

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAHA ÖLÇÜMLERİYLE HARMONİK REZONANSIN TESPİTİ VE
KAPASİTÖR GÜVENLİK SEVİYESİNİN BULANIK MANTIK İLE
BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ramazan Tuygun OTHAN**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAHA ÖLÇÜMLERİYLE HARMONİK REZONANSIN TESPİTİ VE
KAPASİTÖR GÜVENLİK SEVİYESİNİN BULANIK MANTIK İLE
BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ramazan Tuygun OTHAN
(504081026)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Yard. Doç. Dr. Ömer GÜL (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Belgin TÜRKAY (İTÜ)
Yard. Doç. Dr. Muhammed GARİP (YTÜ)**

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı gerçekleştirmemde değerli zaman ve bilgilerinden yararlandığım, hocam Yard. Doç. Dr. Ömer GÜL'e öncelikli teşekkürlerimi sunarım.

33792 numaralı bilimsel araştırma projesine sağladığı maddi destekten ötürü İTÜ B.A.P. Birimi'ne, çalışma ortamlarını benimle paylaşan dostlarıma ve bana sundukları maddi, manevi destekten ötürü aileme de ayrıca teşekkür ederim.

Mayıs 2011

Ramazan Tuygun OTHAN
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Bölümleri.....	3
2. HARMONİKLER	5
2.1 Fourier Serileri ve Elektriksel Büyüklüklerin Tanımlanması	6
2.2 Harmoniklere İlişkin Temel Kavramlar	10
2.2.1 Harmonik bileşen	10
2.2.2 Harmonik sırası.....	10
2.2.3 Spektrum.....	10
2.2.4 Harmonik yüzdesi.....	11
2.2.5 Toplam harmonik distorsiyonu	11
2.2.6 Tekil harmonik distorsiyonu.....	12
2.2.7 Toplam talep distorsiyonu.....	12
2.2.8 Form faktörü.....	12
2.2.9 Tepe faktörü.....	13
2.3 Harmonik Bozulmaların Kaynakları	13
3. HARMONİK REZONANS	15
3.1 Giriş.....	15
3.2 Rezonans Oluşumu.....	15
3.2.1 Seri rezonans	15
3.2.1.1 Devre elemanlarının seri rezonans üzerindeki etkisi	18
3.2.2 Paralel rezonans	19
3.2.2.1 Paralel LR-C devresi.....	20
3.2.2.2 Paralel LR-CR devresi.....	22
3.2.3 Rezonans devrelerinde kalite katsayısı	22
3.3 Dağıtım Sistemlerinde Rezonans Oluşumu.....	24
3.3.1 Ferrerezonans	30
4. DAĞITIM SİSTEMLERİNDE REZONANSIN SAHA ÖLÇÜMLERİ YOLUYLA BELİRLENMESİ.....	33
4.1 Harmonik Büyüklüklerin Ölçümü.....	35
4.2 Ölçüm Yoluyla Harmonik Empedansın Belirlenmesi.....	39
4.2.1 Transient yöntemler	40
4.2.2 Kararlı-hal yöntemleri.....	42
4.3 Tüketici Tarafında Rezonansın Ölçüm Yoluyla Belirlenmesi	44

5. REZONANS ESNASINDA KAPASİTÖRLERİN GÜVENLİ ÇALIŞMA KOŞULLARININ BULANIK MANTIK İLE BELİRLENMESİ	53
5.1 Rezonansın Kapasitörler Üzerindeki Olumsuz Etkileri	53
5.1.1 Kapasitör uçlarında aşırı gerilimlerin oluşması	53
5.1.2 Kapasitörler üzerinden aşırı akımların geçmesi	54
5.1.3 Kapasitörlerin aşırı reaktif yüklenmesi	55
5.2 Kapasitörlerin Güvenli Çalışma Limitleri	56
5.3 Kapasitör Güvenli Çalışma Koşullarının Bulanık Mantık ile Belirlenmesi	58
5.3.1 Bulanık uzman sistemler	58
5.3.1.1 Kapasitör güvenli çalışma koşullarının belirlenmesine yönelik bulanık uzman sistem tasarımı	59
6. DENEYLER.....	67
6.1 Deney Devresi	67
6.1.1 Elektrik güç sistemi model devresi	67
6.1.2 Ölçüm devresi	69
6.2 Deneyin Yapılışı	71
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR.....	79
EKLER.....	85

KISALTMALAR

FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
PCC	: Ortak Bağlantı Noktası
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Simetri durumunda Fourier katsayılarının durumu.....	7
Çizelge 3.1 : Devre parametrelerinin hesaplanan değerleri.....	17
Çizelge 5.1 : TS 804 kapasitörlerin güvenli çalışma indisleri ve limitleri.	56
Çizelge 5.2 : IEC 60831-1 kondansatörlerin taşıyabileceği maksimum akım değerleri.....	56
Çizelge 5.3 : IEC 60831-1 kondansatörlerin maksimum süreyle maruz kalabileceği gerilim değerleri.	57
Çizelge 5.4 : IEEE 1036-1992 nolu standardı, kondansatörlerin güvenli çalışma indisleri ve limitleri.	57
Çizelge 5.5 : Üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadesi (görünür güç).....	62
Çizelge 5.6 : Üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadesi (akım).	63
Çizelge 5.7 : Üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadesi (gerilim).	64
Çizelge 5.8 : Bulanık kural tabanı.	65
Çizelge 6.1 : Elektrik güç sistemi model devresine ait elemanlar.	67
Çizelge 6.2 : Bulanık analiz sonuçları.	75
Çizelge A.1 : Deney sonuçları.	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Endüstriyel ve ticari faaliyetlerdeki kesintilerin nedenleri	2
Şekil 2.1 : Doğrusal olmayan empedans karakteristiğine sahip yükün akım eğrisi	5
Şekil 2.2 : Simetrik ve simetrik olmayan dalga şekilleri	8
Şekil 2.3 : Harmonik spektrumu	11
Şekil 3.1 : Seri RLC devresi	16
Şekil 3.2 : Fazör diyagram	16
Şekil 3.3 : Devre parametrelerinin frekansla değişimi	17
Şekil 3.4 : Farklı L/C oranları için devreden geçen akımın değişimi	18
Şekil 3.5 : Paralel RLC devresi	19
Şekil 3.6 : Paralel RLC devresinde devre elemanlarından akan akımın değişimi	20
Şekil 3.7 : Paralel RLC devresinin fazör diyagramı	20
Şekil 3.8 : Paralel LR-C devresi	21
Şekil 3.9 : Elektrik güç sistemi	26
Şekil 3.10 : Elektrik güç sisteminin tek hat şeması	27
Şekil 3.11 : Elektrik güç sisteminin harmonik frekanslar için eşdeğer devresi	27
Şekil 3.12 : Elektrik güç sistemine ikinci bir tüketici tarafından harmonik bileşenlerin enjekte edilmesi	29
Şekil 3.13 : Sistemin harmonik eşdeğer şeması	30
Şekil 3.14 : Ferromanyetik malzemelerde akım-manyetik akı yoğunluğu değişimi ..	31
Şekil 4.1 : Konvansiyonel ölçüm cihazlarıyla sinüsoidal olmayan dalga biçimlerinin ölçülmesi	36
Şekil 4.2 : AEMC 3945 enerji analizörü akım ve gerilim problemlerinin bağlantısı	37
Şekil 4.3 : Üç faz gerilim ve akım harmonik bileşenleri, grafik arayüzü	38
Şekil 4.4 : 12 darbeli sürücünün harmonik akım bileşenleri, metin arayüzü	39
Şekil 4.5 : Harmonik empedansı ölçüm yoluyla belirlemeye yönelik yöntemler	40
Şekil 4.6 : Kapasitörün anahtarlanmasıyla akım ve gerilim dalga biçiminde gözlenen değişimler	41
Şekil 4.7 : Transient dalga şekilleri ve spektral içerikleri	41
Şekil 4.8 : Eşdeğer devrenin basitleştirilmiş biçimi	46
Şekil 4.9 : Zsistem(h)'ın rezonans oluşumu durumunda genlik ve faz açısında gözlenen değişimler	47
Şekil 4.10 : Üç fazlı sistemde tüketici tarafında doğrusal olmayan yüklerin bulunması halinde rezonansı belirlemeye yönelik yapılacak ölçüm	49
Şekil 4.11 : Dağıtım sistemi üzerinden tüketici tesisatına harmonik bileşenlerin aktığı durum için rezonansın belirlenmesi amacıyla yapılacak ölçüm ...	50
Şekil 5.1 : Paralel LR-C devresinde sirkülasyon akımı	55
Şekil 5.2 : Görünür güç için belirlenen üyelik fonksiyonları	62
Şekil 5.3 : Kapasitör akımı için belirlenen üyelik fonksiyonları	63
Şekil 5.4 : Kapasitör uçlarına uygulanan gerilim için belirlenen üyelik fonksiyonları	64
Şekil 6.1 : Elektrik güç sistemi model devresi	68
Şekil 6.2 : Deney devresi	69

Şekil 6.3 : NI Cdaq-9174 kompakt şase.	69
Şekil 6.4 : NI 9203 ve 9215 veri toplama kartları.	70
Şekil 6.5 : LV25-P ve LTS 25-NP sensörleri.	70
Şekil 6.6 : Tasarlanan sisteme ait akış şeması.	71
Şekil 6.7 : Yük akımına ait spektral içerik.....	71
Şekil 6.8 : Deney esnası.	72
Şekil 6.9 : Eşdeğer empedansa ait genlik değişimi (R fazı).	73
Şekil 6.10 : Eşdeğer empedansa ait açısal değişim (R fazı).	73
Şekil 6.11 : Eşdeğer empedansa ait genlik değişimi (S fazı).....	74
Şekil 6.12 : Eşdeğer empedansa ait açısal değişim (S fazı).....	74
Şekil 6.13 : Eşdeğer empedansa ait genlik değişimi (T fazı).....	75
Şekil 6.14 : Eşdeğer empedansa ait açısal değişim (T fazı).....	75

SAHA ÖLÇÜMLERİYLE HARMONİK REZONANSIN TESPİTİ VE KAPASİTÖR GÜVENLİK SEVİYESİNİN BULANIK MANTIK İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Çok sayıda tüketicinin, endüktif reaktif yük ihtiyacını yerinde karşılamak üzere tesis etmek zorunda olduğu kompanzasyon sistemleri, elektrik güç sistemi ya da diğer doğrusal yüklere ait eşdeğer endüktif reaktans ile belirli bir frekansta rezonansa girebilir. Özellikle, günümüzde kullanımı yaygınlaşan ve hemen her tesisat bünyesinde az ya da çok sayıda yer alan harmonik kaynağı yükler, rezonans frekansını belirlemek üzere yapılacak analizleri güçleştirdiği gibi, sistem bileşenlerinin güvenliği açısından bir bakıma da zorunlu kılmaktadır.

Literatürde optimal kapasitör boyutlandırma ve seçimine yönelik gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir kısmında, sistemin rezonans koşullarını belirleme konusu önemle ele alınmaktadır. Bu doğrultuda, üç fazlı sistem bileşenlerinin detaylı modelleri elde edilmekte, gerek temel frekansta gerekse harmonik frekanslarda yük akış algoritmaları kullanılarak sistem dinamiklerine ilişkin mümkün olan en doğru sonuçlara ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Nitekim pratikte, modellemeye bağlı bir analizin birtakım zorlukları ve imkansızlıkları içerdiği bilinmektedir. Örneğin, sistem içeriğinde yer alan bütün bileşenlerin üç fazlı modellerinin elde edilmesi modellemenin zorlukları arasında sayılacak olursa, kurulu bir tesiste hat ve kablo uzunluklarının ya da döşeme koşullarına bağlı empedans değişimlerin net olarak kestirilememesi, bahsi geçen imkansızlıklar arasında anılabilir.

Bu bağlamda, pratik bir yöntem arayışının sonucu olan bu çalışmada, rezonansa özel koşullar göz önünde bulundurularak tüketiciye ait ortak bağlantı noktasında yapılacak bir dizi ölçüm ile üç fazlı sistemin rezonans frekansı ve koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın çıkış noktası, yine literatürde yer alan ölçüm yoluyla harmonik empedansın belirlenmesine yönelik çalışmalardır.

Meydana gelen rezonansın tespitiyle beraber, kapasitörler üzerindeki etkileri, oluşturduğu tehlike, çalışmanın içeriğinde önemle ele alınan bir başka konu olarak belirmektedir. Bu doğrultuda, kapasitörler için çeşitli standartlarca tanımlanan güvenli çalışma indis ve limitleri incelenmiş, geliştirilen bulanık uzman sistem aracılığıyla, meydana gelen rezonansın önem derecesi belirlenmiştir.

Geliştirilen bütün bu uygulamalar ve uzman sistem, yapılan deney ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüketicinin ortak bağlantı noktasında yapılacak ölçümler ile rezonansın ve rezonansın kapasitörler üzerindeki etkilerinin tespiti mümkündür. Yine elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, geliştirilen uzman sisteme yönelik getirilebilecek eleştiriler, gürültü gibi diğer bazı bozucu sinyallerin, rezonansın tespitine yönelik hesaplamalarda sapmalara yol açabilecek olması ve kurulacak sistemin maliyetidir.

DETERMINATION OF THE HARMONIC RESONANCE BY FIELD MEASUREMENTS AND IDENTIFICATION OF THE CAPACITOR SAFETY DEGREE BY FUZZY LOGIC

SUMMARY

Reactive compensation systems that many customers are obliged to install, may cause electrical resonance between the equivalent inductive reactance of the power systems or the linear loads at a certain frequency. Especially, with the substantial increase of non-linear loads that generates harmonics, analysis to be done for the determination of the resonance frequency get much more harder but also imperative for the safety of system components instead.

In most of the studies concerning optimal capacitor sizing and selection, determination of resonance conditions are considered with vital importance. Thus, three-phase models of all the system components are obtained first, and then either in fundamental frequency and in harmonic frequencies load flow algorithms are used to obtain the rightest results related to the system dynamics.

However, in practical, an analysis that depends on modelling has some difficulties and impossibilities. In example, if it is said that, obtaining the three-phase models of all system components are difficult, then having the exact line and cable lengths or knowing the impedance differentiation according to the furnishing conditions may be mentioned as impossible.

So, as this study is a result of the search of such a practical method, it is aimed that, with the measurements done at the customer's point of common coupling, resonance frequency and type of the three-phase system may be determined. In such a method, the special conditions emerging during a resonance are taken into account. The inspiration to this method is obtained from the studies about harmonic impedance measurements found in the literature.

With the occurrence of resonance, the threat caused for the capacitors is another severe issue that this study is dealing with. Thus, the standards defined about the safe operation limits of the capacitors are carefully examined, the severity of the resonance occurred is determined by the help of developed fuzzy expert system.

The resultant expert system is tested with the experiment done. According to the results, it is seen that, determination of such a possible resonance and its severity instead of a system component such as capacitors, is feasible with the measurements done at the customer's point of common coupling. The only point critical is, other distortive signals such as noise, may cause deviations in the calculations done for determining resonance.

GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

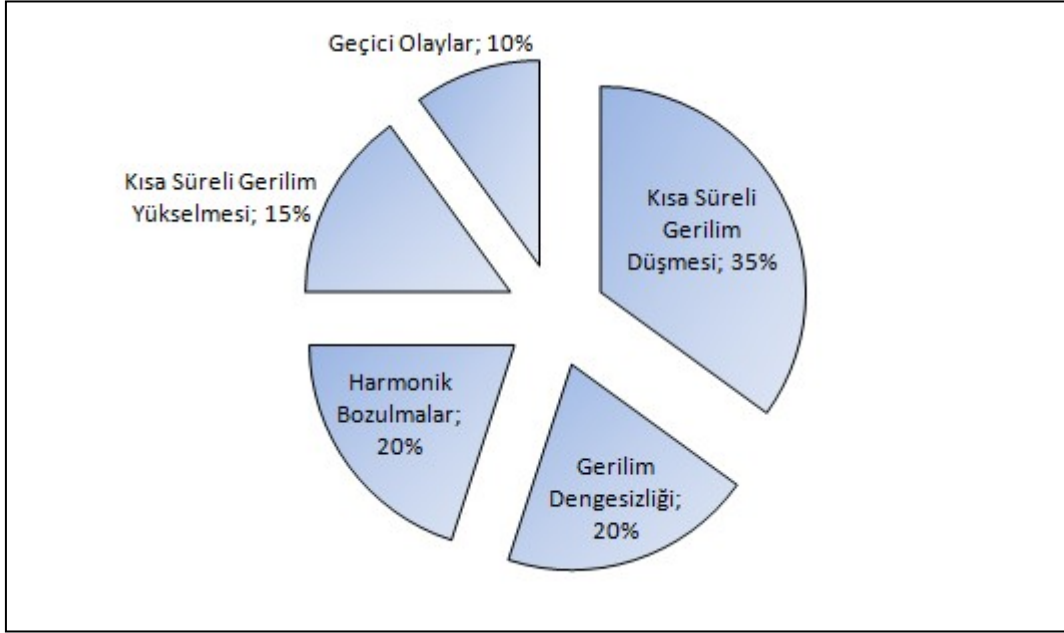
Teknolojinin vardığı nokta itibariyle dağıtım sistemi üzerinden beslenen hemen her tüketici tarafından yaygın kullanım imkanına sahip güç elektroniği ekipmanları, floresan lambalar, bilgisayarların yanı sıra, endüstriyel tesislerde kullanılan mikroişlemci kontrollü yükler, kaynak makineleri, baskı makineleri, ark fırınları gibi elektriksel cihaz ve ekipmanların harmonik bozulmalara yol açtığı günümüzde iyi bilinen bir gerçekliktir. Bu ve benzeri cihaz ve ekipmanların artan sayıda kullanımı, harmonik bozulmaların dağıtım sistemleri ve dağıtım sistemine bağlı diğer tüketiciler üzerinde önemi artan oranda bir dizi olumsuz etkiye sahip olduğu araştırmalarca tanıtlanmıştır. Şekil 1.1’de ABD’de 1350 tüketiciyi kapsayan bir araştırmanın sonuçlarına yer verilmektedir. Araştırma sonuçlarına göre, endüstriyel ve ticari faaliyetler dahilinde yaşanan kesintilerin nedenleri arasında harmonik bozulmalar, diğer kalite problemlerine oranla %20’lik bir paya sahiptir.

Endüstriyel ve ticari faaliyetlerde yaşanan kesintiler dışında, harmonik bozulmaların neden olduğu başka birtakım problemler de mevcuttur. Bu problemlere çok sayıda araştırma içeriğinde yer verilmiştir [1-6].

Dağıtım sistemlerinde reaktif yük ihtiyacını kompanze etmek üzere konumlandırılan şönt kapasitör grupları ile sistem empedansı arasında meydana gelen rezonans, bu problemlerin en önemlilerinden birini teşkil etmektedir. Rezonans oluşumunun, kapasitör grupları da dahil olmak üzere, dağıtım sistemlerine bağlı elektriksel cihaz ve ekipmanlar üzerinde, harmonik bozulmalara neden olan yükler tarafından ilgili frekansta sisteme enjekte edilen harmonik bileşenlerin genliği, rezonansın tipi ve harmonik eşdeğer empedansların büyüklüğüne bağlı olarak birtakım olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu etkiler, cihaz ve ekipmanların bozulmasına, fiziksel hasar görmesine veya ömürlerinin kısalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda literatürde artan bir sıklıkta, temel ve harmonik frekanslar dikkate alınarak

gerçekleştirilen optimal kapasitör seçimi ve yerleştirimi konulu çalışmalara rastlanmaktadır [7, 8].

Nitekim bu tip bir çalışma ileri düzeyde modelleme ve yük akış bilgisi gerektirmekle birlikte, günümüz dağıtım sistemlerinin oldukça karmaşık yapısı nedeniyle yetersiz kalmakta, değişen yük ve empedans koşulları altında rezonans oluşumunun ve rezonansın olumsuz etkilerinin gözlenmeyeceğine dair bir garanti sunamamaktadır.



Şekil 1.1 : Endüstriyel ve ticari faaliyetlerdeki kesintilerin nedenleri [1].

Bu çalışmanın amaçlarından birincisi, araştırmacıyı sürekli değişen sistem ve yük koşulları altında sistem bileşenlerinin tekrar tekrar modellenmesi ve yük akışının gerçekleştirilmesinden kurtararak, sunulacak pratik yöntem aracılığıyla rezonansın varlığının ve tipinin tespitine yönelik bir yaklaşımın sergilenmesidir. Çalışmanın bir diğer amacı ise, rezonansın varlığının ve tipinin tespit edilmesiyle beraber, rezonansın kompanzasyon amacıyla tüketicinin ortak bağlantı noktasına konumlandırılan kapasitör grupları üzerinde bir tehlike oluşturup oluşturmadığının, kapasitörlerin çeşitli standartlarca belirlenmiş güvenli çalışma limitlerinden faydalanarak belirlenmesidir. Yani bir başka deyişle, rezonans oluşumu söz konusu olduğunda, kapasitör gruplarının emniyeti esas alınarak, rezonansın sistem için önem derecesinin kararlaştırılmasıdır.

Bu noktada bu çalışmanın hedefi, yukarıda bahsi geçen amaçların gerçekleştirilmesine yönelik bir uzman sistemin tasarlanması, bir uzman şahsa gerek duyulmadan rezonans koşullarında kapasitör gruplarının güvenliğinin sağlanmasıdır.

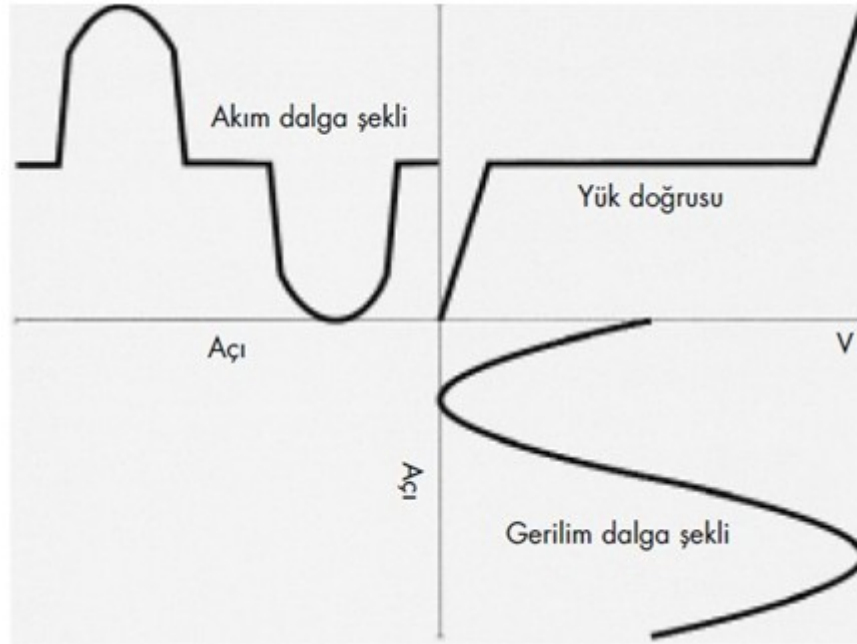
Çalışma açısından bir diğer hedef ise, kapasitör grupları gibi rezonans oluşumunun olumsuz etkilerinden kolayca etkilenebilecek bir takım hassas cihaz ve ekipmanların, kendi güvenli çalışma limitleri esas alınarak, güvenliğinin teminine yönelik özel tasarım uzman sistemlerin geliştirilmesine yol gösterici olmak sayılabilir.

1.2 Tezin Bölümleri

Giriş bölümü olan 1. bölüm, bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki temel motivasyonu, tezin amaç ve hedefleri ile tezde izlenen yolu ifade etmektedir. 2. bölüm, tezin diğer bölümlerinde yer yer atıfta bulunulan ve diğer bölümler için temel teşkil eden harmonikler ile ilgili gerekli özet bilgiyi ve kavramları içermektedir. Çalışmanın iskeletini oluşturan rezonansın oluşumu, farklı tipleri ve etkileri, 3. bölümde olası bütün elektriksel eşdeğer devreler ve dağıtım sistemleri için detaylı bir biçimde ele alınmaktadır. 4. bölüm, özetle dağıtım sistemlerinde modelleme yoluyla rezonans analizinin zorlukları ve yetersizliklerinden bahsetmekte, literatürde harmonik empedansın ölçüm yoluyla belirlenmesine yönelik çok sayıda çalışmadan yola çıkarak rezonansın ölçüm yoluyla tespitine yönelik bir yöntemi tanıtlamaktadır. Rezonansın varlığının, meydana geldiği frekansın ve tipinin belirlenmesi sonrasında, 5. bölümde uluslararası standartlar incelenerek sunulan dağıtım sistemlerinde kompanzasyon amacıyla konumlandırılan şönt kapasitörlerin güvenli çalışma limitleri esas alınarak, kapasitörlerin emniyetli çalışma koşullarını saptamak üzere tasarlanan bulanık mantık temelli uzman sisteme yer verilmektedir. 6. bölüm, çalışmanın ilk beş bölümünde sunulan teorik bilgi ve yöntemin geçerliliğini saptamak amacıyla oluşturulan algoritma ve deneyi içermektedir. 7. Bölüm, sonuç bölümü olup, çalışma içeriğinde elde edilen sonuçları gelecek çalışmalar açısından tartışmaya açmaktadır.

2. HARMONİKLER

Elektrik enerjisi 50 Hz ya da 60 Hz'lik sabit frekanslarda üretilmekte olup, generatör elektromotif kuvveti, generatörün sargı dağılımları ve manyetik devre yapısından kaynaklanan bozulmalar göz ardı edilerek, pratikte sinüsoidal kabul edilir. Üretilen sinüsoidal gerilim, empedans karakteristiği doğrusal olmayan bir elektriksel yüke uygulandığında, çekilen akımın dalga şekli sinüsoidal olmayacaktır. Şekil 2.1'de empedans karakteristiği doğrusal olmayan bir elektriksel yükün akım-gerilim dalga şekilleri görülmektedir [2]. Yük tarafından çekilen akımın harmonik bileşenleri içermesi, bu akım bileşenlerinin üzerinden aktığı sistem bileşenlerine ait empedanslar aracılığıyla da, yük bara ve terminallerinde gerilim harmonik bileşenlerinin oluşmasına neden olacaktır [3, 4].



Şekil 2.1 : Doğrusal olmayan empedans karakteristiğine sahip yükün akım eğrisi [2].

Dalga şekli sinüsoidal olmayan gerilim ve akımlar, frekansları temel bileşen frekansının katları şeklinde sinüsoidal bileşenleri içermektedir [3, 9]. J. B. Fourier, bu tür dalgaların frekansları ve genlikleri farklı olan sinüsoidal dalgalara

ayrılabilirliğini göstermiştir. Bu nedenle, bu şekilde elde edilen seriye Fourier serisi, bu serinin elemanlarına da Fourier bileşenleri adı verilir [3, 4].

2.1 Fourier Serileri ve Elektriksel Büyüklüklerin Tanımlanması

Fransız matematikçi Jean Baptiste Fourier 1822 yılında, devamlılığı olan herhangi bir periyodik fonksiyonun, temel sinüsoidal bileşenin yanında, temel frekansın tam katları biçiminde seyreden yüksek dereceli harmonik bileşenler serisi şeklinde gösterilebileceğini tanıtlamıştır [5, 10].

Temel bileşen ve daha yüksek bileşenlerin genlik ve faz açılarının hesaplanması süreci harmonik analizi olarak adlandırılır. Hesaplama sonucu elde edilen seri, Fourier serisidir.

Periyodik bir fonksiyon aşağıda tanımlanmıştır:

$$x(t+T)=x(t) \quad (2.1)$$

T: fonksiyonun periyodu,

f: fonksiyonun frekansı olmak üzere,

x(t) periyodik fonksiyonunun Fourier serisine açılımı şu şekilde olacaktır [9, 10]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(n\omega T) + b_n \cos(n\omega T)) \quad (2.2)$$

ω : fonksiyonun açısal frekansı,

a_0 : x(t) fonksiyonunun ortalama değeri (DC bileşen),

a_n ve b_n : fourier serisi katsayıları,

n: harmonik mertebesini göstermektedir. Fourier serilerini polar formda da ifade etmek mümkündür [5]:

A_n : n. harmoniğin genliği,

Φ_n : n. harmoniğin fazı olmak üzere,

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.3)$$

$$\Phi_n = \tan^{-1}(a_n/b_n) \quad (2.4)$$

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (2.5)$$

Basitleştirmeler ve dalga şekli simetrisi uyarınca, katsayılardan bazıları sıfırlanır. Çizelge 2.1, çeşitli simetri durumlarında katsayılardaki değişimi özetlemektedir [5].

Çizelge 2.1 : Simetri durumunda Fourier katsayılarının durumu.

Fonksiyonun Simetri Özelliği	Matematiksel İfadesi	Fourier Katsayıları
Çift Fonksiyon Simetrisi	$f(-t)=f(t)$	$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d\omega t$ $A_n = 0$
Tek Fonksiyon Simetrisi	$f(-t)=-f(t)$	$B_n = 0$ $A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d\omega t$
Yarım Dalga Simetrisi	$f(t)=-f(t+T/2)$	$A_n = B_n = 0 \quad (n\text{'nin çift değerlerinde})$ $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (n\text{'nin tek değerlerinde})$ $A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (n\text{'nin tek değerlerinde})$

Şekil 2.2’de simetri olması ya da olmaması durumlarına ilişkin örnek dalga şekilleri görülmektedir.

Fourier dönüşümünün daha hızlı ve kolay gerçekleştirilmesini sağlayan yöntemler geliştirilmiştir [4]. Sayısal değerlendirmeye en uygun Fourier dönüşümü, ayrık Fourier dönüşümüdür ve sonlu uzunluktaki serilerin Fourier dönüşümü için kullanılır [6].

