlar ideal kabul edilecek,
- iii. Yük olarak sabit direnç kullanılacak,
- iv. Rezonans durumu incelenmeyecek,
- v. Devre çözümleri hat akımının süresiz olduğu durum için elde edilecektir.

1.4 Tezin İçeriği

Tezin ikinci, bölümünde sinüsoidal olmayan dalgalar, harmonikler ve harmonikleri incelemek için kullanılan Fourier metodu ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Harmonik büyüklüklere ait temel tanım ve kavramlar ortaya konulmuş, güç sisteminde harmoniklerin kaynağı olan elemanlar verilip bu elemanların diğer elemanlar ve sistem üzerindeki etkileri incelenmiş, harmonik standartları ve harmoniklere getirilen kısıtlamalar detaylandırılmıştır.

Üçüncü bölümde, literatürdeki çalışmalar incelenerek geniş özetleri sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, çıkış filtresi endüktans ve kapasiteden oluşan tek fazlı köprü diyotlu doğrultucu devresinin analitik modeli elde edilmiş bu model kullanılarak çıkış filtresi büyüklüklerinin hat akımı ve yük gerilimi üzerindeki etkileri görülmüş, çeşitli harmonik büyüklükler yine aynı değişkenler için hesaplanmıştır.

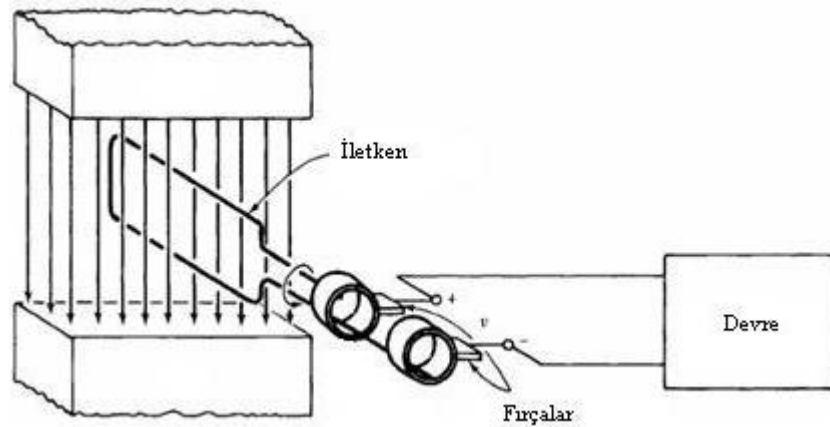
Beşinci bölümde ise tezde elde edilen genel sonuçlarla ilgili yorumlar verilmiş, yapılan çalışmanın önemi ve literatürdeki yeri anlatılmıştır.

2 GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER

2.1 Giriş

Bu bölümde, sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan dalga şekilleri tarif edilerek sinüzoidal olmayan dalga şekline sahip akım ve gerilimlerin *Fourier* serileri ile analizi, harmonik büyüklüklere ait tanım ve kavramlar, harmonik üreten elemanlar ve bu elemanların ürettiği harmoniklerin meydana getirdiği zararlar ve diğer elemanlara etkileri açıklanacak.,son olarak da literatürde bulunan harmoniklere ait standart ve sınırlar özetlenecektir.

2.2 Sinüsoidal Dalga Şekilleri



Şekil 2.1 Alternatif akım oluşumu

AC generatör veya alternatörde üretilen gerilim ve akımın belli bir zaman aralığında yön değiştirmesiyle alternatif akım oluşur. Alternatif akımın dalga şekli sinüsoidaldir.

Sinüsoidal dalga formundaki akım ve gerilim aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin \omega \cdot t - \varphi \quad (2.1)$$

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega \cdot t \quad (2.2)$$

Bu değerlerin çarpımından ani güç

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = 2 \cdot V \cdot I \cdot \sin \omega t \cdot \sin \omega t - \varphi \quad (2.3)$$

biçiminde elde edilir. Ani güç yarım açı formülleri kullanılarak

$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 1 - \cos 2\omega t - V \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (2.4)$$

biçimine dönüştürülebilir. Bu ifadede;

$$p_a(t) = V \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 1 - \cos 2\omega t \quad (2.5)$$

terimi ani aktif güç,

$$p_r(t) = V \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (2.6)$$

terimi ise ani reaktif güçtür. Ani aktif gücün bir periyot boyunca işareti değişmez. Bu anlık aktif gücün ortalama değerinin sıfırdan farklı olduğunu gösterir. Ani aktif gücün ortalama değeri aktif güç olarak tanımlanmıştır ve bu değer ani gücün ortalama değerine eşittir. Ani reaktif gücün bir yarı periyottaki akış yönü diğer yarı periyottakinin tersi yönde olduğu için ortalama değeri sıfırdır. Ani reaktif gücün azami değeri reaktif güç olarak tanımlanmıştır.

Ani aktif gücün ortalama değeri;

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.7)$$

ifadesi ile hesaplanabilir.

Anlık reaktif gücün maksimum değeri;

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (2.8)$$

ifadesi ise reaktif güç olarak tanımlanmıştır.

Sinüzoidal şartlarda aktif ve reaktif güçlerin vektör toplamı görünür güç olarak isimlendirilmiştir. Görünür güç

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.9)$$

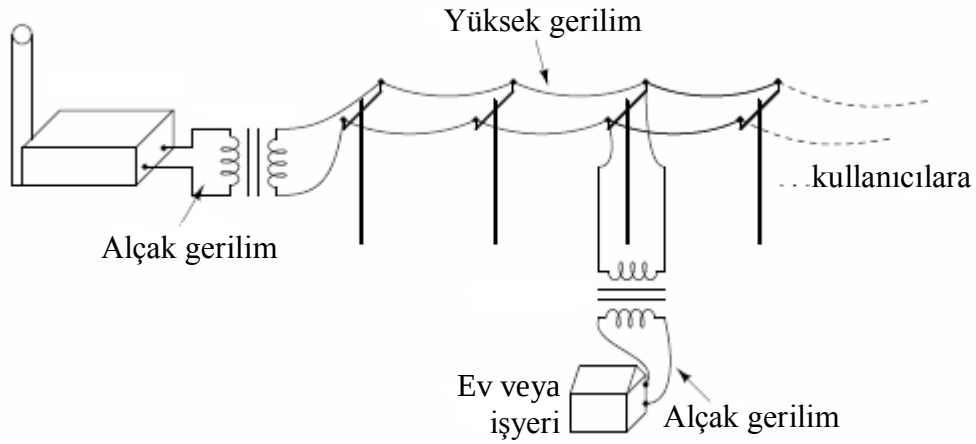
biçiminde ifade edilmiştir.

Verimlilik ölçmeye yönelik bir terim olan güç faktörü aktif güç ile görünür gücün birbirine oranı olan

$$g.f = \frac{P}{S} = \frac{P}{V \cdot I} \quad (2.10)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

2.3 Sinüzoidal Olmayan Dalga Şekilleri



Şekil 2.2 Enerjinin iletimi ve dağıtımı

Kullandığımız elektrik enerjisi, santrallerde saf sinüzoidal dalga şekline sahip olarak üretilir. Sistemdeki motor, generatör, transformatör gibi demir çekirdekli bobine sahip elemanlara uygulanan gerilim sinüzoidal değişimli olmasına rağmen bu elemanların mıknatıslanma eğrilerindeki doyma nedeniyle sinüzoidal olmayan bir akı ve bunun sonucunda da sinüzoidal olmayan bir akım meydana gelecektir. Oluşan bu

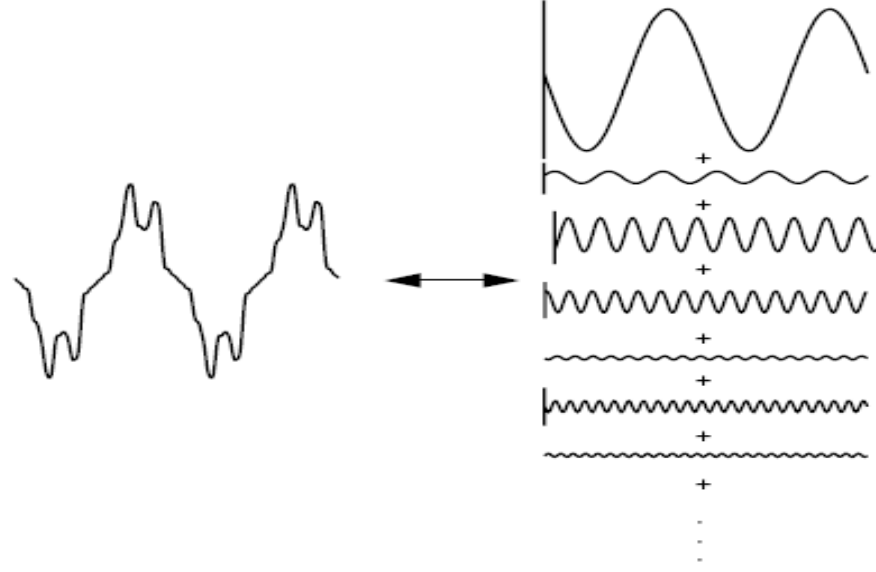
sinüsoidal olmayan akım ve gerilimler, AC elektrik enerjisinin kullanımından bu yana var olmuştur.

Günümüzde ise, güç sistemlerindeki akım ve gerilim dalga şekillerinin sinüsoidal formdan uzaklaşmasına sebep olan başlıca elemanlar, ark fırınları, yarı iletken teknolojisine sahip güç elektroniği elemanları, statik VAr kompanzatörler ve konvertörler gibi lineer olmayan yüklerdir.

2.4 Sinüsoidal Olmayan Dalgaların Fourier Serileri ile Analizi

Sinüsoidal olmayan dalgalar, lineer ya da lineer olmayan elemanlı bir devreye sinüsoidal olmayan besleme gerilimi uygulanması veya lineer olmayan elemanlı bir devreye sinüsoidal gerilim uygulanmasıyla meydana gelir. Sinüsoidal olmayan büyüklüklerin analizi *Fourier Serileri* yardımıyla yapılır.

Fransız fizikçi ve matematikçisi *Jean Baptiste Joseph Fourier* (1768 – 1830), sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların, genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalgaların toplamından oluştuğunu, bir başka deyişle, bu tür dalgaların genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüsoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir. Bu şekilde elde edilen seriye “*Fourier Serileri*”, bu serinin elemanlarına da “*Fourier Bileşenleri* ” adı verilir.



Şekil 2.3 Bozulmuş dalga formunun Fourier serileri ile gösterimi

Bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü

$$f(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.11)$$

$f(w)$ fonksiyonunun ters Fourier dönüşümü ise

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(w) \cdot e^{j\omega t} dw \quad (2.12)$$

biçiminde tanımlanır. Yukarıdaki dönüşümler sayesinde periyodik bir dalga hem zaman hem de frekans domeninde incelenebilir.

Genel olarak herhangi bir periyodik dalga şekli, Fourier serilerine aşağıdaki gibi açılabilir:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) + B_n \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t)] \quad (2.13)$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot dt \quad (2.14)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t) \cdot dt \quad (2.15)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n \cdot w_0 \cdot t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \sin(n \cdot w_0 \cdot t) \cdot dt \quad (2.16)$$

Fourier serileri kompleks formda ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t - \theta_n) \quad (2.17)$$

Burada C_n ve θ_n kompleks büyüklüklerdir.

$$\begin{aligned} A_n - jB_n &= \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \angle -\theta_n \\ &= C_n \angle -\theta_n \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t) + B_n \cdot \sin(n \cdot w_0 \cdot t)] \quad (2.19)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t) + B_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t - 90^\circ) \quad (2.20)$$

$$\mathbb{F}(A_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t)) = A_n \angle 0^\circ = A_n \quad (2.21)$$

$$\mathbb{F}(B_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t - 90^\circ)) = B_n \angle 90^\circ = -jB_n \quad (2.22)$$

$$\mathbb{F}(A_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t) + B_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t - 90^\circ)) = A_n - jB_n \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \angle -\theta_n \\ &= C_n \angle -\theta_n \end{aligned}$$

$$(A_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t) + B_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t - 90^\circ)) = \mathbb{F}^{-1}(C_n \angle -\theta_n) \quad (2.24)$$

$$= C_n \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot t - \theta_n)$$

Üstel gösterim ise aşağıdaki gibidir:

$$f(t) = A_0 + \sum_{-\infty}^{\infty} C_n \cdot e^{j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot t} \quad (2.25)$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot t} dt = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.26)$$

$$C_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot t} dt \quad (2.27)$$

Bu denklemlerde kullanılan terimler aşağıda açıklanmıştır;

$n = 1, 2, 3, \dots$ (pozitif tamsayı) harmonik derecesi

t = Bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde $t = \omega t$ olmaktadır)

T = $f(t)$ fonksiyonunun periyodu

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

A_0 = Sabit terim (doğru bileşen veya ortalama değer) olup literatürde A_0 yerine $A_0 / 2$ de kullanılmaktadır.

A_n ve B_n = $f(t)$ fonksiyonunun harmonik katsayıları

$\mathbb{F}$ = Fazör

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

θ_n = Harmoniklerin faz açısı

2.5 Harmonik Büyüklere Ait Tanım ve Kavramlar

Harmoniklerin güç sistemine yaptığı etkilerin incelenmesi, yorumlanması ve bu etkilerin giderilmesi için harmonik büyüklüklerin tanımlanması ve seviyelerinin belirlenmesi gereği doğmuştur. Standart olarak, sinüsoidal şartlar için tanımlanmış olan elektrik büyüklüklerinin harmonikler sebebiyle sinüsoidal olmayan şartlar için yeniden tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bu bölümde, harmonikler sebebiyle meydana gelen etkilerin seviyesini belirlemek için kullanılan büyüklükler tanımlanmıştır. Bu büyüklükler sayesinde yapılan çalışmalar ortak kavramlarla ele alınarak, bu çalışmaların ortak paydalarda buluşması sağlanmaktadır.

Bu bölümde sinüsoidal olmayan durumlar için elektrik büyüklükleri tanımlanmıştır.

Fourier serisi kullanılarak sinüzoidal olmayan akım $i(t)$ ve gerilim $v(t)$ dalga formları;

$$v(t) = V_{da} + \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = V_{da} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (2.28)$$

$$i(t) = I_{da} + \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = I_{da} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_0 t + \delta_n) \quad (2.29)$$

olarak ifade edilebilir

Sinüzoidal olmayan akım ve gerilimlerin etkin değeri ise

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2.30)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.31)$$

eşitlikleri yardımı ile hesaplanabilir.

Ani akım ve ani gerilimin çarpılmasıyla elde edilen ani güç;

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \text{ ' dir.} \quad (2.32)$$

Bir T periyodu için ortalama güç;

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.33)$$

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (2.34)$$

$$p(t) = \sum_{n=1}^n \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin \omega_n t \cdot \sum_{n=1}^n \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin \omega_n t - \varphi_n \quad (2.35)$$

biçiminde elde edilebilir.

2.5.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Gerilim veya akım dalga formunda olan temel harmoniğin dışındaki harmoniklerin toplam etkin değerinin temel harmoniğin etkin değerine oranı toplam harmonik bozulması olarak tanımlanmaktadır. Gerilim ve akım için;

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad ; \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.36)$$

ifadelerinden yararlanılarak hesaplanabilir. THD ' nin gerilim ve akım için farklı ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$THD_V = \sqrt{\left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2 - 1} = \frac{\sqrt{V_n^2 - V_1^2}}{V_1} \quad ; \quad THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 - 1} = \frac{\sqrt{I_n^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (2.37)$$

Gerilim ve akımın efektif değerleri de THD cinsinden ifade edilebilir:

$$V = V_1 \cdot \sqrt{1 + THD_V^2} \quad ; \quad I = I_1 \cdot \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (2.38)$$

Benzer şekilde, n . harmonikteki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları;

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad ; \quad HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.39)$$

şeklinde tanımlanır.

2.5.2 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Akım bozulma seviyelerinin, sadece *THD* ile belirtilesi kimi zaman yanıltıcı olabilmektedir. Örneğin, küçük akım değerine sahip bir sürücü, az yüklü durumdayken giriş akımının *THD*'si çok yüksek seviyelere ulaşabilir. Görece akım bozulması yüksek olduğu halde, akımın genliği küçük olduğu için bu, sistemin geneli açısından çok önemli bir sorun yaratmamaktadır. Bu yüzden, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşenin efektif değerine oranı yerine temel frekansın maksimum talep akımına oranı olan *toplam talep distorsiyonu* kavramı ortaya atılmıştır.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.40)$$

Formüldeki I_L akımı yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. Bu akım on iki ay öncesinden başlanarak, hesaplamının yapılacağı ana kadar olan süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır.[3]

2.5.3 Distorsiyon Güç Faktörü (DGF)

Aktif gücün, görünür güce oranı olan toplam güç faktörü, gerilim ve akım harmonikler içerdiğinde, aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
 gf_{toplaml} &= \frac{P}{V_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \\
 &= \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} = gf_k \cdot gf_{dist}
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

Burada,

$$S_1 = V_1 \cdot I_1 \tag{2.42}$$

Temel frekanstaki görünür güç;

$$gf_k = \frac{P}{S_1} \tag{2.43}$$

kayma güç faktörü ve

$$gf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_V)^2} \cdot \sqrt{1 + (THD_I)^2}} \tag{2.44}$$

distorsiyon güç faktörü olarak tanımlanır. Sinüsoidal durumda toplam güç faktörü ile kayma güç faktörü birbirine eşittir.

2.5.4 Şekil (Form) Faktörü

Herhangi bir sinüsoidal olmayan dalganın bozulma ölçütünü veren şekil faktörü o dalganın efektif değerin ortalama değere oranı olarak tanımlanır. Gerilim ve akım için sırasıyla,

$$kf_V = \frac{V}{V_{ort}} \text{ ve } kf_i = \frac{I}{I_{ort}} \tag{2.45}$$

2.5.5 Tepe (Krest) Faktörü

Sinüsoidal olmayan akım veya gerilimin tepe değerinin temel bileşenin efektif değerine oranıdır.

Tepe faktörü = Tepe değer / Temel bileşenin efektif değeri

2.5.6 Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)

Elektrik enerji sistemindeki harmonik akım ve gerilimlerinden kaynaklanan telefon gürültü değerinin belirlenmesi için kullanılır.

$$\text{TIF} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot \omega_n^2}}{I} \quad \text{ve} \quad \text{TIF} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot \omega_n^2}}{V} \quad (2.46)$$

2.5.7 Transformatör K-Faktörü ve F_{HL} Faktörü

UL 1561–1994 [12] ve UL 1562–1994 [13]. K Faktörünü “isteğe bağlı olarak transformatörlere uygulanan ve sinüsoidal olmayan akım çeken yüklerle kullanımının uygunluğunu belirten bir orandır” diye tanımlar. Transformatör K faktörü harmonik akımlar mevcut olduğu zaman, standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır.

$$k = \sum_{n=1} n^2 \cdot \frac{I_n^2}{I^2} = \frac{1}{I^2} \cdot \sum_{n=1} n^2 \cdot I_n^2 \quad (2.47)$$

Harmonik kayıp faktörü (F_{HL}), IEEE C57.110–1998 standardında, toplam fuko kayıplarının (P_{EC}), temel bileşen akımının meydana getirdiği fuko akım kayıplarına (P_{EC-O}) oranı olarak tanımlanır.

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{n=1}^{n_{max}} I_n^2 \cdot n^2}{\sum_{n=1}^{n_{max}} I_n^2} \quad (2.48)$$

$$F_{HL} = \frac{\sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\frac{I_n}{I_1} \right]^2 \cdot n^2}{\sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\frac{I_n}{I_1} \right]^2} \quad (2.49)$$

$$F_{HL} = \frac{\frac{1}{I_1^2} \cdot \sum_1^{n_{\max}} I_n^2 \cdot n^2}{\frac{1}{I_1^2} \cdot \sum_1^{n_{\max}} I_n^2} = \frac{\sum_1^{n_{\max}} I_n^2 \cdot n^2}{\sum_1^{n_{\max}} I_n^2} \quad (2.50)$$

$$\sum_1^{n_{\max}} I_n^2 \cdot n^2 = F_{HL} \cdot \sum_1^{n_{\max}} I_n^2 \quad (2.51)$$

$$K - \text{faktör} = \left[\frac{\sum_1^{n_{\max}} I_n^2}{\frac{1}{I_R^2}} \right] \cdot F_{HL} \quad (2.52)$$

Görüldüğü üzere IEEE C57.110:1998 standardında tanımlanan Harmonik Kayıp Faktörü (F_{HL}), UL:1562:1994 standardında tanımlanan K faktörü ile benzer olmasına karşın aynı değildir. Harmonik kayıp faktörü, harmonik akım dağılımının bir fonksiyonudur ve görece genlikten bağımsızdır. UL K faktörü ise harmonik akımının hem genliğine hem de dağılımına bağlıdır.