Frekans domenî spektrumu ve zaman domenî fonksiyonunun her ikisi de her periyotta N adet örneklemeyle periyodik olarak örneklenmiş fonsiyonlar olduğu zaman Fourier dönüşüm çiftine ait ifadeler Denklem 2.6 ve Denklem 2.7’deki biçimiyle verilir [6]:

Burada k ve n=0, 1, ..., N-1,

$$\Delta\Omega = \frac{2\pi}{\Delta T} \quad (2.6)$$

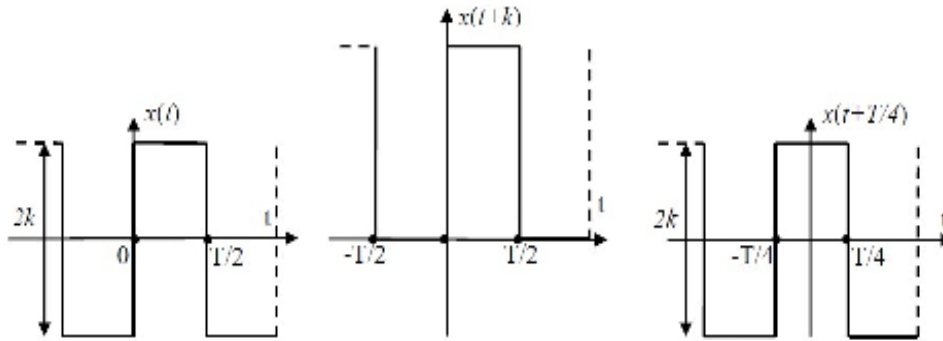
$$\Delta T = T/N \quad (2.7)$$

olmak üzere,

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.8)$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.9)$$

Ayrık Fourier dönüşümünü kolaylaştırmak için hızlı Fourier dönüşümü geliştirilmiştir. Bilgisayar desteği ile uygulanması mümkündür. Pratikte hızlı Fourier dönüşümü çözümü için matematiğe dayalı algoritmalar kullanılır. Bu algoritmalarda sıra önemlidir. Yapılan işlemlere “kelebek” adı verilir [5]. Son yıllarda, hızlı Fourier dönüşümü hesaplamaları için paket programlar çeşitli yazılımlar dahilinde mevcuttur.



Şekil 2.2 : Simetrik ve simetrik olmayan dalga şekilleri.

a) Tek fonksiyon simetrisi b) simetri yok c) Çift fonksiyon simetrisi

Fourier serilerini inceledikten sonra, harmonikli devrelerde elektriksel büyüklüklere ait ifadelerden bahsedilebilir. Harmonik bileşenleri için akım ve gerilimin ani değerleri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n\omega s + \gamma_n) \quad (2.10)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \cdot \sin(n\omega s + \delta_n) \quad (2.11)$$

Akım ve gerilimin n. harmonik için etkin değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$I_n = \frac{I_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (2.12)$$

$$V_n = \frac{V_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (2.13)$$

Akım ve gerilimin etkin değerleri, akım ve gerilimlerin her bir harmonik mertebesindeki değerlerinin karelerinin toplamının karekökü olacaktır. Akım ve gerilimin etkin değerlerinin genliği sırasıyla,

$$|I| = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.14)$$

$$|V| = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.15)$$

gibi ifade edilir [11]. Yukarıdaki denklemlerde, I_0 ve V_0 akım ve gerilimin doğru bileşenlerini, n harmonik mertebesinde, I_{mn} ve V_{mn} n. harmonik akım ve geriliminin tepe değerlerini göstermektedir. γ_n n. harmonik akımının faz açısını, δ_n ise n. harmonik geriliminin faz açısını ifade etmektedir.

Harmonikli büyüklüklerin bulunduğu bir devrede aktif güç ve reaktif güçlere ait ifadeler,

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^n V_n I_n \cdot \cos(\delta_n - \gamma_n) \quad (2.16)$$

$$Q = \sum_{n=1}^n V_n I_n \cdot \sin(\delta_n - \gamma_n) \quad (2.17)$$

şeklindeir. Görünür güç ise gerilim ve akımın etkin değerleri çarpımından,

$$S = V \cdot I = \sqrt{\sum_{n=1}^n V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^n I_n^2} \quad (2.18)$$

olarak hesaplanır. Konuyla ilgilenen araştırmacıların bir kısmı harmonik bileşenlerin bozucu gücünü görünür güç içinde ayrı bir indisle tanımlarken, bir kısım araştırmacı ise bozucu gücün etkisini reaktif güç içeriğinde tanımlama yolunu seçmiştir. Farklı frekanslı akım ve gerilim bileşenlerinin çarpımından oluşan bu gücün fiziksel anlamı ve reaktif güç ile ilişkisi halen tartışma konusudur [3, 9].

Bozucu gücün etkisi ayrı bir indisle tanımlanacak olursa,

$$D = \sqrt{S^2 - Q^2 - P^2} \quad (2.19)$$

formülünden değeri hesaplanabilir. Son olarak güç faktörü, bilindiği üzere, aktif gücün görünür güce oranıdır. Devrede harmonikli bileşenlerin bulunması durumunda değeri düşecektir. Temel bileşen için güç faktörü:

$$PF_1 = P_1/S_1 = \cos(\delta_1 - \gamma_1) \quad (2.20)$$

iken, harmonikli bileşenlere ait güç faktörü:

$$PF_n = \cos(\tan^{-1}(\beta_n - \alpha_n)) \quad (2.21)$$

ifadesi ile verilir. Denklemden,

α_n : akım harmonik bileşeninin faz açısı

β_n : gerilim harmonik bileşeninin faz açısıdır.

2.2 Harmoniklere İlişkin Temel Kavramlar

Çalışma içeriğinde adı geçen kavramlara özetle aşağıda yer verilmiştir.

2.2.1 Harmonik bileşen

Harmonik bileşen, frekansı temel frekansın bir katı olan sinüsoidal bileşenlerin herhangi birine verilen isimdir. Harmoniklerin büyüklüğü genelde temel bileşenin yüzdeliği şeklinde ifade edilir.

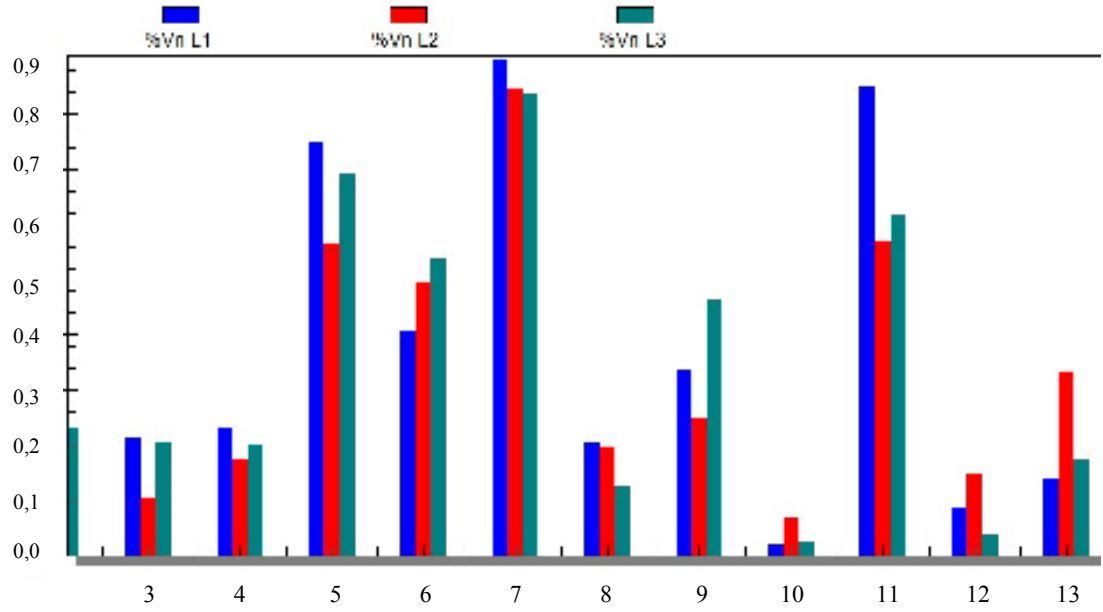
2.2.2 Harmonik sırası

Harmonik sayısı olarak da adlandırılan harmonik sırası, bir harmonik frekansın (f_n), temel frekansa olan oranıdır. Enerji sistemlerinde temel frekans genellikle 50 veya 60 Hz'dir.

$$n = f_n / f_1 \quad (2.22)$$

2.2.3 Spektrum

Spektrum, çeşitli harmonik büyüklüklerinin harmonik sırası olarak dağıtılmasıdır ve bir histogramla gösterilirler. Aşağıdaki şekilde bir histogram örneği görülmektedir.



Şekil 2.3 : Harmonik Spektrumu.

2.2.4 Harmonik yüzdesi

Harmonik yüzdesi, her bir harmoniğin temel harmoniğe göre şiddetini gösterir. Şekil 2.3 buna örnektir. n . harmonik oranı, n . harmoniğin efektif değerinin temel bileşenin efektif değerine oranıdır. Örneğin; I_n harmonik oranı I_n/I_1 veya yüzde olarak ifade edilmesi durumunda $100 \times (I_n/I_1)$ olur. Harmonik analizi gerektiren problemlerde, harmonikli bileşenlerin temel bileşenin yüzdesi olarak verilmesi, sık rastlanan bir durumdur.

2.2.5 Toplam harmonik distorsiyonu

Kısa biçimiyle THD, harmonik bileşenlerin efektif değerleri toplamının, temel bileşenin efektif değerine oranıdır. Genellikle yüzde biçiminde ifade edilir. Harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin sinüs dalga şeklinden sapma miktarını tespit için kullanılmaktadır. Gerilim ve akım için toplam harmonik bozulma ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.23)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.24)$$

2.2.6 Tekil harmonik distorsiyonu

Toplam harmonik distorsiyonu ifadesine benzer biçimde, her bir harmonik bileşenin efektif değerinin, temel bileşenin efektif değerine oranlanması ile tekil harmonik distorsiyonu elde edilir. Bu tanımlama, ilgili harmonik mertebesinin bozucu etkisini değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Tekil harmonik distorsiyonu, akım ve gerilim bileşenleri için aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$HD_v = \frac{V_n}{V_1} \quad (2.25)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.26)$$

2.2.7 Toplam talep distorsiyonu

Kısaltması TTD olan toplam talep distorsiyonu, IEEE Standart 519 dahilinde de belirtilmiş, çekilen yük akıma ait bozulmaları belirlemede kullanılan bir tanımlamadır. Harmonik akımlar üzerine toplam talep bozulması tanımlaması üzerinden yapılan yorumlar, kimi zaman toplam harmonik akım bozulmasına göre daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Bir yüke ait toplam talep bozulması aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [3-6].

$$TTD = \frac{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}{I_L} \quad (2.27)$$

I_L , yük tarafından besleme sistemi ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanstaki maksimum akımdır. Son 12 ay içerisinde, yük tarafından çekilen temel frekanslı maksimum akımların ortalaması alınarak hesaplanır [12].

2.2.8 Form faktörü

Form faktörü nonsinüsoidal bir dalga için aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$k_f = x_{eff} / x_{ort} \quad (2.28)$$

x_{eff} : efektif değer,

x_{ort} : ortalama değerdir.

Bozulmuş sinüsoidal bir dalganın bozulma ölçütünü verecek olan form faktörü sinüsoidal bir dalga için 1.11 değerine eşittir [6].

2.2.9 Tepe faktörü

Tepe faktörü sinüsoidal olmayan akım veya gerilim dalga şeklinin tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri için tanımlanmıştır. Harmonik bileşenlerin varlığını en basit biçimde ortaya koyan tanımlamalardan biridir. Sinüsoidal bir dalga için tepe faktörü $\sqrt{2}$ 'dir [6].

$$k_c = x_{\max}/x_{1\text{eff}} \quad (2.29)$$

$x_{\max}$: tepe değeri,

$x_{1\text{eff}}$: temel bileşenin efektif değeridir.

2.3 Harmonik Bozulmaların Kaynakları

Harmonik analizi yapılmadan önce, harmonik bozulmaların kaynaklarının tanımlanması ve modellenmesi gereklidir. Doğrusal olmayan direnç karakteristiğine sahip elektriksel yükler, elektrik güç sistemlerindeki bozulmaların temel kaynağı olarak belirmektedir. Bir çok doğrusal olmayan karakteristiğe sahip yük, dağıtım sistemlerinde tüketici tarafında konumlandırılmış olduğundan, gerilim dalga biçimlerindeki en yüksek bozulma seviyeleri de tüketici tarafında, harmonik kaynağına yakın noktalarda gözlemlenir. Günümüzde önem arz eden bu problem yeni değildir. Elektrik güç sistemlerinden beslenen ark fırınları, kaynak makineleri, floresan lambalar ve beraberindeki balastlar, doymuş transformatörler ve döner makineler (motor, generatör), kondansatör arızaları, ac/dc dönüştürücüler birer harmonik kaynağı olarak bulunmaktadır. Yakın zamanda, güç elektroniği devrelerinin yaygın kullanımı sonucu, bu devreleri bünyesinde barındıran cihaz ve ekipmanların, mikroişlemciler ile kontrol edilen yüklerin daha yaygın birer harmonik kaynağı olarak ön plana çıktığı görülmektedir. Özetle denilebilir ki, günümüzde elektrik güç sistemlerine bağlı bütün tüketiciler, az ya da çok sayıda harmonik kaynağını konutlarında ya da tesislerinde barındırmaktadır. Teknolojideki gelişmişlikle doğrudan ilintili olarak artış gösteren ve çeşitlenen harmonik kaynaklarının çözümleri de gitgide artan sayıda çeşitlilik göstermekte, beraberinde daha etkin çözümleri getirmektedir.

Ticari amaçlı kullanıma sahip yerleşkelerde ve konutlarda, harmonik kaynağı olarak gözüken yükler, küçük sayılabilecek miktarlarda harmonik bozulmalara neden olurlar. Bu tip ortamlarda harmonik kaynakları genellikle, floresan lambalar ve beraberindeki manyetik balastlar, bilgisayarlar ve güç adaptörleri, iklimlendirme ve vantilasyon amaçlı kullanılan cihazların ayarlanabilir hız sürücüleri, asansör sürücü devreleri, hassas elektronik cihazlar öncesinde kullanılan tek fazlı kesintisiz güç kaynakları ve gerilim regülatörleri olarak sıralanabilir. Günümüzde, ticari amaçlarla kullanılan yüksek katlı, plaza tipi yapılarda ya da otellerde kullanılan çok sayıda bilgisayarların, floresan lambaların toplam etkisinin göz ardı edilmemesi gereken seviyelerde büyük harmonik bozulmalara neden olduğu bir başka önemli konudur.

Endüstriyel tesislerde harmonik üreten yükler ise, büyük bir çeşitlilik göstermektedir. Ticari amaçlı kullanıma sahip yerleşkelerde var olan harmonik kaynaklarının yanı sıra, büyük güçlü cihazların sürücü devreleri, konverter devreleri, motorlar, kaynak makineleri ve ark cihazları temel harmonik kaynakları olarak sıralanabilir. Bu tip yükleri barındıran bir endüstriyel tesisin elektrik güç sistemine enjekte edeceği harmonik akım bileşenleri, gerilim dalga seviyesinde büyük harmonik bozulmaların oluşumuna neden olacaktır.

3. HARMONİK REZONANS

3.1 Giriş

Herhangi bir sistemde rezonans olabilmesi için, sistem dahilinde iki adet enerji depolayan elemanın bulunması gerekir. Elektriksel bir sistem için bu iki eleman kondansatör ve endüktanstır. Sadece endüktans ve dirençten ya da sadece direnç ve kondansatörden ibaret bir sistem için rezonansın varlığından bahsedilemez.

Direnç, endüktans ve kapasitans içeren elektriksel bir devreye ya da şebekeye uygulanan gerilim, geçen akım ile aynı fazda ise devre rezonans halindedir. Devrenin eşdeğer empedansı saf omik karakterde olup, güç faktörü bire eşittir [13].

Yukarıdaki ifadelerden anlaşılabacağı üzere, elektriksel bir sistemde rezonans, kapasitif reaktansın endüktif reaktansa eşit olduğu durumlarda görülecektir. Bu noktada harmoniklerin rezonans oluşumu açısından önemi daha iyi açığa çıkmaktadır. Zira bilindiği üzere, endüktif reaktans frekansla birlikte artarken, kapasitif reaktans azalacaktır. Çeşitli frekanslarda ve büyük değerlerdeki harmonik bozulmalar, güç sisteminde rezonans yolu ile problemlerin artmasına sebep olabilir [6].

Elektrik güç sistemlerinde seri ve paralel olmak üzere iki tip rezonans mevcuttur.

3.2 Rezonans Oluşumu

3.2.1 Seri rezonans

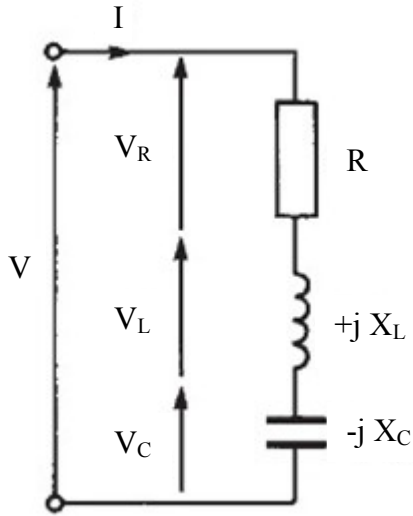
Şekil 3.1’de bir seri RLC devresi görülmektedir. Seri RLC devresinin eşdeğer empedansı aşağıdaki gibi ifade edilir [13]:

$$Z = R + j (X_L - X_C) = R + j(\omega L - 1/\omega C) \quad (3.1)$$

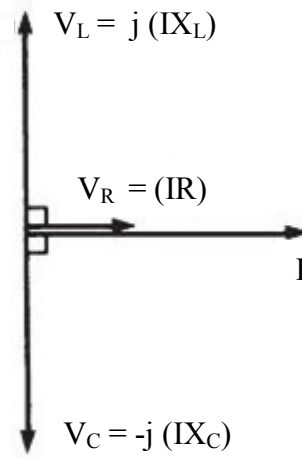
Devre, $X_L = X_C$ bir başka deyişle $\omega L = 1/\omega C$ olduğu takdirde rezonans halindedir. Seri rezonans halinde devrenin fazör diyagramı şekil 3.2’de gösterilmiştir [13].

O halde rezonans frekansı f_r aşağıdaki gibi tanımlanacaktır:

$$f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (3.2)$$



Şekil 3.1 : Seri RLC devresi.



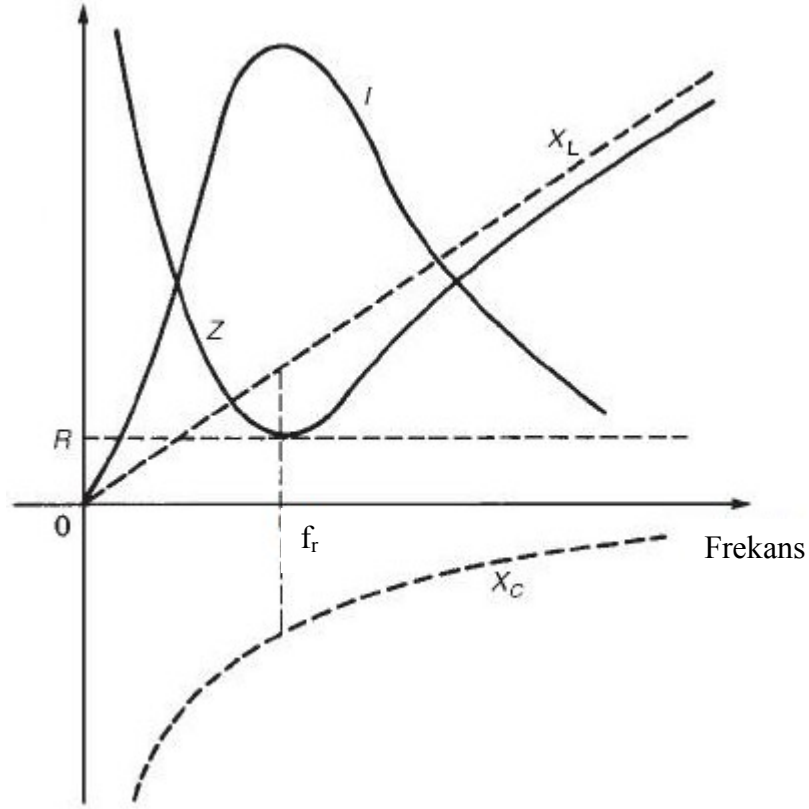
Şekil 3.2 : Fazör diyagramı.

Şekil 3.3, endüktif reaktans ile kapasitif reaktansın frekansla değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere rezonans frekansından küçük frekans değerleri için, endüktif reaktans kapasitif reaktanstan küçük olacak ve devre kapasitif karakteristiğe sahip olacaktır. Rezonans frekansından büyük frekans değerleri için ise tam tersi biçimde, endüktif reaktans kapasitif reaktanstan büyük olacak ve devre endüktif karakteristiğe sahip olacaktır.

Seri RLC devresinin eşdeğer empedansının genliği, aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak hesaplanılır (3.3). Şekil 3.3'te kapasitif ve endüktif reaktansın frekansla değişiminin yanı sıra, devrenin eşdeğer empedansı ve devreden geçen akımın eşdeğer empedansa bağlı değişimi her bir frekans değeri için hesaplanarak gösterilmiştir. Rezonans frekansında, devre eşdeğer empedansı en küçük değerine ulaşırken, devreden geçen akım ise en büyük değerine ulaşır.

$$|Z_{eq}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.3)$$

Şekil 3.1'deki gibi bir seri RLC devreye uygulanan gerilimin genliği 100V sabit kabul edilmiş ve devre parametreleri değişik frekanslar için hesaplanarak değişimleri incelenmiştir. Direnç, endüktans ve kapasitans değerleri sırasıyla $R = 100 \, \Omega$, $L = 0,1 \, H$ ve $C = 0,1 \, \mu F$ olarak belirlenmiş, devrenin rezonans frekansı hesaplanmıştır. Devreye ilişkin hesaplamalara, çizelge 3.1'de yer verilmiştir.



Şekil 3.3 : Devre parametrelerinin frekansla değişimi.

Çizelge 3.1 : Devre parametrelerinin hesaplanan değerleri.

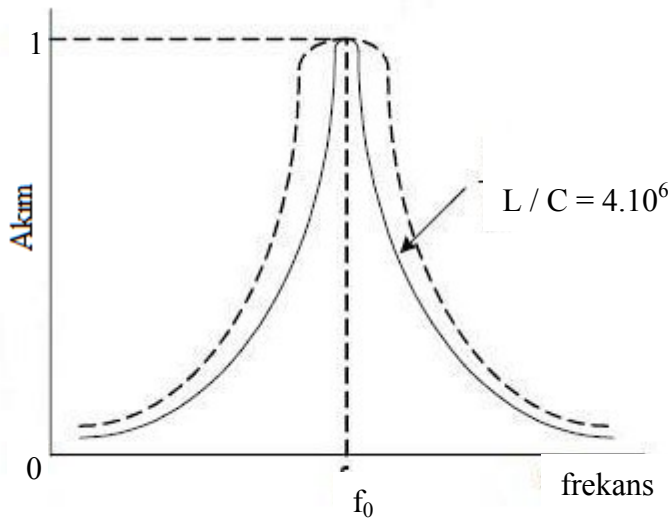
F (Hz)	R (Ω)	X_L (Ω)	X_C (Ω)	$X_L - X_C$ (Ω)	Z_{eq} (Ω)	ϕ ($^\circ$)	I (A)
150	100	100	10 k	-9900	9900	-89,4	0,0101
650	100	415	2415	-2000	2002	-87,2	0,0500
1250	100	781	1281	-500	509	-78,7	0,1965
1500	100	952	1052	-100	141	-45	0,7092
1600	100	1000	1000	0	100	0	1,0000
1750	100	1105	905	200	223	63,4	0,4484
2550	100	1618	618	1000	1005	84,3	0,0995
15900	100	10 k	100	9900	9900	-89,4	0,0101

Çizelgedeki veriler, daha önce anlatılanları doğrular niteliktedir. Devrenin rezonans frekansı 1600 Hertz olarak hesaplanmıştır. Bu frekanstan küçük frekanslarda devre eşdeğer empedansı kapasitif, büyük frekanslarda ise endüktif özellik göstermektedir. 1600 Hertz’de, kapasitif reaktans endüktif reaktansa eşit olup, devre eşdeğer empedansı sadece omik direncin değerinden ibarettir ve rezonans frekansı olan 1600 Hertz’de ϕ değeri sıfıra eşittir. Yani bir başka deyişle, devreye uygulanan gerilim ile devreden geçen akım aynı fazdadır.

3.2.1.1 Devre elemanlarının seri rezonans üzerindeki etkisi

Rezonans frekansının nasıl hesaplanacağı eşitlik 3.2 ile verilmiştir. Eşitlikten kolayca anlaşılacağı üzere farklı L ve C değerleri ile aynı frekansta rezonans oluşumu mümkündür. Yukarıdaki örnekten yararlanılarak aynı rezonans frekansında seçilen farklı L ve C değerleri için devre elemanlarının rezonans koşulları üzerindeki etkisi anlatılacaktır.

L ve C değerleri sırasıyla 0,1 mH ve 0,1 mF olarak belirlendiği takdirde rezonans frekansı yine 1600 Hertz olarak hesaplanacaktır. Bir önceki örnekteki L/C oranı, bu örnekteki oranla 10^6 kez büyüktür. Rezonans esnasında X_L ve X_C değerleri 1000Ω iken, yeni değerlerle 1Ω olarak elde edilir. X_L ve X_C 'ye ait reaktans değerleri bütün frekanslar için değişmiştir. Bu değişimin devrenin eşdeğer empedansına etkiyeceği görülmektedir. Bir devrede L/C oranı arttıkça empedans büyüyeceğinden devreden geçen akım azalır. Akım eğrisi L/C oranı arttıkça sivrileşir [14]. Şekil 3.4'te uygulanan gerilim ve omik direnç değeri sabit iken, farklı L/C oranına sahip iki devrenin akım eğrilerinin değişimi gösterilmiştir.



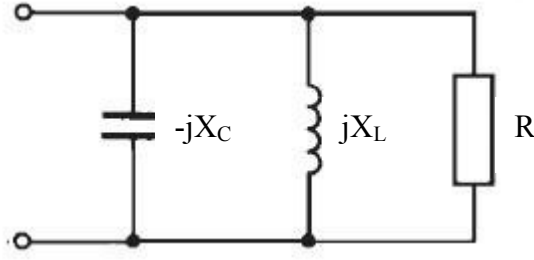
Şekil 3.4 : Farklı L/C oranları için devreden geçen akımın değişimi.

Seri RLC devrede omik direncin değeri, devrenin eşdeğer empedansının değerini değiştirecek, özellikle rezonans koşulunda devrenin eşdeğer empedansı sadece omik dirençten ibaret olduğundan devreden geçen akımı sınırlayan tek unsur olarak belirecektir.

3.2.2 Paralel rezonans

Şekil 3.5'te basit bir paralel RLC devresi görülmektedir. Birbirine paralel bağlı R, L ve C elemanlarının admitansları ile paralel RLC devresinin eşdeğer admitansı Y, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Y = \frac{1}{R} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L}) \quad (3.4)$$

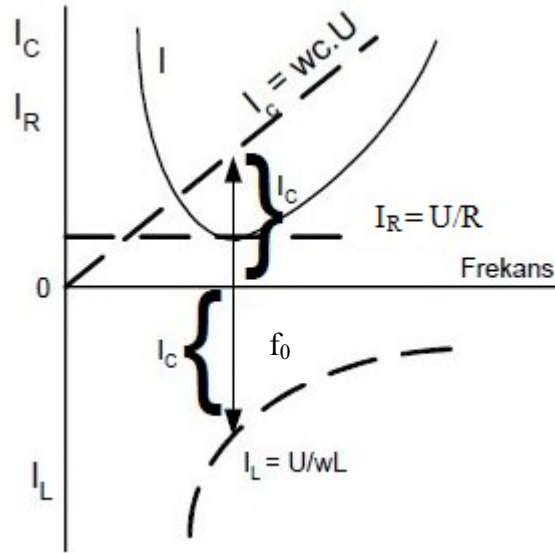


Şekil 3.5 : Paralel RLC devresi.

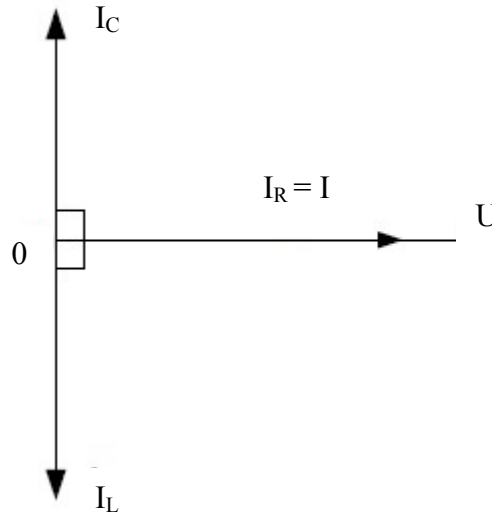
Frekans değişimi omik direnç üzerinde herhangi bir değişikliğe yol açmayacak ve omik direncin bulunduğu koldan akan akım , devreye uygulanan gerilim sabit kaldığı sürece değişmeyecektir. Endüktansın artan frekansla birlikte reaktansı artacak, bulunduğu koldan geçen akım azalacaktır. Kapasitans ise tam tersi biçimde, frekansla reaktansı azalacak, bulunduğu koldan geçen akım ise artacaktır. Şekil 3.6'da direnç, endüktans ve kapasitans akımlarının frekansla değişim eğrileri görülmektedir.

Rezonans halinde endüktif reaktans kapasitif reaktansa eşit olacağından, eşitlik 3.4'te eşitliğin imajiner kısmı sıfıra eşit olacaktır. Devre rezonans frekansı seri rezonans olduğu gibi eşitlik 3.2'deki gibi hesaplanacaktır.

Kapasitif reaktans, endüktif reaktansa rezonans frekansında eşit olacağından, $I_L = I_C$ eşitliği de yine bu frekansta sağlanır. Kaynaktan çekilen akım ise, sadece omik direnç üzerinden geçecek akım olup kaynak gerilimi ile aynı fazda olacaktır. Rezonans esnasındaki paralel RLC devresinin fazörel diyagramı şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.6 : Paralel RLC devresinde devre elemanlarından akan akımın değişimi.



Şekil 3.7 : Paralel RLC devresinin fazör diyagramı.

Eşitlik 3.4 dikkate alındığında, rezonans esnasında devrenin eşdeğer admitansı sadece omik direncin admitansından ibarettir. Bir başka deyişle, devrenin eşdeğer empedans değeri maksimum olacaktır. Empedansın maksimum olması, kaynaktan çekilen akımın minimum değerini alacağı anlamına gelir. Bu durum, akımın frekansla değişimini gösteren şekil 3.6'dan da görülebilir.

3.2.2.1 Paralel LR-C devresi

Pratikte farklı tipte paralel rezonans devreleri ile karşılaşılır. Endüktans ve direncin birbirine seri, kapasitansın ise bu ikisine paralel bağlı olduğu LR-C devresi, şekil 3.8'de görülmektedir.

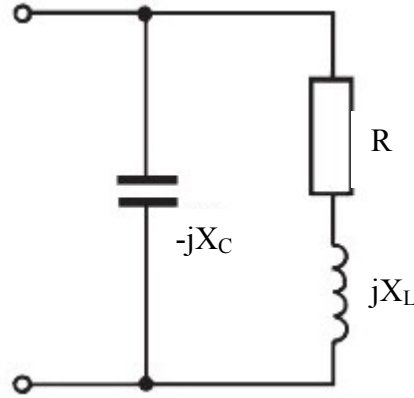
Devre kollarının eşdeğer admitansları şu şekilde elde edilir [13]:

$$Y_{LR} = \frac{1}{R + jX_L} = \frac{R - jX_L}{R^2 + X_L^2} = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} - \frac{j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (3.5)$$

$$Y_c = \frac{1}{-jX_c} = \frac{j}{X_c} = j\omega C \quad (3.6)$$

Devre eşdeğer admitansı ise her iki kolun admitansları toplamından hesaplanır [13]:

$$Y = Y_{LR} + Y_c = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} - \frac{j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} + j\omega C \quad (3.7)$$



Şekil 3.8 : Paralel LR-C devresi.

Rezonans esnasında, devre eşdeğer admitansının imajiner kısmı sıfıra eşit olacaktır. Eşitlik 3.7'nin imajiner kısmını sıfıra eşitleyip açısal frekansı yalnız bıraktığımız takdirde , rezonans esnasında açısal frekans eşitliği aşağıdaki gibi elde edilir [13] **(3.8)**:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (3.8)$$

Paralel RL-C devresinin rezonans esnasındaki frekans değeri eşitlik 3.8'den hareketle elde edilir **(3.9)**:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9’da omik direncin, endüktans değeri yanında çok küçük olması durumunda kök içindeki ikinci kesir ifadesi, birinci kesir ifadesine nazaran çok küçük olacağından rezonans frekansını veren ifade eşitlik 3.2’dekine eşit kabul edilir.

3.2.2.2 Paralel LR-CR devresi

Pratikte karşılaşılmaması muhtemel bir devre tipi de şekil 3.9’da görülen paralel LR-CR devresidir. Devre kolların admitansları ve devre eşdeğer admitansını veren eşitlikler şu şekildedir:

$$Y_{LR} = \frac{1}{R_L + jX_L} = \frac{R_L - jX_L}{R_L^2 + jX_L^2} = \frac{R_L}{R_L^2 + jX_L^2} - \frac{jX_L}{R_L^2 + jX_L^2} \quad (3.10)$$

$$Y_{CR} = \frac{1}{R_c - jX_c} = \frac{R_c + jX_c}{R_c^2 + jX_c^2} = \frac{R_c}{R_c^2 + jX_c^2} + \frac{jX_c}{R_c^2 + jX_c^2} \quad (3.11)$$

$$Y = Y_{LR} + Y_{CR} = \frac{R_L}{R_L^2 + jX_L^2} - \frac{jX_L}{R_L^2 + jX_L^2} + \frac{R_c}{R_c^2 + jX_c^2} + \frac{jX_c}{R_c^2 + jX_c^2} \quad (3.12)$$

Rezonans esnasında, ifadenin imajiner kısmı sıfır olacaktır. Eşitlikler düzenlenip açısal frekans ifadesi yalnız bırakıldığında elde edilecek eşitlik şu şekilde olacaktır[13]:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_L^2 - (L/C)}{R_c^2 - (L/C)}} \quad (3.13)$$

Paralel LR-CR devresinin rezonans esnasındaki frekansı eşitlik 3.13’ten yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir (3.14):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_L^2 - (L/C)}{R_c^2 - (L/C)}} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.14, paralel LR-CR devresinde kök içerisindeki ifadenin kök dışısındaki ifadenin yanında çok küçük olması durumunda, eşitlik 3.2 ile verilen ifadeye indirgenebilir.

3.2.3 Rezonans devrelerinde kalite katsayısı

Bir RLC devrede yer alan endüktans ve kapasitans, kaynak gerilimi ile beslenmeye başladıktan sonra, bünyesinde enerji depolayacaktır. Manyetik alanında enerjiyi

depolayan endüktans, bir süre sonra bu enerjiyi kapasitansa aktaracak, kapasitans da bu enerjiyi elektrik alanında depolayacaktır. Kapasitansın depoladığı bu enerji nihayetinde tekrar manyetik alanında depolanmak üzere endüktansa aktarılacak, sürekli bir döngü oluşacaktır [13]. Rezonansa giren bir devrede, reaktif komponentler arasındaki depolanmış enerjinin periyodik alışverişinin yanı sıra, devrenin omik direncinde ısı kayıp olarak açığa çıkan bir enerji de mevcuttur. Tanım olarak kalite katsayısı [13]:

$$Q = 2\pi (Q_{smax} / P_r) \quad (3.15)$$

Q_{smax} : depolanan maksimum reaktif güç

P_r : çevrim başına omik direnç üzerinde harcanan aktif güçtür.

Eşitlik 3.15, rezonans devresinde yer alan kapasitör ve endüktanstan yola çıkılarak farklı biçimlerde ifade edilebilir. Gerekli düzenlemeler yapıldığı takdirde kalite katsayısı endüktans değeri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir (3.16):

$$Q = \omega_r \left(\frac{\frac{1}{2} L I_m^2}{I^2 R} \right) = \left(\frac{\omega_r \left(\frac{1}{2} L I_m^2 \right)}{\left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R} \right) = \frac{\omega_r L}{R} \quad (3.16)$$

Kapasitans değeri cinsinden ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir (3.17):

$$Q = \omega_r \left(\frac{\frac{1}{2} C V_m^2}{I^2 R} \right) = \left(\frac{\omega_r \frac{1}{2} C (I_m X_c)^2}{\left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R} \right) = \frac{\omega_r \frac{1}{2} C I_m^2 (1/\omega_r C)^2}{\left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R} = \frac{1}{\omega_r C R} \quad (3.17)$$

3.16 ve 3.17 eşitlikleri göstermektedir ki, bir rezonans devresinin kalite katsayısı reaktif devre elemanının reaktans değerinin, omik direnç değerine oranına eşittir (3.18).

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} \quad (3.18)$$

Rezonans esnasında kalite katsayısı, yüzlerle ifade edilen değerlere erişebilir. Kalite katsayısının 10'dan büyük değerleri için ancak rezonansın olumsuz etkileri göz

önünde bulundurulur. 10'dan küçük Q değerleri için, devre 1'e yakın güç faktörü değerine sahiptir [13].

3.3 Dağıtım Sistemlerinde Rezonans Oluşumu

Günümüz dağıtım sistemlerinin gittikçe daha karmaşık ve bütünleşik bir yapıya büründüğü gözlenmektedir. Dağıtım sisteminden beslenen tüketicilerin yük profilleri günden güne çeşitlilik göstermekte, temin edinilen enerji üzerinde bunun birbirinden farklı etkileri olmakla beraber tüketici tarafından enerjinin niteliğine yönelik de farklı talepler ortaya çıkmaktadır. Çok sayıda yük hızlı bir biçimde devreye girip çıkmakta, dağıtım sistemi üzerinden aynı anda tek fazlı ve üç fazlı yükler beslenebilmektedir. Endüstriyel ve ticari amaçlı kullanıma tabii çok sayıda meskenin reaktif yük ihtiyacına oranla da bir zorunluluk addeden kompanzasyon ihtiyacına yönelik olarak, tüketicinin ortak bağlantı noktasına konumlandığı kapasitör grupları aracılığıyla yük ihtiyacına göre kapasitörler devreye alınıp, devre dışı bırakılmaktadır.

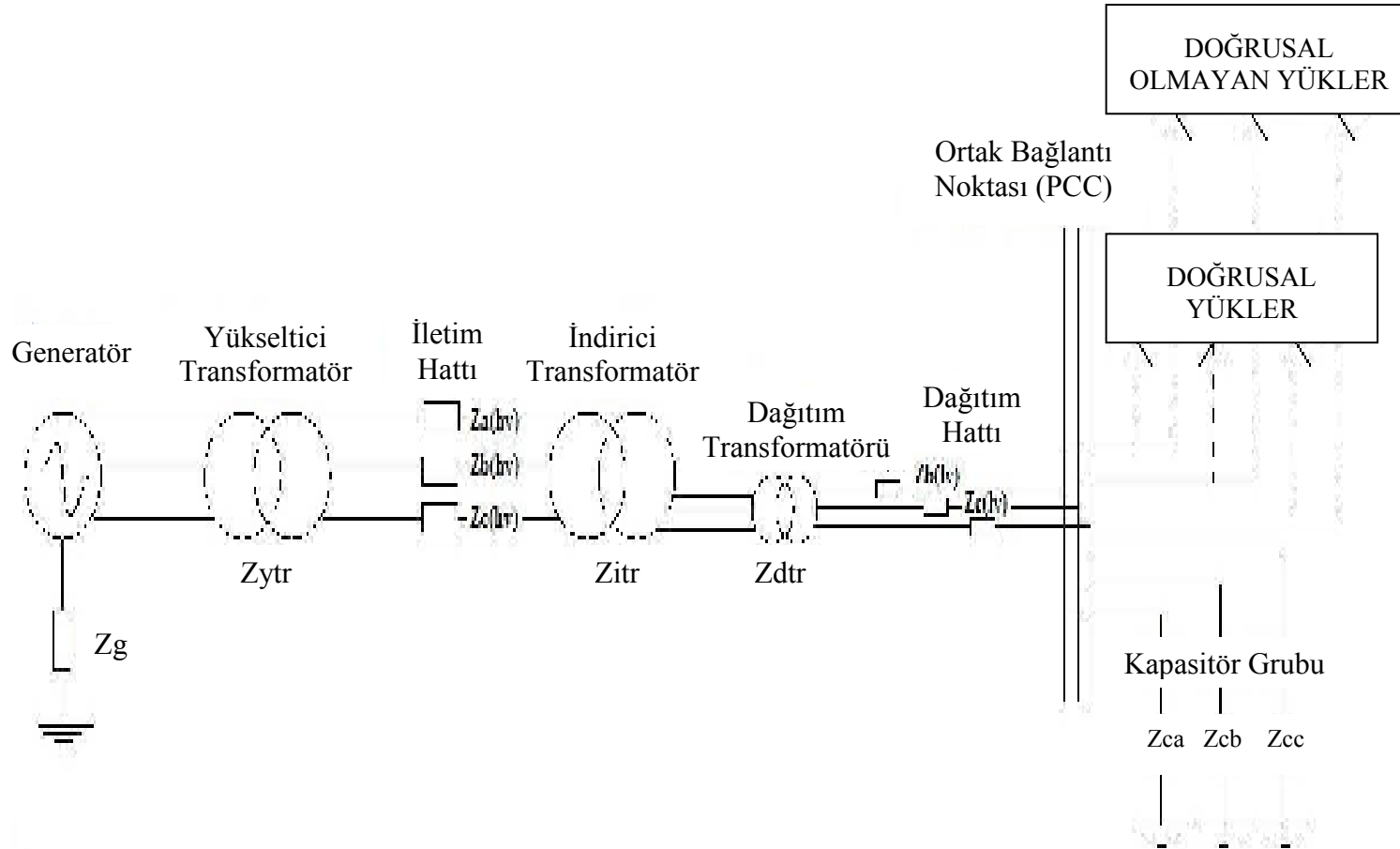
Yukarıda bahsi geçen bütün bu hususlar, dağıtım sistemlerinin değişken yapısını özetlemek üzeredir.

Şekil 3.9'da elektrik güç sisteminin üretimden son tüketiciye kadar ki temel yapısı görülmektedir. Generatör tarafından üretilen enerji yükseltici transformatörler, iletim hatları, indirici transformatörler, dağıtım transformatörleri ve dağıtım hatları üzerinden tüketiciye ulaştırılmaktadır. Tüketici tarafında ise özetle, ortak bağlantı noktasına bağlı doğrusal yüklerin yanı sıra, harmonik distorsiyon kaynağı doğrusal olmayan yükler ve kompanzasyon amacıyla yüklerle paralel konumlandırılmış kapasitör grupları bulunmaktadır. Bütün bu bileşenlerin bir empedans karşılığı vardır ve modellenmesi mümkündür. Şekil 3.10'da, şekil 3.9 ile verilen elektrik güç sisteminin temel frekanstaki tek hat şeması gösterilmiştir.

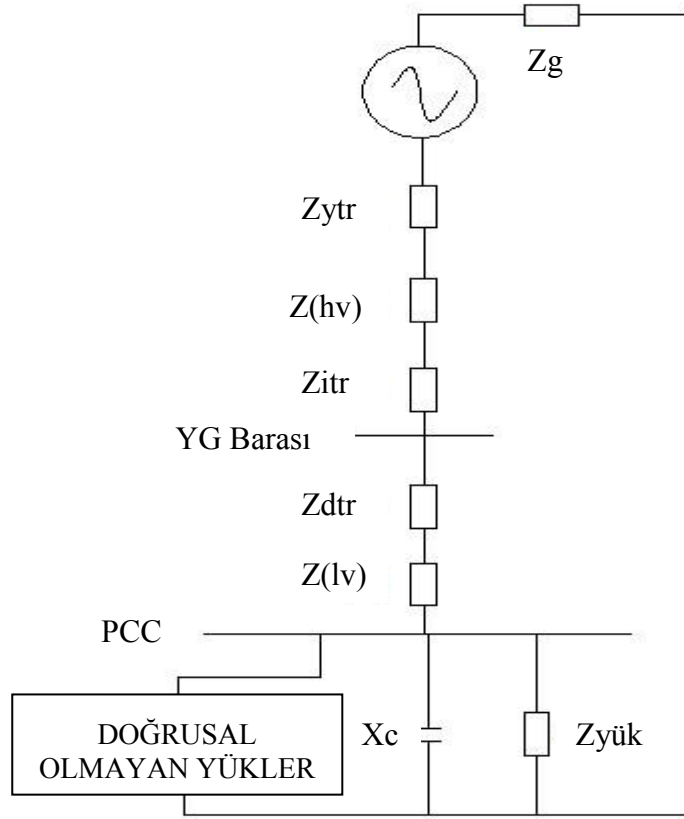
Aynı güç sisteminin harmonik eşdeğer şeması, temel frekansta modellenen tek hat şemasından farklılık gösterecektir. Şekil 3.11'de güç sisteminin harmonik eşdeğer şeması verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, doğrusal olmayan yükler, harmonik distorsiyonun kaynağı olup, yük profillerinin gereği harmonik akım bileşenlerini güç sistemine enjekte etmektedirler. Buna göre, harmonik eşdeğer şemada sistem bileşenleri, doğrusal olmayan yüklerin konumuna göre, ortak bağlantı noktası dikkate

alınarak modellenmiştir. Modelde yer alan her bir empedansın imajiner kısmı, analizin gerçekleşeceği frekansa bağlı olarak değişiklik gösterecektir.

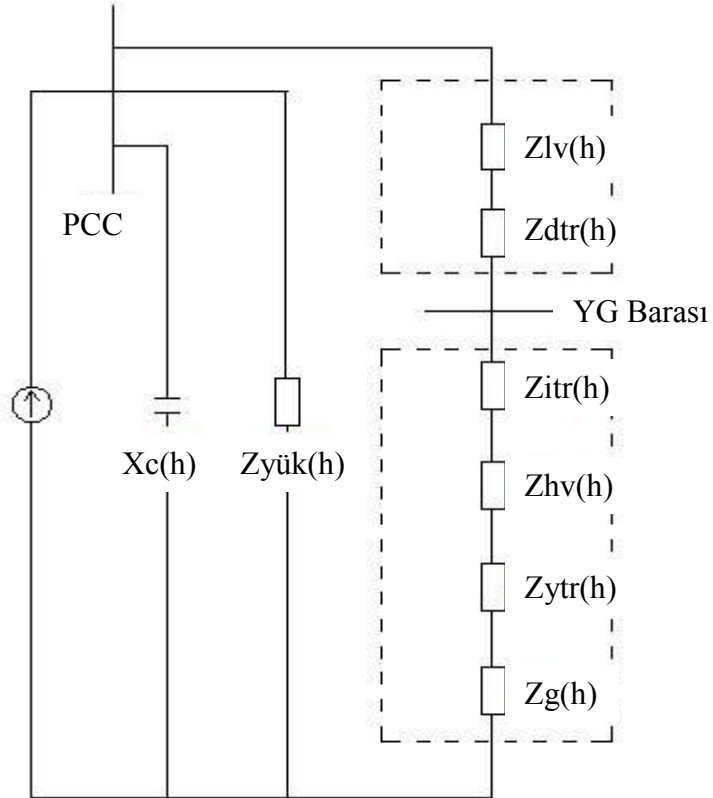
Şekil 3.11’de dağıtım hattı, transformatörler ve iletim hattı üzerinden generatöre kadarki kısmı sistem tarafı diye betimleyecek olur ve eşdeğer bir empedans gibi düşünecek olursak, ortaya çıkan eşdeğer devre, bölüm 3.2.2.1’de incelenen paralel LR-C devresidir. Bu durumda, doğrusal olmayan bir yükün ortak bağlantı noktasında mevcudiyeti durumunda yine ortak bağlantı noktası konumlandırılan kapasitör grupları ile sistem empedansı arasında belirli bir frekansta rezonans oluşacağı söylenebilir.



Şekil 3.9 : Elektrik güç sistemi.



Şekil 3.10 : Elektrik güç sisteminin tek hat şeması.

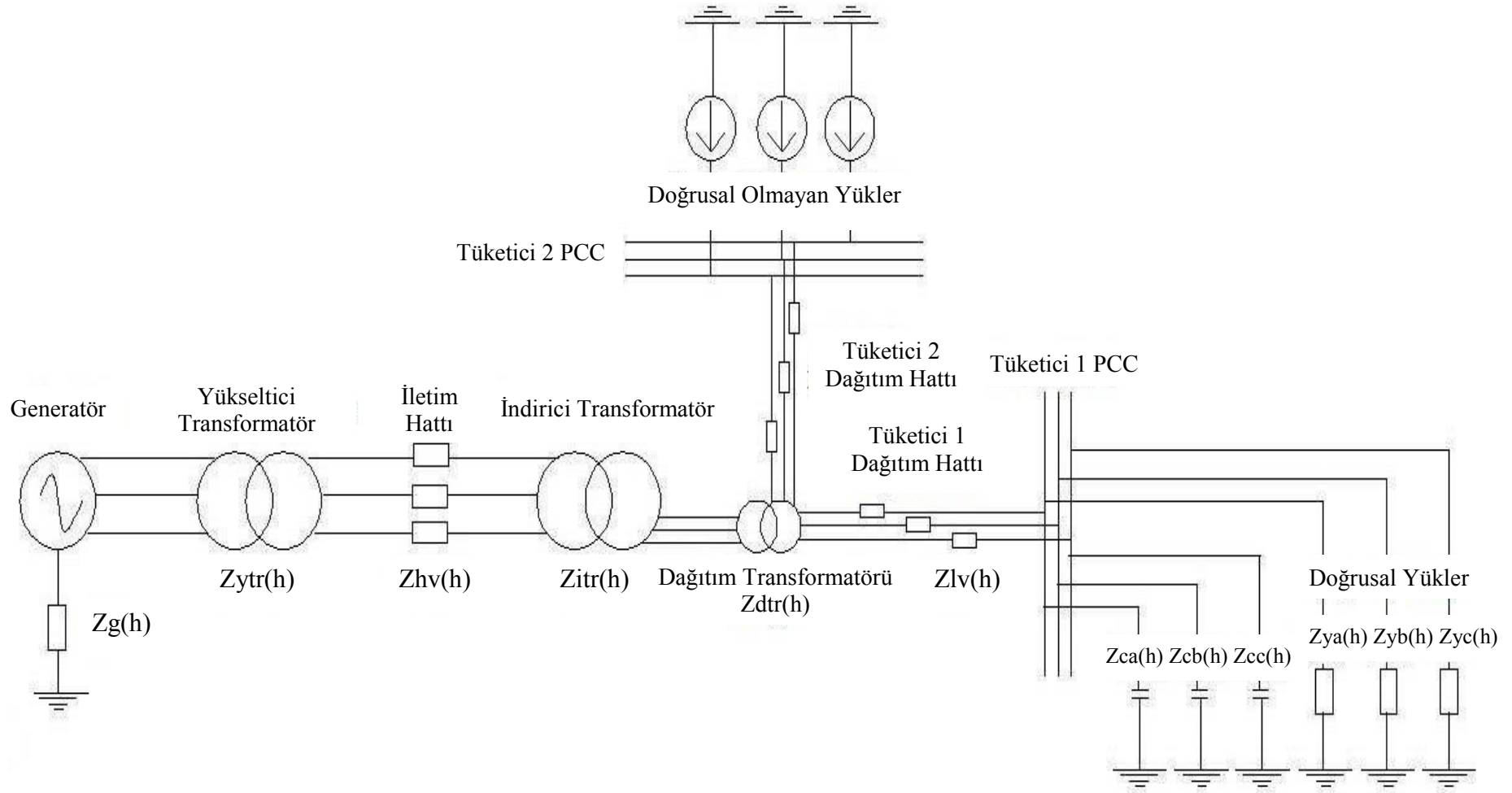


Şekil 3.11 : Elektrik güç sisteminin harmonik frekanslar için eşdeğer devresi.

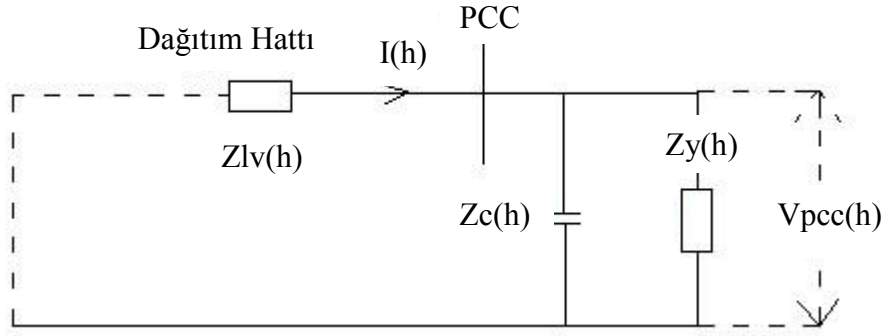
Yukarıda, tüketicinin doğrusal olmayan yükleri tesisatında barındırması durumu incelenmiştir ve dağıtım sistemlerinde en sık gözlenen rezonans olayları yukarıda anılan biçimiyle gerçekleşmektedir [4]. Fakat dağıtım sistemi dahilinde farklı biçimde rezonans olayları da gözlenmektedir. Örneğin şekil 3.12’de aynı dağıtım sisteminden beslenen ikinci bir tüketicinin tesisatında doğrusal olmayan yükleri barındırdığı ve önemli nicelikte harmonikli bileşeni dağıtım sistemine enjekte ettiği durum göz önünde bulundurulsun. Bu durumda ikinci tüketici tarafından güç sistemine enjekte edilen harmonik bileşenlerin bir kısmının sistemden beslenen diğer tüketicilerin tesisatına doğru akacağı görülecektir. Şekil 3.12 baz alınarak konu incelemeye tabii tutulduğunda, birinci tüketicinin ortak bağlantı noktasına göre dağıtım sistemi tarafından tüketici tesisatına doğru akmakta olan harmonikli bileşenler, belirli bir frekansta, kompanzasyon amaçlı konumlandırılan kapasitör grupları ile birinci tüketicinin yük empedansları arasında bir rezonansın oluşmasına neden olabilir. Şekil 3.13’te yukarıda bahsi geçen duruma ait harmonik eşdeğer devre şeması sunulmuştur. Bu devre incelendiğinde de, bir paralel LR-C devresiyle karşılaşıldığı görülecektir.

Elektrik güç sistemlerinde seri rezonans, paralel rezonansa oranla daha nadir gözlenmektedir. Elektrik güç sistemi tarafından tüketicinin ortak bağlantı noktasına doğru, harmonik bileşenlerin aktığı durumda, sistem eşdeğer empedansı ile ortak bağlantı noktasına konumlandırılan kapasitör grubu arasında bir seri rezonans oluşumu gözlenebilir.

Üç fazlı sistemlerde, her bir fazın eşdeğer sistem empedansı farklılık göstereceği gibi, faza bağlı yüklere ait empedanslar ve o yüklere kompanze etmeye yönelik devrede olan kapasitörlerin sayısı ve büyüklüğü de birbirinden farklı olabilir. Bu durumda her bir fazın rezonansa gireceği frekans birbirinden farklı olacak, sistemde var olan harmonik içeriğe göre bazı fazlar rezonansa girerken, bazıları girmeyebilecektir. Dolayısıyla, üç fazlı sistemlerde rezonans analizi gerçekleştirmek için her bir fazın durumu incelemeye tabii tutulmalıdır.



Şekil 3.12 : Elektrik güç sistemine ikinci bir tüketici tarafından harmonik bileşenlerin enjekte edilmesi.



Şekil 3.13 : Sistemin harmonik eşdeğer şeması.

3.3.1 Ferrorezonans

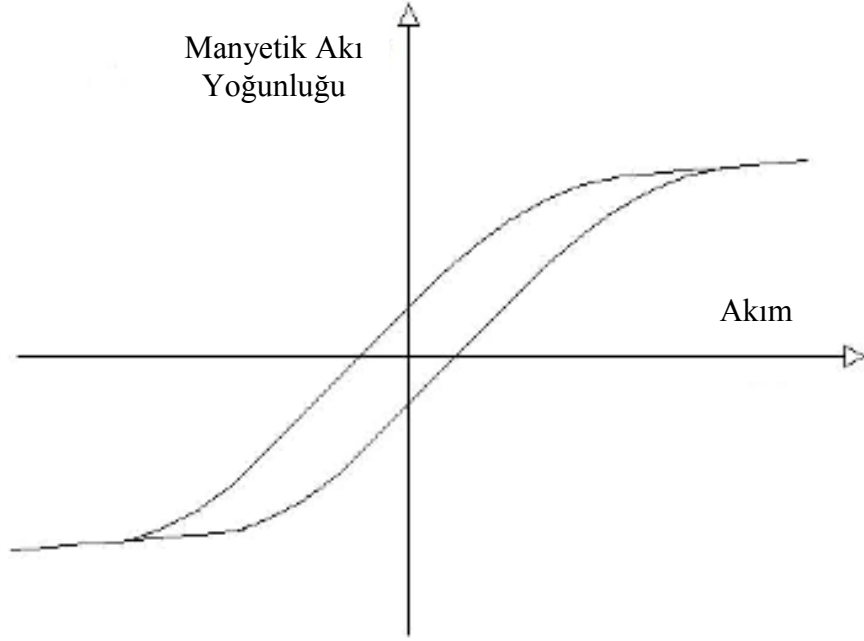
Daha önceden incelenen seri ve paralel rezonans olayları direnç, kapasitans ve doğrusal endüktansın yer aldığı devrelere ilişkindi. Ferrorezonans, yine direnç ve kapasitansın bulunduğu bir devrede, demir çekirdeği doyuma giden ve dolayısıyla doğrusal karakteristiğe sahip olmayan endüktansın neden olduğu rezonans durumudur. Böyle bir devrede öğelerden biri olan endüktansın değerinin değişimi, devrenin diğer öğelerinin uçlarındaki gerilim ve üzerlerinden geçen akım değerlerinde ani yükselmelere yol açabilir [15].

Elektrik sistemlerinde birçok öge, içlerindeki demir çekirdeğin doymasıyla doğrusal olmayan endüktans karakteristiğine sahiptirler. Bu gibi durumlarda endüktansın değeri, devredeki akım değerinden bağımsız olmaz ve ters orantılı olarak, akım arttıkça endüktans değeri azalır. Sonuç olarak doğrusal olmayan seri RLC devresinde, doyma nedeniyle kararlı ve geçici rejimdeki elektriksel olaylar çok değişir ve bunların saptanması da aşırı derecede zorlaşır.

Genel olarak ferrorezonans deyimi, doyan demir çekirdekli sargılarla paralel ya da seri bağlı bir kapasitanstan oluşan devredeki olayları tanımlar. Demirdeki doymanın derecesine göre devredeki elektriksel salınımların doğal frekansları değişir. Kuşkusuz endüktansın doyma eğrisinin biçimi ve en üst değeri değiştirilerek de ferrorezonans yaratılabileceğinden olayın incelenmesinde gerçek karakteristiklerin kullanılması önem taşır.

Şekil 3.14, demir manyetik nüveye ait manyetik akı yoğunluğunun, akıma bağlı değişimini göstermektedir. Lineer çalışma bölgesinde, akımla birlikte manyetik akı, doğrusal bir artış gösterirken, doyma noktası olarak adlandırılan eşiğe erişildiğinde, endüktans üzerinden geçen akım ne kadar artarsa artsın, manyetik akı yoğunluğu

küçük bir artış gösterecektir. Bir başka deyişle, doyma noktasından sonra, akımın artışı, endüktans değerinde oldukça büyük değişimlere sebep olacaktır. Seri bir RLC devresinde bulunan doyumlu endüktans, nonlinear endüktans olarak da ifade edilebilir [16]. Dağıtım sistemleri için transformatörler, ferromanyetik endüktansa iyi birer örnek teşkil eder.



Şekil 3.14 : Ferromanyetik malzemelerde akım – manyetik akı yoğunluğu değişimi.