Standart transformatörün anma değerindeki düşümün hesaplanmasında IEEE C57.110-1986'da transformatör gücündeki azalmayı belirten,

$$D = \frac{1.15}{1 + 0.15 \cdot K} \quad (2.53)$$

eşitliği verilmiştir.

2.6 Harmonik Üreten Kaynaklar

Bir güç sisteminde sistemdeki harmonik kaynakları iki temel gruba ayrılabilir. Bunlar ticari yüklerin oluşturduğu harmonik kaynaklar ve endüstriyel yüklerin oluşturduğu harmonik kaynaklardır.

2.6.1 Ticari Yüklerin Oluşturduğu Harmonik Kaynaklar

Ofisler, mağazalar, hastaneler ve internet veri merkezleri gibi ticari kuruluşlarda kullanılan elektronik balastlı flouresantlar, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) yükleri için ayarlanabilir hızlı sürücüler, asansör sürücüler ve TV, bilgisayar gibi hassas elektronik ekipmanlar, güç kaynağı bir fazlı köprü doğrultucu olan cihazlarla donatılmışlardır. Bu cihazlar tek tek ele alındığında her birinin gücü düşük olmasına rağmen cihazların çok sayıda olmaları ve aynı anda sisteme dahil olmaları dikkate alındığında harmonik etkiler büyük olmakta ve sistemde bozulmalara yol açmaktadırlar.

2.6.2 Endüstriyel Yüklerin Oluşturduğu Harmonik Kaynaklar

Modern endüstriyel tesisler çok sayıda lineer olmayan yüke sahiptirler. Bu yükler tesisin toplam yükünün önemli bir bölümünü oluşturabilir ve güç sistemine gerilimde önemli bozunmalara yol açacak harmonik akımları akıtabilirler. Bu lineer olmayan yükler göreceli olarak düşük güç faktörüne sahiptirler. Endüstriyel tesisler ceza uygulamasına tabi olmamak için kapasitör gruplarıyla kompanzasyon yaparlar. Bu kapasitör grupları lineer olmayan yüklerin harmonik akımlarını arttırır veya rezonansa yol açabilirler. Endüstriyel yüklerin oluşturduğu lineer olmayan yükler üç ana kategoriye ayrılabilir:

- i. Büyük güçlü statik konverterler ve iletim sistemindeki güç elektroniği elemanları
- ii. Ark prensibiyle çalışan cihazlar
- iii. Doyma karakterine sahip cihazlar.

2.6.2.1 Büyük Güçlü Statik Konverterler ve İletim Sistemindeki Güç Elektronik Elemanları

Üç fazlı konverterler 3 ve 3'ün katı harmonikleri üretmeleri sebebiyle 1 fazlı konverterlerden ayrılırlar. Bu çok büyük bir avantajdır. Çünkü 3. harmonikler genelde harmonik bileşenlerin en büyüğüdür. Konverterler yine de önemli harmonik kaynağıdır. Genel olarak, konverterlerin ürettikleri harmonik bileşenler $n = k \cdot p \pm 1$ formülü ile ifade edilirler. Burada $k = 1, 2, 3 \dots$ tam sayılar olmak üzere tam sayıları, $p = 6, 12 \dots$ olmak üzere darbe sayısını belirtmektedir. Örneğin 6 darbeli bir konverterde 5, 7, 11, 13... no' lu harmonik bileşenleri ortaya çıkmaktadır. 12 darbeli konverterde ise 11, 13, 23...25 harmonikleri şebekeye akıtılır. Görüldüğü gibi 12 darbeli konverter kullanılarak 5, 7, 17, 19 gibi harmoniklerin şebekeye geçmesi önlenir.

Güç sistemlerinde reaktif güç kontrolü maksadıyla kullanılan, kontrollü bir süseptans elemanı olarak düşünebileceğimiz TKR içeren statik VAr kompanzatörleri içerdikleri lineer olmayan elemanlar sebebiyle lineer olmayan uç karakteristiğine sahiptirler. Dengeli yüklenme koşulu altında TKR, tek dereceli harmonikleri üretir. Eğer TKR' de üçgen bağlantı yapılırsa 3 ve 3' ün katı harmonikler bağlantı içinde elemine edilerek şebekeye verilmezler.

TKR içeren devrelerin rezonans sonucu etkin harmonik üretimine ve süreksizliğe sebep olacak çalışma noktalarında işletilmemesine çok dikkat edilmesi gerekir.

2.6.2.2 Ark Prensibiyle Çalışan Cihazlar

Elektrik arkının akım gerilim karakteristiği lineer değildir. Ark başladıktan sonra gerilim düşerken akım artmaktadır. Bu artış sadece sistemin empedansı tarafından sınırlandırılmaktadır. Bu tip cihazlar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Ark fırınlarında, akım sınırlayıcı olarak sisteme ait kablo ve trafonun empedansı görev yapar.

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biridir. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup

zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olur. Ayrıca ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir. Harmonikler en üst düzeye, eritme safhasında ulaşırlar. Aritma safhasında ise akım harmonikleri daha düşük düzeyde ve istikrarlıdır.

2.6.2.3 Doyma Karakteristiğine Sahip Cihazlar

Bu kategorideki cihazlar transformatör, motor ve generatör gibi demir çekirdeğinde bobine sahip cihazlardır.

Güç sistemlerinin en önemli elemanlarından olan transformatörler bilinen en eski lineer olmayan elemandır. Bunun sebebi demir çekirdekte doymanın meydana gelmesidir. Bir demir çekirdekli bobine uygulanan gerilim sinüsoidal olmasına karşın mıknatıslanma eğrisindeki lineer olmama (doyma) nedeniyle bir sinüsoidal olmayan akım meydana gelecektir.

En doğal harmonik üreticileri olan generatörlerin bu harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, magnetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklara yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikler üretir. Bunu önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar üzerinde uygun yapısal tedbirler alınır.

2.7 Harmoniklerin Meydana Getirdiğı Etkiler

Lineer olmayan yüklerin oluşturduğu harmonik akımlar, sistemde harmonik gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Oluşan gerilimler sisteme bağlı lineer ve lineer olmayan yükler üzerinden harmonik akımlar akıtırlar. Böylece kendileri harmonik üretmeyen elemanlar bile harmonik bozunmaya maruz kalabilirler. Bu nedenle teknik ve ekonomik bakımdan pek çok etkisi olan harmoniklerin bu etkilerinin bilinmesi önemlidir. Bu bölümde harmoniklerin güç sistemleri üzerinde yol açtığı problemler sıralanmış ve bazı elemanlar üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

Harmoniklerin güç sisteminde yol açtığı problemler aşağıdaki gibi özetlenebilir [3].

- i. Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin bozulması,
- ii. Elektrik güç sistemi elemanlarında ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
- iii. Güç üretiminde, iletiminde ve dağıtımında verimin düşmesi,
- iv. Gerilim Düşümünün artması, toprak kısa devre akımlarının daha büyük değerlere yükselmesi,
- v. Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve yalıtım zorlanması nedeniyle hasar görmeleri,
- vi. Senkron ve asenkron motorlarda salınımların oluşması nedeniyle aşırı ısınmalar,
- vii. Koruma sistemlerinin hatalı çalışmaları,
- viii. Kesintisiz güç kaynaklarının veriminin düşmesi,
- ix. Aydınlatma elemanlarında ve monitörde görüntü titreşimi meydana getirmesi,
- x. Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması,
- xi. Yalıtım malzemesinin zorlanması ve delinmesi,
- xii. Temel frekansta rezonans olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması,

- xiii. Elektrik cihazlarının ömrünün kısılması,
- xiv. Sesli ve görüntülü iletişim araçlarının parazitli ve anormal çalışması,
- xv. Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
- xvi. Harmoniklerden kaynaklanan gürültü nedeniyle kontrol sistemlerinin hatalı işletimi,
- xvii. Başta motor olmak üzere sistem elemanlarında ek gürültülere neden olması

Harmoniklerin bazı elemanlar üzerindeki etkileri aşağıdaki şekilde verilebilir:

2.7.1 Kondansatörler

Bir tesiste harmoniklerin oluşturduğu problemler ilk olarak kondansatörlerde ortaya çıkar. Kondansatörün kendisi harmonik üreten bir eleman olmasa da sistemdeki harmonik seviyelerinin artmasına sebep olabilirler. Bunun sebebi frekans arttıkça kondansatörlerin reaktanslarının azalmasıdır.

Endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olduğu bir frekansta meydana gelen rezonans olayı sistemde aşırı gerilimler ve akımlar meydana getirebilmektedir. kondansatörler sistem empedansı ile paralel rezonans devresi meydana getirebilirler. Harmonikli durumda temel veya harmonik bileşenlerin herhangi birinde rezonans görülebileceğinden, hem kondansatör gibi elemanların dielektriğinin delinmesine hem de diğer elemanlar üzerinde bozulma ve arızalara yol açabilir. Rezonans olayı aşağıdaki gibi izah edilebilir.

$$V_C = V_{\text{bar}}' = \frac{-iX_C}{Z - iX_C} \cdot V = \frac{V}{1 - \omega_0^2 \cdot L \cdot C + i \cdot \omega_0 \cdot C \cdot R} \quad (2.54)$$

Rezonansta h. Harmonik frekansı,

$$\omega_r = h_r \cdot \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (2.55)$$

$$h_r = \frac{\omega_r}{\omega_0} = \frac{1}{\omega_0 \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X}} = \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q_C}} \quad (2.56)$$

olarak ifade edilir.

Burada;

Q_C : mVA cinsinden kapasitörün gücü

S_{CC} : mVA cinsinden baranın kısa devre gücü

olmak üzere,

$$V_{Ch} = \frac{V}{i \cdot \omega \cdot C \cdot R} = -i \cdot \frac{V}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = -i \frac{Z_K}{R} \cdot V = -i \cdot A_f \cdot V \quad (2.57)$$

eşitliği ortaya çıkmaktadır. Burada;

V_{Ch} :h. Harmonikte kondansatör gerilimi ya da rezonanstaki kondansatör gerilimi

Z_K : $\sqrt{L/C} = \sqrt{X \cdot X_C}$ olarak tanımlanan karakteristik empedans

A_f : Z_C / R olarak tanımlanan amplifikasyon ya da artış faktörü

$$A_f = \frac{Z_C}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\sqrt{X \cdot X_C}}{R} = \frac{X}{R} \cdot h_r \quad (2.58)$$

olarak da ifade edilebilir. Görüldüğü üzere rezonans frekansında ya da bu frekansa yaklaşıldığında harmonikler artış göstermektedir.

Harmonikler genel olarak kondansatörler üzerinde aşağıdaki etkilere yol açar [3]:

- i. Harmonik bileşenler, kondansatörün akım gerilim ve reaktif güç değerlerinin değişmesine neden olmaktadır.
- ii. Harmonik bileşen içeren gerilimler, kondansatörün dielektrik malzemesinin zorlanmasına ve dielektrik kayıplarının artmasına yol açmaktadır.
- iii. Eğer kaynak gerilimi sinüsoidal değil ise kondansatörün akım ve reaktif güç değeri artış göstermekte yani kondansatör aşırı akım ve aşırı yüke maruz kalmaktadır. Bu ise kondansatörün ömrünü kısaltmaktadır.
- iv. İki harmonik bileşenin temel bileşen içerisindeki yüzdesi aynı olsa bile büyük dereceli harmonik bileşenlerin küçük dereceli harmonik bileşenlere göre oluşturacağı aşırı akım ve aşırı reaktif güç değeri daha fazla olacaktır.

2.7.2 Transformatörler

Transformatörler temel frekansta bağlı bulundukları yüke gerekli gücü minimum kayıpla iletecek şekilde tasarlanmışlardır. Harmonikler ise transformatörlere ek ısınma olarak yansıyan kayıplara ve gürültü artışına sebep olurlar.

Harmonik akımlarının oluşturduğu kayıplar 3 başlıkta toplanabilir:

- i. RMS akım

Transformatörler yükün sadece kVA ihtiyacı için boyutlandırılmışsa, harmonik akımları transformatörün RMS akım kapasitesinin üzerine çıkmasına sebep olabilir. Bu ise iletken kayıplarının artmasına yol açar.

- ii. Fuko Kayıpları

Manyetik akı sebebiyle indüklenen bu akımlar; sargılarda, çekirdekte ve transformatörün manyetik alana maruz kalan diğer parçalarında dolaşarak ilave ısınmalara sebep olurlar. Fuko kayıpları yük akımının frekansının karesiyle artar. Yük harmonik spektrumunda bulunan yüksek frekanslı bileşenler, fuko kayıplarını artırır.

iii. Çekirdek Kayıpları

Harmoniklerin çekirdek kayıplarında sebep olduğu artış, transformatör çekirdeğinin tasarımına ve uygulanan gerilime bağlıdır. Gerilim bozulmasındaki artış, çekirdek levhalarındaki fuko akımlarının artmasına neden olur.

2.7.3 Generatörler ve Motorlar

Bir motora bozulmuş gerilim uygulandığında, motorun manyetik çekirdeğinde ek kayıplar oluşur. Motor sargılarına uygulanan harmonikli gerilimin frekansı arttıkça, çekirdekdeki histerisis ve fuko kayıpları da artar. Histerisis kayıpları frekansla, fuko kayıpları ise frekansın karesiyle artar. Ayrıca harmonik akımların motor sargılarında meydana getirdiği ek $I^2.R$ kayıpları da hesaba katılmalıdır.

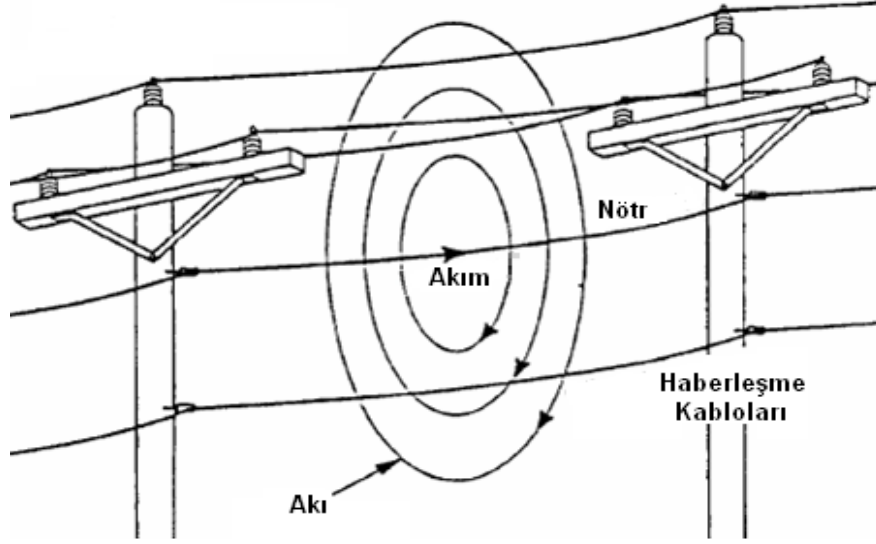
Başka ve belki de daha önemli bir etki, harmonikler sebebiyle oluşan darbe torklarıdır. Manyetik alan ile rotorda indüklenen akımlar sonucunda motor shaftında darbe torkları oluşur. Eğer bu osilasyonların frekansı motorun dönen elemanlarının herhangi birisinin frekansına denk gelirse, mekanik rezonans meydana gelir. Bu da motorda ciddi hasarlara sebebiyet verebilir [2].

Dönen makinelerde harmoniklerin etkisi aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- i. Harmoniklere bağlı olarak bakır ve demir kayıpları artar. Bu da dönen makinelerde ilave ısınmalara, dolayısıyla verimin düşmesine yol açar.
- ii. Manyetik alanın temel manyetik alan ile aynı ya da farklı yönde olmasına bağlı olarak oluşan net etki sonucunda rotor çubuklarında akımlar indüklenir. Bu akımlar, motor shaftında darbe torkları oluşturur. Bu da motorun hasar görmesine neden olabilir.

2.7.4 Telekomünikasyon Hatları

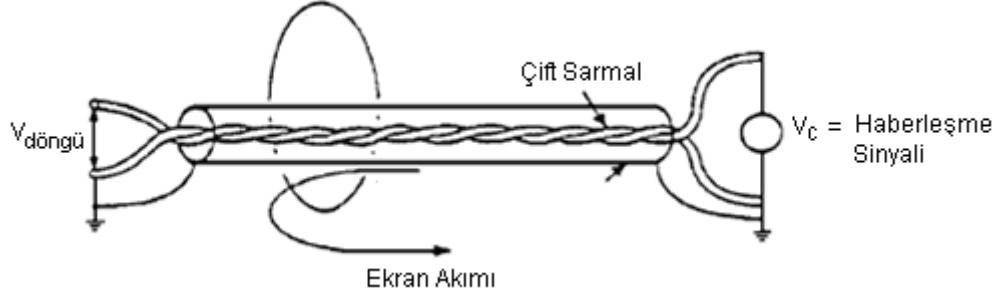
Dağıtım sisteminde ya da herhangi bir tesiste dolaşan harmonik akımları, aynı direkleri kullanan haberleşme devreleriyle etkileşime girebilir. Ortak harmonik akımlar sebebiyle, paralel iletkenlerde indüklenen gerilimler, sıklıkla sesli iletişimin yapıldığı bant genişliğine girerler. 540 Hz. (9. harmonik) ve 1200 Hz. Arasındaki harmonikler önemli parazitlere yol açarlar. Akıma bağlı indüklenen gerilimler, frekans ile artar. 3 ve 3' ün katı olan harmonikler dört telli sistemlerde, üç fazlı devrenin her fazında bulunur ve nötr iletkeninde toplanır. Haberleşme hatlarına en büyük etkiyi bu akımlar meydana getirir [14].



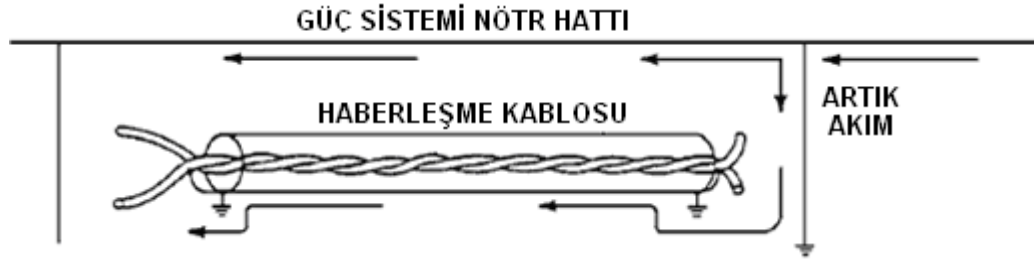
Şekil 2.4 Aynı direkte bulunan iletişim hatları ile enerji hatlarının etkileşimi

Güç sistemlerindeki harmonik akımlar, haberleşme devreleriyle indüksiyon yoluyla yahut direkt temasla etkileşime geçerler. İndüksiyon ile etkileşim açık telli telefon devrelerinde önemli bir problemken, günümüzde telefon devrelerinde ekranlı ve çift sarmallı iletkenler kullanılmasıyla birlikte önemli bir problem olmaktan çıkmıştır. Her iki iletkende de direkt etkileşim eşit olduğundan, iletkenler arasında bir etkileşim oluşmamaktadır. İndüksiyon yoluyla etkileşim, telefon iletkenlerinin ekranında yüksek akımlar indüklediğinde problem yaratabilir. Ekranında dolaşan akım, telefon kablosunun sonlarındaki toprak referansında farka yol açan bir $I.R$ düşümü yaratır. Ekran akımları direkt temas ile de oluşabilir.