Ferromanyetik malzemelerin bir diğer özelliği histeresis oluşturmalarıdır. Histeresis, demir nüvede depolanan artık akı yoğunluğundan kaynaklanır. Şekil 3.14’te manyetik akı yoğunluğunun akıma bağlı değişimi iki farklı eğri ile gösterilmektedir. Bu iki eğrinin manası, doyuma giden bir ferromanyetik malzemenin doyma noktası ile doymadan çıkan bir ferromanyetik malzemenin doyma noktasının bir olmamasıdır. Bunun nedeni histeresistir. Doyumdan çıkan bir ferromanyetik malzemenin doyma noktası daha düşük olacaktır.

Daha önce incelenen rezonans olaylarından farklı olarak ferreazonansta, frekans değişiminden bağımsız olarak, endüktans değeri sabit değildir ve doyuma bağlı olarak değişir. Doğal olarak, endüktif reaktans da endüktansın değerine bağlı olarak değişecektir. Kısacası, böyle bir devrede rezonans frekansı değişim gösterir. Doyuma giden bir demir nüvenin endüktansında meydana gelen ani değişim, rezonansın meydana geldiği frekansı da bir anda değiştirecektir.

Güç sistemlerinde ferreazonans, transformatörlerinde bulunduğu hatta yük gruplarından bazıları devre dışı kalmasıyla ya da transformatörlerin çok az yüklenmesiyle ortaya çıkabilmektedir [17]. Ferraci çalışmasında güç sistemlerinde ferreazonans oluşumunu mümkün kılan gereklilikleri, bir ac gerilim kaynağının varlığı, ferromanyetik endüktans, kapasitör, düşük değeri direnç ve bu ilk dördüne ek olarak, sistemde potansiyeli sabit olmayan bir noktanın varlığı olarak sıralamıştır [18].

Güç sistemlerinde meydana gelecek bir ferreazonans, Faz-faz ve faz-nötr arası aşırı gerilimlerin ya da devamlılık arz eden aşırı akımların oluşmasına, akım ve gerilim dalga şeklinde yüksek seviyede distorsiyona, transformatörlerde ısınma ve yüksek gürültüye, sisteme bağlı elektriksel ekipmanlarda ısı kaynaklı zarar ya da yalıtımsal hasara ve koruma elemanlarının yanlış açma-kapama yapmasına neden olabilir [19].

Ferreazonans olayı, elektrik güç sistemlerinde yeni ortaya çıkan bir olay değildir. Ferreazonans terimine 1900'lü yılların başında yapılan çalışmalarda dahi rastlanmaktadır [20]. Geçen süreç içinde güç sistemlerinde meydana gelen ferreazonans problemlerinin analizine yönelik çok sayıda çalışma literatürdeki yerini almıştır [21-24].

4. DAĞITIM SİSTEMLERİNDE REZONANSIN SAHA ÖLÇÜMLERİ YOLUYLA BELİRLENMESİ

Dağıtım sistemlerinde rezonans koşullarının ve rezonans meydana geldiği andaki sistem dinamiklerinin belirlenebilmesi konularını içeren çok sayıda çalışma, literatürde mevcuttur [14, 25, 26]. Bu çalışmaların önemli bir kısmı rezonansın oluşturulacak matematiksel modeller ile belirlenmesine yöneliktir. Buna göre, elektrik güç sisteminin yapısı incelendikten sonra, sistemde yer alan bütün bileşenlerin matematiksel modellerinin tanıtlanması gerekmektedir. Elde edilen sonuçların doğruluğu, kurulacak modeller ile doğrudan bağlantılı olacaktır.

Nitekim, matematiksel modelleme yoluyla yapılacak bir analizin daha başlangıçtan itibaren birtakım zorlukları içerdiği anlaşılmaktadır. Bir önceki bölümde, dağıtım sistemlerinde rezonans oluşumu konusu ele alınırken, üç fazlı sistemlerde her bir faz için rezonans koşullarının değişebileceği sebepleriyle açıklanmıştı. Dolayısıyla üç fazlı sistemler için kurulacak modellerde, sistem ya sekanslara ayrılarak incelenmeli ya da daha kolay ve bütünlüklü bir biçimde, sistem bileşenlerinin üç fazlı modelleri kullanılarak analiz gerçekleştirilmelidir.

Elektrik güç sistemlerinin teknik ilerlemelere bağlı olarak, giderek çeşitlenen sayıda bileşeni bünyesinde barındırması, analiz için gerekli üç fazlı bileşen modeli sayısını da arttırmaktadır. [27-29] numaralı kaynaklar, iletim ve dağıtım hatlarının üç fazlı modellerinin nasıl elde edilebileceğini konu edinmektedir. Buna göre, hatta ait iletken sayısı, iletkenlerin ortalama geometrik yarıçapı ve birim uzunluk başına direnç değeri bilgisine ihtiyaç duyulmakta, hesaplamalar için Carson tekniğinden faydalanılmaktadır. Uzunluğa ve iletken tipinin değişimine göre (yer altı kablosu veya havai hat olmasına göre) modellemede kullanılacak π -eşdeğer devre modelinin sayısı da değişim gösterecektir. Örneğin yer altı kablolarının kullanıldığı dağıtım hatlarında yüksek R/X oranı gözetilerek, hatlar birden fazla π -eşdeğer modelin birbirine seri konumlandırılmasıyla modellenilebilecek ve bu sayede, hat kapasitesi hat boyunca daha düzgün dağıtılarak, hesaplamaların doğruluk payı artacaktır [29]. [7, 27, 30-32] numaralı kaynaklar, transformatörlerin nasıl modellenmesi gerektiğini

konu edinmektedir. Buna göre elektrik güç sistemlerinde transformatörler, dengesiz yüklenme, faz kayıpları ve nüve kayıpları gözetilerek, en basit biçimleriyle, kaçak empedans değerleri üzerinden tanımlanan üç ayrı admitans matrisinin primer ve sekonder devrelerinin bağlantı şekline bağlı olarak yer değiştirmesiyle modellenmektedir. Primer ve sekonder devrenin dönüştürme oranı birden farklı ise, bu oranlar, primer ve sekonder devrenin öz admitans matrisi ve karşıt admitans matrisi içerisine dahil edilebilir. [7, 27] numaralı kaynaklar, kapasitörlerin modellenmesine değinmektedir. Buna göre kapasitörlere ait empedans, elektrik güç sistemlerinde, reaktif güç değerlerinin ve uçlarına uygulanan gerilimin bir fonksiyonu biçiminde modellenebilmektedir. [33] numaralı kaynak, farklı karakteristiğe sahip yüklerin modellenmesi konusunu ele almaktadır. Buna göre yükler delta ya da yıldız bağlı olmasına göre ve sabit güç, sabit akım, sabit empedans karakteristiklerinden birine sahip olmasına göre farklı biçimlerde modellenebilmektedir. Elektrik güç sistemlerinde yükler modellenirken, tek fazlı ya da çok fazlı olmaları dikkate alınarak modellenmeleri önemlidir.

Yukarıda bahsi geçen çalışmaların içeriğinden anlaşılacağı gibi, üç fazlı sistemlerde matematiksel modellerin elde edilmesi uğraş ve dikkat gerektiren bir çalışmanın ürünüdür. Yanı sıra, her bir modelin elde edilebilmesi için modellenmesi yapılacak sistem bileşeni ile ilgili birtakım bilgilere gereksinim duyulmaktadır. Pratikte bu her zaman mümkün olmamaktadır. Örneğin kurulu, faaliyette olan bir tesiste, kablo ya da iletken mesafelerinin tam kestirilememesi, yine bu iletkenlerin döşeme koşullarının her daim gözlenememesi, iletken ya da kablonun ortam sıcaklığına bağlı empedans değişikliklerinin kesin olarak hesaplamalara dahil edilememesi elde edilen sonuçlarda farklılıkların oluşmasına sebep olacaktır. Yük değişimlerinin sık olduğu ve kestirilemediği tesislerde, yüklere bağlı olarak değişen kompanzasyon ihtiyacı gereği kapasitörler devreye girip, çıkabilecek, beraberinde sistemin rezonans analizine yönelik modellerin sürekli değişkenlik göstermesi sonucunu doğuracaktır.

Bir başka önemli konu, elektrik güç sisteminde ya da rezonans analizi gerçekleştirilecek tesise ait iç tesisatta yapılması muhtemel bir değişiklik, değişiklik öncesi duruma ait üç fazlı sistem modelinin gözden geçirilmesini, yenilenmesi gereğini doğurur. Bunun gibi yapılacak her değişiklik sonucu, üç fazlı sistem modelinin yenilenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın ana amaçlarından biri olarak beliren rezonans esnasında kapasitörlerin emniyetli çalışma koşullarının irdelenmesi gibi bir amaç söz konusu ise, matematiksel modellemenin yanı sıra incelemenin gerçekleştirildiği elektrik güç sisteminin yapısına uygun bir yük akış algoritmasının seçimi ve kullanımı da bir başka zorunluluktur. Bu sayede rezonansın varlığının tespiti yanı sıra sistem bileşenlerinin rezonans esnasında maruz kaldığı gerilim ve üzerlerinden geçen akım değerleri de elde edilebilecektir. Literatürde farklı tipte güç sistemlerinde, harmonik frekanslar için uygulanabilir yük akış algoritmaları mevcuttur [34-39].

Matematiksel modellemenin ve yük akış uygulamalarının zorluklarından kaçınarak, kurulu bir tesiste yapılacak ölçümler aracılığıyla rezonansın mevcudiyetinin ve tipinin belirlenmesi mümkündür. Bu gibi bir uygulamanın beraberinde geliştirilip kullanılacak bir algoritmayla birlikte, elektrik güç sisteminde yaşanacak değişimlerin doğal sonucu olarak değişecek rezonans koşullarının, istenilen aralıklarla belirlenmesi, analizi ve kontrolü mümkündür. Bu fikrin çıkış noktası, literatürde harmonik empedans ölçümlemeye yönelik yapılan çok sayıda çalışma olmuştur [40-52]. Bu çalışmalarda yer alan yöntemler dikkatle incelenmiş, rezonansın özel koşulları dikkate alınarak saha ölçümleri yoluyla rezonansın mevcudiyetinin ve tipinin belirlenebileceği düşüncesi ortaya çıkmıştır.

Bölüm içeriğinde, harmonik büyüklüklerin ölçülmesi, ölçümler ile elde edilen veriler üzerinden harmonik empedans hesabına yönelik yöntemler ve bu yöntemlerin rezonansın tespitine yönelik kullanılması konuları ele alınacaktır.

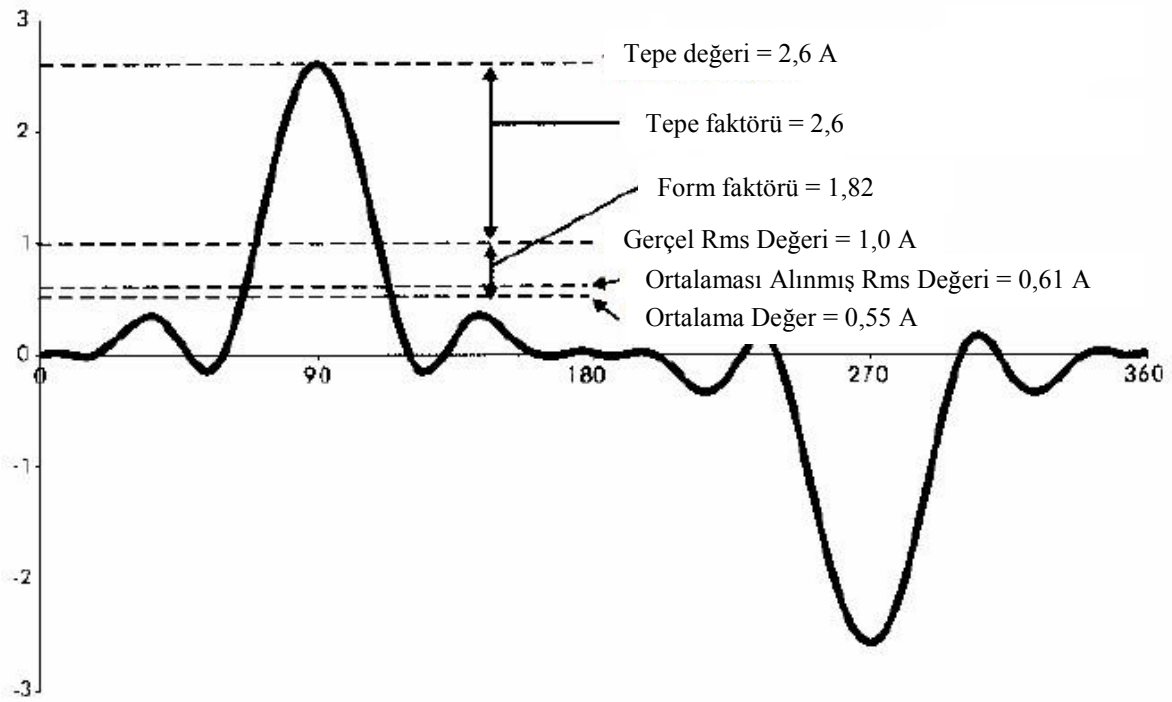
4.1 Harmonik Büyüklüklerin Ölçümü

Konvansiyonel metreler, genellikle sinüsoidal büyüklükleri okumak üzere tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan karakteristiğe sahip akım ve gerilim formlarını bu tip bir ölçüm cihazıyla ölçmek, yanlış sonuçlar doğurur.

Doğru ölçümleme için cihazın kalibrasyonu önem taşımaktadır. Konvansiyonel ölçüm cihazları, ortalama karesel değer (rms) esas alınarak kalibre edilir. Bilineceği üzere saf bir sinüs dalgasının rms değeri, tepe değerinin 0,707'si kadardır. Bir sinüs dalgasının genliğinin ortalaması alındığı takdirde, ortalama değer tepe değerinin 0,636'sı, rms değerinin ise yaklaşık 0,9'u kadar olacaktır.

Bir çok analog cihaz ve dijital çok fonksiyonlu ölçüm cihazı, “average reading, rms calibrated” yöntemine göre akım ve gerilim büyüklüklerini ölçümler. Bu yöntem, ortalama değer ile 2. Bölümde eşitlik 2.28 ile tanımlanan form faktörü değeri çarpılarak rms değerinin elde edilmesi esasına dayanır. Harmonik distorsiyon içeren bir dalga formu ancak “true rms” değeri baz alınarak kalibre edilen cihazlar aracılığıyla doğru ölçümlenebilir.

Konvansiyonel ölçüm cihazlarıyla harmonikli bir dalga formunun ölçülmesine yönelik zorluklar, şekil 4.1 ile gösterilmiştir. Şekil 4.1’de görülen dalga formu, bir anahtarlama gücü kaynağı tarafından çekilen akıma aittir. “True rms” değerine göre kalibre edilmiş ölçüm cihazıyla ölçülen akımın genliğinin gerçek değeri 1 A, tepe değeri 2,6 A ve ortalama değeri 0,55 A olarak belirlenmiştir. Aynı dalga formunun, “average reading, rms calibrated” tekniğine göre kalibre edilmiş konvansiyonel bir cihazla ölçülmesi sonrası elde edilen rms değeri ise 0,61 A olarak belirlenmiştir. Ölçülen akım değeri, gerçek değerden yaklaşık %40 daha azdır.



Şekil 4.1 : Konvansiyonel ölçüm cihazlarıyla sinüsoidal olmayan dalga biçimlerinin ölçümü.

Akım ölçümlemek için kullanılan standart toroid tipi akım transformatörlerinin yüksek kalitede olması bir başka önemli konudur. Bu tip bir akım transformatörünün geniş bant aralıklarında ölçüme imkan tanıyor olması, daha yüksek frekanslardaki

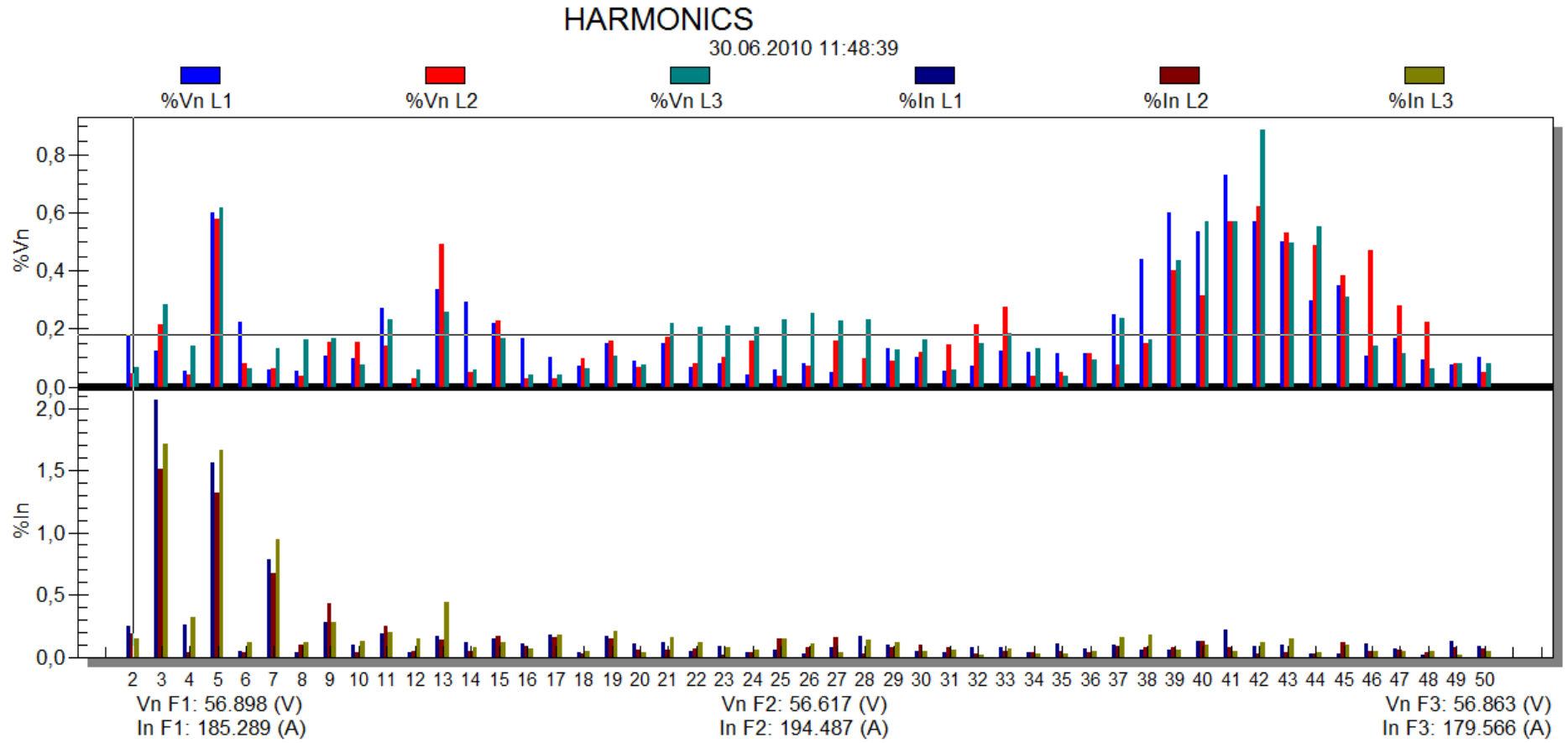
harmonik bileşenlerin ölçümü için gereklidir. Enerji analizörleri gibi harmonik bileşenleri ölçümlemeye imkan tanıyan çok sayıda taşınabilir cihaz, daha hafif ve pratik olmaları nedeniyle akım ölçümlemek üzere hall-effect sensörlerden faydalanmaktadır. Hall-effect sensörler yardımıyla analog olarak ölçümlenen veriler dijitalle çevrilerek enerji analizörü için işlevsel hale getirilmiş olur.

Bir enerji analizörünün genellikle 3 adet akım, 4 adet gerilim probu mevcuttur. Ölçüm yapılırken, problemlerin yalıtım dayanımları ve ölçüm hassasiyetleri dikkate alınarak seçilmesi güvenlik ve etkin bir sonuç için önemlidir. Özellikle akım problemlerinin ölçüm yapılan noktadan geçen akım değerine göre değişen kademelerine dikkat edilmelidir. Tesisin ölçüme tabii tutulacağı süre, cihazın dahili (ve bazı cihazlarda harici) hafızası elverdiği oranda mümkündür. Ölçüm hassasiyeti ve ölçüm süresi gözetilerek, cihazın bağlı bulunduğu noktadan alınacak örneklem aralığı ve sayısı değişebilir. Ölçüm yapılan tesisten toplanan veriler, bir bilgisayar yazılımı aracılığıyla analiz edilebilir.

Şekil 4.2’de, bir enerji analizörünün akım ve gerilim problemlerinin bağlantı biçimi görülmektedir. Şekil 4.3 ve 4.4 ise, toplanan verilerin kullanılan cihaza uygun bir arayüz aracılığıyla elde edilen grafiksel ve metinsel değerlerine ilişkindir.



Şekil 4.2 : AEMC 3945 enerji analizörü akım ve gerilim problemlerinin bağlantısı.



Şekil 4.3 : Üç faz gerilim ve akım harmonik bileşenleri, grafik arayüzü.

HARMONICS LIST [No.1 12/14 17:34:52.425 Ext (Stop)]						
CH1 VALUE iHarm OFF						
Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)	
1	100.00	18	0.23	35	0.94	
2	0.20	19	0.43	36	0.17	
3	0.63	20	0.40	37	0.60	
4	0.19	21	0.43	38	0.33	
5	0.37	22	0.22	39	0.22	
6	0.16	23	2.69	40	0.18	
7	0.49	24	0.25	41	0.20	
8	1.02	25	2.13	42	0.26	
9	0.54	26	0.40	43	0.09	
10	1.18	27	0.40	44	0.29	
11	8.12	28	0.22	45	0.09	
12	0.31	29	0.37	46	0.21	
13	6.03	30	0.27	47	0.21	
14	0.40	31	0.14	48	0.09	
15	0.57	32	0.39	49	0.06	
16	0.21	33	0.24	50	0.19	
17	0.66	34	0.24	THD	11.05 (%)	

Şekil 4.4 : 12 darbeli sürücünün harmonik akım bileşenleri, analizör metin arayüzü.

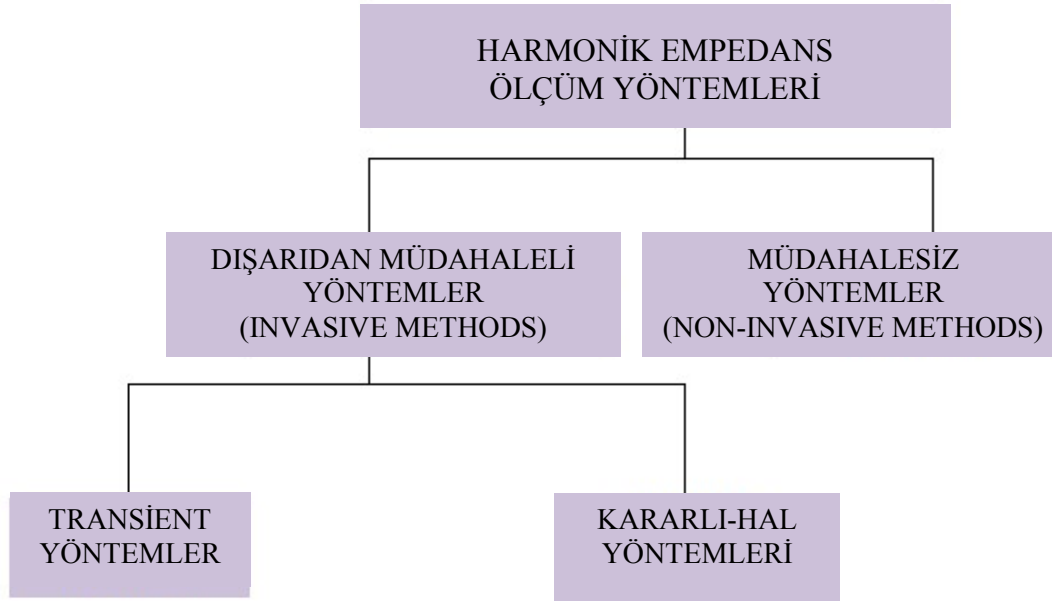
Son olarak, ölçüme dönük bazı hazırlıkların ölçüm öncesinde yapılması, doğru ve etkin bir ölçümün gerçekleştirilmesi adına önemlidir. Örneğin, harmonik üretmesi muhtemel yüklerin ve bağlantılarının belirlenmesine yönelik, ölçüm yapılacak tesisin gezilmesi ve tesise ait tek hat şemasının incelenmesi fayda sağlayacaktır.

4.2 Ölçüm Yoluyla Harmonik Empedansın Belirlenmesi

Ölçüm yoluyla harmonik empedansı belirlemeye yönelik çok sayıda yöntem literatürde yer edinmiştir [40-55] fakat uygulanış kolaylığı ve maliyet parametreleri esas alınarak sağlanmış bir konsensus söz konusu değildir. Her bir yöntemin kendine göre avantajlarının ve dezavantajlarının olduğu görülmektedir. Literatürde kabul gören yöntemler özetle, şekil 4.5’deki biçimiyle şematize edilebilir.

Müdahalesiz yöntemler (non-invasive methods), şebeke akım ve gerilimlerinde dinamik yük koşulları ve mevcut harmonik kaynaklarından kaynaklanan salınımlardan yararlanarak empedans ölçümünü amaçlar. Anlaşılacağı üzere harmonik kaynağı yüklerin mevcudiyeti, yöntemin uygulanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Dışarıdan müdahaleli yöntemler ise özetle, şebeke işleyişinde kasıtlı değişikliklere neden olarak şebeke harmonik empedansını ölçümlemeyi amaçlar. Harmonik kirliliğin olmadığı veya ölçüm için yetersiz olduğu şebeke koşullarında dışarıdan müdahaleli yöntemler (invasive methods)’den faydalanılabilir. Dışarıdan müdahaleli yöntemler, transient ve kararlı-hal uygulamaları olarak iki farklı biçimde incelenebilir.



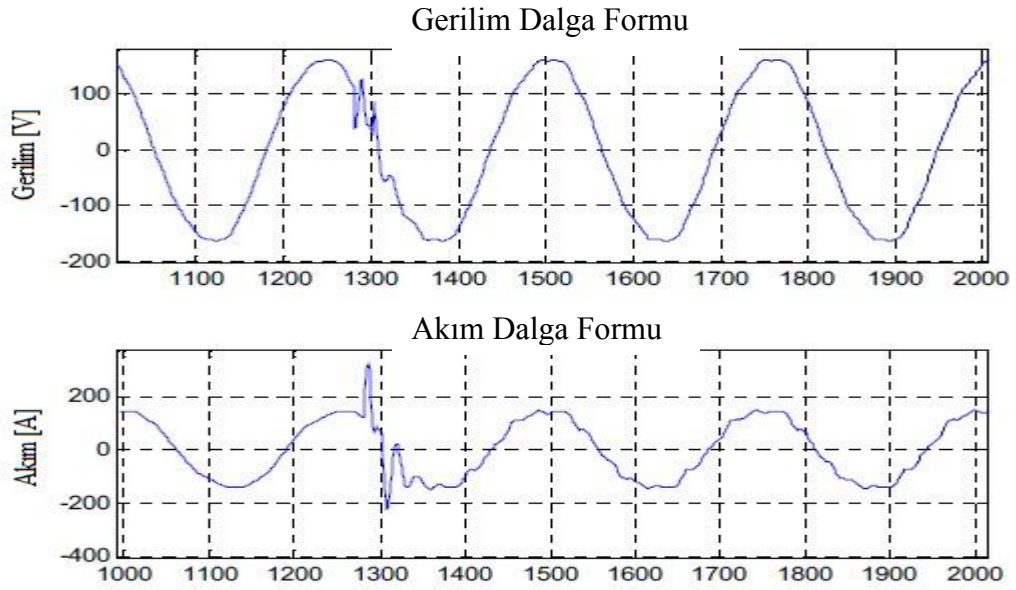
Şekil 4.5 : Harmonik empedansı ölçüm yoluyla belirlemeye yönelik yöntemler.

4.2.1 Transient yöntemler

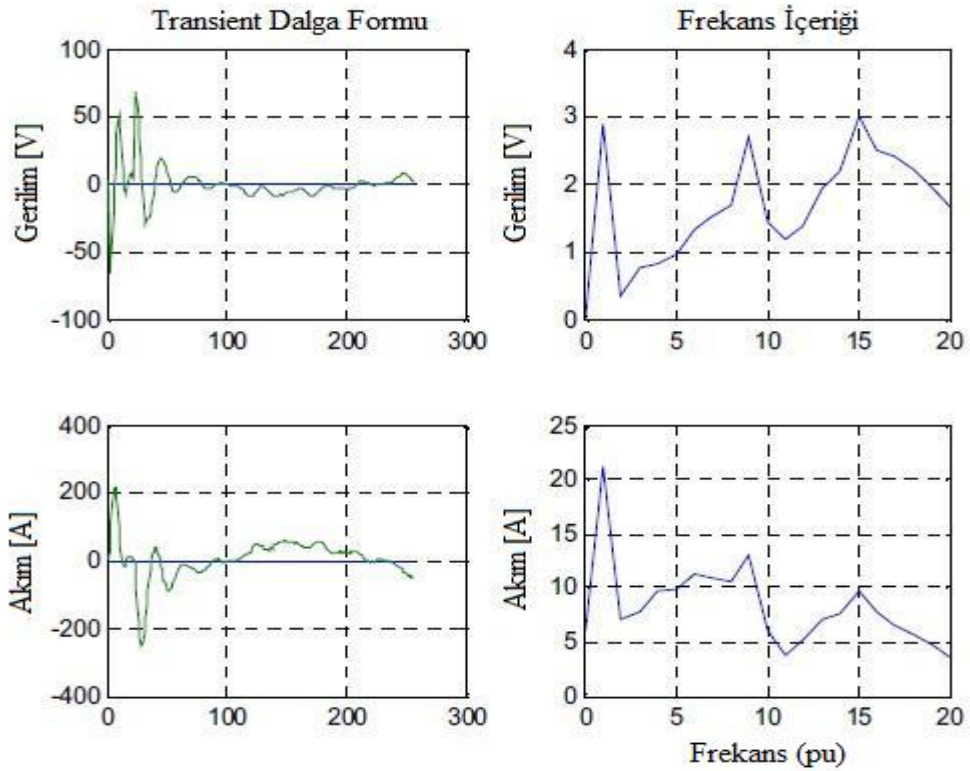
Dağıtım sisteminde yapılacak değişimler, sistem dinamiklerinde transient değişimleri de beraberinde getirecektir. Küçük zaman aralıklarındaki değişimleri ölçümlemeye imkan tanıyacak bir ölçüm ekipmanı ile akım ve gerilimlerdeki değişimleri veri halinde depolayarak, harmonik empedansı belirlenebilir. Bir dağıtım sisteminde bu tip transient değişimlere yol açması muhtemel en önemli üç eleman, kapasitörler, transformatörler ve güç elektroniği cihazlarıdır.

Bir kapasitör grubunun doğrudan devreye alınması, sistemde anlık bir kısa devre oluşumuna neden olur. Bunun sonucu olarak da geniş bir frekans aralığında akım sinyali elde edilecektir. Referans [43, 53, 54]’le belirtilen çalışmalarda, böyle bir akım sinyali elde etmek üzere kapasitörlerin anahtarlanmasından faydalanılmaktadır.

Şekil 4.6’da, bir kapasitör grubunun anahtarlanması sonrası oluşan tipik akım ve gerilim dalga formları görülmektedir. Şekil 4.7’de ise, transient dalga formu grafiği ve bunlara ait spektral içeriğe yer verilmiştir [54].



Şekil 4.6 : Kapasitörün anahtarlanmasıyla akım ve gerilim dalga biçiminde gözlenen değişimler.



Şekil 4.7 : Transient dalga şekilleri ve spektral içerikleri.

Transformatörlerin devreye alınması, manyetik devrelerinin doyumuna neden olabilir. Transformatörlerin enerjilendirilmesi esnasında ise, anahtarlama anına bağlı olarak yüksek transient akımlar oluşabilir. Oluşan bu transient akımlara darbe

akımları adı verilir ve geniş bir frekans aralıkta, yüksek genlikli içeriğe sahiptir [55]. Mevcudiyetleri birkaç periyottan birkaç dakikaya kadar varabilir.

Transient sinyaller elde etmeye yönelik diğer bir alternatif ise, güç elektroniği ekipmanlarının kullanımıdır. Referans [41], bir dönüştürücü devresinden faydalanarak, sisteme kontrollü akım darbeleri enjekte etmektedir. Güç elektroniği ekipmanlarının ateşleme açılarının ayarlanabiliyor olması, ([41] numaralı kaynak çalışmada konvertör devresindeki tristörlerin ateşleme açıları kontrol edilmektedir) anahtarlama işleminin de kontrollü gerçekleşmesine olanak verir. Transient sinyallerin büyüklüğü anahtarlama anına bağlı olması, dağıtım sisteminin yapılacak ölçümün amacına uygun spektral içerikte kirletilmesi avantajını sağlar.

Bozucu dalganın oluşumuyla birlikte, ölçümlenen akım ve gerilim değerleri, Fourier dönüşümü yardımıyla temel frekans ve harmonik frekanslar için açı ve genlik değerlerine ayrılabilir. Her bir frekans için empedans değeri akım ve gerilim arasındaki temel bağıntıdan hareketle elde edilir (4.1).

$$Z(f) = \frac{V(f)}{I(f)} \quad (4.1)$$

Bu yöntemin dikkat gerektiren en önemli yönü, ölçüm ile toplanan ve sonrasında işlenen verilerden hareketle doğru bir sonuca varılmasıdır. Kaynak gerilimindeki bozulmalardan kaynaklanabilecek yanlış hesaplamaları ortadan kaldırmak amacıyla iki farklı anda veri toplanması genel yaklaşım olarak benimsenmektedir. Birinci veri kümesi, darbe akımı enjekte edilmeden hemen önce, ikinci veri kümesi ise transient değişimlerden elde edilir.

4.2.2 Kararlı-hal yöntemleri

Kararlı-hal yöntemleri, transient yöntemlerden farklı olarak, harmonik empedansı belirlemek üzere transient akım ve gerilim sinyallerinden yararlanmaz. Onun yerine, kararlı haldeki, yani şebekedeki bozulma öncesi ve sonrası akım, gerilim sinyallerine ait verilerden hareket ederek harmonik empedansı belirler. Sık başvurulanan kararlı-hal yöntemleri arasında, yardımcı empedans yöntemi, harmonik akım kaynağı ile akım enjeksiyonu, hibrid yöntemler, kapasitörlerin anahtarlama öncesine ve sonrasına ait dağıtım sistemi kararlı-hal durumunun incelenmesi yer almaktadır.

Yardımcı empedans yönteminde, yeni bir kararlı-hal durumu betimlemek üzere yardımcı bir empedanstan faydalanılır [44]. Yüksüz konumda, gerilime ait harmonik spektrum elde edilir. Değeri bilinen yardımcı empedans devreye alındığında, empedans üzerine düşen gerilim ve üzerinden akan akıma ait harmonik spektral içerik elde edilecektir. Böylece, fazörel analizden, harmonik empedansı belirlemek üzere şu şekilde yararlanılır [44]:

$$R_h = \frac{E_h \cos \alpha - R_{\text{haux}} I_h}{I_h} \quad (4.2)$$

$$X_h = \frac{E_h \sin \alpha - X_{\text{haux}} I_h}{I_h} \quad (4.3)$$

Denklemlerde h indisi harmonik sıra sayısını, α ise akım ve gerilim arasındaki açığı belirtmektedir.

Harmonik akım kaynağı ile akım enjeksiyonu, sık başvurulanan yöntemlerden biri olup, elde edilen sonuçların ne kadar sağlıklı olduğu şüphe gerektirir. Yöntemin ana fikri, bilinen bir harmonik akım kaynağı tarafından ölçüm yapılacak şebekeye harmonikli akım bileşenlerinin enjekte edilmesidir [44]. Harmonikli akım kaynağı devreye alınmadan önce, elektrik güç sistemine enerji sağlayan kaynağın gerilimin herhangi bir distorsiyon içermediği varsayımından hareket eder. Harmonik empedans eşitlik 4.1 ile belirlenir.

Yöntemin iki ana dezavantajından söz edilebilir. Birincisi bahsedildiği üzere, kaynak geriliminin yüksüz konumdayken, harmonik distorsiyon içermediği varsayımdır. Aksi takdirde, sonuç kaynağın içerdiği distorsiyona bağlı olarak, hatalı elde edilir. İkinci dezavantaj, harmonik akım kaynağının spektral içeriği ile ilgilidir. Belirlenecek harmonik empedans değerleri, sadece harmonik akım kaynağı tarafından enjekte edilen akıma ait frekanslar için hesaplanabilir.

Hibrid yöntem, yukarıda bahsi geçen iki yöntemin bazı özelliklerini birleştirerek kullanmaktadır [44]. Yöntem gereği kaynak baraya ait akım ve gerilimler yüksüz konumda ölçülür, bir yandan da bir harmonik akım kaynağı yardımıyla sisteme harmonik akım bileşenleri enjekte edilir. Fazörel analizlerden kaynağa ait harmonik empedans aşağıdaki eşitlikler kullanılarak belirlenir:

$$R_h = \frac{V_h \cos \beta_1 - E_h \cos \beta_2}{I_h} \quad (4.4)$$

$$X_h = \frac{V_h \sin \beta_1 - E_h \sin \beta_2}{I_h} \quad (4.5)$$

Yardımcı empedans yöntemindeki α 'ya benzer biçimde β_1 ve β_2 açıları da, anahtarlama öncesi ve sonrası koşullara bağlı açılardır.

Şebeke kararlı-hal durumuna ait yukarıda bahsi geçen üç yöntem de, kaynak geriliminin harmonik spektral içeriği ile ilgili kabullere dayanan yöntemlerdir. Bu kabuller sistem dinamiklerine bağımlı olmaları itibarıyla her zaman doğru sonuçlar vermeyebilir. Kapasitörlerin anahtarlanması öncesine ve sonrasına ait dağıtım sistemi kararlı-hal durumunun incelenmesi ile kararlı-hal durumunda, daha doğru sonuçlar elde etmek mümkün gözükmemektedir. Bir şönt kapasitör grubunun anahtarlanması ile ortak bağlantı noktasında, anahtarlama öncesi ve sonrası akım ve gerilimlerine ait kararlı-hal dalga biçimlerinden hareketle, eşdeğer empedans aşağıdaki eşitlik ile belirlenir (4.6):

$$Z_{eq-h} = \frac{V_{h-post} - V_{h-pre}}{I_{h-post} - I_{h-pre}} = \frac{\Delta V_h}{\Delta I_h} \quad (4.6)$$

4.3 Tüketici Tarafında Rezonansın Ölçüm Yoluyla Belirlenmesi

Ölçüm yoluyla harmonik empedansın belirlenmesi mümkün olduğu gibi, harmonik empedansı belirlemeye yönelik bu çalışmalardan yola çıkarak tüketici tarafında meydana gelebilecek bir rezonansın belirlenmesi de mümkündür.

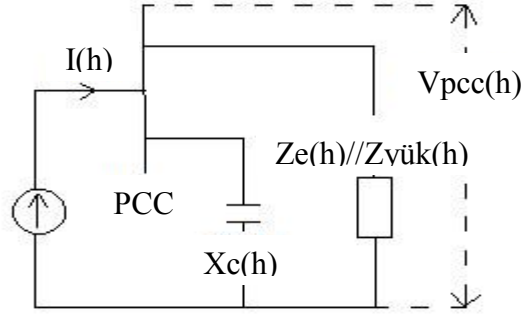
Özetlemek gerekirse, bölüm 4.2 içeriğinde ele alınan harmonik empedans ölçüm yöntemleri, dışarıdan müdahaleli ve müdahalesiz olarak ikiye ayrılmıştır. Dışarıdan müdahaleli yöntemlerde, bir dış etken sonucu yaratılan geçici, bozucu dalga söz konusudur. Transient yöntemler, bu geçici, bozucu dalganın geniş frekans aralıklarındaki harmonikli akım ve gerilim bileşenlerinin ölçülmesini ve aralarındaki matematiksel ilişkiden yola çıkarak empedansın belirlenmesini amaç edinirken, kararlı-hal yöntemleri, geçici, bozucu dalganın öncesi ve sonrasına ait kararlı hal durumundaki akım ve gerilim bileşenlerinin ölçülmesini ve yine aralarındaki matematiksel ilişkiden yola çıkarak empedansın belirlenmesini amaç

edinir. Bu bağlamda, geçici, bozucu dalganın spektral içeriğinin ve kontrolünün, ölçümcü tarafından belirlenebiliyor olması bu yöntemin avantajıdır. Bu sayede geniş bir frekans aralığında, harmonik empedansın ölçüm yoluyla belirlenmesi mümkündür.

Müdahalesiz yöntemler ise, ölçüm yapılacak sistem dahilindeki doğrusal olmayan karakteristiğe sahip yüklerin dağıtım sisteminde neden olduğu bozulmalardan yola çıkarak harmonik empedansı hesaplamayı amaçlar. Harmonik empedansın ölçüm yoluyla hesabı söz konusu olduğunda, müdahalesiz yöntemlerin, dışarıdan müdahaleli yöntemlere kıyasla dezavantajı olduğu söylenebilir. Nitekim, hesaplanacak harmonik empedans değeri, harmonik frekanslarda ölçülen akım ve gerilim bileşenlerine ait değerlerden yararlanılarak hesaplanır. Bir başka deyişle, ölçüm yoluyla elde edilen harmonik empedanslar, sadece, doğrusal olmayan karakteristiğe sahip yük ve işletme elemanlarının ölçüm yapılan sisteme enjekte ettiği akım-gerilim sinyallerinin frekanslarında hesaplanabilir. Ölçüm sonrası toplanan verilerin, dar bir spektral içeriğe sahip olması, araştırmacının tercih ettiği yöntemin yetersiz olduğu sonucunu doğurabilir.

Söz konusu bir dağıtım sistemi üzerinden beslenen tüketicinin ortak bağlantı noktasına konumlandığı kapasitör gruplarından kaynaklı bir rezonansın oluşup oluşmadığının belirlenmesi olduğunda, durum farklı bir hal alır. Bu noktada, bizim için önemli olan mevcut harmonik distorsiyon ve empedans ilişkileri altında rezonansın var olup olmadığının tespiti ve eğer var ise etkilerinin gözlemlenebilmesidir. Dışarıdan müdahaleli yöntemler kullanılarak oluşturulacak zorlama rezonans durumu, dağıtım sisteminin genel işletme koşullarıyla ilişkili olmayıp, dilenirse sisteme ait rezonans frekansının belirlenmesi amacıyla kullanılabilir. Aksi takdirde, müdahalesiz yöntemlerin benimsediği ilkeler, çalışma açısından daha uygun düşmektedir.

Şekil 3.9’da yapısı özetlenen elektrik güç sisteminde, daha önceden bahsedildiği üzere, rezonans çoğunlukla hat ve transformatörlerin endüktif eşdeğer reaktansı ile dağıtım sisteminin tüketici tarafında kompanzasyon amaçlı konumlandırılan kondansatör grubunun kapasitif reaktansı arasında meydana gelir. 3.11’de sunulan eşdeğer devrenin ortak bağlantı noktasına göre en basit eşdeğeri şekil 4.8 ile verilmiştir.



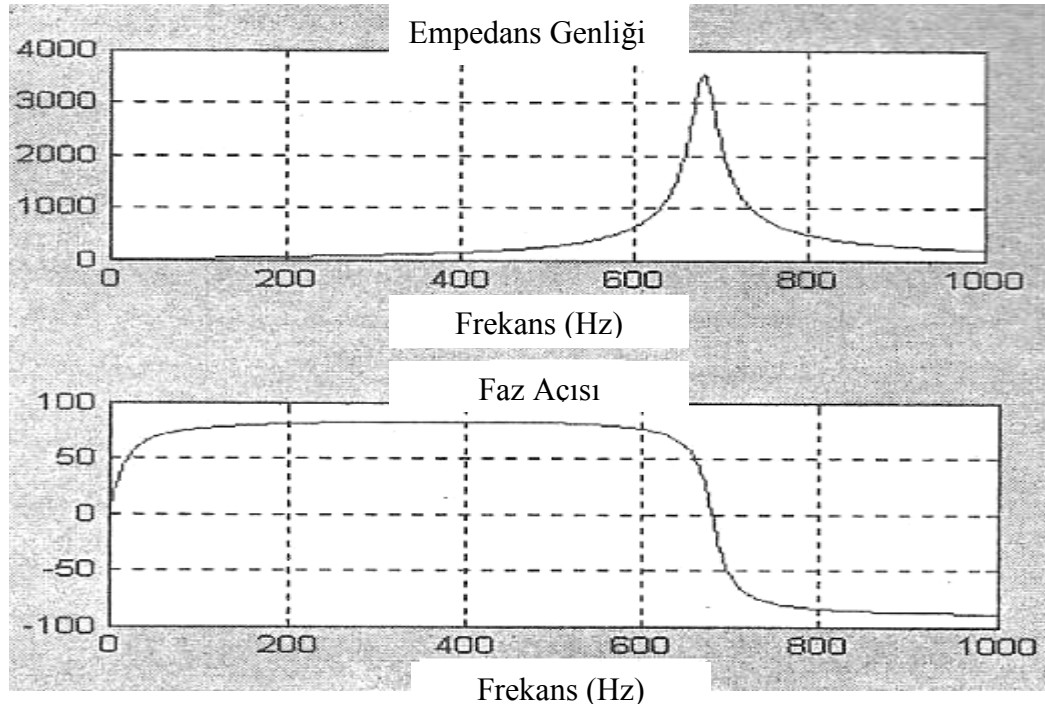
Şekil 4.8 : Eşdeğer devrenin basitleştirilmiş biçimi.

Şekil 4.8’de $I(h)$, ilgili harmonik frekansta doğrusal olmayan yük tarafından sisteme enjekte edilen akım bileşenini, $V_{pcc}(h)$ ise, ortak bağlantı noktasında ölçülen gerilim bileşenini betimlemektedir. Harmonik frekanslarda empedans belirlemeye yönelik çalışmalardan hareketle, ortak bağlantı noktasındaki sistem eşdeğer empedansı aşağıdaki biçimiyle elde edilir (4.7):

$$Z_{\text{sistem}}(h) = \frac{V_{pcc}(h)}{I(h)} \quad (4.7)$$

Bir rezonans söz konusu olduğunda ise, bölüm 3.2.2’de detaylı biçimde anlatıldığı üzere, paralel rezonansın özel durumundan hareketle elde edilecek $Z_{\text{sistem}}(h)$ değerinin genliği maksimum değerine ulaşacak, faz açısı rezonansın oluşumu sonrasında işaret değiştirecektir.

Şekil 4.9’da şekil 4.8 ile gösterilen eşdeğer devre için 650 Hz frekansta, yani temel bileşen frekansının 50 Hz olduğu şebeke koşulları için 13. harmonik bileşende paralel rezonansın oluşması durumu görülmektedir. $Z_{\text{sistem}}(h)$ 650 Hz’de maksimum değerine erişirken, empedansa ait faz açısı rezonansın oluşması sonrasında işaret değiştirmiştir. İşaret değişiminin gerçekleşeceği frekans değeri, elektrik güç sisteminin omik direncine bağlı olarak değişim gösterir.



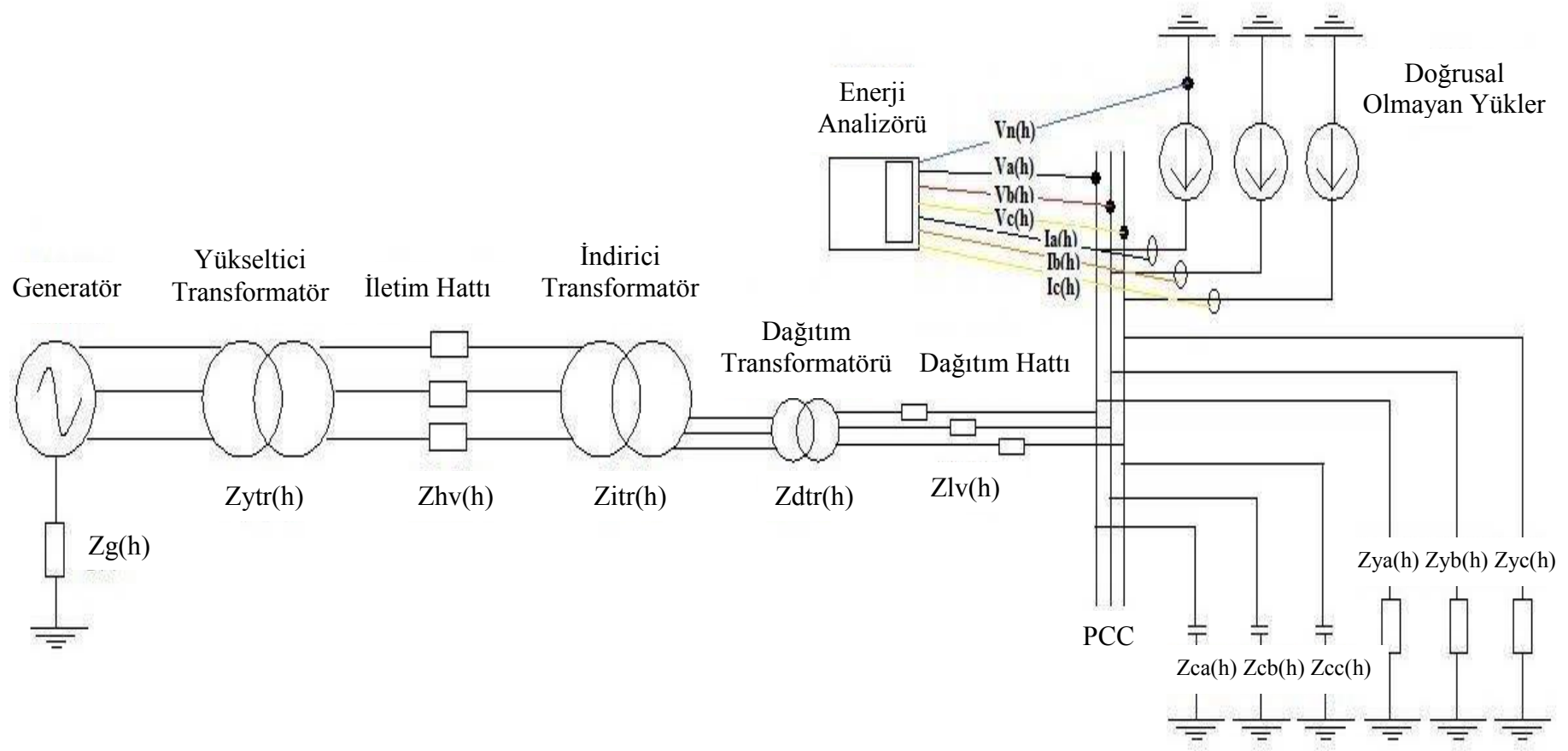
Şekil 4.9 : $Z_{\text{sistem}}(h)$ 'ın rezonans oluşumu durumunda genlik ve faz açısında gözlenen değişimler.

Dağıtım sisteminde olası bir seri rezonans oluşumunun da ölçüm yoluyla belirlenmesi mümkündür. Bölüm 3.2.1'de seri rezonans tanımlanırken, seri rezonans oluşumunun teşkil ettiği bazı kendine özel koşullardan bahsedilmiştir. Kısaca hatırlatmak gerekirse, seri rezonans durumunda, doğrusal olmayan yük tarafından devreye enjekte edilen harmonik akım bileşeni ile devre uçlarında ölçülecek gerilim, rezonansın olduğu frekans için aynı fazdadır. Paralel rezonanstaki farklı olarak, eşdeğer devre empedansı diğer frekanslardaki değerine oranla minimum değerini alacaktır. Dağıtım sistemi özelinde seri rezonans, tüketici tarafında ortak bağlantı noktasına bağlı bulunan doğrusal olmayan yüklere ait branşman kolundan ölçülecek akım ile ortak bağlantı noktasında ölçülecek gerilimin, aynı faz açısına sahip olduğu durumda belirlenecek, ölçülen değerlerden hareketle eşitlik 4.7 kullanılarak hesaplanan eşdeğer sistem empedansının minimum değerini aldığı görülecektir.

Üç fazlı sistemlerde, gerek sistem ve yük empedanslarının fazdan faza farklılık göstermesi, gerek fazlar arasındaki harmonik spektral içeriğin birbirinden farklılık göstermesi ve gerekse kompanzasyon amaçlı konumlandırılan kapasitör gruplarının reaktif yük ihtiyacına göre devreye alınması sonucu fazlar arasındaki muhtemel dengesiz yüklemelerden kaynaklı gözlenebilecek farklı değerlerde kapasitif reaktans değerleri nedeniyle ortak bağlantı noktasına göre sistem eşdeğer empedansı, fazlar arasında farklı değerlerde hesaplanacak, rezonans koşulları da bunun doğal bir

sonucu olarak değişecektir. Bir başka deyişle, bir faz için belirlenen rezonans frekansı ve koşulları diğer fazlar için geçerli olmayacaktır. Bu nedenle her bir faz için akım ve gerilim değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir.

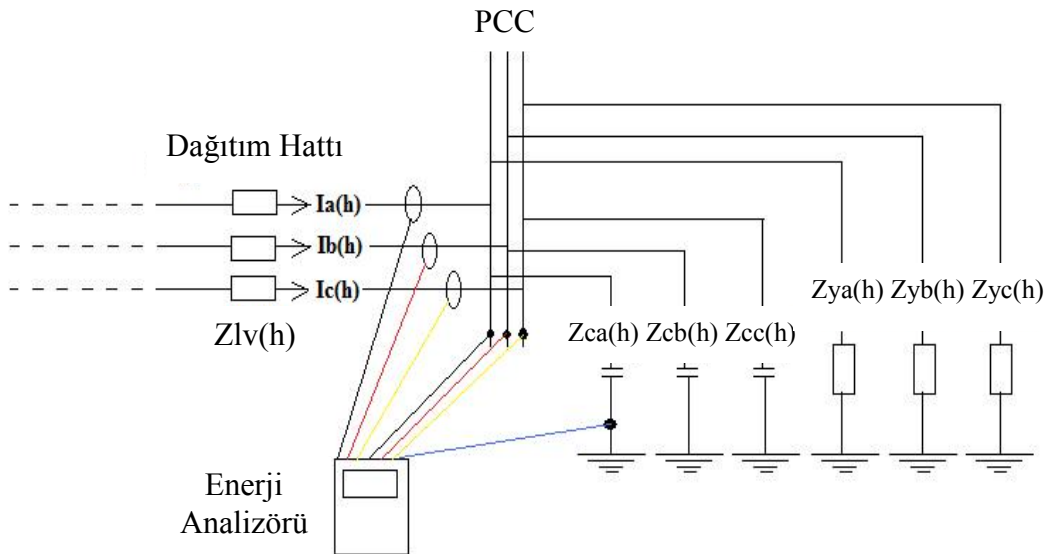
Bir dağıtım sisteminde, tüketicisi tarafında, ortak bağlantı noktasına bağlı doğrusal olmayan yüklerin varlığı söz konusu ise, kompanzasyon amaçlı konumlandırılan kapasitör grupları ile ortak bağlantı noktasına göre elektrik güç sisteminin eşdeğer empedansı arasındaki rezonansı belirlemeye yönelik yapılacak ölçüm, şekil 4.10 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : Üç fazlı sistemde tüketici tarafında doğrusal olmayan yüklerin bulunması halinde rezonansı belirlemeye yönelik yapılacak ölçüm.

Bir dağıtım sisteminde gözlenen harmonikler, tüketicinin kendi ortak bağlantı noktasına bağlı, doğrusal olmayan yüklerden kaynaklı olmayabilir. Bir başka tüketicinin doğrusal olmayan yüklere sahip olması durumunda, bu yüklerin üreteceği harmonik bileşenler dağıtım şebekesine bağlı diğer tüketicilerin elektrik güç sistemine etki edebilir. Sözü edilen yapı, dağıtım sistemlerinde rezonans oluşumu başlığı altında bölüm 3.3'te incelenmişti. Bu durumda tüketicinin ortak bağlantı noktasına dağıtım transformatörü ile dağıtım hattı üzerinden erişecek harmonik bileşenlerin neden olacağı rezonans, şekil 3.13'te sunulan eşdeğer devre şeması üzerinden incelenmiştir. Şekilde $I(h)$, dağıtım sistemi üzerinden bir numaralı tüketicinin elektrik güç sistemine enjekte edilen harmonik akım bileşenini temsil etmektedir. Ortak bağlantı noktasına göre bakıldığı zaman, yüklere ait empedans ile kompanzasyon amaçlı konumlandırılan kapasitör grubu arasında belirli bir frekansta paralel rezonansın oluşabileceği görülecektir. Bu tip bir rezonansın ölçüm yoluyla tespiti mümkündür. Zira, rezonans halinde $I(h)$ harmonik akım bileşeni ile ortak bağlantı noktası uçlarında ölçülen gerilim bileşeni aynı fazda olacaktır. Eşitlik 4.7'den yararlanarak belirlenecek empedans değerinin rezonans esnasında, genliği maksimum değerine erişecek, faz açısı sıfır olacaktır.

Şekil 4.11'de üç fazlı sistemde, şebeke tarafından bir numaralı tüketici tarafına harmonik akım bileşenlerinin akmakta olduğu durum için, rezonans koşullarının belirlenmesi amacıyla yapılacak ölçüm gösterilmektedir.



Şekil 4.11 : Dağıtım sistemi üzerinden tüketici tesisatına harmonik bileşenlerin aktığı durum için rezonansın belirlenmesi amacıyla yapılacak ölçüm.

Özetle, elektrik güç sistemlerinde, müşteri tarafında yapılacak bir dizi ölçümle rezonansın ve rezonans etkilerinin belirlenmesi mümkündür. Bu bağlamda, ölçümün yapılacağı yerin doğru seçilmesi önem arz eder. Tüketici tarafında belirlenebilecek rezonans, ölçüm yapılacak yer itibarıyla ikiye ayrılabilir. Bunlardan birincisi tüketicinin ortak bağlantı noktasına bağlı doğrusal olmayan yüklere sahip olması durumunu içerir. Kompanzasyon amaçlı konumlandırılan kapasitör gruplarına ait kapasitif reaktans ile elektrik güç sistemine ait eşdeğer empedans arasında belirli bir frekansta oluşacak rezonansı belirlemeye yönelik gerçekleştirilecek ölçüm şekil 4.10 ile gösterilmiştir. İkinci durum ise, elektrik güç sistemine bağlı bir başka tüketicinin doğrusal olmayan yüklere sahip olmasına ilişkindir. Bu yüklerin elektrik güç sistemine enjekte edeceği harmonik bileşenler, sisteme bağlı diğer tüketicileri de etkiler. Dağıtım transformatörü ve dağıtım hattı üzerinden sisteme bağlı diğer bir tüketiciye ulaşan harmonik bileşenler, ortak bağlantı noktasında birbirine paralel konumlandırılmış yük empedansı ile kapasitör grubu arasında rezonans oluşumuna sebep olabilir. Bu gibi bir rezonansın belirlenmesine yönelik yapılacak ölçüm, şekil 4.11 ile gösterilmiştir.

Müşteri tarafında rezonansın varlığı tespit edildikten sonra, rezonans tipinin ayrımı ölçüm noktasına göre belirlenen eşdeğer harmonik empedansın hesaplanmasıyla mümkündür. Ölçümden elde edilen akım ve gerilim bileşenlerine ait veriler ve eşitlik 4.7 yardımıyla eşdeğer harmonik empedans hesaplanabilir. Mevcut her bir harmonik bileşen için hesaplanan empedans değerinin genliği, seri rezonans söz konusu olduğunda rezonansın meydana geldiği frekans için minimum değerini erişirken, paralel rezonans esnasında tam tersi biçimde maksimum değerine ulaşacaktır.