İndüksiyon yoluyla etkileşiminin ekranlı kablo tarafından ortadan kaldırılmasına ilişkin bağlantı şeması Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 İndüksiyon yoluyla etkileşimin ekranlı kablo tarafından ortadan kaldırılması



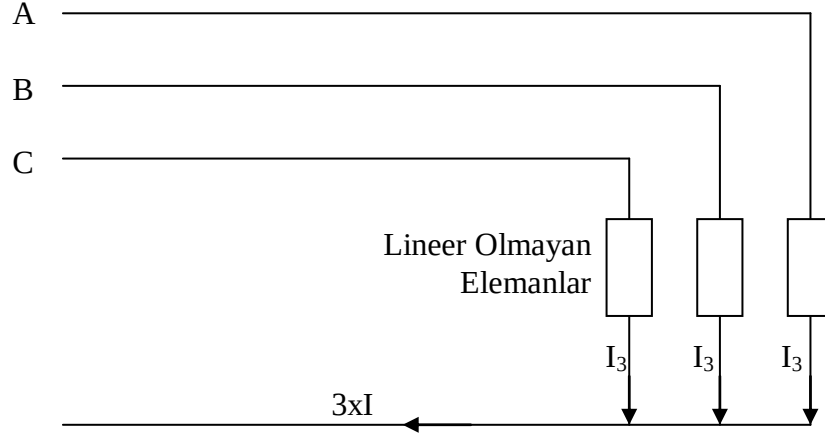
Şekil 2.6 Direkt iletkenlik ile haberleşme hattının etkilenmesi

Şekil 2.6’de görüldüğü gibi güç sistemi topraklama hattının ekranla paralel olması durumunda, ekran üzerinden görece olarak çok yüksek miktarlarda akım akacağından meydana gelecek $I.R$ düşümü yine telefon kablosunun sonlarındaki toprak referansında potansiyel fark yaratacaktır.

2.7.5 İletkenler

İletkenlerde akan akım, $I^2.R$ kayıplarına yol açar. Yük akımları harmonik içeriğe sahip olduğunda, ek kayıplar ortaya çıkmaktadır. İletkenin efektif direnci, deri etkisi sebebiyle frekans ile artış gösterir. Deri etkisi, iletkenin çapraz kesitinde oluşan, eşit olmayan akı sebebiyle akımın, iletkenin dış kısmında akmasıdır. Bu, alternatif akımda iletkenin direncinin artmasına neden olur.

Bazı lineer olmayan elemanlar büyük değerde üç ve üçün katı harmonik bileşenleri üreterek 3 fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesine sebep olurlar. Harmonik mertebesi “n” için fazlar arasında $120^\circ \cdot n$ ’ lik faz farkı olduğundan 3 ve 3’ün katı harmoniklerde 360° ’ lik faz farkı oluşur yani akımlar birbirine eklenir. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem, nötr iletkenini faz iletkenlerinin iki katı büyüklükte seçmektir.



Şekil 2.7 Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi

2.7.6 Koruma Cihazları

Devre kesicilerinde bulunan elektromanyetik indüksiyon bobini, harmonikli durumlarda düzgün çalışmayarak devre kesicisinin çalışmasında aksaklıklara sebebiyet verebilir.

Ayrıca harmonik akımları ilave ısınmalara sebep olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerine etki ederek zamansız açma yapmalarına sebep olabilirler.

2.7.7 Aydınlatma Elemanları

Harmonik gerilimler, flüoresan lambalarda duyulabilir gürültülere sebep olurken; akkor telli lambalarda, lambanın içerisindeki flamanın aşırı ısınmasına ve lambanın ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır.

2.7.8 Elektronik Elemanlar

Harmoniklerin elektronik cihazlara çeşitli etkileri olabilir. Harmonik distorsiyon, gerilimin tepe değerinde ve sıfır geçişlerinde değişime sebep olur. Değişimler, bu değerleri referans alan elektronik cihazların hatalı çalışmalarına yol açarlar.

2.7.9 Ölçü Aletleri

Sayaç gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel akım bileşenlerini ölçerler. Bununla birlikte, harmonik distorsiyonun sebep olduğu faz dengesizliği, sayaçların hatalı işletimine neden olabilir [3].

Endüksiyon diskli enerji sayaçları, frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından ötürü hatalı çalışmaktadır.

Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş voltmetre ve amperetreler, harmoniklerin var olması durumunda hatalı sonuçlar vermektedirler.

2.7.10 Sonuç ve Özet

Harmonikler bir güç sisteminde bulunan kondansatörler, transformatörler, generatörler ve motorlar, telekomünikasyon hatları, iletkenler, koruma elemanları ve ölçü aletleri gibi aklımıza getirebileceğimiz tüm elemanlar üzerinde olumsuz etkilere sahiptirler. Bu etki kimi zaman hatalı çalışma ve o elemanın ömründe kısalma olarak görülebilirken, kimi zaman ise rezonans ve aşırı yüklenme gibi durumlarda elemanın hasar görerek tamamen kullanılmaz hale gelmesine sebep olabilmektedir. Bunun başlıca sebebi, tüm bu sayılan sistem elemanlarının temel frekans için saf sinüsoidal akım ve gerilimle çalışmak üzere tasarlanmış olmalarıdır. Harmoniklerin etkisinin azaltılmasının bir güç sisteminin verimini arttıracığı açıkça görülmektedir. Yine görülmektedir ki, bir sistem elemanının harmoniklerden etkilenmesi için kendisinin harmonik kaynağı olması gerekmemektedir.

Elektrik enerjisinin kullanılmaya başlamasından beri var olan harmonikler görüldüğü üzere gün geçtikçe önemi artan bir konu olarak varlığını sürdürmektedir.

Günümüz için harmoniklerin etkilerinden tamamen kurtulmak mümkün olmasa da yukarıda belirtilen bozucu etkiler geliştirilen standartlarla minimize edilmeli ve bu konuda yapılan çalışmalar arttırılarak devam etmelidir. Tüm bunlar ele alındığında yaptığımız çalışmanın önemi bir kez daha göz önüne serilmektedir.

2.8 Harmonik Standartları

Enerji sistemlerinde harmonik problemlerinin gün geçtikçe artması, hem şebeke hem de son kullanıcı açısından harmoniklerin sınırlandırılması ihtiyacını doğurmuştur. Bu nedenle bazı standartlar oluşturulmuştur [14].

Standartların asıl hedefi, son kullanıcı ekipmanlarıyla bu ekipmanların çalıştığı sistem arasındaki uyumu sağlamak için ortak bir zemin oluşturmaktır.

Bu bölümde, “IEEE 519–1992”, “IEEE 1459–2000”, “IEEE C57–110–1998”, “IEC 61000–3–2”, “IEC 61000–3–4” ve “IEC 61000–3–6”dan kısaca bahsedilecektir.

2.8.1 IEEE Standartları

Bu bölümde IEEE ‘nin harmoniklerle ilgili standartlarından kısaca bahsedilecektir.

2.8.1.1 IEEE 519–1992 Standardı

IEEE 519–1992 standardı, son kullanıcının sisteme enjekte ettiği harmonik akımlara sınır getirmekte, böylece enerji sistemindeki genel harmonik gerilim seviyesi kabul edilebilir düzeyde tutulmaktadır. Bu yaklaşımda hem son kullanıcıya hem de şebekeye görevler düşmektedir.

Her bir son kullanıcı için sisteme enjekte edilen harmonik akımı seviyesi ortak bağlantı noktasından sınırlanır. (Point Common Coupling). Tavsiye edilen limitler, hem her bir harmonik bileşeni hem de toplam talep distorsiyonu için mevcuttur.

IEEE 519–1992 standardı; güç sisteminin büyüklüğüyle orantılı olarak yükün büyüklüğüne göre–ki bu kısa devre gücüyle belirlenir – sisteme enjekte edilecek harmonik akımlarını sınırlar. Kısa devre oranı ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımının maksimum yük talep akımına göre -temel frekans bileşeni-oranıdır. Tablo 2.1’ de çeşitli gerilimler için harmonik akım sınırları gösterilmiştir[15].

Tablo 2.1. Temel harmonik akım limitleri

PCC’ deki kısa devre oranı	Maksimum gerilim harmonikleri (%)	İlgili varsayımlar
10	2.5–3.0	Şebeke
20	2.0–2.5	1–2 büyük kullanıcılar
50	1.0–1.5	Bağlı birkaç büyük kullanıcı
100	0.5–1.0	5–20 orta büyüklükte kullanıcı
1000	0.05–0.10	Birçok küçük kullanıcı

Tablo 2.2 IEEE 519–1992’ e göre gerilim harmonik distorsiyon sınırları

Bara Gerilimi (V_n)	Tekil Harmonik Büyüklük (%)	Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD_{Vn}) (%)
$V_n \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161 < V_n$	1.0	1.5

2.8.1.2 Diğer IEEE Standartları

Harmoniklerle ilgili diğer standartlar ise IEEE 1459 – 2000 Standardı ve IEEE C57 –110 – 1998 standardıdır.

IEEE 1459 – 2000 standardı, Sinüzoidal, sinüzoidal olmayan, dengeli ve dengesiz durumlarda güç tanımlamalarını anlatan, örnek analizlerle bu tanımlamaları açıklayan standarttır[16].

IEEE C57 –110 – 1998 Standardında ise transformatörlerde sinüzoidal olmayan yükleri beslerken oluşan ek kayıpları, bu kayıplara göre transformatörün verebileceği azami akım ve görünür gücün belirlenmesine ait prosedür anlatılmaktadır [17].

2.8.2 IEC Standartları

IEC, güç kalitesiyle ilgili EML, yani Elektromanyetik uyumluluk standartlarını ortaya koymuştur. IEC standardı 6 ana başlık altında toplanmıştır [14].

- i. **Genel:** Bu bölüm giriş, temel prensipler, tanımlar ve terminoloji, gibi genel kavramları açıklar. Ayrıca genel tanımların ve terimlerin yorum ve uygulamalarını içerir. Atama numaraları IEC 61000–1–X şeklindedir.
- ii. **Çevre:** Bu standartlar, ekipmanın konumlandırılacağı çevrenin uyumluluk seviyesini ve karakteristiğini tanımlar. Atama numaraları IEC 61000–2–X şeklindedir.
- iii. **Sınırlar:** Bu standartları cihazın bağlı bulunduğu çevrede oluşturabileceği emisyonun sınırını belirler. Atama numaraları IEC 61000–3–X şeklindedir.
- iv. **Ölçüm ve Test Teknikleri:** Bu standartlar ölçüm aletleri test prosedürleriyle ilgili ayrıntılı bilgi verirler. Atama numaraları IEC 61000–4–X şeklindedir.

v. **Kurulum:** Bu standartlar, elektrikli ve elektronik cihazların topraklama ve kablolanması sınır elektromanyetik uyumluluğunun sağlanması ile ilgili tanımlamalar içerir. Atama numaraları IEC 61000–5–X şeklindedir.

vi. **Muhtelif:** Genel veya özel bir kategorideki cihazlar için gerekli olan emisyon ve muafiyet sınırları için jenerik standartlardır. Atama numaraları IEC 61000–6–X şeklindedir.

IEC 61000–2–X ve IEC 61000–3–X harmoniklerle ilgilidir.

IEC 61000 – 2 – 2 standardı, alçak gerilim güç sistemlerinde düşük frekanslardaki bozulma ve sinyalizasyonun uyumluluk seviyesini tanımlar[14].

IEC 61000 – 3 – 2 standardı, harmonik akım emisyonu limitlerini içeren standarttır. Her faza ait çektiği akım 16 A' i geçmeyen cihazlar için geçerlidir [18]. IEC 61000 – 3 – 2 cihazları 4 temel kategoriye ayırmıştır.

i. A SINIFI: Dengeli 3 fazlı cihazlar

ii. B SINIFI: Seyyar cihazlar

iii. C SINIFI: Dimmerler dahil aydınlatma cihazları

iv. D SINIFI: Giriş akımının dalga şekli özel olan ve aktif gücü 600W'tan düşük cihazlar.

IEC 61000 – 3 – 4 standardı, anma akımı 16 A' den büyük olan alçak gerilimde çalışan cihazlar için geçerli harmonik akım emisyonu standardıdır[19].

IEC 61000 – 3 – 6 standardı, orta ve yüksek gerilimde çalışan harmonik üreten yükler için geçerli olan emisyon standardıdır[20].

2.8.2.1 Sonuç

Bu bölümde IEEE ve IEC gibi kurumların şebeke ve son kullanıcıya getirdiği gerilim ve akım harmonik bozulmalarının sınırları verilmiştir. Bu standartlar sayesinde, şebekenin ve son kullanıcıların, gelişen teknoloji ile birlikte yaygınlaşan harmonik kaynaklarının olumsuz etkilerinden daha az zarar görmesi, bu bozucu etkilerin en aza indirgenmesi ve günümüzde gelişmişliğinin bir ölçütü sayılan enerji güvenilirliği ve kalitesinin artırılması hedeflenmiştir.

3 KONUSU VE ÖNEMİ

3.1 Giriş

Lineer olmayan yükler şebekeden temel dalga frekansında aktif ve reaktif akım çekerken çeşitli frekanslarda harmonik dalgaları üretirler. Bu tip yüklerin ürettiği oldukları harmonik dalgaları, devrelerini şebekede bulunan alıcılar üzerinden tamamlar ve başlangıçta santrallerde saf sinüsoidal olan şebekenin gerilim dalga şeklini bozarlar. Geniş alana yayılmış tek fazlı güç elektroniği yükleri güç dağıtım sistemlerinde gittikçe önemi artan birer harmonik kaynağı haline gelmektedirler. Örneğin TV'ler, kişisel bilgisayarlar, ayarlanabilir hızlı sürücüler gibi yüklerin güçleri küçük olsa bile sistemde çok sayıda oldukları ve aynı anda kullanıldıkları varsayılırsa bu tarz yükler önemli birer harmonik kaynağıdır. Bu sebeple tek fazlı bu cihazların güç kaynaklarında sıklıkla kullanılan filtreli köprü doğrultucu devresi hakkında literatürde birçok çalışma yapılmıştır.

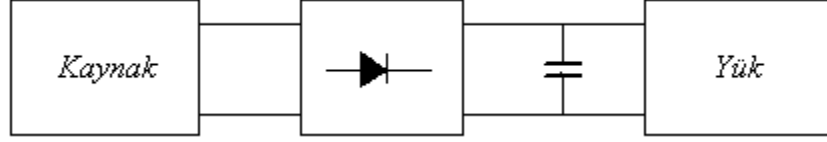
Bu çalışmaların bazılarında çıkış filtresi olarak sadece kapasitör bulunurken [4], [5], [6], [7], [8] bazılarında ise endüktans ve kapasitör birlikte kullanılmıştır [9], [10], [11] Çıkışa konulan filtrenin amacı, gerilim dalgalılığını azaltarak daha düzgün bir gerilim elde edilmesidir. Bunu elde ederken güç faktörünün maksimum olması hedeflenirken hat akımı harmonikleri de minimum seviyelere çekilmek istenmektedir. Çıkış geriliminin dalgalılığını azaltan kapasitörün şarj periyodunda akan giriş akımı, harmonikler bakımından zengindir ve toplam harmonik distorsiyonu genellikle %100'ler mertebesinde [5]. Bu sebeple giriş akımının ve çıkış gerilimin dalga şekillerinin elde edilmesinde bu dalga şekillerinin devre parametreleriyle olan ilişkilerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Köprü doğrultucu devresinin akım ve gerilim dalga şekillerini elde etmek için bir yol Spice, EMTP, MATLAB Simulink gibi simülasyon programlarını kullanmaktır. Bu tarz programların yapısı gereği bazı sıkıntıları vardır. Ana problem, iletimde olmayan diyotlara seri bir endüktans bulunmasından kaynaklanan nümerik problemlerdir. Bu problem endüktansa paralel bir RC söndürücü ya da büyük bir R konularak halledilebilirse de devreye fazladan elemanlar eklemek sistemin doğruluk payını düşürmektedir. Bir başka zorluk ise simülasyonun sürekli hale geçebilmesi için

simülasyonda birçok periyotun geçmesi gereğidir. Bunun sebebi, giriş akımının tepe değeri büyüklüğünün kapasitörün gerilim seviyesine bağlı olmasıdır. Kaynağın harmonikli olduğu durumda, simülasyon programlarında harmonik kaynakları sabit akım kaynağı olarak modellenmektedir. Ayrıca devre parametrelerinde yapılmak istenen her değişiklik için ayrı simülasyonlar yapılması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı matematiksel analitik bir çözüme ihtiyaç duyulmaktadır [7].

Literatürdeki çalışmalar; çok sayıdaki bu tip yüklerin kümülatif harmonik akım karakteristiklerini araştırmak [5], devre parametrelerinin değişik değerleri için akımın dalga şekilleri ve harmonik davranışlarını incelemek [7], kaynak gerilimi harmoniklerinin tek fazlı köprü doğrultucu yükler üzerindeki etkisini belirlemek [6], maksimum güç faktörü ve minimum hat akımı harmoniği için filtre endüktansını optimize etmek [9] gibi çeşitli konularla ilgilenmişlerdir. Aşağıda literatürde bulunan çalışmaların geniş bir özeti sunulmuştur.

3.2 Kapasitör Filtreli Doğrultucunun Hat Empedansıyla Harmonik Analizi

Makalede, televizyon setleri gibi ev elektroniği cihazları tarafından üretilen harmoniklerin miktarı az olmasına rağmen, bu tarz yüklerin sayısının oldukça fazla olduğu ve aynı anda kullanıldığı belirtilmiş, bu yüzden de bu tip elektronik cihazların güç kaynakları tarafından üretilen harmoniklerin güç dağıtım sistemlerinde harmonik parazitlerin (bozulmaların) oluşumunun bir sebebi olduğu vurgulanmıştır. Kapasitör filtreli doğrultucu giriş akımının sadece kondansatör şarj olurken akan bir darbe akımı olduğu ve bu yüzden yüksek dereceli harmonikler barındırdığı ifade edilmiştir. Elektronik cihazların güç kaynağında sıklıkla kullanılan kapasitör filtreli köprü doğrultucu devresinin giriş akımı dağıtım sisteminin empedansı da hesaba katılarak kararlı hal için hesaplanmıştır [4].



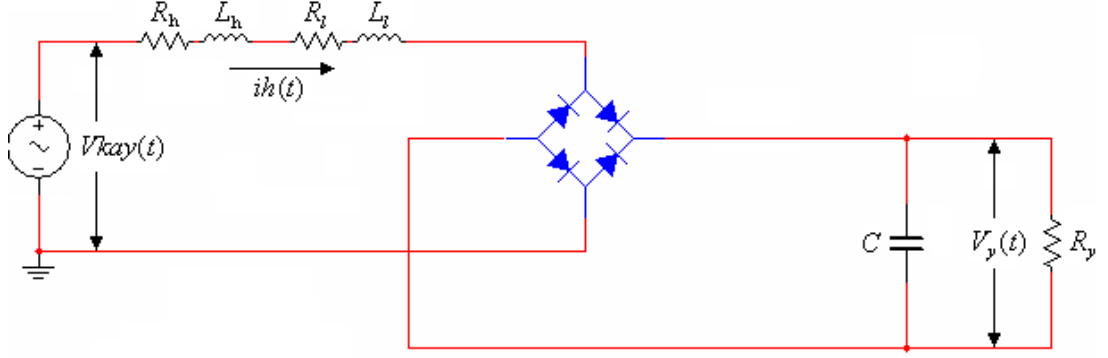
Şekil 3.1 Makalede kullanılan eşdeğer devre

Yük devresi olarak sabit direnç ve sabit güç olarak iki şekilde çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- i. Çeşitli parametreler değiştirilerek yapılan hesaplamalar sonucunda, diyot akımının bant genişliği, akım dalga şekilleri ve harmonik bozulmaların, endüktansın değişimine oldukça bağlı olduğu görülmüştür.
- ii. Sabit direnç durumunda endüktans arttıkça, harmonikler ile birlikte temel dalganın genliği ve ortalama gücü de azalmıştır. Diğer taraftan sabit güç durumunda, temel dalganın genliği endüktans arttıkça artma eğilimi göstermiştir.
- iii. Birçok kapasitör filtreli doğrultucu paralel olarak güç dağıtım sistemine bağlandığında, harmoniklerin genliği her bir doğrultucunun harmonik içeriklerinin doğrusal toplamı alınarak hesaplanamaz.