Üç fazlı sistemlerde her faza ait eşdeğer empedans fazdan faza farklılık göstereceği gibi, fazların yük durumuna bağlı olarak reaktif gücü kompanze etmek üzere konumlandırılan kapasitör reaktansları da farklı değerlerde olabilir. Bu nedenle her bir faza ait rezonansın belirlenmesi, yapılacak üç fazlı ölçümler sonucu mümkün olacaktır.

5. REZONANS ESNASINDA KAPASİTÖRLERİN GÜVENLİ ÇALIŞMA KOŞULLARININ BULANIK MANTIK İLE BELİRLENMESİ

5.1 Rezonansın Kapasitörler Üzerindeki Olumsuz Etkileri

Rezonansın kapasitörler üzerindeki olumsuz etkileri, rezonansın meydana geldiği frekanstaki harmonik bileşenlerin büyüklüğüne ve rezonansın tipine göre değişiklik gösterir. Rezonans esnasında meydana gelebilecek etkiler aşağıdaki şekilde sıralanabilir [56]:

- Kapasitör uçlarında aşırı gerilimlerin oluşması
- Kapasitörler üzerinden aşırı akım geçmesi
- Kapasitörlerin aşırı reaktif yüklenmesi.

5.1.1 Kapasitör uçlarında aşırı gerilimlerin oluşması

Harmonik distorsiyonun mevcut olduğu durumlar için, tüketicinin ortak bağlantı noktasına konumlandırılan kapasitör uçlarında aşırı gerilimlerin oluşumu gözlemlenebilir. Bölüm 4.3 içeriğinde, şekil 3.9’da genel yapısı özetlenen elektrik güç sisteminin 13. harmonikte rezonansa girmesi ile eşdeğer sistem empedansında gözlemlenen değişime ilişkin örnek sunulmuştur. Şekil 4.9’da paralel rezonansın oluşumuyla sistem empedansının oldukça büyük değerlere eriştiği görülmektedir. Özellikle rezonansın meydana geldiği frekansta, doğrusal olmayan yükler tarafından sisteme enjekte edilen harmonik akım bileşeni değerleri büyük değerlerde ise (örneğin ele alınan örnek için, ortak bağlantı noktasına bağlı harmonik kaynağı yükün büyük güçlü bir 12 darbeli doğrultucu devresi olduğunu düşünelim. Bu durumda 13. harmonik bileşene ait akım değerleri oldukça büyük değerlere erişecektir) bu durumda, ortak bağlantı noktasında aşırı gerilimlerin oluştuğu gözlemlenecektir. Kapasitör uçlarında meydana gelecek bu gibi aşırı gerilimler, kapasitörler için tehlike teşkil ederek, dielektrik malzemelerinde zorlanmalara neden olur.

Seri rezonansa, daha önceden de bahsedildiği gibi, elektrik güç sistemlerinde nadiren rastlanmaktadır. Seri rezonans oluşumu söz konusu ise, bölüm 3.2.3’te değinilen

rezonans devresi kalite katsayısına bağılı olarak kapasitör uçlarında aşırı gerilimler oluşur. Eşitlik 3.18'in düzenlenmesiyle aşağıda elde edilen eşitlikler, seri rezonans durumunda kalite katsayısına bağılı olarak kapasitör uçlarında oluşacak aşırı gerilimleri tanıtlamaktadır (5.2).

$$Q_r = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(\frac{L}{R} \right) = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.1)$$

$$V_c = IX_c = I/(\omega_r C) = \frac{R}{\omega_r C} = Q_r V \quad (5.2)$$

V_c : Kapasitör uçlarına düşen gerilim,

V : Kapasitör, endüktans ve dirençten oluşan seri RLC devrenin uçlarına düşen gerilim değeridir.

V_c değeri, rezonans esnasında, kaynak gerilimi değerinin oldukça üzerinde değerlere erişebilir. Seri rezonans devreleri için Q , “devre büyütme faktörü” olarak da isimlendirilmektedir [57].

5.1.2 Kapasitörler üzerinden aşırı akımların geçmesi

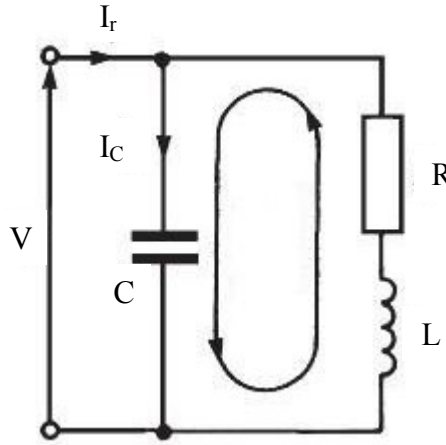
Seri rezonansın meydana geldiği durumlar için, sistem eşdeğer empedansının minimum değerini alacağı, bölüm 4.3 içeriğinde açıklanmıştı. Harmonik distorsiyonun elektrik güç sistemi dahilinde yüksek miktarda bulunduğu durumlarda, seri rezonansın oluştuğu frekans için büyük değerli akımların kapasitör üzerinden geçmesi söz konusudur. Oluşacak aşırı akımlar kapasitörler dahil, üzerinden geçeceği bütün sistem bileşenleri için ısıl zorlanmalara yol açacaktır.

Paralel rezonansın meydana geleceği sistem için de kalite katsayısı önem teşkil etmektedir. Zira, kalite katsayısı paralel rezonans devresinde akım yükselişinin bir ölçütüdür [13]. Eşitlik 5.2'den yararlanarak aşağıdaki eşitlik elde edilecektir (5.3):

$$I_c X_c = Q_r V \quad (5.3)$$

Eşitlikten görüleceği üzere, paralel rezonans esnasında kapasitör uçlarındaki gerilimin değerinin yükselmesiyle beraber, sistemin yüksek kalite katsayısına sahip olması durumunda, kapasitör üzerinden geçecek akımın değeri büyüyecektir.

Paralel rezonansa, RLC devresinin birbirine paralel kolları arasındaki sirkülasyon akımı, kaynak akımından büyük değerlere ulaşabilir. Sirkülasyon akımından kasıt, birbirine paralel konumlandırılan L ve C elemanları arasında sürekli olarak salınan akımdır. Kapasitansın elektrik alanında depolanan gerilim, akım olarak endüktansın manyetik alanına aktarılır ve burada depolanır. Endüktansta depolanan akım ise, kapasitansı şarj etmek üzere kapalı çevrim bir döngü oluşturur ve bu döngü sürekli bir hal alır. Rezonans esnasında, sirkülasyon akımı, kaynak akımının yüzlerce katı büyüklükte değerlere erişebilir.



Şekil 5.1 : Paralel LR-C devresinde sirkülasyon akımı.

5.1.3 Kapasitörlerin aşırı reaktif yüklenmesi

Kapasitörlerin çeşitli nedenlerle etiket değerlerinin üzerinde güçlerde çalışıyor olması, aşırı reaktif yüklendikleri anlamını taşır. Nominal reaktif güç değerleriyle anılan kapasitörlerin reaktif gücü aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (5.4):

$$Q = \omega \cdot C \cdot V^2 \quad (5.4)$$

Eşitlikten görülebileceği üzere kondansatör uçlarına uygulanan gerilimdeki değişimin karesiyle orantılı bir değişim, kondansatör reaktif gücünde gözlemlenecektir. Doğrusal olmayan yükler nedeniyle elektrik güç sisteminde bulunan harmonik bileşenlerin de etkisiyle kapasitör uçlarına uygulanan gerilime ait etkin değer daha büyük değerlere erişeceğinden, kapasitörlerin aşırı reaktif yüklenmesi söz konusudur. Yanı sıra, rezonans oluşumuyla beraber 5.1.1 ve 5.1.2’de bahsi geçen aşırı gerilim ve akımlara maruz kalan kapasitörler, aşırı reaktif yüklenme sorunuyla karşılaşabilirler.

Dağıtım sistemlerinde kompanzasyon amacıyla kullanılan kapasitörler için standartlarca belirlenen birtakım indis ve sınır değerler mevcuttur.

5.2 Kapasitörlerin Güvenli Çalışma Limitleri

Kapasitörlerin elektrik güç sistemlerinde güvenli çalışma limit ve indisleri uluslararası düzeyde kabul gören standartlar tarafından belirlenmiştir. Türkiye’de önceleri, 10.07.1995 tarihinde yürürlüğe giren ve 100 Hz’e kadarki frekanslarda çalışan alçak ve yüksek gerilim güç sistemlerine, güç katsayısını düzeltmek için bağlanan kapasitörlere ilişkin tanımlamalara, TS 804 standardında yer verilmekteydi [58].

Çizelge 5.1 : TS 804 kapasitörlerin güvenli çalışma indisleri ve limitleri.

İndeks	Tanımlama	Sınır Değerler
V _n	Kondansatör nominal (anma) gerilimi	%110
I _n	Kondansatör üzerinden akan nominal akım	%130

Çizelgeden, TS 804 standardı ile kapasitörler geçici rejimler dışında nominal gerilimlerinin 1,1 katına kadar sürekli olarak dayanabilecekleri görülmektedir. Kapasitör üzerinden akan akım baz alındığında ise, nominal akım değerinin en fazla 1,3 katına kadar sürekli olarak maruz kalabilirler.

TS 804 numaralı standart, 26.05.2005 tarihi itibarıyla yürürlükten kaldırılmış, yerine IEC 60831-1 numaralı standardın birebir çevirisi niteliğindeki TS EN-60831-1 numaralı standart yürürlüğe girmiştir. Standardın başlığı beyan gerilimi 1000 V'ye kadar olan (1000 V dahil) alternatif akım sistemleri için kendi kendini onaran tipte şönt güç kondansatörleri adını taşımaktadır. Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Sistem İşletme Dairesi Başkanlığı tarafından Mart 2008’de yayınlanan alçak gerilim tesislerinde kompanzasyon tesisi teknik şartnamesi gereği, 60831-1 numaralı standarda uygun olarak üretilmeyen kondansatörlerin tesislerde kullanımı, şartnamenin yayınlandığı tarih itibarıyla mümkün değildir [59]. Harmonikli bileşenlerin varlığı dikkate alınarak geliştirilen IEC 60831-1 numaralı standart gereği kondansatörlerin güvenli çalışma indisleri ve limitleri çizelge 5.2 ve 5.3 ile gösterilmiştir [60]:

Çizelge 5.2 : IEC 60831-1 kondansatörlerin taşıyabileceği maksimum akım değeri.

İndeks	Tanımlama	Sınır Değerler
I _{rms}	Kondansatör üzerinden akan akımın rms değeri	%130

Çizelge 5.3 : IEC 60831-1 kondansatörlerin maksimum süreyle maruz kalabileceği gerilim değerleri.

Vrms	Maruz Kalınan Maksimum Süre
%100	Sürekli
%110	Her 24 saatte 8 saat süreyle
%115	Her 24 saatte 30 dakika süreyle
%120	5 dakika
%130	1 dakika

IEC 60831-1 standardı ile belirlenen, kapasitörün taşıyabileceği akımın maksimum değeri, nominal gerilim değerinde çalışan kapasitöre ait akım değerinin %130'u ile sınırlandırılmıştır. Maksimum gerilim süreleri için ise, aşırı gerilime maruz kalınan süre önemlidir. Çizelge 5.3 ile sunulan değerler uyarınca, bir kapasitör sürekli olarak nominal gerilim değeri ile çalıştırılabilirken, bir dakikalık süreyi aşmamak koşuluyla nominal gerilim değerinin %130'u kadarlık bir gerilime maruz kalabilir. Kapasitör uçlarına uygulanan gerilimin tepe değeri ise, tanımlı rms değerleri ve süreler için, rms değerinin $\sqrt{2}$ katını aşmamalıdır [60].

Tavsiye niteliğinde IEEE tarafından geliştirilen 1036-1992 numaralı standart da bilimsel araştırmalar açısından başvuru niteliği taşıyan bir başka standart olarak belirmektedir [61]. Bu standarda göre kapasitörlerin güvenli çalışma indisleri ve limitleri çizelge 5.4'teki gibi biçimiyle tanımlanmaktadır [62]:

Çizelge 5.4 : IEEE 1036-1992 kondansatörlerin güvenli çalışma indisleri ve limitleri.

İndeks	Tanımlama	Sınır Değerler
S	Kondansatör görünür gücü ($I_{rms} \cdot V_{rms}$)	%135
Vrms	Kondansatör gerilimi rms değeri	%110
Vmax	Kondansatör gerilimi tepe değeri	%120
Irms	Kondansatör üzerinden akan akımın rms değeri	%180

Standart gereği, kapasitöre ait görünür gücün üst sınırı nominal değerinin 1,35 katı olarak belirlenmiş, kapasitör uçlarına uygulanan gerilimin karesel ortalama değerinin üst sınırı 1,1 kat iken, tepe değerinin sınır değeri ise nominal değerinin 1,2 katı olarak tespit edilmiş ve kapasitör üzerinden akacak akımın karesel ortalama değeri ise nominal değerinin en fazla 1,8 katı ile sınırlandırılmıştır.

Çeşitli firmalar tarafından üretilen kapasitörlerin IEC 60831-1 standardını sağladığı görülmekle birlikte, tanımlı güvenli çalışma indislerine ilişkin sınır değerleri daha da yukarı çektiği görülmektedir [63].

5.3 Kapasitör Güvenli Çalışma Koşullarının Bulanık Mantık İle Belirlenmesi

Elektrik güç sisteminde meydana gelen rezonansın her ne şekilde olursa olsun, olumsuz bir dizi etkiyi beraberinde getireceği şüphesizdir; fakat bu etkilerin ne kadarının gerçekten bir tehlike teşkil ettiği, bir başka deyişle meydana gelen rezonansın incelenen sistem bileşeninin emniyetli çalışması açısından ne derece önem arz ettiği, belirlenmesi gereken bir başka husus olarak karşımızda durmaktadır.

Yapay zeka metotlarından biri olan bulanık mantığın, mühendislik alanında kullanımı gitgide yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, dağıtım sistemlerinde meydana gelen rezonansın, tüketici tarafında kompanzasyon amaçlı konumlandırılan kapasitörler üzerinde ne derece tehlike teşkil ettiğinin belirlenmesi amacıyla yönelik olarak da bulanık mantık uygulamalarından faydalanılmıştır.

5.3.1 Bulanık uzman sistemler

Tam ve kesin olmayan bilgilere dayanarak tutarlı ve doğru kararlar vermeyi sağlayan düşünme ve karar verme mekanizması bulanık mantık olarak adlandırılır [64]. 1965 yılında California Berkeley Üniversitesi'nden Azeri kökenli Ali Asker Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılan bulanık mantık, günümüzde birçok değişik alanda kullanılmaya başlamıştır.

Boole mantığı yaklaşımında, herhangi bir önerme doğrudur ya da yanlıştır. Arada üçüncü bir durum söz konusu değildir. Eğer bu durum küme kavramına uygulanacak olursa, elemanlar A kümesine ait olanlar (1) ve ait olmayanlar (0) şeklinde iki ayrık gruba ayrıştırılır. Bulanık mantık yaklaşımında bir kümeye üye olanlar ve olmayanlar şeklinde bir kesin sınıflandırma mevcut değildir. Bu bağlamda, bulanık mantığın bir hedefi, bilgisayar tabanlı sistemlerin insan gibi düşünmesini, bu doğrultuda karar verebilmesini sağlamaktır [65]. İnsan düşüncüsü ve doğal dilindeki belirsizlik esasına göre davranabilmek ve onun doğasının gelişigüzellikten farklı olduğunu sezebilmektir. Veriler üzerinden bulanık mantık aracılığıyla akıl yürütme yapabilen sistemlere bulanık uzman sistemler denir. Bulanık mantık algoritmasının kullanımı, uzman sistemlere sıcak, soğuk, geniş, dar vb. gibi belirli dilsel kavramları anlama ve buna yanıt verme olanağı sağlar. Aynı zamanda belirsiz bilgiden belirli sonuçlara erişimde göreceli olarak daha basit bir yaklaşım sağlayabilir.

Bulanık kümelerde söz konusu evrenin elemanlarının bir A bulanık kümesine ait olma derecelerini temsil etmek amacıyla üyelik fonksiyonları belirlenir. Bulanık

kümeler, üyelik fonksiyonları ile tanımlanırlar ve bulanık kümelere dayalı matematiğin ifade gücü, klasik matematikten daha fazla olsa da onun faydalı ve etkin olabilmesi, değişik alanlarda, değişik kavramlara uygun üyelik fonksiyonları yaratabilmemize bağlıdır [66]. Bu fonksiyonlar, elemanlara $[0, 1]$ kapalı aralığında gerçel değerler atayarak elemanların A bulanık kümesi ile temsil edilen kavrama ne derece uygun olduklarını veya A bulanık kümesi ile temsil edilen özellikleri ne derece taşıdıklarını gösterirler. Bir A bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu şu şekilde gösterilir:

$$\mu_A(x) \rightarrow [0, 1], x \in X \quad (5.5)$$

Burada x , X evrensel kümesinden alınan elemanları, $\mu_A(x)$ ise x elemanının A bulanık kümesine üyelik derecesini göstermektedir. $\mu_A(x)$ 'in değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x \in A \\ 0, & \text{eğer } x \notin A \end{cases} \quad (5.6)$$

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ sonlu kümesi için A bulanık kümesi şöyle hesaplanır:

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (5.7)$$

X sonsuz olduğu durumda:

$$A = \int \mu_A(x)/x \quad (5.8)$$

Üyelik fonksiyonlarının üçgen biçimli, s -tipi, z -tipi, π -tipi gibi standart biçimleri mevcuttur. Kişinin yaklaşımına uygun tipte üyelik fonksiyonu seçimi, elde edeceği sonuçlar açısından önemlidir.

5.3.1.1 Kapasitörlerin güvenli çalışma koşullarının belirlenmesine yönelik bulanık uzman sistem tasarımı

Burada bulanık uzman sistem tasarımındaki amaç, rezonans oluşumu söz konusu olduğunda, meydana gelen rezonansın kapasitörler açısından önem derecesinin belirlenmesi, bir başka deyişle kapasitörlerin, rezonansın sebep olacağı olası tehlikelerden korunmasıdır. Bu sürecin, bir uzman şahsın bilgisine ve müdahalesine

gerek duyulmadan, kendiliğinden gerçekleşiyor olması ulaşılmak istenen hedeftir. Bu bağlamda sırasıyla:

- Kapasitörler için güvenli çalışma indis ve limitleri seçilecek,
- Seçilen indislerin gerektirdiği, kapasitörlere ait veriler ölçüm sonuçları ve oluşturulan eşitliklerden yararlanılarak elde edilecek,
- Kapasitörlerin güvenli çalışma koşullarının belirlenmesine yönelik bulanık mantık üyelik fonksiyonları oluşturulacaktır.

Bölüm 5.2’de çeşitli standartlarca belirlenen kapasitörlerin güvenli çalışma limitleri ve indislerine yer verilmiştir. Türkiye’de uygulanan standartların belirtildiği gibi IEC standartlarının birebir çevirisi niteliğini taşıması itibariyle, uzman sistem tasarımında kapasitörlerin güvenli çalışma koşullarını belirlemeye yönelik değerlendirilecek indisler, ilgili IEC ve IEEE standartlarından hareketle belirlenecektir. Burada temel kıstas, kapasitörler için maksimum güvenlik ilkesinin benimsenmesidir. Bu doğrultuda, her iki standart da tanımlanan indisler, en fazla güvenlik kriteri temin etmeye yönelik seçilecektir. Örneğin, IEC 60831-1 numaralı standardı, akım ve gerilim değerleri için sınır değerler belirlerken, IEEE 1036-1992 numaralı standart ilaveten kapasitörün gücü (bir başka ifadeyle yüklenebilirliği) nezdinde bir değerlendirmede de bulunmaktadır. Uzman sistem tasarımı gerçekleştirilirken, her iki standardın incelenmesi sonucu, kapasitör üzerinden geçecek akım, kapasitör uç gerilimi ve kapasitör görünür gücüne yönelik bulanık mantık üyelik fonksiyonları oluşturulacaktır.

Bu durumda, toplanması gereken veriler arasında kapasitör uçlarına uygulanan gerilim ve kapasitör üzerinden geçmekte olan akım yer almaktadır. Zira, kapasitör görünür güç değeri, IEEE 1036-1992 numaralı standartta ölçülen bu iki değer çarpımı olarak tanımlanmaktadır [62]. Kapasitör uçlarına uygulanan gerilim, ortak bağlantı noktasında rezonansı belirlemeye yönelik yapılacak ölçümden elde edilen gerilim bilgileridir (Şekil 4.10 ve 4.11). Ayrı bir ölçüme gerek duymadan bu veriler elde bulunacaktır. Kapasitör üzerinden geçen akım için ise elde iki seçenek bulunmaktadır. Birincisi, rezonansı belirlemeye yönelik tanımlanan ölçümler gerçekleştirilirken, eş zamanlı olarak kapasitör üzerinden geçecek akımların da ölçülmesi gerekecektir. Yapılacak her ölçüm, ilave ekipman gerektireceğinden maliyet kaidesi göz önünde bulundurulduğunda bu seçenek cazip gözükmemektedir.

Birincisine oranla daha ekonomik ve optimum olan ikinci yöntem ise, eldeki mevcut ölçülmüş verilerden hareketle kapasitörler üzerinden geçmekte olan akımın belirlenmesidir. Bu bağlamda, rezonansı belirlemek üzere eşitlik 4.7'den mevcut her bir harmonik bileşen için hesaplanacak sistem eşdeğer empedansını oluşturan sabit ve değişkenler, elektrik güç sistemini temsilen R değeri ve X_L değeri, kapasitör grubu eşdeğer reaktansını temsilen ise X_C değeridir. Üç farklı harmonik frekanstaki eşdeğer sistem empedansı değerinden hareketle elde edilecek üç denklem yardımıyla R , L ve C değerleri belirlenebilir. Daha sonrasında ise, rezonansın gerçekleştiği frekans için kapasitif reaktans değeri hesaplanabilir. X_C değerinin belirlenmesiyle beraber kapasitörler üzerinden geçen akım değeri, ortak bağlantı noktasında ölçülen gerilim değerinin kapasitif reaktansa bölünmesiyle hesaplanmış olacaktır.

Oluşturulacak algoritma içeriğinde, X_C değerinin -şayet biliniyorsa- dışarıdan girişine olanak tanımak da bir başka seçenek sayılabilir.

Kapasitörlere ait gerilim ve akım değerleri elde edildikten sonra, bu ikisinin çarpımından görünür güç değeri hesaplanabilir. Böylece, tasarlanacak uzman sistemde ihtiyaç duyulan bütün verilere ulaşılabilecektir.

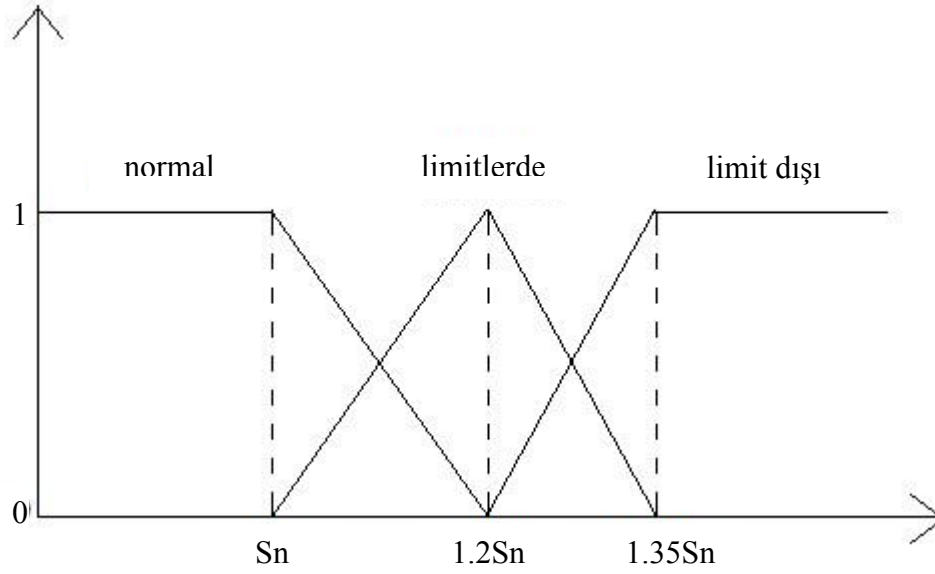
Akım, gerilim ve görünür güç için limit değerlerin belirlenmesine yönelik olarak da iki standart mukayese edilmiştir. Kapasitör üzerinden akacak akımın karesel ortalama değeri, IEC standardı içeriğinde nominal değerin %130'u ile sınırlandırılırken, IEEE standardı sınır değeri, nominal değerin %180'i olarak belirlemiştir. Gerilimin karesel ortalama değeri için sınır, IEEE standardında nominal değerin %110'u iken, IEC standardı sürekli maruz kalınıldığı takdirde nominal değeri sınır değer olarak kabul etmektedir. 8 saatlik süre zarfında ise nominal değerin %110'u sınır değer olarak kabul edilebilir. Sadece IEEE standardında yer alan görünür güç için belirlenen sınır değer, nominal değerin %120'si kadardır.

Üyelik fonksiyonları oluşturulurken, her iki standartça belirlenen değerlerden maksimum güvenlik ilkesi gözetilerek baz alınan sınır değerler, akım için nominal değerin %130'u, gerilim için nominal değerin %110'u ve görünür güç için nominal değerin %120'si olmuştur.

Her bir indis için üç farklı üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla, nominal değer ve altındaki değerler için “normal”, nominal değerin üstünde fakat

sınır değerlerin altındaki değerler için “limitlerde” ve sınır değer ve üstündeki değerler için”limit dışı” olarak belirlenmiştir..

Görünür güç için belirlenen üyelik fonksiyonları ve grafiksel gösterime aşağıda yer verilmektedir.

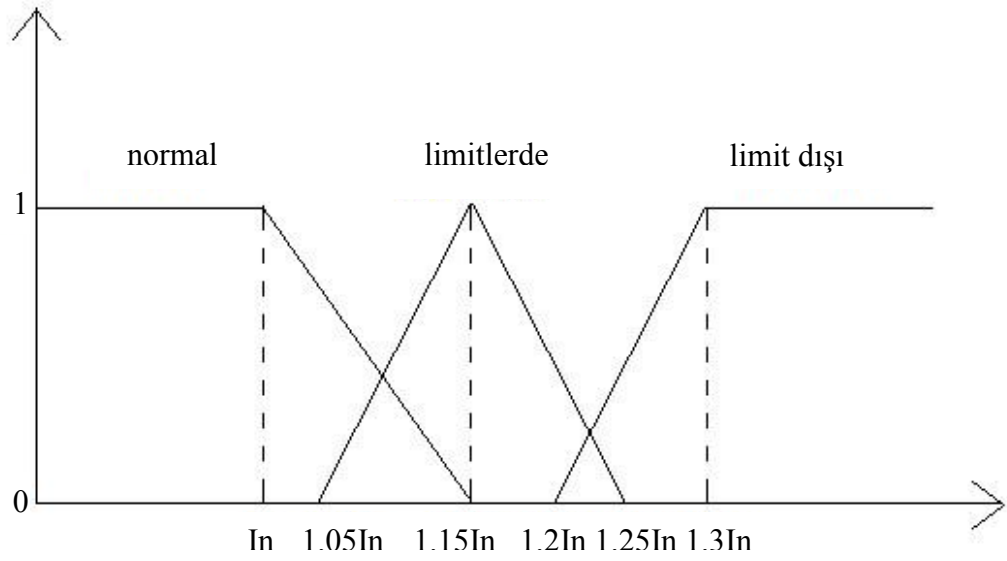


Şekil 5.2 : Görünür güç için belirlenen üyelik fonksiyonları.

Çizelge 5.5 : Üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadesi (görünür güç).

$\mu_{s1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq S_n \\ (1.2S_n - x)/0.2 & S_n < x < 1.2S_n \\ 0 & x \geq 1.2S_n \end{cases}$	“normal”
$\mu_{s2}(x) = \begin{cases} 1 & x = 1.2S_n \\ (x - S_n)/0.2 & S_n < x < 1.2S_n \\ (1.35S_n - x)/0.15 & 1.2S_n < x < 1.35S_n \\ 0 & x \leq S_n \text{ veya } x \geq 1.35S_n \end{cases}$	“limitlerde”
$\mu_{s3}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 1.35S_n \\ (x - 1.2S_n)/0.15 & 1.2S_n < x < 1.35S_n \\ 0 & x \leq 1.2S_n \end{cases}$	“limit dışı”

Kapasitör üzerinden geçen akım için belirlenen üyelik fonksiyonları ve grafiksel gösterime aşağıda yer verilmektedir.

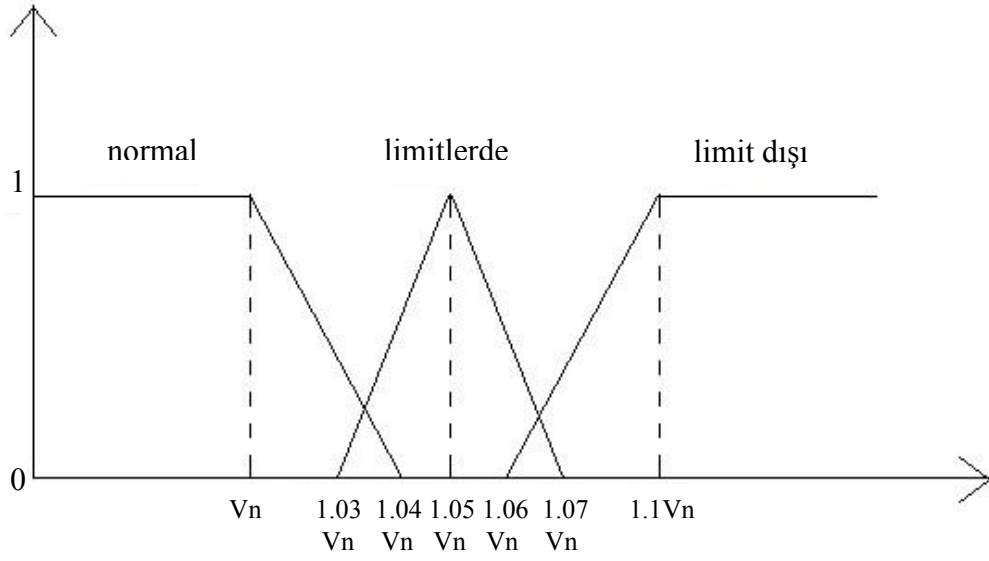


Şekil 5.3 : Kapasitör akımı için belirlenen üyelik fonksiyonları.

Çizelge 5.6 : Üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadesi (akım).

$\mu_{11}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq I_n \\ (1.15I_n - x)/0.15 & I_n < x < 1.15I_n \\ 0 & x \geq 1.15I_n \end{cases}$	“normal”
$\mu_{12}(x) = \begin{cases} 1 & x = 1.15I_n \\ (x - 1.05I_n)/0.1 & 1.05I_n < x < 1.15I_n \\ (1.25I_n - x)/0.1 & 1.15I_n < x < 1.25I_n \\ 0 & x \leq 1.05I_n \text{ veya } x \geq 1.25I_n \end{cases}$	“limitlerde”
$\mu_{13}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 1.3I_n \\ (x - 1.2I_n)/0.1 & 1.2I_n < x < 1.3I_n \\ 0 & x \leq 1.2I_n \end{cases}$	“limit dışı”

Kapasitör uçlarına uygulanan gerilim için belirlenen üyelik fonksiyonları ve grafiksel gösterime ise aşağıda yer verilmektedir.



Şekil 5.4 : Kapasitör uçlarına uygulanan gerilim için belirlenen üyelik fonksiyonları.

Çizelge 5.7 : Üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadesi (gerilim).

$\mu_{v1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq V_n \\ (1.04V_n - x)/0.04 & V_n < x < 1.04V_n \\ 0 & x \geq 1.04V_n \end{cases}$	“normal”
$\mu_{v2}(x) = \begin{cases} 1 & x = 1.05V_n \\ (x - 1.03V_n)/0.02 & 1.03V_n < x < 1.05V_n \\ (1.07V_n - x)/0.02 & 1.07V_n < x < 1.05V_n \\ 0 & x \leq 1.03V_n \text{ veya } x \geq 1.07V_n \end{cases}$	“limitlerde”
$\mu_{v3}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 1.1V_n \\ (x - 1.06V_n)/0.04 & 1.06V_n < x < 1.1V_n \\ 0 & x \leq 1.06V_n \end{cases}$	“limit dışı”

Giriş üyelik fonksiyonları belirlenen bulanık uzman sistemin kural tabanına ise çizelge 5.8’de yer verilmiştir. “U” bulanık çıkış fonksiyonudur. Çıkış fonksiyonu için dört dilsel karşılık tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla, “güvenli, tolere edilebilir, dikkat ve tehlikeli”dir.

Çizelge 5.8 : Bulanık kural tabanı.

Eğer V limitdışı ise, U tehlikeli.
Eğer I limitdışı ise, U tehlikeli.
Eğer S limitdışı ise, U tehlikeli.
Eğer V limitlerde VE I limitlerde VE S normal ise, U dikkat.
Eğer V limitlerde VE I normal VE S limitlerde ise, U dikkat.
Eğer V normal VE I limitlerde VE S limitlerde ise, U dikkat.
Eğer V normal VE I limitlerde VE S normal ise, U tolere edilebilir.
Eğer V limitlerde VE I normal VE S normal ise, U tolere edilebilir.
Eğer V normal VE I normal VE S limitlerde ise, U tolere edilebilir.
Eğer V normal VE I normal VE S normal ise, U güvenli.

6. DENEYLER

Bu bölümde, çalışma içeriğinde sunulan yöntemi ve bulanık uzman sistemi test etmek üzere İTÜ Mekar Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneye yer verilmektedir.

6.1 Deney Devresi

Deney için iki ayrı devre tasarlanmıştır. Bunlar:

- Elektrik güç sistemini temsil etmek üzere tasarlanan üç fazlı devre,
- Ölçüm devresidir.

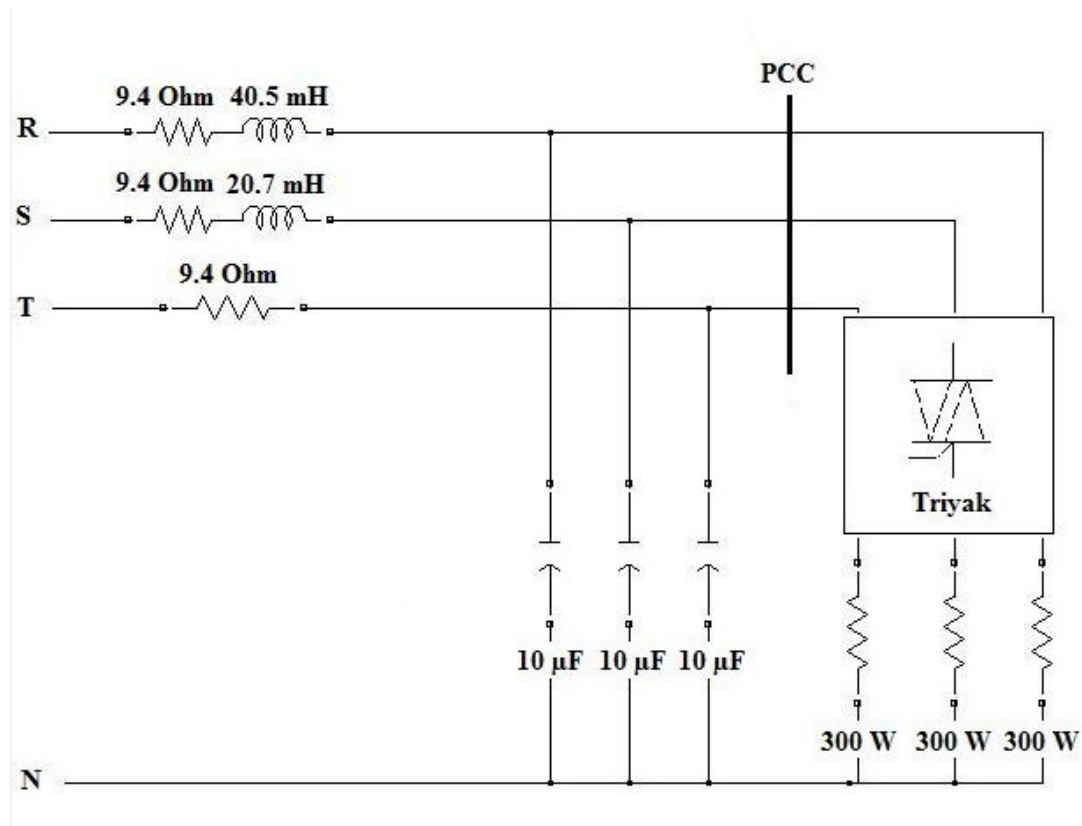
6.1.1 Elektrik güç sistemi model devresi

Oluşturulan elektrik güç sistemi model devresi şekil 6.1 ve 6.2'de görülmektedir. Devredeki elemanlar ve özellikleri aşağıdaki gibidir:

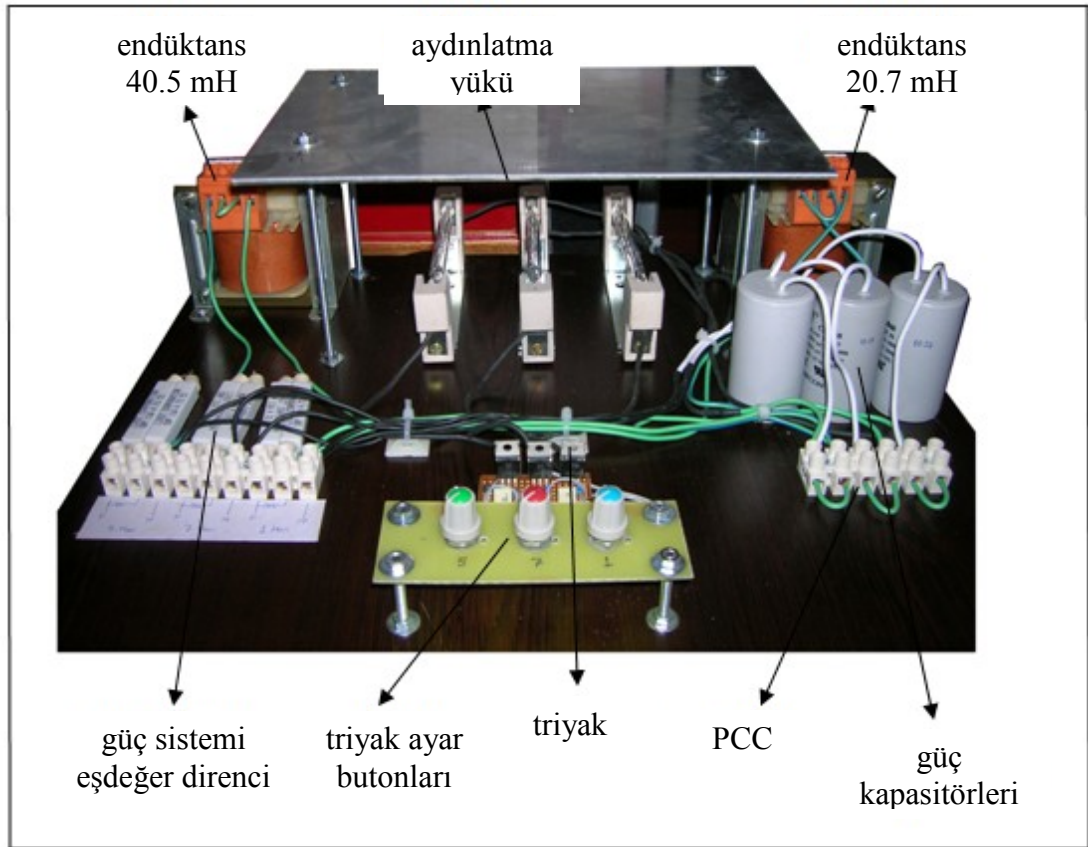
Çizelge 6.1 : Elektrik güç sistemi model devresine ait elemanlar.

R fazı :
Rs : Elektrik güç sistemi eşdeğer direnci ($2 \times 4.7 \text{ Ohm}$) Ls : Elektrik güç sistemi eşdeğer endüktansı (40.5 mH) Ck : Kompanzasyon kapasitörü (10 μF , $V_n=400\text{V}$, $S_n=0.1 \text{ kVAR}$) Triyak Aydınlatma yükü (300 W)
S fazı :
Rs : Elektrik güç sistemi eşdeğer direnci ($2 \times 4.7 \text{ Ohm}$) Ls : Elektrik güç sistemi eşdeğer endüktansı (20.7 mH) Ck : Kompanzasyon kapasitörü (10 μF , $V_n=400\text{V}$, $S_n=0.1 \text{ kVAR}$) Triyak Aydınlatma yükü (300 W)
T fazı :
Rs : Elektrik güç sistemi eşdeğer direnci ($2 \times 4.7 \text{ Ohm}$) Ck : Kompanzasyon kapasitörü (10 μF , $V_n=400\text{V}$, $S_n=0.1 \text{ kVAR}$) Triyak, Aydınlatma yükü (300 W)

Devrede, elektrik güç sistemi, eşdeğer direnç ve endüktanslar ile temsil edilmiştir. Endüktans değeri, R ve S fazları için farklı seçilmiştir. Temel frekans değeri 50 Hz olmak üzere, R fazı 5. harmonik frekansta, S fazı ise 7. harmonik frekansta rezonansa girecektir. T fazında ise rezonans oluşumu istenmediğinden endüktans kullanılmamıştır. Kompanzasyon sistemini temsilen kullanılan kapasitörler, her faz için aynı değerde belirlenmiştir. Harmonik kaynağı, doğrusal olmayan yükleri temsilen ise, triyak üzerinden beslenen aydınlatma yükleri kullanılmıştır. Triyak ile değiştirilen anahtarlama aralığı, devrede var olan harmonik bileşenleri ve bu bileşenlerin genlik değerlerini ayarlamaya imkan tanımaktadır.



Şekil 6.1 : Elektrik güç sistemi model devresi.



Şekil 6.2 : Deney devresi.

6.1.2 Ölçüm devresi

Ölçüm devresi, çalışma içeriğinde tanımlanan amaca uygun bir biçimde, geliştirilen uygulamalar için gerekli verileri toplamak üzere tasarlanmıştır. Ölçüm devresinde kullanılan ekipmanlar, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından sağlanan yüksek lisans proje desteğiyle temin edilmiştir. Devre, aşağıdaki ekipmanlardan oluşmaktadır:

NI Cdaq-9174 : kompakt veri toplama kartı şasesidir. 4 adet veri toplama kartının kurulumuna imkan tanımaktadır. Veri toplama kartları ile bilgisayar arasındaki fiziksel bağlantıyı sağlamak üzere tasarlanmıştır. Üzerinde usb girişi mevcuttur. Şase, şekil 6.3'te görülmektedir.



Şekil 6.3 : NI Cdaq-9174 kompakt şase (National Instruments).

NI 9203 modülü : 8 kanallı veri toplama kartıdır. 200 kS/s toplam örneklem hızı ve 16 bit çözünürlüğe sahiptir. ± 20 mA giriş aralığıdır.

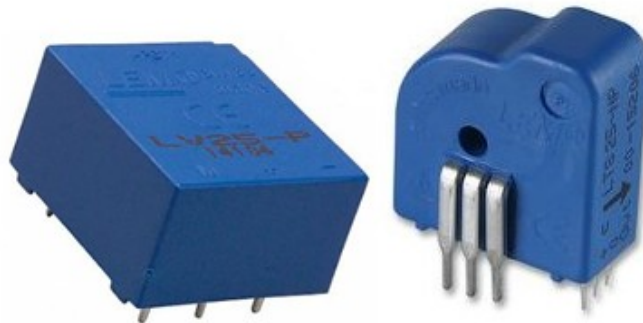
NI 9215 modülü : 4 kanallı veri toplama kartıdır. 400 kS/s toplam örneklem hızı ve 16 bit çözünürlüğe sahiptir. ± 10 V giriş aralığıdır. Şekil 6.4'te veri toplama kartlarına yer verilmiştir.



Şekil 6.4 : NI 9203 ve 9215 veri toplama kartları (National Instruments).

LEM LV 25-P : Gerilim sensörüdür. Bu sensör ile 500 V'a kadarki gerilim değerlerinin ölçülmesi mümkündür. 3 adet LV 25-P, ölçüm devresinde kullanılmıştır.

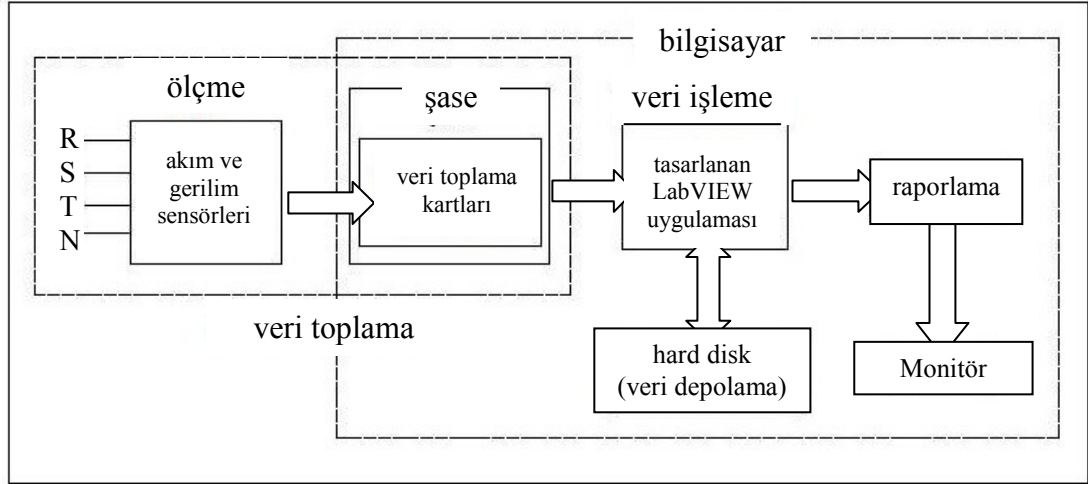
LEM LTS 25-NP : Hall-effect akım sensörüdür. 25 A ve 8 A'e kadarki akım değerlerinin ölçümüne imkan tanıyan iki farklı bağlantı biçimi mevcuttur. Deneyde, devreden geçecek akım değerleri gözetilerek, ölçüm hassasiyetini arttırmak adına 8 A'lik maksimum akım değerini baz alan bağlantı biçimi tercih edilmiştir. Ölçüm devresinde, 3 adet LTS 25-NP akım sensörü kullanılmıştır. Şekil 6.5'te LV 25-P ve LTS 25-NP sensörleri görülmektedir.



Şekil 6.5 : LV25-P ve LTS 25-NP sensörleri.

Ölçüm devresine ait akış çizelgesi şekil 6.6'da sunulmuştur. Sensörler ile veri toplama kartlarına iletilen her bir faza ait akım ve gerilim bilgileri, veri toplama

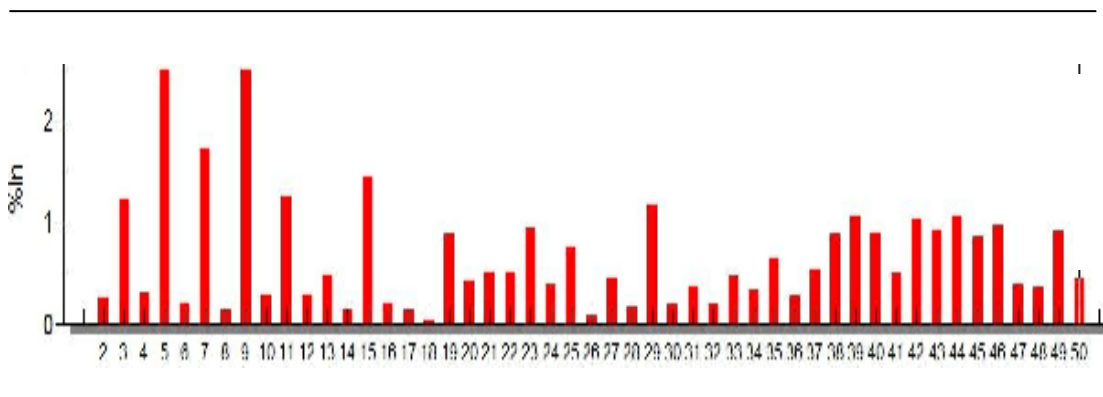
kartları sayesinde bilgisayar ortamında işlenebilir hale gelir. LabVIEW’de tasarlanan uygulamalar, deney esnasında toplanan bu verilerden yararlanacaktır.



Şekil 6.6 : Tasarlanan sisteme ait akış şeması.

6.2 Deneyin Yapılışı

Elektrik güç sistemi model devresi ve ölçüm devresi, deneyi gerçekleştirmek üzere hazırlanmıştır. Triyaklar üzerinden beslenen ve birer harmonik kaynağı olan aydınlatma yüklerine ait branşmandan faz akımları ve ortak bağlantı noktasından (PCC) her bir faza ait faz-nötr gerilimleri ölçülecektir. Deney öncesinde belirlenen anahtarlama aralığı için, aydınlatma yüküne ait akımın spektral içeriği şekil 6.7’de görülmektedir.



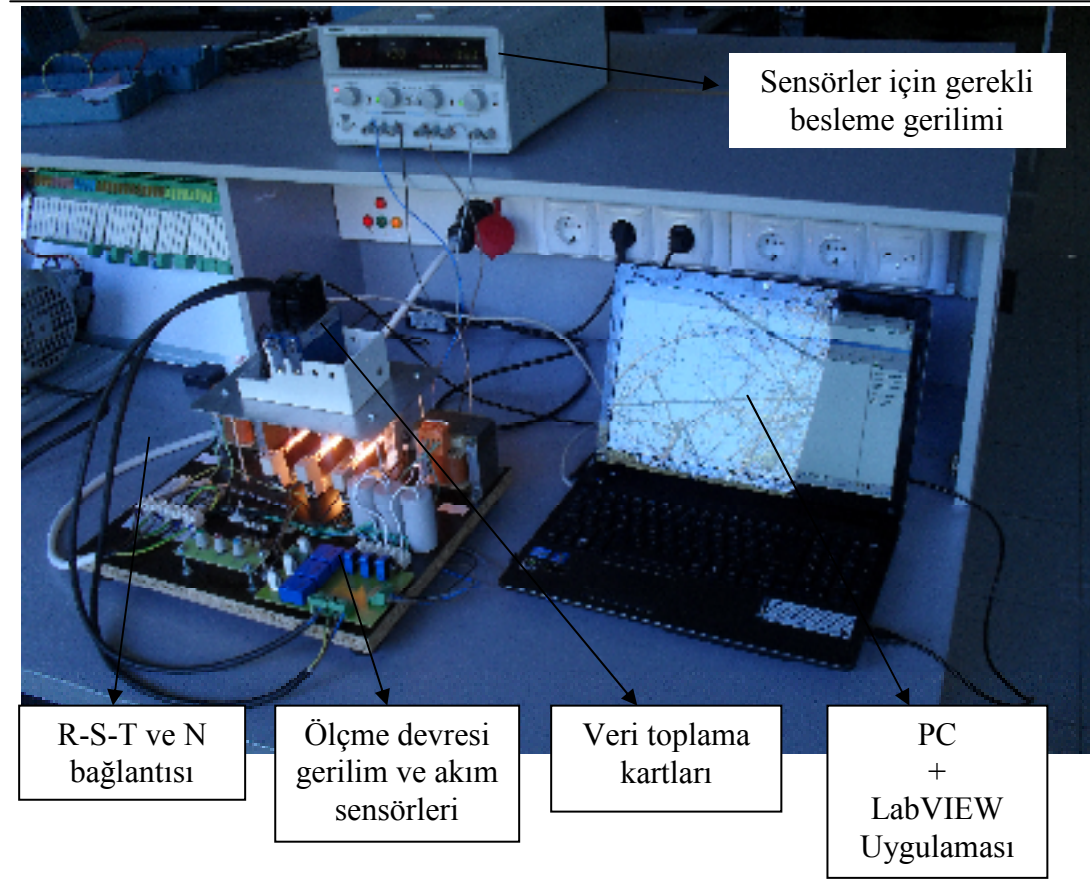
Şekil 6.7 : Yük akımına ait spektral içerik.

Şekil 6.7’de sunulan spektral içerik ilk 50 bileşene ait olup, sistemden 30 dakika boyunca yarım dakika aralıklarla veri alınmıştır.

Tasarlanan elektrik güç sistemi model devresinde, R fazının 250 Hz frekansta, S fazının ise 350 Hz frekansta rezonansa gireceği düşünülerek, yük akımlarına ait 5. ve

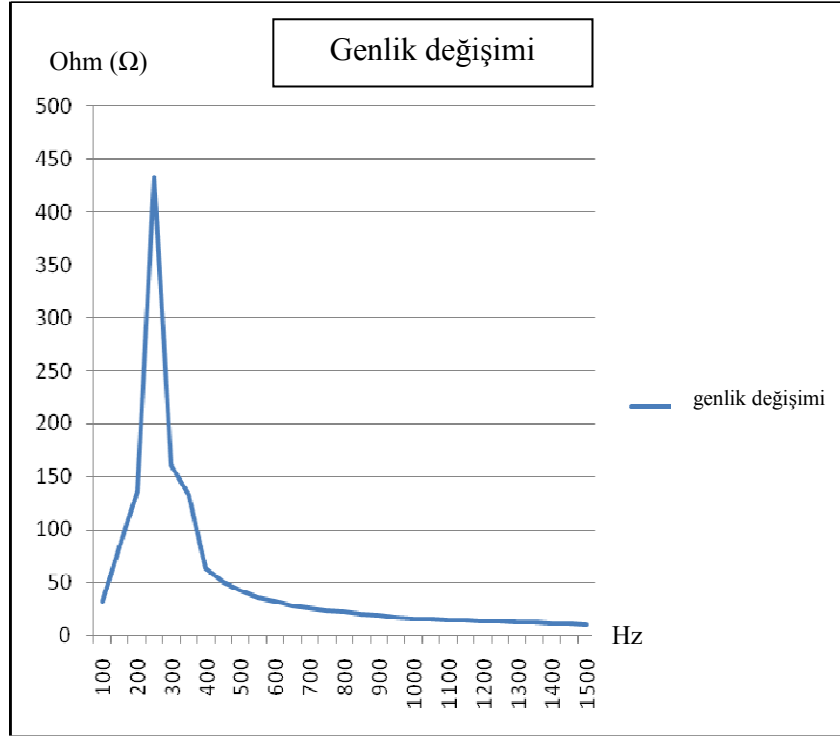
7. harmonik bileşenlerin, ayarlanan anahtarlama aralığı uyarınca diğer bileşenlere oranla baskın bir karakteristiğe sahip olması amaçlanmıştır. Bu sayede, rezonansın yaratacağı etki, daha belirgin hale getirilmek istenmiştir.

Ölçülen akım ve gerilimler, LabVIEW'in FFT fonksiyonu kullanılarak harmonik bileşenlere ayrılacaktır. Rezonansın olduğu frekans ve rezonans tipi, bölüm 4'te anlatıldığı biçimiyle oluşturulan algoritma tarafından belirlenecektir. Her bir faz için elde edilen sonuçlara çizelge A.1'de yer verilmektedir. Şekil 6.8'de, deney esnasında çekilen fotoğraf görülmektedir.

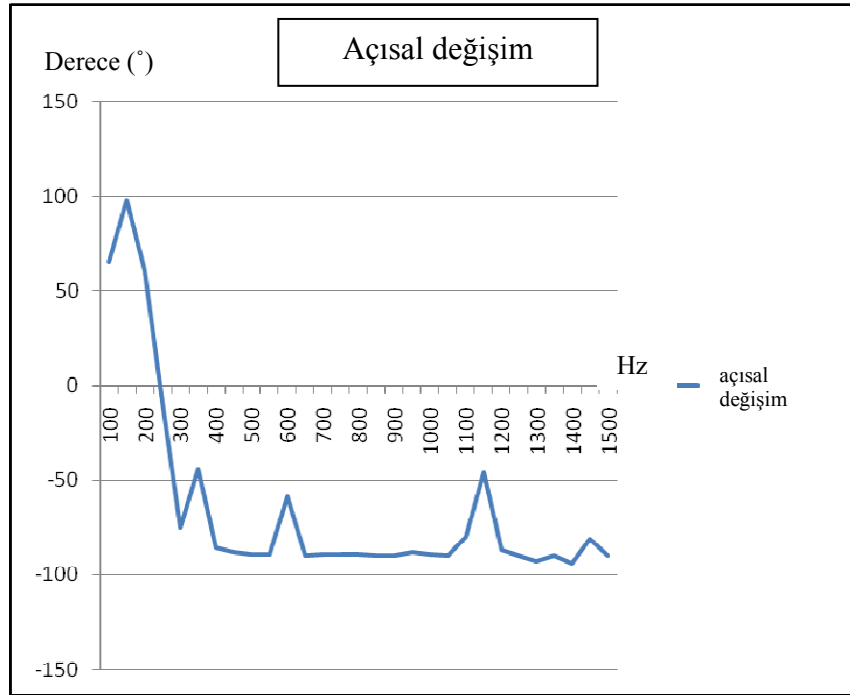


Şekil 6.8 : Deney esnası.

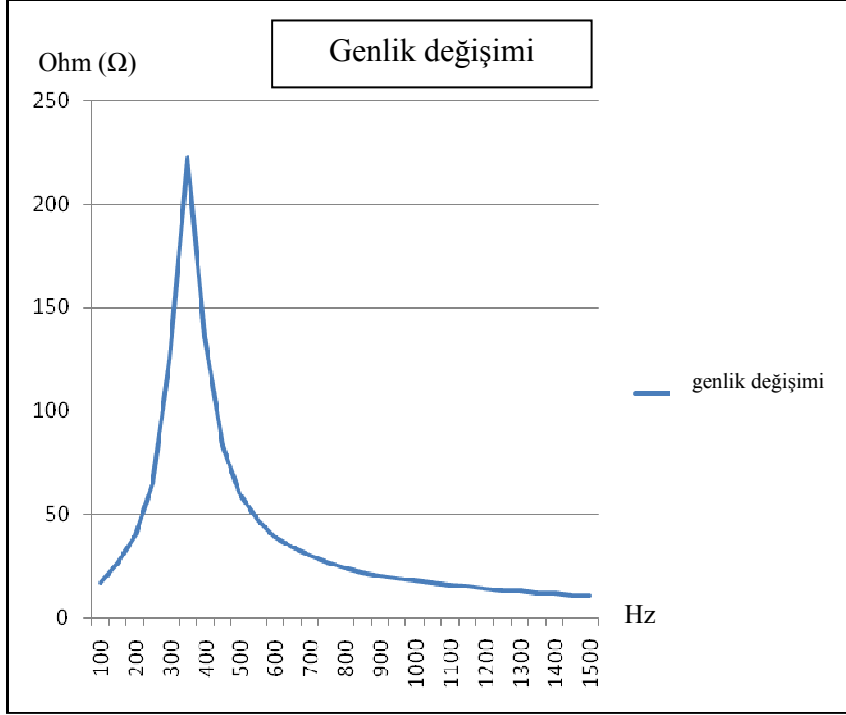
Rezonansın tespit edilmesiyle beraber, kapasitörlerin güvenliği, tanımlanan bulanık fonksiyonlar aracılığıyla belirlenir. Geliştirilen LabVIEW uygulamasında, kapasitörlere ait nominal değerlerin kullanıcı tarafından atanması gerekmektedir. Çizelge 6.2'de bulanık analiz sonuçlarına yer verilmiştir.