3.3 Dağıtılmış Tek Fazlı Güç Elektroniği Yüklerinin Harmoniklerinin Zayıflaması ve Diversitesi Üzerine Araştırma

Bu makalenin amacı geniş alana yayılmış çok sayıdaki tek fazlı güç elektroniği yüklerinin kümülatif harmonik akım karakteristiklerini araştırmaktır. En sık karşılaşılan yük modeli için tam analitik model türetilmiştir. Bu model daha sonra paylaşılan kaynak empedansı yüzünden oluşan etkileşimi, güç seviyelerindeki değişimi ve devre parametrelerindeki değişikliklerin tekil ve kümülatif olarak harmonik akımları üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Makalede kullanılan eşdeğer devre

Bu makalede ortaya sürülen temel unsurlar şunlardır[5]:

- i. Geniş alana yayılmış tek fazlı güç elektroniği yükleri, dağıtım sistemi çalışmalarında genellikle sabit harmonik akım enjekte eden yükler şeklinde kabul edilirler. Bu kabul akım harmoniklerinin faz açılarının dağılımını hesaba katmadığından gerilim harmoniklerinin fazla tahmin edilmesine sebep olurlar.
- ii. Diversite ve harmoniklerin zayıflaması, özellikle yüksek harmonikler için, dağıtılmış tek fazlı güç elektroniği yüklerinin davranışlarının tahmininde çok önemli etmenlerdir.
- iii. Bu iki faktör sebebiyle, harmonik akımların genliklerinin aritmetik toplamının kullanıldığı sabit akım enjeksiyon metodu, bu tip yüklerin oluşturduğu kümülatif harmonik akımları fazla tahmin edebilir.

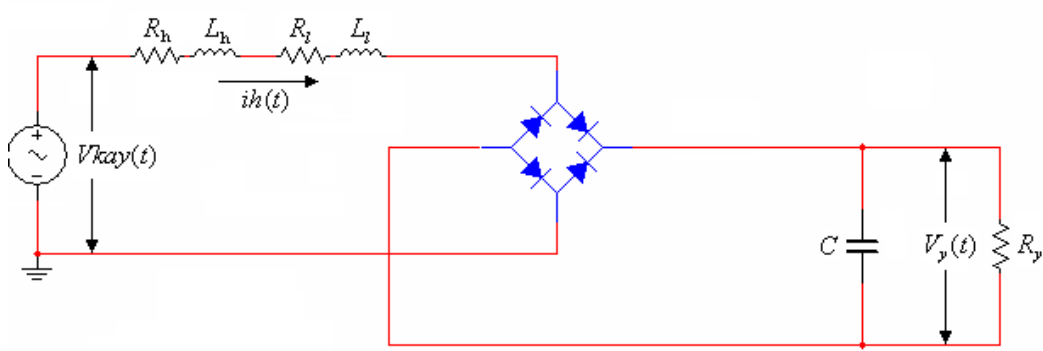
Güç seviyesindeki ve devre parametrelerindeki değişimler sebebiyle oluşan akım harmoniklerinin diversitesinin dağıtılmış yükler tarafından oluşturulan kümülatif akım harmoniklerini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir.

Masa üstü bilgisayarlar ve televizyon setleri gibi aynı tipte yükler ortak bir kaynak empedansını paylaştığında üçün katı olan akım harmoniklerinde önemli bir azalma olduğu gösterilmiştir. Bu durumdaki akımın THD' si tekil yük akımlarının

süperpozisyonu alınarak elde edilen akım THD' sinin yarısı kadardır. Bununla birlikte nötr iletkeninin harmonikler sebebiyle aşırı yüklenmesinin asıl sebebi olan 3. harmonikte ufak bir azalma gözlenmiştir.

3.4 Kaynak Gerilimi Harmoniklerinin Tek Fazlı Köprü Doğrultucu Yüklerine Ait Giriş Akımı Üzerindeki Etkisi

Bu makalede, kaynak gerilimi harmoniklerinin, tek fazlı köprü doğrultucu yükler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu tip yükler nonsinüsoidal kaynak ile beslendiğinde, ortaya çıkan akım harmoniklerinin hesaplanması için tam bir analitik model sunulmuştur.



Şekil 3.3 Makalede kullanılan eşdeğer devre

Bu makalede üzerinde durulan ana unsurlar şunlardır:

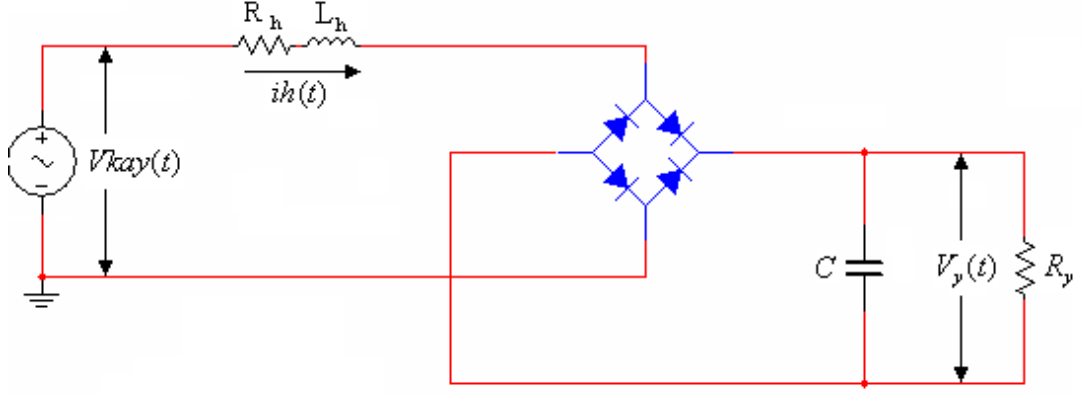
- i. Kaynak gerilimi harmoniklerinin faz açıları akım bozulmalarının artmasını veya azalması belirlemektedir. Genel olarak, tepe yapmış (sivrilmiş) gerilim dalgası akım bozulmalarını arttırırken, yassı bir dalga ters etki yapmaktadır. Bu karmaşık ilişkiden dolayı, gerilimin krest faktörü, THD_i ' yi belirlemede THD_v ' den daha kullanışlıdır.

- ii. Tek fazlı köprü doğrultucu yükler tarafından oluşturulan akım harmonikleri, bu harmoniklerin kendi kendini kısmi olarak kompanze etmesini sağlayan gerilim harmonikleri üretirler.

En büyük tek fazlı güç elektroniği yükleri ayarlanabilir hızlı sürücüyeye sahip ısı pompaları ve elektrikli taşıtların pil şarj üniteleridir. Ayarlanabilir hızlı sürücüyeye sahip ısı pompalarının evsel güç dağıtım sistemlerine olan harmonik etkilerini ön görmek için çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur [21], [22], [23], [24]. Bu çalışmalar, akım harmoniklerinin kaynak gerilimi bozulmalarından bağımsız olduğu kabulüne dayanmaktadır. Bu kabul sadece kaynak gerilimi dalga şekli kabul edilebilir derecede sinüsoidal olduğunda geçerlidir. Bununla birlikte yapılan simülasyon çalışmaları dağıtım fiderlerine bağlı ayarlanabilir hızlı sürücüyeye sahip ısı pompalarının yaygınlık oranı % 10 'a ulaştığında fiderin THD_v ' sinin %10'lar mertebesine yükseldiğini göstermektedir. Bu sebeple gelecekteki harmonik bozulma seviyelerini doğru olarak tahmin edebilmek için kaynak gerilimi bozulmalarının harmonik akımlar üzerindeki etkisini incelemek önemlidir. Makalede gerilim harmoniklerinin faz açılarının yük akımı harmoniklerinin ve THD_i ' nin belirlenmesinde çok önemli olduğu gösterilmiştir. Ayrıca kaynak gerilimine ait krest faktörüyle THD_i ' yi belirleyebilmek için basitleştirilmiş ampirik bir denklem geliştirilmiştir. Son olarak bu yükler tarafından meydana getirilen gerilim harmoniklerinin THD_i üzerinde yarattığı kısmi kompanzasyon etkisi gösterilmiştir.

3.5 Düzeltme Kondansatörü İçeren Doğrultucu Devrelerinde Kaynak Akımı Dalga Şekillerinin ve Harmoniklerinin Öngörülmesi

Bu makalede yapılan analizler kaynak endüktansını, kaynak direncini, sonsuz büyük olarak kabul edilmeyen doğru akım tarafındaki kondansatörünü de hesaba katmıştır. Harmoniklerin içeriğini kontrol etmek için kaynak tarafındaki empedansın kullanımı tartışılarak farklı yük seviyeleri için sayısal sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu makalede tek fazlı doğrultucu için çözüm yapılmış doğru akım tarafında filtre olarak sadece düzeltme kondansatörü kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Makalede kullanılan eşdeğer devre

Makalede üzerinde durulan konular şu şekilde özetlenebilir:

Düzeltilme kondansatörü içeren köprü doğrultucu kullanılarak yapılan doğrultmanın asıl zararlı etkisi kaynak gerilimi tepe değerindeki yüksek genlikli ve kısa süreli kaynak akımı darbeleri sebebiyle meydana gelen basıktır (düzleşme, yassılaşma). Gerilimdeki bu bozulmanın derecesi kaynak empedansına, düzeltme kondansatörüne ve doğru akım yük seviyesine bağlı olarak değişen kaynak akımının harmonik içeriğine bağlıdır. Bu nedenle kaynak tarafı empedansının ya da doğru akım tarafındaki düzeltme kondansatörünün değeri değiştirilerek kaynak akımı harmonikleri üzerinde kontrol sağlanabilir.

Düzeltilme kondansatörü kullanılarak doğrultmanın yarattığı problemler nedeniyle kaynak akımını şekillendirmede alternatif düzenlemeler günümüzde ticari ürünlerde kullanılmaktadır. Bunlardan en popülerleri devrenin karmaşıklığını arttırmak pahasına sanal sinüzoidal giriş elde eden kuvvetlendirici doğrultucudur (boost rectifier). Bu tarz alternatif metotlar geliştirilse de, ekonomik sebepler ile düşük güçlü ve düşük maliyetli elektronik cihazlarda kondansatörlü doğrultucular kullanılmaktadır. Bu sebeple ortaya sunulan doğrultucu devre tasarımının akım bozulmaları için mevcut olan düzenlemelere uygun olup olmadığını belirlemek ve eğer uygun değilse hangi düzeltici önlemlerin gerektiğini belirleyebilmek önemlidir.

Bu makalenin üç amacı vardır:

- i. Kaynak empedansı, düzeltme kondansatörü ve yük seviyesinin herhangi bir kombinasyonu için kaynak akım şekillerini ve harmoniklerini çabuk ve doğru bir şekilde belirlemek.
- ii. Kaynak akımının dalga şekillerini ve harmoniklerini devre parametrelerinin nasıl etkilediğini göstermek
- iii. IEC 555-2 standardının şartlarının sağlanması için kaynak tarafında empedansın gerekliliğini vurgulayan sayısal sonuçlar sunmak

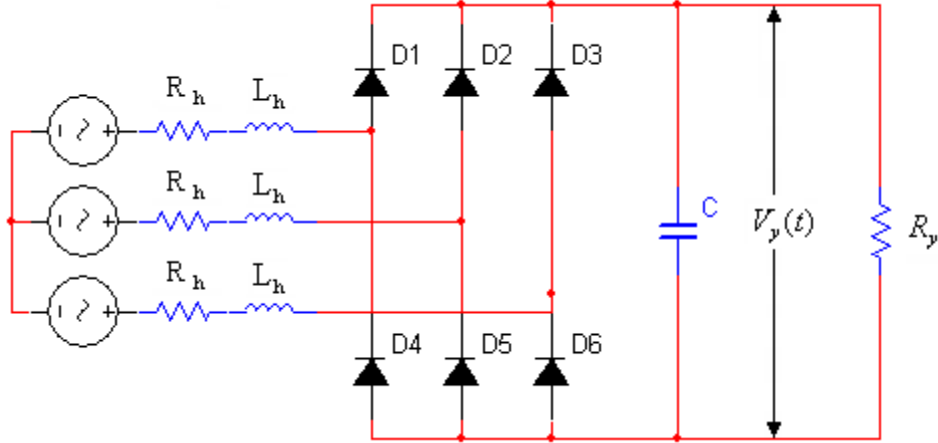
Köprü doğrultucu devresinin akım ve gerilim dalga şekillerini elde etmek için bir yol Spice, EMTP, MATLAB Simulink, gibi simülasyon programlarını kullanmaktır. Fakat ne yazık ki bu programlar güç elektroniği simülasyonları için tam anlamıyla uygun değildir. Ana problem iletimde olmayan diyotlara seri bir endüktans bulunmasından kaynaklanan nümerik problemlerdir. Bu problem endüktansa paralel bir RC söndürücü ya da büyük bir R konularak halledilebilirse de devreye (sisteme) fazladan elemanlar eklemek sistemin doğruluk payını düşürmektedir. Bir başka zorluk ise simülasyonun sürekli hale geçebilmesi için simülasyonda birçok periyotun geçmesi gereğidir. Bunun sebebi giriş akımı tepe değeri büyüklüğünün kapasitörün gerilim seviyesine bağlı olmasıdır. Kaynak harmonikli olduğu durumda, simülasyon programlarında harmonik kaynakları sabit akım kaynağı olarak modellenmektedir. Ayrıca devre parametrelerinde yapılmak istenen her değişiklik için ayrı simülasyonlar yapılması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı matematiksel analitik bir çözüme ihtiyaç duyulmaktadır.

Yarım periyotta birden fazla akım darbesi olma durumu kondansatörün çok küçük değerleri için, çok yüksek dalgali gerilimde meydana gelebilir ki pratikte bu karşılaşılmayan bir durumdur.

3.6 Gerilim Kaynaklı Evirici Tarafından Beslenen Sürücülerin Hat Akımının Harmonik Analizinin Analitik Modellenmesi

Makalede, üç fazlı köprü diyotlu doğrultucu tarafından beslenen gerilim kaynaklı eviriciden oluşan AC/DC/AC çift aşamalı konverterlerin, ayarlanabilir hızlı sürücülerde ayarlanabilir frekans ve gerilim genliği elde etmek için günümüzde sıkça kullanıldığı belirtilerek, sistemde yüksek hat akımı harmonikleri üreten bu doğrultucular için sinüsoidal olmayan kaynak gerilimi ile enerjilendirildiklerinde sisteme enjekte edilen akım harmoniklerinin analitik formu temel alınarak, sürekli ve süreksiz akım durumları için akım harmoniklerinin denklemleri elde edilmiş ve kararlı hal için Fourier analizleri türetilmiştir. Önerilen modelin doğruluğu zaman domeninde yapılmış simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Bu modelleme hem sürekli hem de süreksiz durum için, kaynak gerilimi bozulmalarının güç sistemine enjekte edilen akım harmonikleri üzerindeki etkisini kısa sürede hesaplamak için faydalıdır.



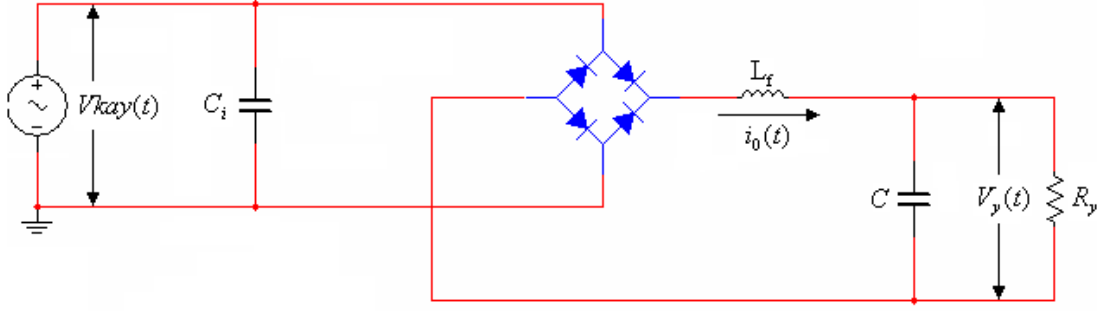
Şekil 3.5 Makalede kullanılan eşdeğer devre

3.7 Tek Fazlı Doğrultucu Güç Kaynağı için Optimum Giriş ve Çıkış Filtreleri

Bu makalede düşük güçlü DC' den DC' e çeviriciler veya eviricilerde kullanılan tek fazlı kontrolsüz köprü doğrultucu için optimum çıkış filtresi L_f ve giriş filtresi C_i elde edilmiştir. C_i filtresi, maksimum giriş güç faktörünü, minimum filtre endüktansını ve minimum DC çıkış voltaj regülasyonu elde etmek için optimize edilmiştir. Deneysel bir model üzerinde, teorik sonuçlar doğrulanmıştır.

Anma gücü 2 kW' a kadar olan çoğu DC' den DC' e çeviricilerin veya eviricilerin giriş DC gerilimi tek fazlı köprü doğrultucular vasıtasıyla sağlandığı belirtilmiştir. Doğrultucunun çıkış filtresi genel olarak dalgasız DC gerilim sağlayan ve harmonikleri azaltan tek parçalı L_f - C filtresinden oluşturulmuştur.. Bu makalede C çok büyük kabul edilerek verilen çıkış gücü için, L_f ' nin büyüklüğü, yük ile değişen çıkış DC gerilimi ve giriş güç faktörü arasında uyumluluk sağladığını gösterilmiştir.

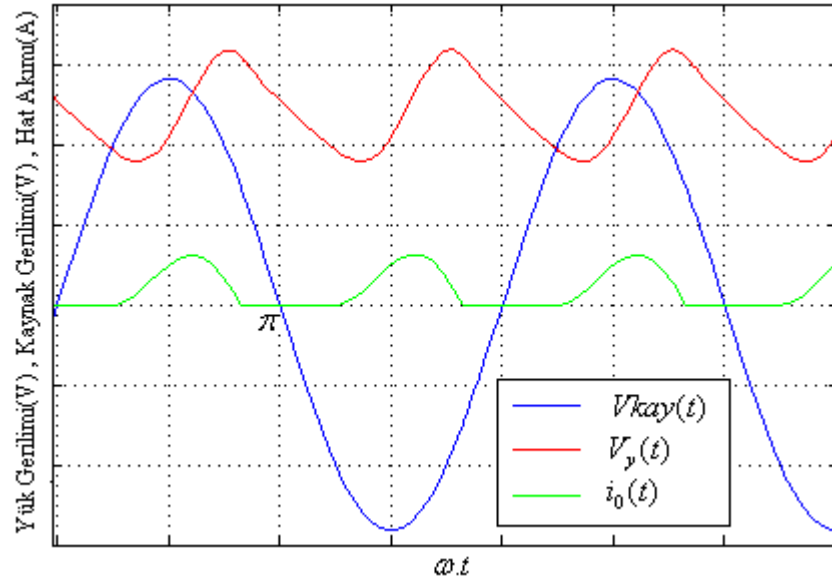
Burada, L_f filtresinin per unit değeri değiştirildiğinde giriş güç faktörüyle çıkış DC gerilimi olan V ' nin ilişkisini sağlayan detaylı bir analiz sunulmuştur. Teorik sonuçlar aynı zamanda en iyi giriş güç faktörünün bütün yük durumlarından i_0 'nun süresiz ve C_i hesaba katıldığında elde edildiğini göstermiştir. Son olarak yükün farklı durumları için, minimum filtre endüktansı ile maksimum giriş güç faktörünü, ve minimum çıkış gerilimi regülasyonunu elde edebileceğimiz optimum çalışma noktası tespit edilmiştir. Bu tespitler, L_f ve C_i bileşenlerinin seçimi için prosedür dizayn örneği üzerinde gösterilerek, teorik sonuçlar deneysel olarak doğrulanmıştır.



Şekil 3.6 Makalede kullanılan eşdeğer devre

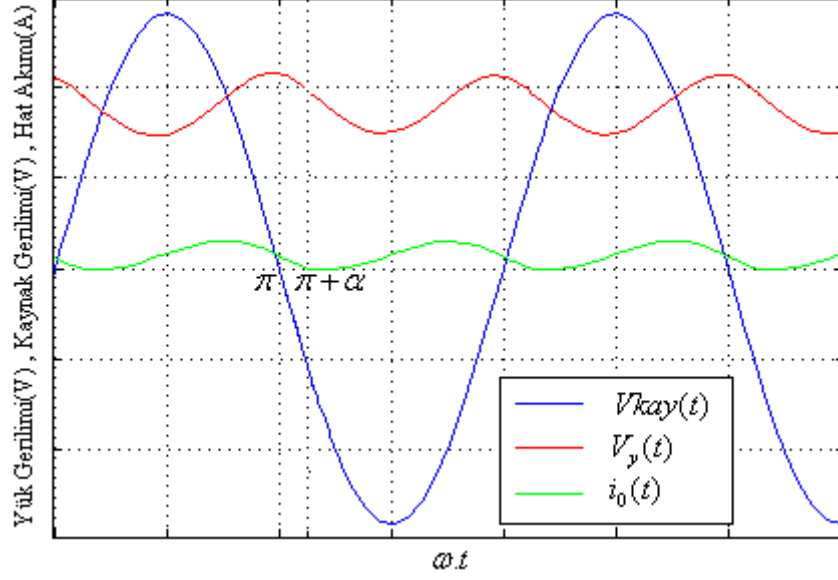
Makalede çıkış akımı i_0 'ın sıfıra gittiği an temel alınarak doğrultucu sistemin üç çalışma modu açıklanmıştır.

- i. Süreksiz Mod 1:** Çıkış akımı i_0 , süreksizse ve sıfıra $\omega t = \pi$ 'den önce gidiyorsa doğrultucu sistem, süreksiz mod 1' de çalışır.



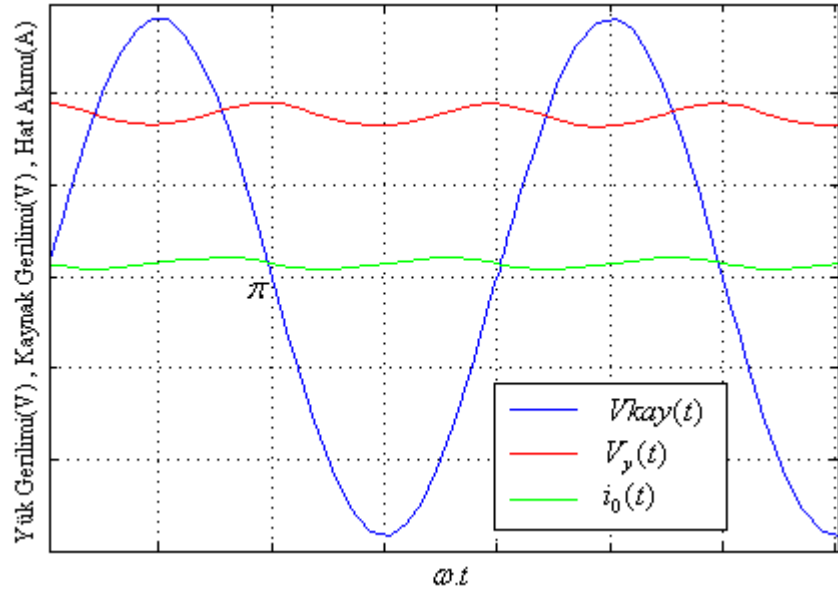
Şekil 3.7 Şekil 3.6' daki devrenin süreksiz mod 1' de çalışması (C_i ihmal)

- ii. **Süreksiz Mod 2:** Çıkış akımı i_0 , süreksizse ve sıfıra $\pi < \omega t < \pi + \alpha$ aralığında gidiyorsa doğrultucu sistem, süreksiz mod 2' de çalışır.



Şekil 3.8 Şekil 3.6' daki devrenin süreksiz mod 2' de çalışması (C_i ihmal)

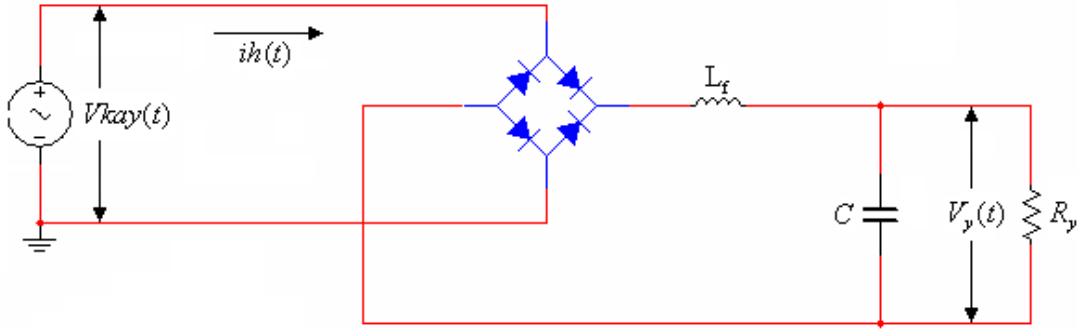
- iii. **Sürekli mod:** Çıkış akımı i_0 , hiç sıfıra inmiyorsa doğrultucu sistem, sürekli modda çalışır.



Şekil 3.9 Şekil 3.6' daki devrenin sürekli modda çalışması (C_i ihmal)

3.8 Minimum Hat Akımı Harmonikleri ve Maksimum Güç Faktörü İçin Doğrultucu Dizaynı

Bu makalede; doğrultucu hat akımı harmoniklerinin güç sisteminin düzgün çalışmasına zarar vererek, doğrultucunun güç faktörünün azalmasına ve kaynaktan iletilen gücün sınırlanmasına sebep olduğu ifade edilerek kaynağın sıfır empedanslı, diyotların ideal, çıkış filtresi kapasitansı C 'nin sonsuza yakın büyüklükte ve dolayısı ile çıkış gerilimi V_0 'ın dalgasız kabul edildiği durumda, doğrultucunun çıkış filtresi endüktansının, hat akımının dalga şeklini, hat akımı harmoniklerini ve güç faktörünü belirlediği ifade edilmiştir. Literatürdeki klasik doğrultucu analizlerinde bu endüktansın sonsuza yakın kabul edildiği, bu yüzden de güç faktörünün ve hat akımı harmoniklerinin hesaplanmasında ciddi hatalar meydana geldiği belirtilmiş, güç faktörünün ve hat akımı harmoniklerinin bilgisayar simülasyonu tabanlı analizi yapılarak güç faktörünün ve hat akımı harmoniklerinin, çıkış filtresi büyüklüğü L_0 'ın bir fonksiyonu olarak dizayn eğrileri sunulmuş, sonuçlar laboratuvar ölçümleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.



Şekil 3.10 Makalede kullanılan eşdeğer devre

Sayısal analizler ve dizaynlar yapılmadan önce seçilen referanslara göre normalizasyon yapılmış, simülasyon ve laboratuvar karşılaştırmaları sonucunda Dewan' ın [9] makalesinde belirtildiği gibi doğrultucu için üç farklı çalışma modu belirlenmiştir. Bu modlar sırasıyla süreksiz iletim modu 1, süreksiz iletim modu 2 ve sürekli iletim modudur. Bu modların oluşma durumları L_0 'ın normalize edilmiş değerlerine göre belirtilmiştir.

Sonuç olarak, tek fazlı doğrultucu için maksimum güç faktörünün süreksiz iletim modu 1' de meydana geldiği, çıkış filtresinin bir değerinin maksimum güç faktörünü, başka bir değerinin ise minimum hat akımı harmoniğini verdiği ortaya konulurken, üç fazlı doğrultucu için maksimum güç faktörünün ve minimum hat akımı harmoniğinin sonsuza yakın çıkış filtresi endüktansında elde edildiği gösterilmiş ve mümkün olan en küçük sonsuza yakın endüktans belirlenmiştir.

3.9 Aşırı ve Kritik Endüktanslı Doğrultucu Filtre Sistemi Güç Faktörünün Zaman Domeninde Analizi

Zaman domeninde basit bir anahtarlama devresi ve doğrultucu filtresi analizi yapılmıştır. L seri endüktansına bağlı olarak filtre devresi akımı ve AC kaynak akımının ifadeleri çıkartılmış, sürekli ve süreksiz akım durumları için kaynak tarafından görülen güç faktörü hesaplanmıştır. I/I_{ort} gibi bir akım form faktörü ortaya sürülmüştür. Böylece akımdaki bozulmaların devre bileşenleri üzerine olan etkilerini belirleyecek bir ölçüm oluşturulmuş, I_{ort} , I, bunların form faktörleri, çıkış gerilimi güç faktörü, L ve L_{kr} 'in bir fonksiyonu olarak grafiklerle verilmiştir.

3.10 Sonuç ve Yorumlar

[9], [10], [11]' de aşağıdaki basitleştirici kabuller yapılmıştır:

- i. Kaynak empedansı ihmal edilmiştir.
- ii. Çıkış filtresi kondansatörünün değeri olan C , çok büyük seçilmiş, böylece çıkış gerilimi V_y , dalgasız sabit DC gerilim olarak kabul edilmiştir.
- iii. AC kaynak ideal kabul edilmiştir.
- iv. L_f ve köprü doğrultucunun kayıpları ihmal edilmiştir.
- v. Yük modeli direnç olarak modellenmiştir.

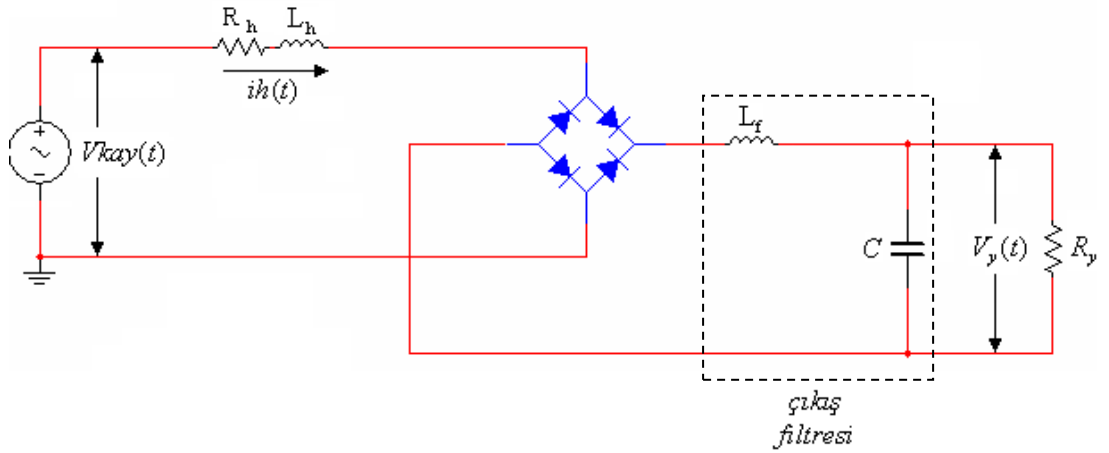
Hat empedansının ihmal edilmesi, akım ve gerilim harmonik numaralarının farklı değerler alabilmesine yol açmaktadır. Buna ek olarak, kondansatör değeri pratikte sınırlı bir değerdedir ve çıkış gerilimi dalgalı bir yapıya sahiptir. Yapılan bu tarz basitleştirmeler sistemi gerçeklikten uzaklaştırmaktadır.

[4], [5], [6], [7], [8]' de görüldüğü gibi düşük güçlü, düşük maliyetli cihazlarda yaygın olarak kullanılan köprü doğrultucu devresinin analitik olarak modellenmesi literatürde geniş yer tutmaktadır. Aynı analizlerin gerçekleşmesi için simülasyon metoduyla binlerce simülasyon yapılması gerekirken, analitik metod sayesinde bu analizler hızlı ve doğru bir şekilde elde edilebilmiştir. Analitik metod sisteme devre parametrelerinin etkilerinin belirlenmesinden devrenin giriş ve çıkış dalga şekillerinin belirlenmesine, mevcut sistemlerin optimizasyonundan geleceğe yönelik planlamalara kadar birçok alanda kullanılabilmektedir. Ayrıca elde edilen analitik arayüz değişik güç sistemi mühendisliği çalışmalarına (rneğin yük akış analizleri) da entegre edilerek metodun kullanım alanı daha da genişletilebilmektedir.

4 TEK FAZLI KÖPRÜ DOĞRULTUCUNUN ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Bu bölümde çıkış filtresi endüktans ve kapasitörden oluşan tek fazlı köprü doğrultucu devresinin hat empedansının da dahil edildiği tam bir analitik modeli diferansiyel denklemler yardımıyla elde edilmiştir. Çıkış filtresinin değerlerinin hat akımı, çıkış gerilimi ve güç faktörü gibi büyüklüklere nasıl etki ettiği kaynağın sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan durumlarına göre incelenmiştir.

4.1 Sinüzoidal Olmayan Gerilim Kaynağı Lineer Olmayan Yük Durumu

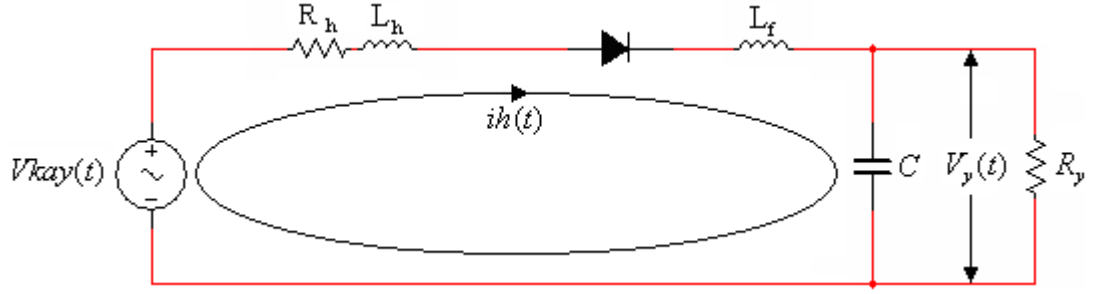


Şekil 4.1 Çıkış filtresi endüktans ve kapasitörden oluşan tek fazlı köprü doğrultucu devresinin hat empedansının da dahil edildiği eşdeğer devresi

Model devre Şekil 4.1’de verilmiştir. Devrenin çalışma periyodunu iki bölüme ayırabiliriz:

- i. İletim (Şarj) Periyodu
- ii. Kesim (Deşarj) Periyodu

4.1.1 İletim (Şarj) Periyodu ($t_1 \leq t \leq t_2$)



Şekil 4.2 İletim (şarj) periyodu için eşdeğer devre

İletim periyodunda $i_h(t)$ akımı diyotlardan akarak kondansatörü şarj eder. Diyotlar akımın akmaya başladığı an olan t_1 ve akımın tekrar sıfıra indiği an olan t_2 zamanları arasında iletimdedirler. Sinüsoidal olmayan gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumu için Kirchhoff' un akım ve gerilim yasaları uyarınca aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$V_{kay}(t) = R_h \cdot i_h(t) + (L_h + L_f) \cdot \frac{di_h}{dt} + V_y(t) \quad (4.1)$$

$$i_h(t) = C \cdot \frac{dV_y}{dt} + \frac{V_y(t)}{R_y} \quad (4.2)$$

$$V_{kay}(t) = \sum_1^n V_{m_n} \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (4.3)$$

(4.1) - (4.3) denklem sistemi çözülerek hat akımı ve yük gerilimi için ifadeler aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$V_y(t) = \sum_1^n c1_n e^{D1 \cdot t} + c2_n \cdot e^{D2 \cdot t} + A_n \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n) + B_n \cdot \cos(\omega_n t + \varphi_n) \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned}
ih(t) = & \sum_1^n [e^{D_1 \cdot t} \cdot (C \cdot D_1 + \frac{1}{R_y}) + e^{D_2 \cdot t} \cdot (C \cdot D_2 + \frac{1}{R_y})] + \\
& \sum_1^n [\sin(w_n \cdot t + \varphi_n) \cdot (-C \cdot B_n \cdot w_n + \frac{1}{R_y} \cdot A_n) + \\
& \cos(w_n \cdot t + \varphi_n) \cdot (C \cdot A_n \cdot w_n + \frac{1}{R_y} \cdot B_n)]
\end{aligned} \tag{4.5}$$

İfadelerdeki D_1 , D_2 değerleri (4.2)-(4.4) diferansiyel denklem sisteminin karakteristik denklemi olan;

$$D^2 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} D + \frac{\alpha_3}{\alpha_1} = 0 \tag{4.6}$$

$$\alpha_1 = \frac{(L_h + L_f) \cdot C \cdot R_y}{R_y} \tag{4.7}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_h \cdot C \cdot R_y + L_h + L_f}{R_y} \tag{4.8}$$

$$\alpha_3 = \frac{R_h + R_f}{R_y} \tag{4.9}$$

$$D_1 = \frac{-\alpha_2 + \sqrt{\alpha_2^2 - 4 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3}}{2 \cdot \alpha_1} \tag{4.10}$$

$$D_2 = \frac{-\alpha_2 - \sqrt{\alpha_2^2 - 4 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3}}{2 \cdot \alpha_1} \tag{4.11}$$

biçiminde elde edilmiştir.

Bilindiği üzere diferansiyel denklemlerin çözümü, geçici hal durumunu veren homojen çözüm ve sürekli hal çözümünü veren zorlanmış çözüm olmak üzere iki bölümden oluşur. Bu iki çözümün toplamı bize tam çözümü verecektir.

Elde edilen ifadelerdeki gerilim kaynağının n. harmoniği için sürekli hal çözümü katsayıları A_n ve B_n aşağıdaki gibidir.

$$A_n = \frac{\begin{vmatrix} \Delta_{1,n} & \Delta_{5,n} \\ \Delta_{2,n} & \Delta_{6,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \Delta_{3,n} & \Delta_{5,n} \\ \Delta_{4,n} & \Delta_{6,n} \end{vmatrix}} \quad (4.12)$$

$$B_n = \frac{\begin{vmatrix} \Delta_{3,n} & \Delta_{1,n} \\ \Delta_{4,n} & \Delta_{2,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \Delta_{3,n} & \Delta_{5,n} \\ \Delta_{4,n} & \Delta_{6,n} \end{vmatrix}} \quad (4.13)$$

$$\Delta_{1,n} = Vm_n \quad (4.14)$$

$$\Delta_{2,n} = -R_y \cdot C \cdot Vm_n \cdot \omega_n \quad (4.15)$$

$$\Delta_{3,n} = -\alpha_1 \cdot \omega_n^2 + \alpha_3 \quad (4.16)$$

$$\Delta_{4,n} = \alpha_2 \cdot \omega_n \quad (4.17)$$

$$\Delta_{5,n} = -\alpha_2 \cdot \omega_n \quad (4.18)$$

$$\Delta_{6,n} = -\alpha_1 \cdot \omega_n^2 + \alpha_3 \quad (4.19)$$

Gerilim kaynağının n. harmoniğinden dolayı meydana gelen $c1_n$, $c2_n$ geçici hal katsayıları ise aşağıdaki şekilde olur.

$$c1_n = \frac{\begin{vmatrix} \delta_{1,n} & \delta_{5,n} \\ \delta_{2,n} & \delta_{6,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \delta_{3,n} & \delta_{5,n} \\ \delta_{4,n} & \delta_{6,n} \end{vmatrix}} \quad (4.20)$$

$$c2_n = \frac{\begin{vmatrix} \delta_{3,n} & \delta_{1,n} \\ \delta_{4,n} & \delta_{2,n} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \delta_{3,n} & \delta_{5,n} \\ \delta_{4,n} & \delta_{6,n} \end{vmatrix}} \quad (4.21)$$

$$\delta_{1,n} = \sin(w_n \cdot t_1 + \varphi_n) \cdot (Vm_n - A_n) - \cos(w \cdot t_1 + \varphi_n) \cdot B_n \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \delta_{2,n} = & -\sin(w_n \cdot t_1 + \varphi_n) \cdot \left(-C \cdot B_n \cdot w_n + \frac{1}{R_y} \cdot A_n\right) - \\ & \cos(w_n \cdot t_1 + \varphi_n) \cdot \left(C \cdot A_n \cdot w_n + \frac{1}{R_y} \cdot B_n\right) \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\delta_{3,n} = e^{D_1 \cdot t_1} \quad (4.24)$$

$$\delta_{4,n} = e^{D_1 \cdot t_1} \cdot \left(C \cdot D_1 + \frac{1}{R_y}\right) \quad (4.25)$$

$$\delta_{5,n} = e^{D_2 \cdot t_1} \quad (4.26)$$

$$\delta_{6,n} = e^{D_2 \cdot t_1} \cdot \left(C \cdot D_2 + \frac{1}{R_y}\right) \quad (4.27)$$

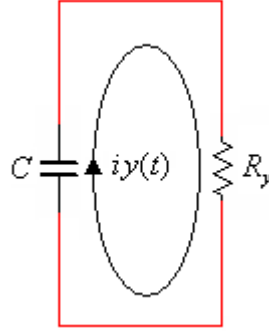
$c1_n$, $c2_n$ geçici hal katsayıları kaynağının n numaralı harmoniği için diyotların ilettime girdiği andaki hat akımı ve yük gerilimi denklemleri olan;

$$ih(t_1) = 0 \quad (4.28)$$

$$V_y(t_1) = Vm_n \cdot \sin(w_n \cdot t_1 + \varphi_n) \quad (4.29)$$

çözülerek elde edilmiştir. İkinci alternans için t_1 yerine $t_1 + T_f / 2$ yazılarak katsayılar elde edilebilir.

4.1.2 Kesim (Deşarj) Periyodu ($0 \leq t \leq t_1$, $t_2 \leq t \leq T_f / 2$)



Şekil 4.3 Kesim (deşarj) periyodu için eşdeğer devre

Bu periyotta devre kesimdedir ve iletim periyoduna şarj olan kondansatör direnç üzerinden boşalır. Bu durum için hat akımı ve yük gerilimine ait ifadeler;

$$ih(t) = 0 \quad 0 \leq t \leq t_1, t_2 \leq t \leq T_f / 2 \quad (4.30)$$

$$V_y(t) = V_y(t_2) \cdot e^{\frac{-(t+T_f/2-t_2)}{R_y \cdot C}} \quad 0 \leq t \leq t_1, \quad (4.31)$$

$$V_y(t) = V_y(t_2) \cdot e^{\frac{-(t-t_2)}{R_y \cdot C}} \quad t_2 \leq t \leq T_f / 2 \quad (4.32)$$

şeklindedir.

Tablo 4.1 Bir periyot boyunca diyotların durumu ve o aralık için yük gerilimi denklemlerinin çözüm yöntemi

Zaman Aralığı	Diyotların Durumu	Yük gerilimi denklemlerinin Çözümü
$0 \leq t \leq t_1$	Kesimde	Kondansatördeşarj denklemi
$t_1 \leq t \leq t_2$	İletimde	Diferansiyel durum denklemleri
$t_2 \leq t \leq t_1 + T_f / 2$	Kesimde	Kondansatördeşarj denklemi
$t_1 + T_f / 2 \leq t \leq t_2 + T_f / 2$	İletimde	Diferansiyel durum denklemleri
$t_1 + T_f / 2 \leq t \leq t_2 + T_f / 2$	Kesimde	Kondansatördeşarj denklemi

Tablo 4.2 Bir periyot boyunca diyotların durumu ve o aralık için hat akımı denklemlerinin çözüm yöntemi

Zaman Aralığı	Diyotların Durumu	Hat akımı denklemlerinin Çözümü
$0 \leq t \leq t_1$	Kesimde	0
$t_1 \leq t \leq t_2$	İletimde	Diferansiyel Durum Denklemleri
$t_2 \leq t \leq t_1 + T_f / 2$	Kesimde	0
$t_1 + T_f / 2 \leq t \leq t_2 + T_f / 2$	İletimde	Diferansiyel Durum Denklemleri
$t_1 + T_f / 2 \leq t \leq t_2 + T_f / 2$	Kesimde	0

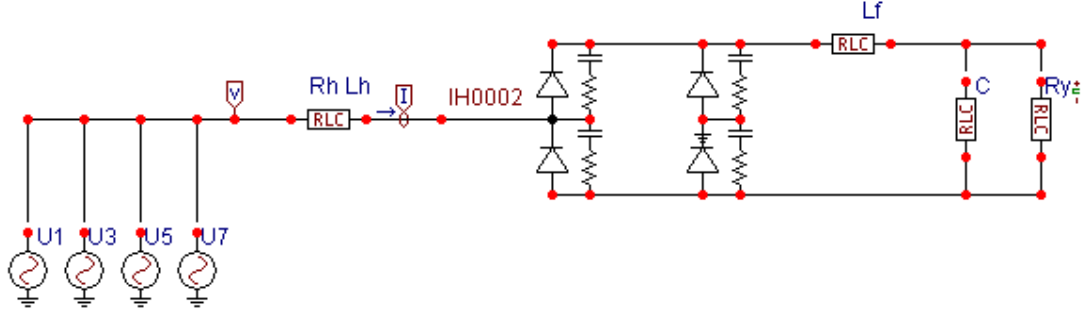
t_1 ve t_2 zamanları diyotlar kontrolsüz eleman oldukları için bilinmemektedir. t_1 ve t_2 zamanlarını bulmak için aşağıdaki iki sınır denklemi iteratif olarak çözülerek bulunabilir. Aşağıdaki denklemler, MATHCAD [25] paket programında geliştirilen algoritma yardımıyla çözülmüştür.

$$ih(t_2) = 0 \quad (4.33)$$

$$V_y(t_2) \cdot e^{\frac{-(t_1 + T_f / 2 - t_2)}{R_y \cdot C}} = Vm_n \cdot \sin(w_n \cdot t_1 + \varphi_n) \quad (4.34)$$

Sinüsoidal olmayan gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumunda verilen ifadelerde $n=1$ alınırsa sinüsoidal gerilim kaynağı lineer olmayan yük durumu için akım ve gerilim ifadeleri elde edilir.

EMTP kullanılarak elde edilmiş gerilim ve akım değerleri, analitik metot ile elde edilen gerilim ve akım değerlerinin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için, Şekil 4.1'deki devrenin EMTP [26] de oluşturulmuş modeli de verilmiştir.



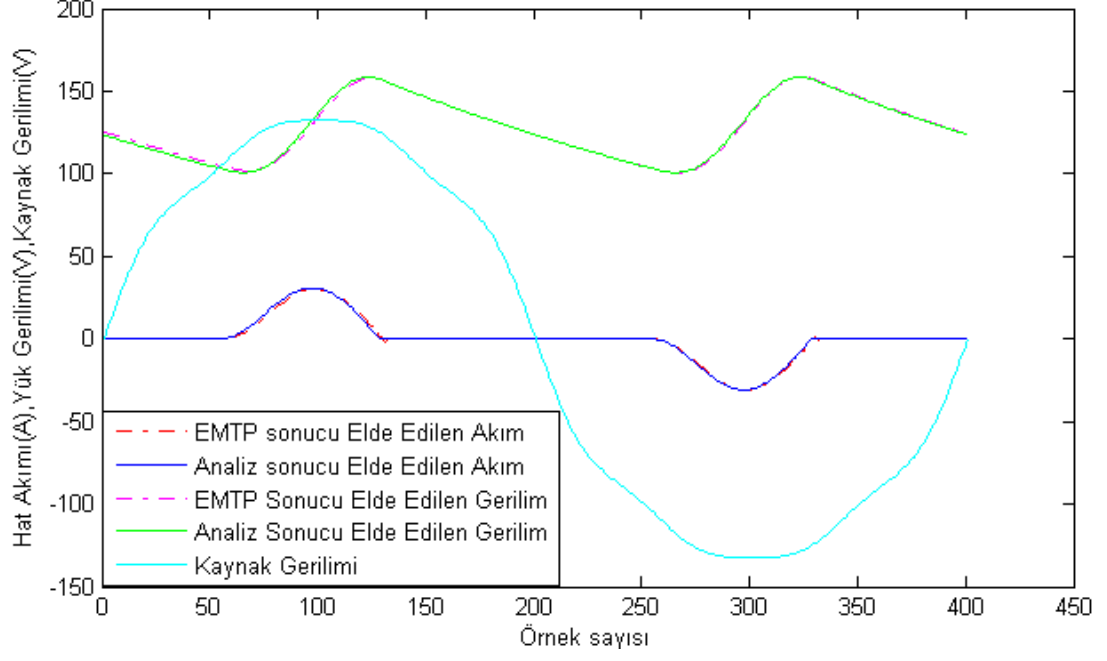
Şekil 4.4 Şekil 4.1' deki devrenin EMTP' de oluşturulmuş modeli

Şekil 4.4' de sinüsoidal olmayan gerilim modellenirken 1., 3., 5. ve 7. harmoniklerin frekanslarına sahip sinüsoidal gerilim kaynakları paralel olarak bağlanmıştır. Gerilim kaynağının sinüsoidal olmayan şartlar için harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulması 'de verilmiştir. Hat empedansının omik direnci R_h $0,01\Omega$, endüktansı L_h ise 0.5mH ' dir. Filtre endüktansı L_f 0.5 mH , kapasitansı C ise $750\mu F$ ' dır. Yük direnci R_y 20Ω olarak seçilmiştir.

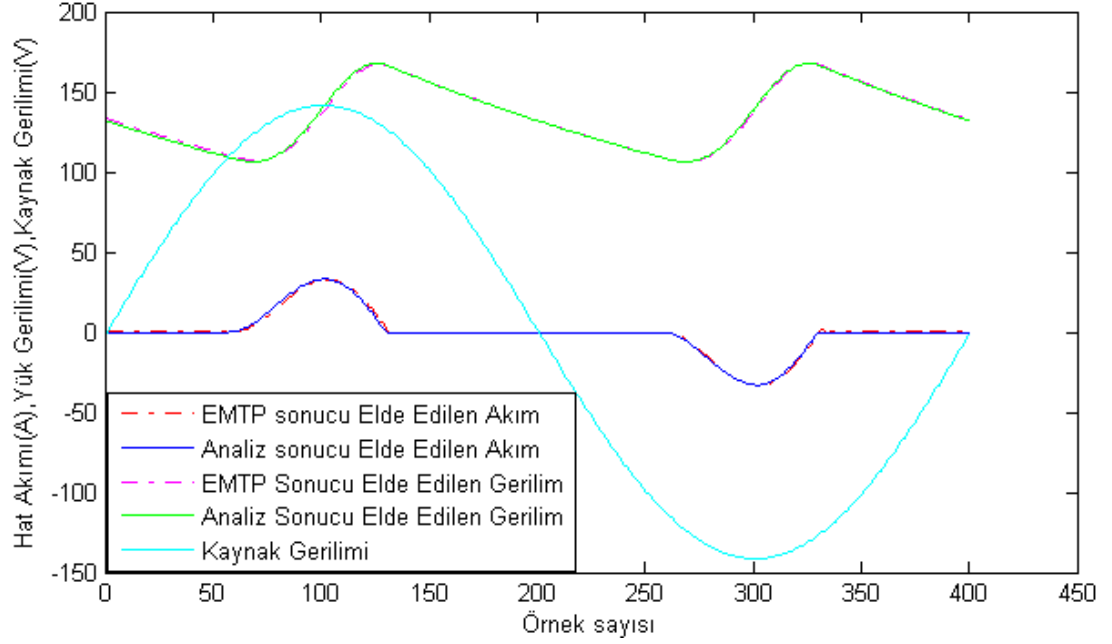
Tablo 4.3 Gerilim kaynağının sinüsoidal olmayan şartlar için harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulması

Harmonik Numarası	Etkin Değeri (Volt)	Açısı (Derece)
1	99.548	0
3	7.753	0
5	4.656	0
7	2.895	0
% THD	9.53882	

Şekil 4.5'de sinüsoidal olmayan gerilim kaynağı-lineer olmayan yük, Şekil 4.6'de ise sinüsoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumu için analitik ifadelerden elde edilen değerler ve EMTP' deki modelden elde edilen değerler MATLAB [27] paket programı yardımıyla üst üste çizdirilmiştir.



Şekil 4.5 Sinüsoidal olmayan gerilim kaynağı-lineer olmayan yük için EMTP sonuçları ile analitik hesaplama sonucunun karşılaştırılması



Şekil 4.6 Sinüsoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük için EMTP sonuçları ile analitik hesaplama sonucunun karşılaştırılması

4.2 Filtre Endüktansının ve Kapasitesinin Harmonik Büyüklüklere Etkisi

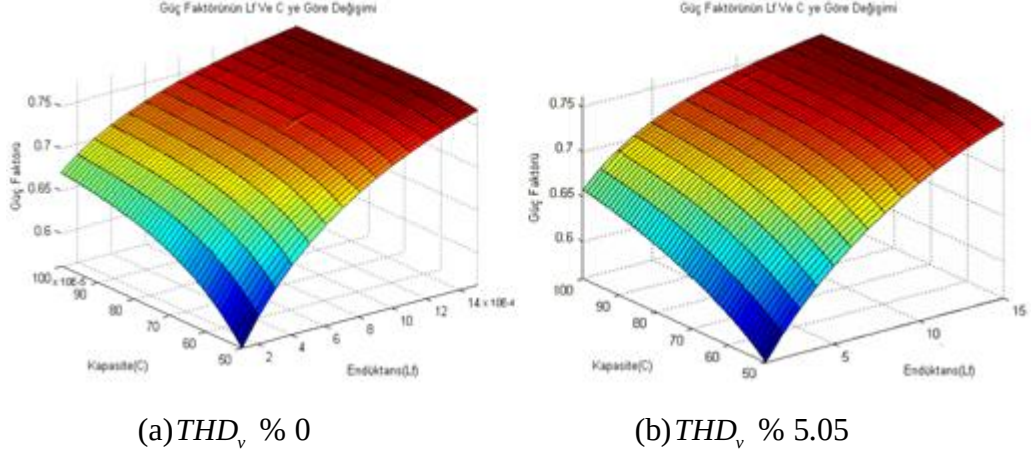
Filtre endüktansının değişiminin çeşitli harmonik büyüklüklere etkisinin incelendiği bu bölümde Hat empedansının omik direnci R_h $0,01\Omega$, endüktansı L_h ise $0.5mH$ ’ dir. Yük direnci R_y 20Ω olarak seçilmiştir. Gerilim kaynağının sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan şartlar için harmonik bileşenleri, toplam harmonik bozulması aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan kaynak değerleri

Kaynağın Durumu	Harmonik Numarası	Etkin değer(V)	% THD	Toplam Etkin Değer (V)
Sinüsoidal Kaynak	1	100	%0	$\sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2} = 100$
	3	0		
	5	0		
	7	0		
Sinüsoidal Olmayan Kaynak	1	99.872	%5.05	$\sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2} = 100$
	3	3.574		
	5	2.968		
	7	1.988		
Sinüsoidal Olmayan Kaynak	1	99.548	%9.53	$\sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2} = 100$
	3	7.753		
	5	4.656		
	7	2.895		

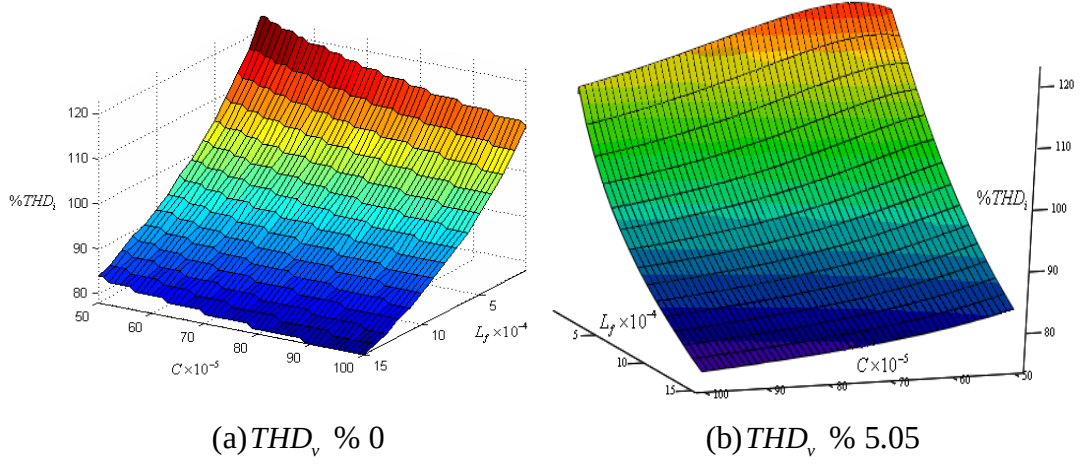
Tablo 4.4’ de görüldüğü gibi toplam etkin değer sabit tutularak harmonik bileşenler değiştirilmiş böylece aynı toplam etkin değer için harmonik bileşenlerin etkisi gözlemlenmiştir. Bu incelemede elde edilen yük akımı, yük gerilimi ve kaynak gerilimi Fourier serilerine açılarak tezin ikinci bölümünde bahsi geçen güç faktörü, THD, Krest faktörü, Form faktörü gibi büyüklükler hesaplanmış, bu büyüklüklerin çıkış filtresi endüktansı L_f ve kapasitesi C ’ye göre değişimi grafiklerle incelenmiştir.

Güç faktörünün çıkış filtresi endüktansı L_f ve kapasitesi C ' e göre değişimi gerilim kaynağının sırasıyla sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan durumlara göre Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



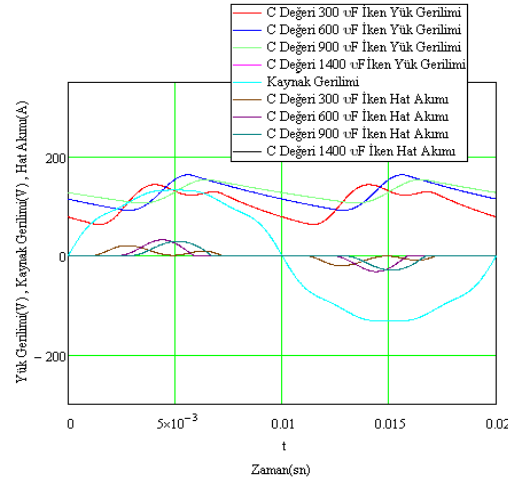
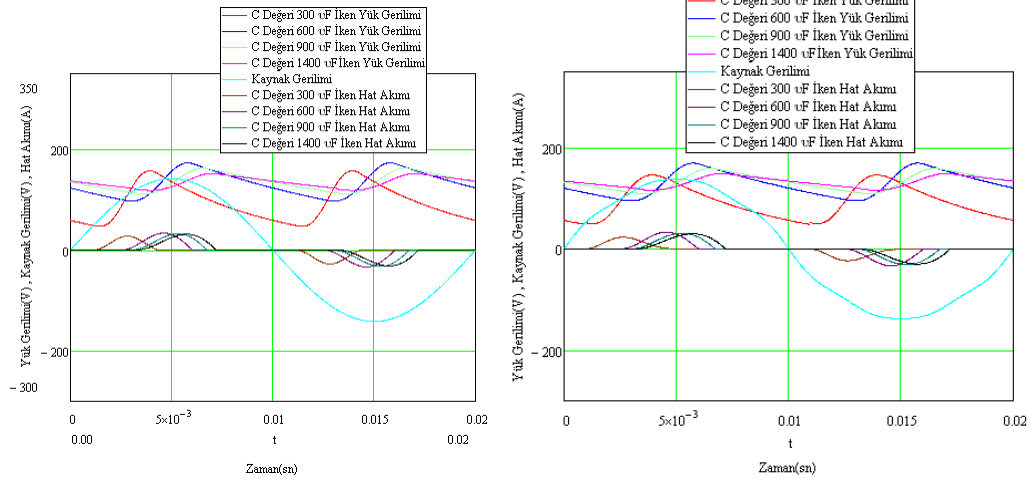
Şekil 4.7 THD_v % 0 ve THD_v % 5.05 için güç faktörünün L_f ve C ' ye göre değişimi

Şekil 4.7' de filtre endüktansı L_f 0.1 mH den 1.5 mH ye kadar 0.1 mH'lik adımlarla arttırılırken filtre kapasitesi C ise $500 \mu F$ 'tan $1400 \mu F$ 'a kadar $10 \mu F$ 'lık adımlarla arttırılmıştır. Çalıştığımız aralıktaki çıkış filtresi endüktansı L_f ve kapasitesi C arttıkça güç faktörü artmaktadır. L_f ve C beraber kullanıldığında yüksek frekanslı harmonikler filtre edildiğinden sistemin verimi dolayısıyla güç faktörü artmıştır. Sinüsoidal olmayan durumda gerilim harmoniklerinden dolayı akımın etkin değeri düştüğünden aynı L_f ve C değeri için daha düşük bir güç faktörü elde edilmiştir.



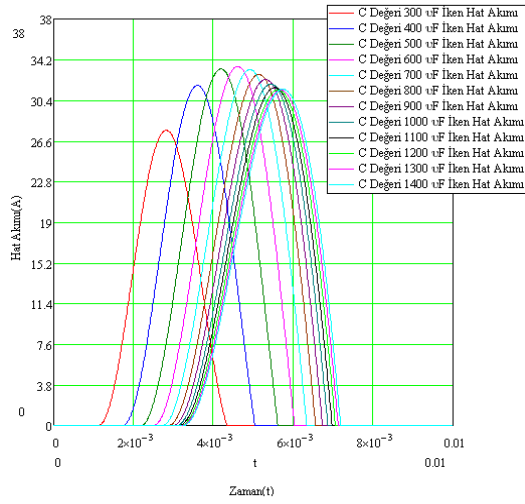
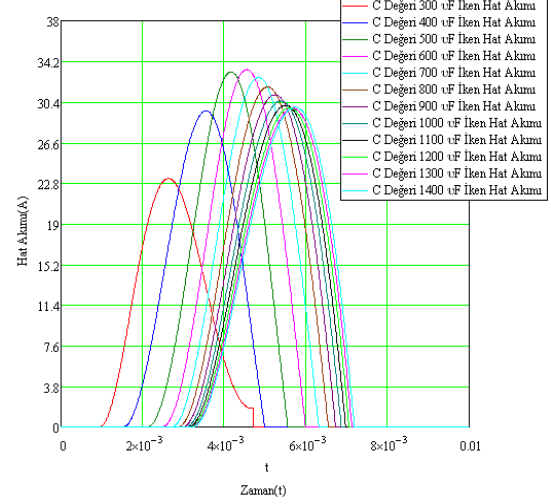
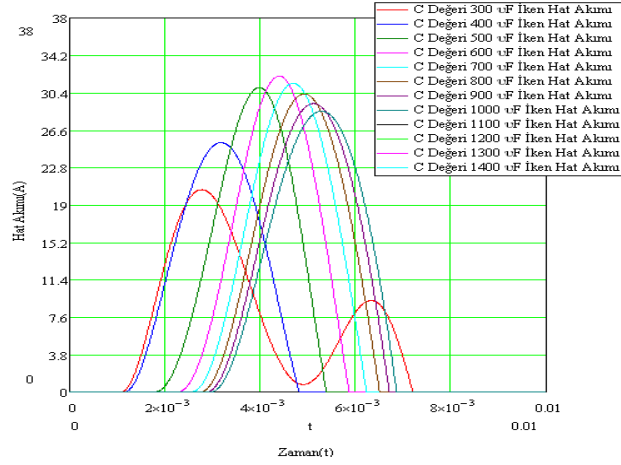
Şekil 4.8 THD_v % 0 ve THD_v % 5.05 için hat akımının toplam harmonik distorsiyonunun (THD_i) L_f ve C 'ye göre değişimi

Şekil 4.8'de filtre endüktansı L_f 0.1 mH' den 1.5 mH ye kadar 0.1 mH' lik adımlarla arttırılırken filtre kapasitansı C ise 500 μF ' tan 1400 μF ' a kadar 10 μF 'lık adımlarla arttırılmıştır. THD_i ' nin çıkış filtresi endüktansı L_f ve kapasitesi C 'ye göre değişimi gerilim kaynağının sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan durumlarına göre sırasıyla Şekil 4.8 (a) ve Şekil 4.8 (b)'de verilmiştir. Gerek sinüsoidal gerekse sinüsoidal olmayan durumda C ve L_f arttıkça THD_i değerlerinde iyileşme gözlemlenmektedir. THD_i düşük C ve L_f değerlerinde % 120' lere ulaşırken yüksek C ve L_f değerlerinde THD_i % 80' ler mertebesinde.



Şekil 4.9 (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için yük gerilimi ve hat akımının C ' ye göre değişimi

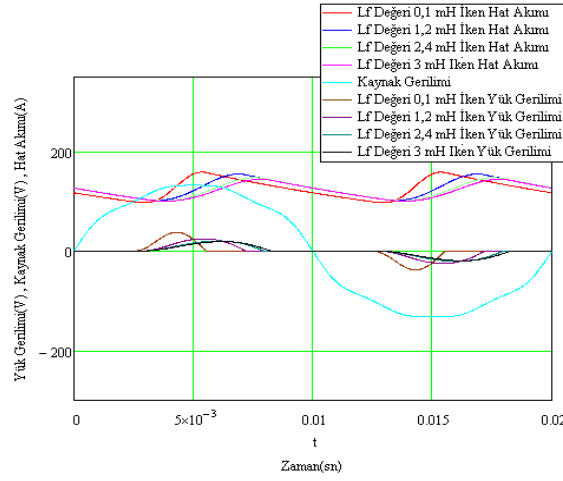
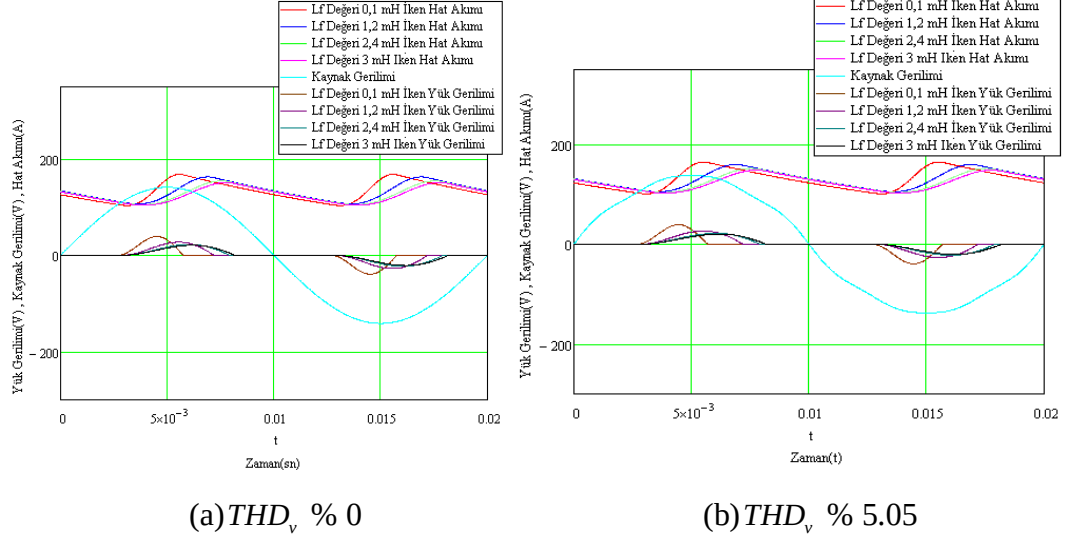
Şekil 4.9'da diyotlar kesimdeyken kondansatör yük direnci üzerinden deşarj olmaktadır. Bu deşarjın süresi zaman sabiti olan τ ' ya bağlıdır. Kaynak periyodu olan (T), zaman sabiti olan τ ' dan küçük olduğu durumlarda kondansatörün gerilimi $V_y(t)$ doğruya yaklaşır. Çünkü zaman, τ ' ya göre çok az olduğundan gerilimi sabitleşir. T arttıkça kondansatörün şarj olma süresi uzar. Bu da diyotların daha uzun iletimde kalmasını sağlar. Denklem 4.31'deki kesim aralığı denkleminde anlaşılacağı üzere C değeri arttıkça üstel kısmın değeri artacağından yük geriliminin değeri artar. Bu durum Şekil 4.9'da açıkça görülmektedir.

(a) THD_v % 0(b) THD_v % 5.05(c) THD_v % 9.53

Şekil 4.10 (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için hat akımının C 'ye göre değişimi

Şekil 4.10' da L_f değeri 0,5 mH sabit tutularak kondansatör değeri 300 μ F' tan 1400 μ F' a kadar arttırılmıştır. THD_v ' nin farklı değerleri için hat akımının ve yük geriliminin kondansatör değeri ile değişimi ayrı ayrı gösterilmiştir. 300 μ F tan 600 μ F' a kadar kondansatörün değeri arttırıldığında diyotun iletme girme zamanı kondansatörün düşük değerleri için (300 μ F - 600 μ F) dalgalılığın büyük olması sebebiyle diyotların iletim zamanı büyük aralıklarla ilerler. Bu da akımın etkin değerinin artmasına sebep olur. 600 μ F' tan sonra dalgalılık azaldığından dolayı diyotun iletim zamanındaki artma azalırken zaman sabiti olan τ arttığından

kondansatörün şarj olma süresi uzar, bu da akım dalga şeklini basıklaştırarak akımın etkin değerinin düşmesine sebep olur. Yapılan analizler kondansatör değeri arttıkça akımın ortalama değerinin arttığını göstermiştir. Şekil 4.10 (c)'de kondansatörün 300 μ F değeri için gözlemlenen akım dalga şeklinin üzerinde ayrıca durmakta fayda vardır. Burada THD_v %9,53 için düşük kondansatör değerinde iki ayrı akım darbesi gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ilk kesimden sonra kapasitör geriliminin kaynak geriliminden daha hızlı düşmesidir [7]. Bu yükseklikteki dalgalılık pratikte uygulama alanına sahip değildir.

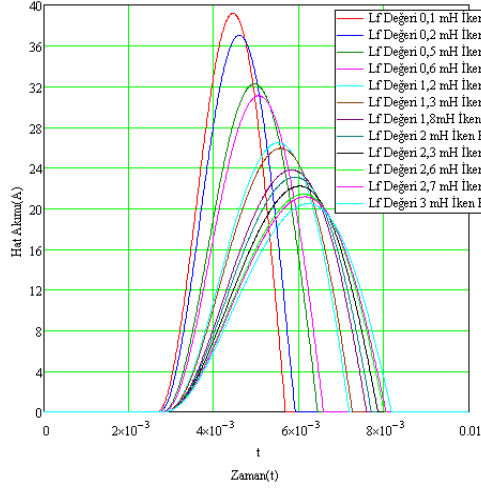
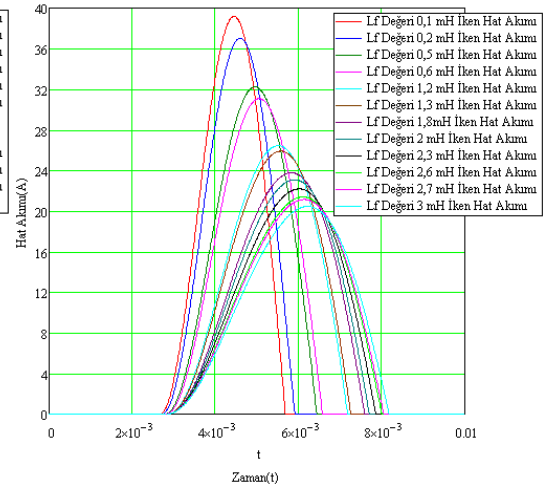
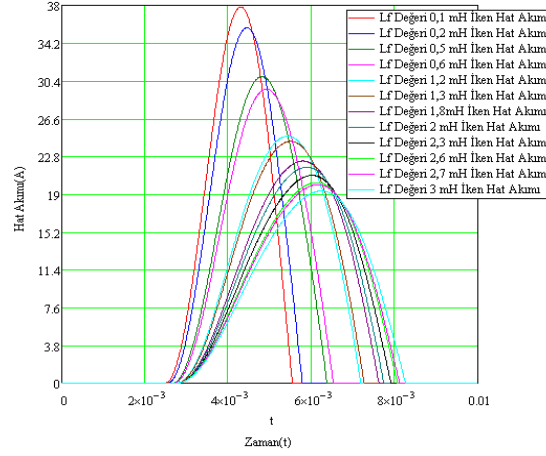


Şekil 4.11 (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için yük gerilimi ve hat akımının L_f 'e göre değişimi

Şekil 4.11'de diyotlar $t=t1$ anında $V_{kay}(t)$ gerilimi $V_y(t)$ gerilimini geçtiğinde iletme girer. Hat akımı $i_h(t)$ tepe değerine t_{tepe} anında ulaşır. Bu anda $V_{kay}(t)$ gerilimi $V_y(t)$ gerilimine eşittir. Hat akımı $t = t2$ anında sıfıra düşer.

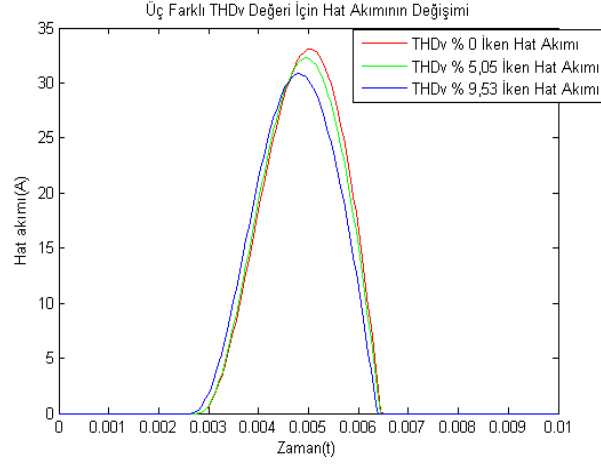
Endüktansın gerilimi $t = t1$ anında sıfırdır. $t = t1$ anından itibaren hat akımının akmasıyla beraber endüktans üzerinde enerji depolanmaya başlar. $t = t_{tepe}$ anına kadar endüktans enerji depolar. Bu andan itibaren gerilim negatif alternansa geçer ve

$t = t_2$ anına kadar endüktans üzerinde depolanan enerji sıfırlanır. $t = t_{tepe}$ anından sonra kaynak gerilimi negatif alternansa geçmesine rağmen endüktans üzerinde depolanan enerji sebebiyle akım hala pozitifdir ve $t = t_2$ anında endüktans üzerinde depolanan enerji sıfır olana değin akmaya devam eder. Diyotlar kesimde iken kondansatör direnç üzerinden deşarj olduğundan deşarj aralığında endüktansın gerilim dalga şekline ciddi bir etkisi yoktur.

(a) THD_v % 0(b) THD_v % 5.05(c) THD_v % 9.53

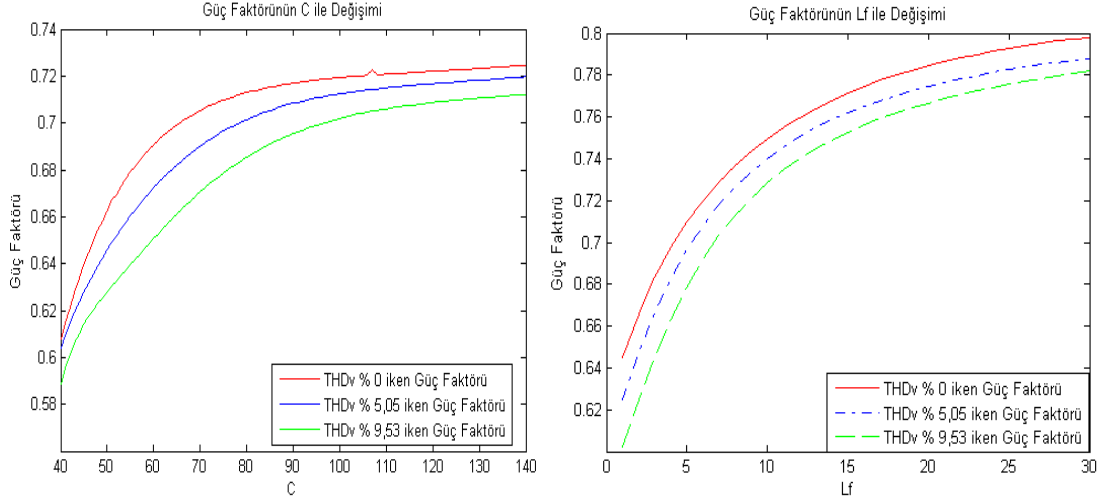
Şekil 4.12 (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için hat akımının L_f 'e göre değişimi

Şekil 4.12'de görüldüğü üzere filtre endüktansının değeri arttıkça diyotların kesime girme anı olan t_2 değeri artar. Böylece hat akımın dalga şekli genişleyip basıklaşarak etkin değeri düşerken şarj periyodu uzar. THD_v değeri arttıkça akımın etkin değerinin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.13 L_f değeri sabit 0.5 mH ve C değeri sabit $750 \mu F$ iken (THD_v % 0), (THD_v % 5.05) ve (THD_v % 9.53) için hat akımının değişimi

Şekil 4.13’de L_f değeri sabit 0.5 mH ve C değeri sabit $750 \mu F$ gerilim harmoniklerinin hat akımı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere gerilim harmoniklerinin diyotların iletim ve kesim zamanları üzerinde bir etkisi yoktur. Bununla birlikte gerilim aynı faz açısı için gerilim harmonikleri akımın etkin değerini düşürmektedir. Bunun sebebi harmonikli durumlar için L_f ’nin endüktans değerinin dolayısıyla üzerindeki gerilim düşümünün artmasıdır.

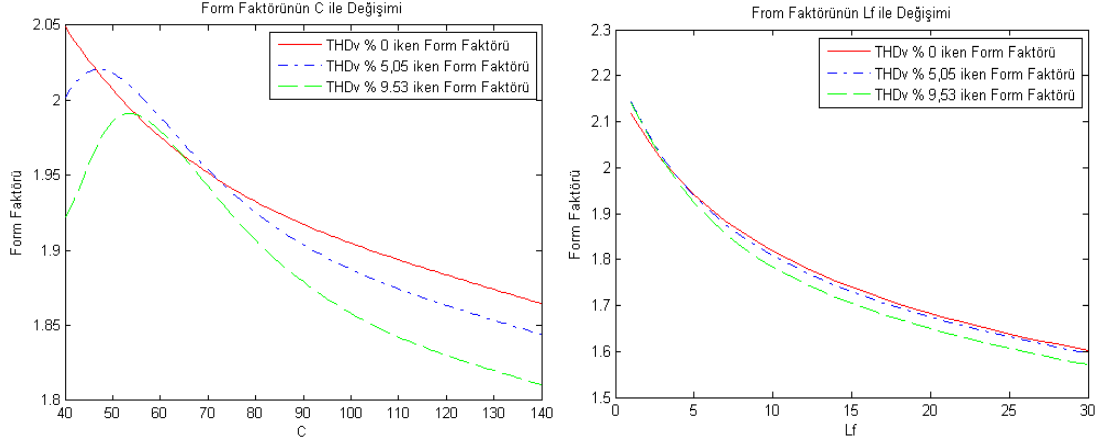


(a) C ile değişim (L_f 0.5 mH sabit) (b) L_f ile değişim (C 750 μF sabit)

Şekil 4.14 Hat akımının güç faktörünün sırası ile C ve L_f ' e bağlı olarak değişimi

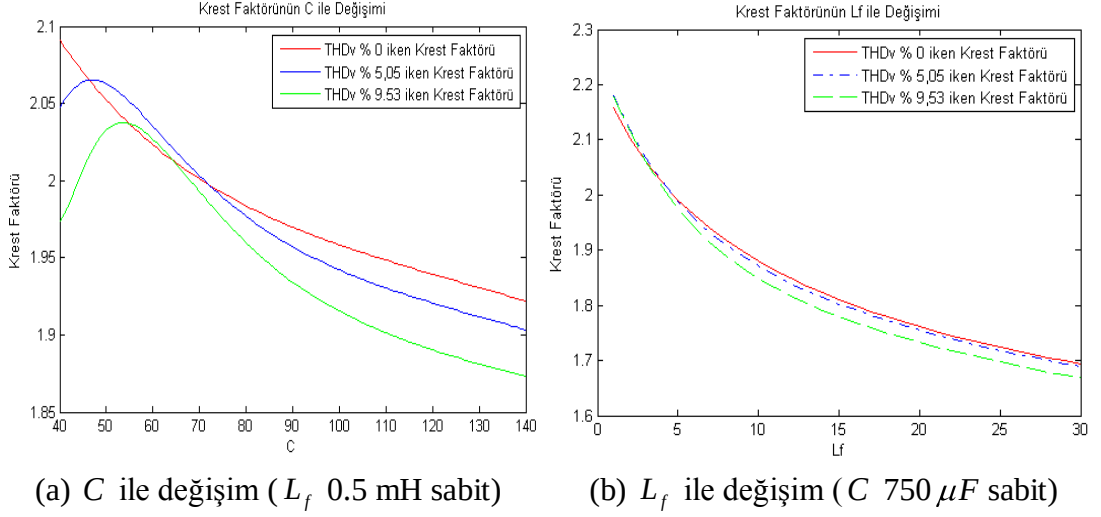
Şekil 4.14 (a)' da L_f değeri 0,5 mH sabit tutularak kondansatör değeri 400 μF ' tan 1400 μF ' a kadar 10 μF ' lık adımlarla arttırılmıştır. $C=400\mu F$ değerinden itibaren THD_v değeri arttıkça aynı kondansatör değeri için güç faktörünün düştüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 4.14 (b)' de C değeri 750 μF sabit tutularak endüktans değeri 0,5mH' den 3mH' e kadar arttırılmıştır. L_f değeri arttıkça yüksek frekanstaki harmonikler süzülerek sistemin verimi yani güç faktörü artmıştır. THD_v değeri arttıkça aynı endüktans değeri için güç faktörünün düştüğü gözlemlenmiştir.

(a) C ile değişim (L_f 0.5 mH sabit)(b) L_f ile değişim (C 750 μF sabit)Şekil 4.15 Hat akımının form faktörünün sırası ile C ve L_f ' e bağlı olarak değişimi

Şekil 4.15 (a)' da L_f değeri 0,5 mH sabit tutularak kondansatör değeri 400 μF ' tan 1400 μF ' a kadar arttırılmıştır. Herhangi bir dalga için bozulmanın ölçütü olan form faktörü kondansatör değeri arttıkça düşmüştür. Yani akım dalga şekli sinüsoidale daha çok yaklaşmıştır. Harmonikli durumda kondansatörün arttırılması form faktörünün düzelmesinde harmoniksiz duruma göre daha çok etkili olmuştur.

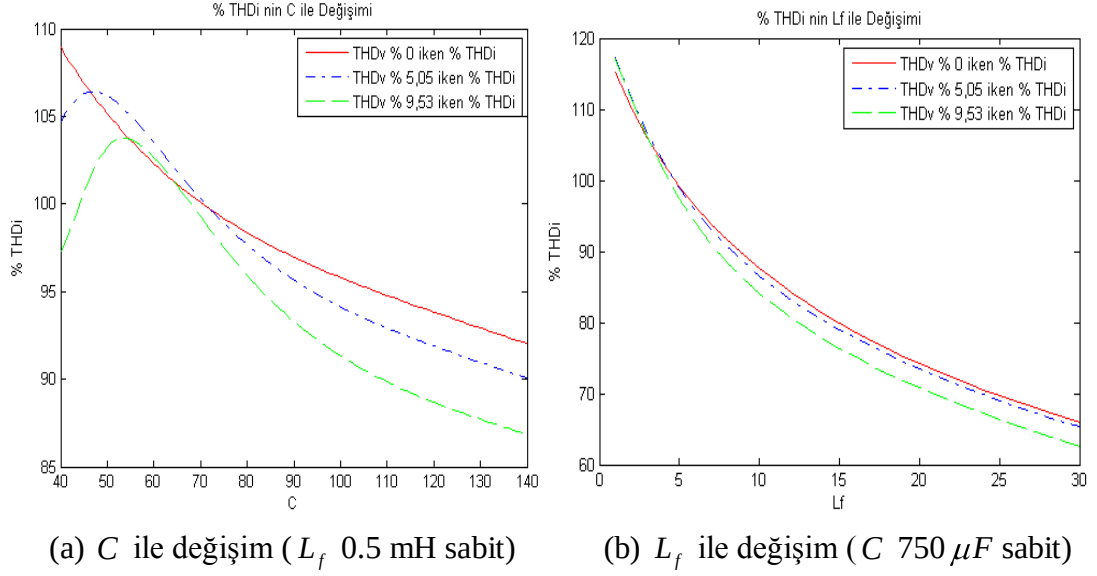
Şekil 4.15 (b)'de C değeri 750 μF sabit tutularak endüktans değeri 0,5 mH' den 3 mH' ye kadar arttırılmıştır. Endüktans değeri arttıkça form faktörü iyileşmiştir. Gerilim harmoniklerinin form faktörüne ciddi bir etkisi olmamakla birlikte düşünülenin aksine gerilim harmonikleri arttığında form faktöründe iyileşme gözlenmektedir.



Şekil 4.16 Hat akımının krest faktörünün sırası ile C ve L_f ' e bağlı olarak değişimi

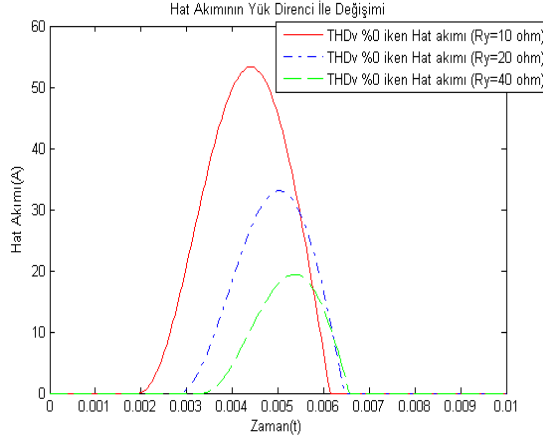
Şekil 4.16 (a)' da L_f değeri 0,5 mH sabit tutularak kondansatör değeri $400 \mu F$ ' tan $1400 \mu F$ ' a kadar arttırılmıştır. Krest faktörü sinüsoidal bir dalga için 1.414 değerindedir. Kondansatörün artan değerleri için krest faktörü iyileşmiştir. Düşük kondansatör değerleri için farklı THD_v değerlerinde krest faktörünün birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 4.16 (b)' de C değeri $750 \mu F$ sabit tutularak endüktans değeri 0,5 mH' den 3 mH' ye kadar arttırılmıştır. Endüktans değeri arttıkça krest faktörü iyileşmiştir. Gerilim harmoniklerinin krest faktörüne ciddi bir etkisi görülmemektedir.

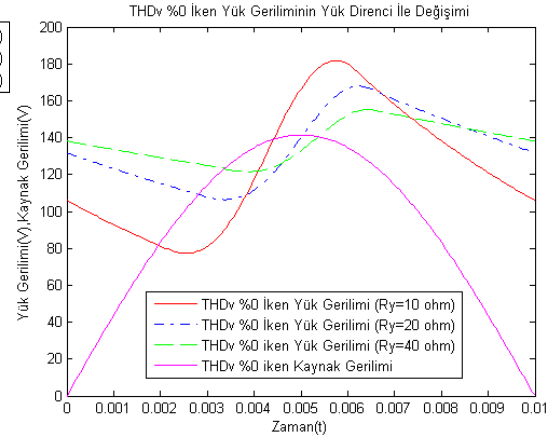


Şekil 4.17 Hat akımının $\% THD_i$ 'sinin sırası ile C ve L_f ' e bağlı olarak değişimi

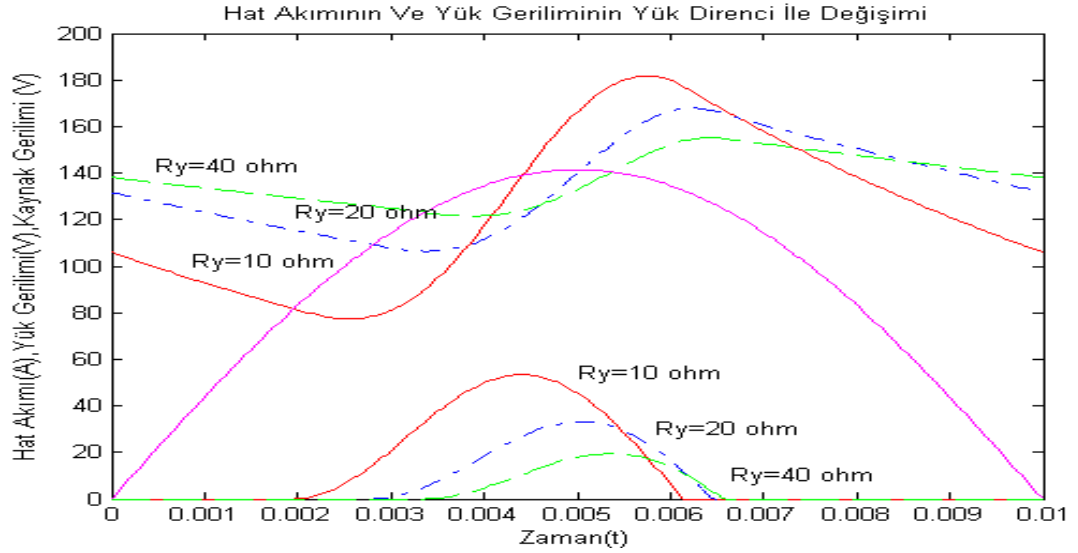
Şekil 4.17' deki sonuçlar ilgi çekicidir. Şekil 4.17 (a)' da L_f değeri 0,5 mH sabit tutularak kondansatör değeri $400\mu F$ ' tan $1400\mu F$ ' a kadar, Şekil 4.17 (b)' de ise C değeri $750\mu F$ sabit tutularak endüktans değeri 0,5 mH' den 3 mH' ye kadar arttırılmıştır. Genel olarak çıkış filtresi değerleri arttığında THD_i 'de iyileşme gözlemlenmiştir. Burada ilgi çekici olan beklenilenin aksine gerilim harmoniklerinde artış olmasına rağmen THD_i 'de düzelme gözlemlenmesidir.



(a) Hat akımının değişimi



(b) Yük geriliminin değişimi



(c) Hat akımı ve yük geriliminin değişimi

Şekil 4. 18 Yük direncine göre değişim

Şekil 4. 18' de yük direncinin arttıkça akım dalga şekli basıklaşıp genişleyerek değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Artan R_y değeri için daha önce bahsedildiği üzere kesim aralığında τ değerini arttırdığından bu aralıkta gerilimin arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde iletme girme açısından da ilerleme gözlemlenmiştir. Artan yük direnci değeri şarj periyodunu uzatmıştır.

4.3 Sonuç

Bu bölümde sırasıyla, çıkış filtresi büyüklükleri C ve L_f aynı anda değiştiğinde elde edilen güç faktörü ve THD_i ' e ait üç boyutlu grafikler, hat akımının, yük geriliminin, güç faktörünün, form faktörünün, krest faktörünün, THD_i ' nin, farklı THD_v değerleri için sırasıyla C ve L_f ' e göre değişimleri ve son olarak da hat akımının ve yük geriliminin yük direncine bağlı değişimleri grafikler ile verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında;

- i. Elde edilen analitik çözüm ile EMTP programına elde edilen sonuçların birebir örtüştüğü,
- ii. Çalışılan aralıkta C ve L_f değeri arttıkça güç faktörünün arttığı,
- iii. Aynı C ve L_f değeri için THD_v arttıkça hat akımının etkin değerinin azaldığı,
- iv. Farklı THD_v değerleri için THD_v arttıkça güç faktörünün azaldığı, ancak THD_i ' nin beklenenin aksine iyileştiği,
- v. Kapasitenin çok küçük değerleri için hat akımının aynı alternansta ayrı akım darbeleri şeklinde oluşabildiği,
- vi. Hat akımının etkin değerinin belli bir kondansatör değerine kadar arttıktan sonra daha büyük kondansatör değerleri için azaldığı, bununla birlikte hat akımının ortalama değerinin kondansatör değeri arttıkça sürekli arttığı,
- vii. Endüktans değeri arttıkça hat akımının etkin değerinin azalarak dalga şeklinin basıklaşıp genişlediği,
- viii. Form faktörü, krest faktörü ve THD_i ' nin, THD_v ' nin sıfır olduğu durumda kondansatör değeri arttırıldığında iyileştiği, ancak THD_v ' nin sıfır olmadığı durumlarda belirli kondansatör değerlerine kadar kötüleşip yüksek kondansatör değerleri için tekrar iyileştiği,
- ix. Yüksek C ve L_f değerleri için harmonikli durumlarda, harmoniksiz duruma göre daha iyi form faktörü, krest faktörü ve THD_i değerlerinin elde edildiği,
- x. Yük direnci arttıkça hat akımının değeri düşerken yük geriliminin dalga şeklinin doğruya yaklaştığı gözlemlenmiştir.

5 SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR

Genelde güç kalitesinin, özelde ise harmoniklerin bir güç sistemi için ne kadar önemli bir konu olduğu farklı kaynaklardaki bilgiler yorumlanarak izah edilmiştir.

Harmoniklerin incelenmesinde kullanılan yöntemler, harmoniklere ait tanım ve büyüklükler, standartlar, harmonik kaynakları ve bu kaynakların diğer sistem bileşenleri üzerindeki etkileri özetlenmiştir.

Geniş alana yayılmış tek fazlı güç elektroniği yüklerinin harmonik değerlerinin ve güçlerinin, bu yüklerin çok yaygın olarak ve aynı anda kullanıldığı hesaba katıldığında yüksek değerlere ulaştığı ortaya konulmuş, bu tip güç elektroniği yüklerinin güç kaynaklarında sıklıkla kullanılan filtreli köprü doğrultucu devresinin incelenmesinin önemi vurgulanmıştır.

Ulaşılan literatürdeki mevcut çalışmalar geniş özetler halinde sunularak bu çalışmaların içerikleri ve yaptığımız çalışmayla paralellikleri ortaya konulmuştur. Görülmüştür ki, bu çalışma literatürdeki birçok çalışma ile paralellik göstermektedir. Bu da konunun önemini ve geçerliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır

Devreyi incelemenin bir yolu simülasyon programlarını kullanmaktır. Fakat bu programlar yapıları gereği bazı problemlere sahiptirler. Gerekli analizlerin elde edilebilmesi için çok sayıda simülasyon yapma zorunluluğu vardır. Bu yüzden analitik bir modele ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında tek fazlı güç elektroniği yüklerinin güç kaynaklarında sıklıkla kullanılan filtreli köprü doğrultucu devresinin çıkış filtresi endüktans ve kapasiteden oluştuğu durum için analitik bir model oluşturulmuş, hat akımının ve yük geriliminin devre denklemleri diferansiyel denklemler yardımıyla çözülerek, elde edilen sonuçlar EMTP programıyla karşılaştırılıp doğruluğu ispat edilmiştir. Kontrolsüz bir eleman olan köprü doğrultucunun iletim ve kesim zamanları iteratif yöntem kullanılarak MATHCAD paket programı yardımıyla elde edilmiştir

Çıkış filtresi büyüklüklerinin, giriş büyüklükleri olan hat akımının ve güç faktörünün büyüklüklerinin belirlenmesinde çok önemli etkenler olduğu ve çıkış filtresi büyüklüklerinin değerleriyle oynanarak giriş büyüklüklerinin kontrol edilebileceği gösterilmiştir.

Elde edilen analitik model kullanılarak L_f ve C' nin farklı değerleri için sırasıyla akım, gerilim, güç faktörü, THD_i , form faktörü, krest faktörü gibi büyüklükler MATLAB ve MATHCAD paket programları kullanılarak grafiklere aktarılmış, böylece analitik olarak elde edilen denklemlerin sonuçları görsel olarak da yorumlanabilmektedir. Grafikler yardımıyla L_f ve C' nin bu harmonik büyüklüklere etkisi ortaya konulabilmektedir. Yine bu büyükler kaynak gerilimin farklı harmonik içeriklere sahip olduğu durumlar için incelenmiştir.

İleriye dönük yapılması planlanan çalışmalarda literatürde de kendine yer bulmuş aynı kaynak empedansına bağlanan çok sayıdaki filtreli köprü doğrultucu devresinin şebekeye ve birbirlerine etkisinin incelenmesi, gerilim harmoniklerinin farklı açılarının değişik yük değerleri için hat akımı harmonikleriyle ilişkisinin belirlenmesidir. Ayrıca filtreli köprü doğrultucu devresinin farklı çalışma modlarındaki analitik ifadelerinin elde edilerek güç faktörü ve hat akımı harmonikleri açısından bakıldığında en uygun filtre dizaynının yapılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Bollen, M.H.J.; “Understanding Power Quality Problems Voltage Sags and Interruptions”; IEEE Pres., 2000.
- [2] Sankaran, C.; “Power Quality”, CRC PRESS, 2002
- [3] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.; “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayinevi, Kasım 2003.
- [4] Kim, D., Nakajima, T., Masada, E.; “Harmonic Analysis of a Capacitor –Filtered Rectifier With Line Impedance”, Electronics and Communications in Japan, Pt. 1, Vol. 72, No. 4, 1989. Translated from Denshi Tsushin Gakkai Robunshi, Vol. 70-B, No. 11, pp. 1316-1322, November 1987,
- [5] Mansoor, A., Grady, W.M, Chowdhury, AH, Samotyj, M.J; “An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single Phase Power Electronic Loads”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No.1, pp. 1416-1422, July 1995
- [6] Mansoor, A., Grady, W.M., Thallam, R.S., Doyle, M.T., Krein, S.D., Samotyj, M.J.; “Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-Phase Diode Bridge Rectifier Loads”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp.467-473, Jan 1995
- [7] Clare, J.C. ,Davis, R.M.; “The Prediction of Supply Current Waveforms and Harmonics for Rectifier Circuits with Capacitive Smoothing”, The European Power Electronics Association, pp. 200-205, 1993.
- [8] Carpinelli, G., Russo, A., Varilone, P., Verde, P.; “Analytical Modeling for Harmonic Analysis of Line Current of VSI-Fed Drives”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, pp. 1416-1422, July 2004.

- [9] Dewan, S.B.; Optimum Input and Output Filters for Single-Phase Rectifier Power Supply”, IEEE Trens. Industry Applications, Vol. IA-17, No. 3, pp. 282-288, May/June 1981.
- [10] Kelley, A.W., Yadusky, W.F.; “Rectifier Design for Minimum Line-Current Harmonics and Maximum Power Factor”, IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 7, No. 2, pp. 332-341 April 1992.
- [11] Schwarz, F.C.; “Time-Domain Analysis of The Power Factor for A Rectifier-Filter System over-and Subcritical Inductance”, IEEE Trens. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-20, No. 2, pp. 61-68, May 1973.
- [12] UL 1561-1994, Dry-Type General Purpose and Power Transformers, 1994
- [13] UL 1562-1994, Transformers, Distribution, Dry-Type-Over 600 Volts, 1994
- [14] Dugan, R.C., McGranagan, M.F. and Beaty, H.W.; “Electrical Power Systems Quality”, Mc Graw-Hill, 1996.
- [15] IEEE Std. 519-1992; “Recommended Practices and Requirements for Harrmonic Control in Electrical Power Systems”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [16] IEEE Std 1459; “Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [17] ANSI/IEEE C57.110/D7-1998; “ANSI/IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, February 1998.
- [18] IEC 61000 3-2; “Electromagnetic Compability (EMC). Part 3: Limits. Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000

- [19] IEC 61000 3-4; "Electromagnetic Compability (EMC). Part 3: Limits. Section 4: Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater Than 16A", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998.
- [20] IEC 61000 3-6; "Electromagnetic Compability (EMC). Part 3: Limits. Section 6: Assesment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996.
- [21] K. J. Olejniczak, J. C. Balda, R. Tirumala, B. Barbre, M. J. Samotyj, "An Evaluation of the Harmonic Impact of Residential Variable-Speed 'High-Efficiency Heat Pumps.'" Proc. of Second Intl. Conf. on Power Quality: End-Use Applications and Perspectives, Atlanta, GA, Sept 28-30, 1992, paper C15.
- [22] W. M. Grady, M. T. Doyle, B. W. Carroll, R. E. Barbrt, "Field Measurements and Preliminary Study of Harmonic Distortion Caused by Distributed Single-Phase ASD Heat Pumps," Proc. of Second Intl. Conf. on Power Quality: End-Use Applications and Perspectives, Atlanta, GA, Sept. 28-30, 1992, paper B13
- [23] R. S. Thallam, W. M. Grady, M. J. Samotyj, "Estimating Future Harmonic Distortion Levels in Distribution Systems Due to Single Phase Adjustable-Speed Drive Air Conditioners: A Case Study," Proc. Of IEEE-ICHPS 1992, Atlanta, GA, September 23-25
- [24] R. S. Wallace, "The Harmonic Impact of Variable Speed Air Conditioners on Residential Power Distribution," Proceedings of 7th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, Boston, Massachusetts, February 23-27, 1992, pp. 293-298.
- [25] MATHCAD, Version 14.0.0.163 [Build 701291152] Help, Parametric Technology Corporation
- [26] CAN/AM EMTP User Group; "Alternative Transient Program (ATP) Rule Book", Canadian/American EMTP User Group, 1992.

- [27] MATLAB R2006b, Version 7.3.0.267(R2006b) Help, The MathWorks Inc,
August 03,200

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İstanbul’da doğdu. Orta ve lise öğrenimini Ümraniye Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nü bitirdi. 2004 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisansa başladı. 2006 yılından itibaren özel bir şirkette çalışmaktadır.