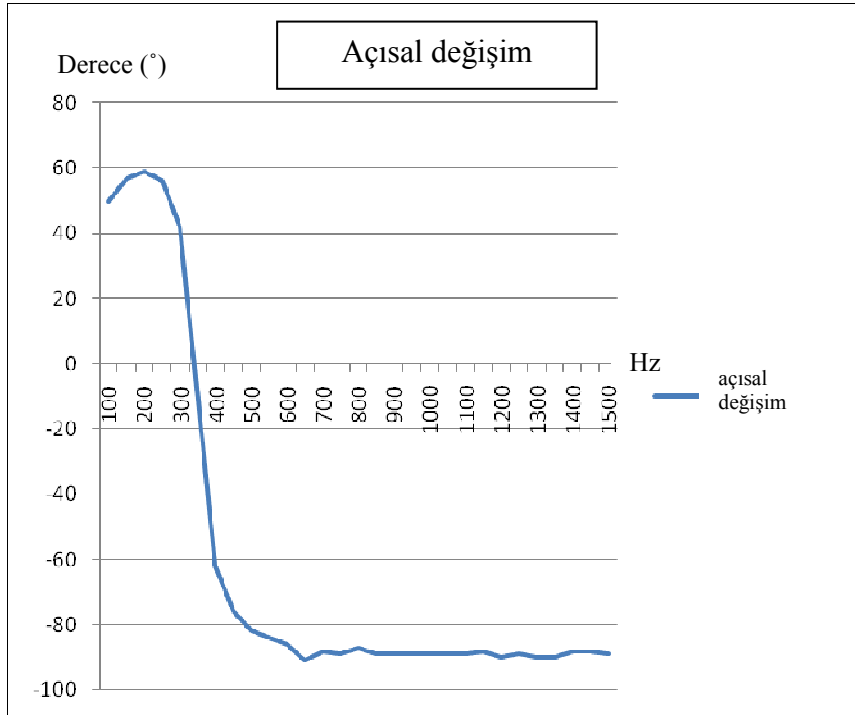
Şekil 6.9 : Eşdeğer empedansa ait genlik değişimi (R fazı).



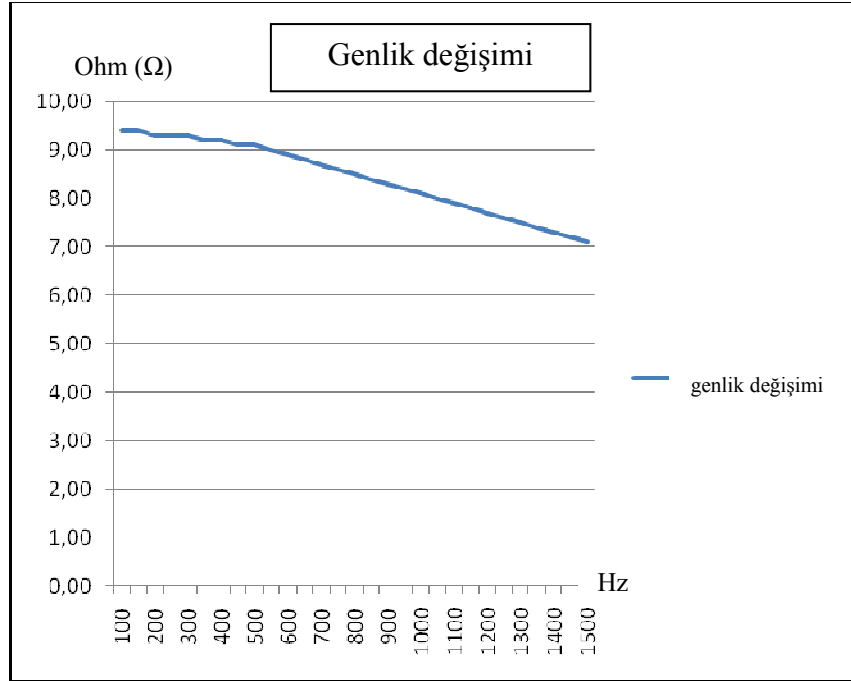
Şekil 6.10 : Eşdeğer empedansa ait açısal değişim (R fazı).



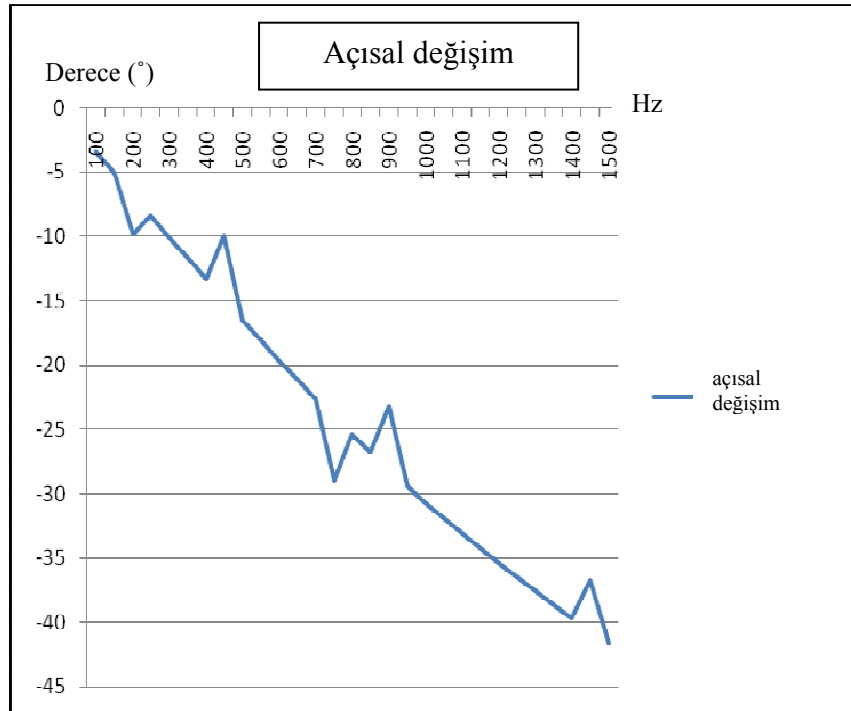
şekil 6.11 : Eşdeğer empedansa ait genlik değişimi (S fazı).



şekil 6.12 : Eşdeğer empedansa ait açısal değişim (S fazı).



Şekil 6.13 : Eşdeğer empedansa ait genlik değişimi (T fazı).



Şekil 6.14 : Eşdeğer empedansa ait açısal değişim (T fazı).

Çizelge 6.2 : Bulanık analiz sonuçları.

C_{faz}	$ V_c = V_{pcc} $ (V)	$ I_c $ (A)	$ S_c $ VA	Sonuç
C_R	226.46	0.2533	57.3623	Güvenli
C_S	221.18	0.2064	45.6516	Güvenli
C_T	219.44	0.1988	43.6247	Güvenli

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geliştirilen uygulama özetle aşağıda sıralanan işlemleri gerçekleştirmektedir:

- Ölçme devresi ve veri toplama kartları yardımıyla, sistemden akım ve gerilim bilgileri elde edilmekte, veriler işlenmek üzere bilgisayara aktarılmaktadır.
- Toplanan akım ve gerilim bilgileri, FFT analizi sonucu harmonik bileşenlerine ayrılmaktadır.
- Akım ve gerilimlerin aynı frekanslı harmonik bileşenleri, vektörel hesaplamalara tabii tutularak, mevcut her bir bileşen için (en fazla 50. harmoniğe kadarki bileşenler) ilgili frekanstaki empedans değerleri hesaplanmaktadır.
- Hesaplanan empedansların açısal değişimlerinin karşılaştırılması ile sistemde rezonansın mevcut olup olmadığı belirlenmektedir.
- Hesaplanan empedansların genlik değişimlerinin karşılaştırılması ile sistemde meydana gelen rezonansın tipi belirlenmektedir.
- Sistemin rezonans koşullarının belirlenmesiyle beraber uygulama kapasitörlerin standartlarca tanımlanan güvenli çalışma limitlerinden yararlanılarak hazırlanmış bulanık analiz ile devam edecektir.
- Bulanık analiz için, uygulama başlamadan önce, kullanıcı tarafından kullandığı kapasitörlere ait nominal değerlerin tanımlanması gerekmektedir.
- Bulanık analiz için gereken veriler, kapasitör uçlarına uygulanan gerilim, kapasitör üzerinden akmakta olan akım ve kapasitör gücüne aittir. Kapasitör uçlarına uygulanan gerilim ölçülen ortak bağlantı noktası gerilimidir. Kapasitör üzerinden akmakta olan akım ve görünür güç değerleri ise uygulama içerisinde oluşturulan bir başka algoritma tarafından hesaplanır.
- Bulanık analiz dahilinde, meydana gelen rezonansın kapasitörler için ne oranda tehlike teşkil edeceği, karar mekanizması içeriğinde belirlenen dört dilsel karşılık ile saptanmaktadır.

Yapılan deneye ait sonuçlar göstermektedir ki, saha ölçümleri yoluyla bir sistemde meydana gelen rezonansın belirlenmesi mümkündür. Bu noktada, hassas ölçüme imkan tanıyan, uygun ekipmanın seçimi büyük önem arz etmektedir.

Yapılan ölçümler ve elde edilen sonuca, dağıtım sisteminden temin edilen enerjinin kalitesi oldukça etki etmektedir. Ortak bağlantı noktasına etki eden ters yönlü, baskın harmonik bileşenler, gürültü, dc bileşen gibi diğer bozucu etkiler, yapılan analizi güçleştirmekte ve sonuçların birtakım yanlışlıkları içermesine sebep olabilmektedir.

Rezonansın tespitine yönelik sistemin maliyeti, ölçüme dayalı bu yöntemin bir başka dezavantajı olarak görülebilir. Kurulacak sistem için en azından sensörler/ölçü transformatörleri, veri toplama kartları, bir harici/dahili bellek, yazılım ve bir işlemci gibi pahalı gereksinimlere ihtiyaç vardır.

Kapasitörlerin rezonans esnasındaki çalışma koşullarını belirleyen bulanık uzman sistem, başka sistem bileşenleri ya da hassas birtakım cihazların güvenliği esas alınarak uyarlanabilir ve bu doğrultuda yapılacak araştırma ve tasarımlara kaynak teşkil edebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Dugan, R. C., McGranaghan, M. F. and Beaty, H. W.,** 1996, *Electrical Power System Quality*, Mc Graw-Hill.
- [2] **Chapman, D.,** 2001, *Harmonikler: Nedenler, Etkiler, Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu*, Copper Development Association-Sarkuysan.
- [3] **Kocatepe, C., Umurkan, N., Attar, F., Yumurtacı, R., Uzunoğlu, M., Karakaş, A., Arıkan, O. ve Baysal, M.,** 2006, *Enerji Kalitesi ve Harmonikler*, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yayın No EG/2006/1.
- [4] **Arrilaga, J. and Watson, N. R.,** 2004, *Power System Harmonics*, John Wiley&Sons Ltd.
- [5] **Adak, S.,** 2003, Enerji sistemlerinde harmonik distorsiyonun azaltılması, *Doktora Tezi*, YTÜ.
- [6] **Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O.,** 2003, *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsan Yayınevi.
- [7] **Eajal, A.,** 2008, Optimal Capacitor Placement and Sizing in Unbalanced Distribution Systems with Harmonics Consideration Using PSO, *Master of Applied Science Thesis*, Dalhousie University.
- [8] **Kannan, S. M., Monica, G. R. A. and Slochanal, S. M. R.,** 2008, Fuzzy Logic Based Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Feeders, *IEEE Trans. on Power Delivery* 978-1-4244-1762-9/08.
- [9] **Gül, Ö.,** 2001, Faz bileşenleri ve çok uçlu eleman kavramı yardımı ile 3-fazlı dağıtım şebekelerinin harmonik analizi, *Doktora Tezi*, İTÜ.
- [10] **Özdemir, A.,** 2009, Power system harmonics ders notu, *Doktora Programı*, İTÜ.
- [11] **Shepherd, W. and Zand, P.,** 1979, *Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits*, Cambridge University Press, New York.
- [12] **IEEE,** 1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE Standard No. 519-1992*.
- [13] **Bird, J.,** 2003, *Electrical Circuit Theory and Technology*, Newnes.
- [14] **Wakileh, G. J.,** 2001, *Power System Harmonics Fundamentals, Analysis and Filter Design*, Springer Verlag Press.
- [15] **Technical Bulletin-004a,** 2002, Ferroresonance, Cadick Corporation.
- [16] **Barbisio, E., Bottauscio, O., Chiampi, M., Crotti, G. and Giordano, D.,** 2008, Parameters Affecting Ferroresonance in LCR Electric Circuits, *IEEE Transactions On Magnetics, Vol:44, No:6*.

- [17] **Al-Anbarri, K., Ramanujam, R., Rao, C. H. S. and Kuppusamy, K.,** 2002, Effect of Circuit Configured on Chaotic Ferroresonance in a Power Transformer, *Electric Power Components and Systems*, 30:1015-1031.
- [18] **Ferraci, P.,** 2002, Ferroresonance, *Cahier Technique No.190*, Group Schneider.
- [19] **Fink, D., G. and Beaty, H. W.,** 1993, *Standard Handbook for Electrical Engineers*, McGraw-Hill Book Company.
- [20] **Mork, B. A. and Struehm, D. L.,** 1994, Application of Nonlinear Dynamics and Chaos to Ferroresonance in Distribution Systems, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.9, No:2, pp. 1009-1017.
- [21] **Hayashi, C.,** 1964, *Nonlinear Oscillations in Physical Systems*, McGraw-Hill, New York.
- [22] **Germond, A.,** 1975, Computation of Ferroresonant Overvoltages in Actual Power Systems by Galerkin's Method", *Proc IEEE PICA, Conf.* pp.127-135, New Orleans, LA.
- [23] **Swift G. W.,** 1971, Power Transformer Core Behavior Under Transient Condition, *IEEE Tans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PS-90, No.5, pp.2206-2210.
- [24] **Kavasseri, R. G.,** 2003, Analytical Prediction of Subharmonic Oscilations in a Ferroresonant Circuit, *Proc. 35th North American Power Symposium*, Rolla, Missouri, October.
- [25] **Huang, Z., Cui., Y. and Xu, W.,** 2007, Application of Modal Sensitivity for Power System Harmonic Resonance Analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*, pp. 222-231.
- [26] **Yan, Y. H., Chen, C. S., Moo, C. S. and Hsu, C. T.,** 1994, Harmonic Analysis for Industrial Customers, *IEEE Trans. On Industry Applications*, pp. 462-468.
- [27] **Kersting, W. H.,** 2002, *Distribution System Modelling and Analysis*, CRC Press LLC.
- [28] **Kavira, S. M.,** 2009, Power System Dynamic Stability Including Wind Farm Representation, *Master of Science Thesis*, University of Glasgow.
- [29] **Eminoglu, U. ve Hoccoğlu, H.,** 2007, Radyal Üç-Fazlı Dengesiz Dağıtım Sistemleri için Yeni Bir Güç Akış Algoritması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [30] **Chen, T. H., Chen, M. S., Inoue, T., Kotas, P. and Chebli, E. A.,** 1991, Three Phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis, *IEEE Trans. Power Delivery* 6, pp. 1671-1681.
- [31] **Xiao, P., Yu, D. C. and Yan, W.,** 2006, A Unified Three-Phase Transformer Model for Distribution Load Flow Calculations, *IEEE Trans. on Power Systems* 21, pp. 153-159.

- [32] **Wang, Z., Chen, F. and Li, J.,** 2004, Implementing Transformer Nodal Admittance Matrices Into Backward/Forward Sweep-Based Power Flow Analysis for Unbalanced Radial Distribution Systems, *IEEE Trans. Power Systems* 19, pp. 1831-1836.
- [33] **Kepka, J.,** 2003, Load Modelling For Power System Analysis, *International Conference on Environment and Electrical Engineering*.
- [34] **George, T. A., Bones, D., Comm, Q. E. and Brisbane, Q.,** 1991, Harmonic Power Flow Determination Using The Fast Fourier Transform, *IEEE Trans. on Power Delivery* vol. 6, no. 2, pp. 530-535.
- [35] **Heydt, G. T. and Galli, A. W.,** 1997, Transient Power Quality Problems Analyzed Using Wavelets, *IEEE Trans. on Power Delivery* vol. 12, no. 2, pp. 908-915.
- [36] **Zheng, T., Makram, E. B. and Girgis, A. A.,** 1999, Power System Transient and Harmonic Studies Using Wavelet Transform, *IEEE Trans. on Power Delivery* vol.14, no. 4, pp. 1461-1468.
- [37] **Xia, D. and Heydt, G.,** 1982, Harmonic Power Flow Studies Part 1 – Formulation and Solution, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* vol.PAS 101, no.6, pp. 1257-1265.
- [38] **Xia, D. and Heydt, G.,** 1982, Harmonic Power Flow Studies Part 2 – Implementation and Practical Application, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* vol.PAS 101, no.6, pp. 1266-1270.
- [39] **Teng, J. and Chang, C.,** 2007, Backward/Forward Sweep-Based Harmonic Analysis Method For Distribution Systems, *IEEE Trans. on Power Delivery* vol. 22, no. 3, pp. 1665-1672.
- [40] **Robert, A. and Deflandre, T.,** 1997, Guide For Assessing The Network Harmonic Impedances, *Joint CIGRE/CIRED Conference Publication No. 438 IEE*.
- [41] **Palethorpe, B., Sumner, M. and Thomas, D. W. P.,** 2000, Power System Impedance Measurement Using A Power Electronic Converter, *Harmonics and Quality of Power Proceedings 9. International Conference Vol.1*, pp. 208-213.
- [42] **Harris, M. B., Kelly, A. W., Rhode, J. P. and Baran, M. E.,** 1994, Instrumentation For Measurement Of Line Impedance, *Applied Power Electronics Conference And Exposition APEC 94, Conference Proceedings Vol.2*, pp. 887-893.
- [43] **Nagpal, M., Xu, W. and Sawada, J. H.,** 1998, Harmonic Impedance Measurement Using Three-phase Transients, *IEEE Trans. Power Delivery* vol.13, pp. 272-277.
- [44] **De Oliveira, A., De Oliveira, J., C., Resende, J. W. and Miskulin, M. S.,** 1991, Practical Approaches For AC System Harmonic Impedance Measurements, *IEEE Trans.on Power Delivery* vol.6, pp. 1721-1726.

- [45] **Xu, W., Ahmed, E. E., Zhang, X. and Liu, X.**, 2002, Measurement Of Network Harmonic Impedances: Practical Implementation Issues And Their Solutions, *IEEE Trans. on Power Delivery* vol.17, no.1, pp. 210-216.
- [46] **Hernandez, E. E. N.**, 2010, Harmonic Impedance And Harmonic Source Determination Based On Field Measurements, *Master of Science Thesis*, University of Alberta.
- [47] **Xiao, Y., Maun, J. C., Mahmoud, H. B., Detroz, T. and Do, S.**, 2000, Harmonic Impedance Measurement Using Voltage And Current Increments From Disturbing Loads, *IEEE Trans. on Power Delivery* vol. 12, pp. 472-477.
- [48] **Crevier, D. and Mercier, A.**, 1978, Estimation Of Higher Frequency Network Equivalent Impedances By Harmonic Analysis Of Natural Waveforms, *IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems* vol.97, no.2, 424-431.
- [49] **Bridgeman, M. J., Morrison, R. E. and Tenakoon, S. B.**, 1998, Measurement Of Harmonic Impedance On An LV System Utilising Power Capacitor Switching And Consequent Predictions Of Capacitor Induced Harmonic Distortion, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, pp. 561-566.
- [50] **Moreau, G., Lee, H. H., Croteau, G., Beaulieu, G. and Portales, E.**, 1998, Measurement System For Harmonic Impedance Of The Network And Validation Steps, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, pp. 842-848.
- [51] **Tsukamoto, M., Ogawa, S., Natsuda, Y., Minowa, Y. and Nishimura, S.**, 2000, Advanced Technology To Identify Harmonics Characteristics And Results Of Measuring, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 12, pp. 562-567.
- [52] **Ahmed, E., Xu, W. and Liu, X.**, 2001, Application Of Modal Transformations For Power System Harmonic Impedance Measurement, *Elsevier Electrical Power And Energy Systems* vol. 23, pp. 147-154.
- [53] **Morched, A. S. and Kundur, P.**, 1987, Identification And Modelling Of Load Characteristics at High Frequencies, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.2, no.1, pp. 153-160.
- [54] **Girgis, A. A. and McManis, R. B.**, 1989, Frequency Domain Techniques For Modeling Distribution or Transmission Networks Using Capacitor Switching Induced Transients, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.4, pp. 1882-1890.
- [55] **Greenwood, A.**, 1991, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd Edition, John Wiley&Sons.

- [56] **Wagner, V. E., Balda, J. C., Griffith, D. C., McEachern, A., Barnes, T. M., Hartmann, D. P., Phileggi, D. J., Emmanuel, A. E., Horton, W. F., Reid, W. E., Ferraro, R. J. and Jewell, W. T.**, 1993, Effects of Harmonics on Equipment, *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol.8, No.2, pp. 672-680.
- [57] **Smith, K. C. A. and Alley, R. E.**, 1992, *Electrical Circuits: An Introduction*, Cambridge University Press, New York.
- [58] **TS No. 804**, 1995, Güç Kondansatörleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [59] **TEDAŞ**, 2008, Alçak Gerilim Harmonik Filtreli Kompanzasyon Tesisi Teknik Şartnamesi, *Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Sistem İşletme Dairesi Başkanlığı*, Ankara.
- [60] **TS EN 60831-1**, 2005, Shunt Power Capacitors of The Self-Healing Type for A.C.Systems Having a Rated Voltage Up To and Including 1000 V; Part 1: General, Performance, Testing and Rating; Safety Requirements; Guide for Installation and Operation, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [61] **Huang, Z., Xu, W. and Dinavahi, V. R.**, 2003, A Practical Harmonic Resonance Guideline for Shunt Capacitor Applications, *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 18, No. 4, pp. 1382-1387.
- [62] **IEEE 1036-1992**, 1992, Guide for Application of Shunt Power Capacitors, *IEEE*.
- [63] **Url**, <[http:// www.federalelektrik.com](http://www.federalelektrik.com)> Güç Kondansatörleri Kataloğu, 22.01.2011.
- [64] **Allahverdi, N.**, Uzman Sistemler: Bir Yapay Zeka Uygulaması, Atlas Yayın Dağıtım, 2002.
- [65] **Ibrahim, A. M.**, 2003, *Fuzzy Logic For Embedded Systems Applications*, Newnes.
- [66] **Eksin, I.**, 2010, Fuzzy modelling and control ders notu, Yüksek Lisans Programı, İTÜ.

EKLER

EK A.1 : Deney Sonuçları

Çizelge A.1 : Deney sonuçları.

R fazı				
n	I(n) (A)	V(n) (V)	Z(n) (Ohm)	Rezonans Durumu
2	0,0035 $\angle$ 18,29°	0,1130 $\angle$ 83,86°	32,2982 $\angle$ 65,57°	-
3	0,0170 $\angle$ 7,46°	1,4369 $\angle$ 105,61°	84,5235 $\angle$ 98,15°	-
4	0,0042 $\angle$ 131,18°	0,5753 $\angle$ -167,66°	136,9851 $\angle$ 61,15°	-
5	0,0346 $\angle$ 42,10°	14,9852 $\angle$ 33,26°	433,0997 $\angle$ -8,85°	Paralel rezonans var
6	0,0028 $\angle$ 27,08°	0,4531 $\angle$ -47,96°	161,8166 $\angle$ -75,04°	-
7	0,0238 $\angle$ 11,09°	3,1693 $\angle$ -32,63°	133,1639 $\angle$ -43,72°	-
8	0,0018 $\angle$ 106,42°	0,1166 $\angle$ 19,77°	64,7852 $\angle$ -86,65°	-
9	0,0345 $\angle$ 27,11°	1,7576 $\angle$ -60,79°	50,9459 $\angle$ -87,91°	-
10	0,0038 $\angle$ 31,36°	0,1609 $\angle$ -57,23°	42,3367 $\angle$ -88,59°	-
11	0,0174 $\angle$ -40,03°	0,6336 $\angle$ -129,02°	36,4147 $\angle$ -88,99°	-
12	0,0040 $\angle$ 21,08°	0,1283 $\angle$ -38,18°	32,0632 $\angle$ -59,26°	-
13	0,0065 $\angle$ 30,14°	0,1866 $\angle$ -59,28°	28,7136 $\angle$ -89,43°	-
14	0,0017 $\angle$ 37,06°	0,0443 $\angle$ -52,50°	26,0451 $\angle$ -89,56°	-
15	0,0200 $\angle$ -28,91°	0,4772 $\angle$ -118,56°	23,8624 $\angle$ -89,65°	-
16	0,0028 $\angle$ 19,17°	0,0617 $\angle$ -70,53°	22,0396 $\angle$ -89,71°	-
17	0,0019 $\angle$ 131,01°	0,0389 $\angle$ 41,25°	20,4914 $\angle$ -89,76°	-
18	0,0005 $\angle$ 10,06°	0,0096 $\angle$ -79,74°	19,1580 $\angle$ -89,80°	-
19	0,0122 $\angle$ 117,21°	0,2196 $\angle$ 27,38°	17,9962 $\angle$ -89,83°	-
20	0,0058 $\angle$ 23,42°	0,0984 $\angle$ -66,44°	16,9738 $\angle$ -89,86°	-
21	0,0069 $\angle$ 99,36°	0,1109 $\angle$ 9,48°	16,0663 $\angle$ -89,88°	-
22	0,0069 $\angle$ 23,21°	0,1053 $\angle$ -66,67°	15,2549 $\angle$ -89,89°	-
23	0,0130 $\angle$ 14,12°	0,1888 $\angle$ -32,74°	14,5245 $\angle$ -46,86°	-
24	0,0052 $\angle$ 27,03°	0,0721 $\angle$ -59,89°	13,8634 $\angle$ -86,92°	-
25	0,0104 $\angle$ -31,07°	0,1379 $\angle$ -121,01°	13,2618 $\angle$ -89,93°	-
26	0,0010 $\angle$ 18,19°	0,0127 $\angle$ -74,75°	12,7119 $\angle$ -92,94°	-
27	0,0062 $\angle$ 23,01°	0,0757 $\angle$ -66,48°	12,2071 $\angle$ -89,49°	-
28	0,0022 $\angle$ 119,37°	0,0258 $\angle$ 25,42°	11,7420 $\angle$ -93,95°	-
29	0,0023 $\angle$ 18,01°	0,0260 $\angle$ -62,59°	11,3119 $\angle$ -80,61°	-

n	I(n) (A)	V(n) (V)	Z(n) (Ohm)	Rezonans Durumu
30	0,0026 $\angle$ -14,40°	0,0284 $\angle$ -104,36°	10,9130 $\angle$ -89,96°	-
31	0,0051 $\angle$ 24,31°	0,0538 $\angle$ -65,65°	10,5419 $\angle$ -89,96°	-
32	0,0025 $\angle$ -26,43°	0,0255 $\angle$ -116,41°	10,1957 $\angle$ -89,97°	-
33	0,0064 $\angle$ 20,09°	0,0632 $\angle$ -60,70°	9,8720 $\angle$ -80,79°	-
34	0,0045 $\angle$ 77,10°	0,0431 $\angle$ -12,86°	9,5687 $\angle$ -89,97°	-
35	0,0088 $\angle$ 30,03°	0,0817 $\angle$ -59,89°	9,2838 $\angle$ -89,92°	-
36	0,0038 $\angle$ 12,18°	0,0343 $\angle$ -77,80°	9,0156 $\angle$ -89,98°	-
37	0,0073 $\angle$ 127,66°	0,0640 $\angle$ 37,68°	8,7628 $\angle$ -89,98°	-
38	0,0122 $\angle$ 24,79°	0,1040 $\angle$ -65,19°	8,5239 $\angle$ -89,98°	-
39	0,0146 $\angle$ -18,70°	0,1212 $\angle$ -103,12°	8,2980 $\angle$ -84,42°	-
40	0,0124 $\angle$ 30,54°	0,1002 $\angle$ -59,44°	8,0839 $\angle$ -89,98°	-
41	0,0067 $\angle$ 67,11°	0,0528 $\angle$ -22,80°	7,8807 $\angle$ -89,91°	-
42	0,0142 $\angle$ 16,38°	0,1092 $\angle$ -73,56°	7,6876 $\angle$ -89,94°	-
43	0,0128 $\angle$ 21,77°	0,0960 $\angle$ -68,21°	7,5039 $\angle$ -89,99°	-
44	0,0147 $\angle$ -9,48°	0,1077 $\angle$ -99,40°	7,3288 $\angle$ -89,92°	-
45	0,0118 $\angle$ 11,71°	0,0845 $\angle$ -78,25°	7,1619 $\angle$ -89,96°	-
46	0,0132 $\angle$ 20,03°	0,0924 $\angle$ -69,95°	7,0024 $\angle$ -89,98°	-
47	0,0053 $\angle$ 114,20°	0,0363 $\angle$ 24,13°	6,8500 $\angle$ -89,91°	-
48	0,0048 $\angle$ 31,09°	0,0322 $\angle$ -58,70°	6,7041 $\angle$ -89,79°	-
49	0,0126 $\angle$ 18,31°	0,0827 $\angle$ -71,68°	6,5644 $\angle$ -89,99°	-
50	0,0060 $\angle$ 127,57°	0,0386 $\angle$ 37,54°	6,4304 $\angle$ -89,94°	-
S fazı				
n	I(n) (A)	V(n) (V)	Z(n) (Ohm)	Rezonans Durumu
2	0,0051 $\angle$ 121,34°	0,0891 $\angle$ 171,49°	17,4649 $\angle$ 50,15°	-
3	0,0142 $\angle$ 149,81°	0,3744 $\angle$ -152,39°	26,3669 $\angle$ 57,80°	-
4	0,0031 $\angle$ 55,60°	0,1252 $\angle$ 115,51°	40,3957 $\angle$ 59,91°	-
5	0,0388 $\angle$ 124,31°	2,5603 $\angle$ -178,86°	65,9877 $\angle$ 56,82°	-
6	0,0041 $\angle$ 133,23°	0,5129 $\angle$ 175,65°	125,0959 $\angle$ 42,42°	-
7	0,0210 $\angle$ -151,19°	4,6751 $\angle$ -162,75°	222,6241 $\angle$ -11,55°	Paralel rezonans var
8	0,0034 $\angle$ 160,82°	0,4637 $\angle$ 98,48°	136,3789 $\angle$ -62,35°	-

n	I(n) (A)	V(n) (V)	Z(n) (Ohm)	Rezonans Durumu
9	0,0303 $\angle$ -163,01°	2,5448 $\angle$ 120,13°	83,9880 $\angle$ -76,86°	-
10	0,0049 $\angle$ -179,04°	0,2974 $\angle$ 98,64°	60,6846 $\angle$ -82,32°	-
11	0,0194 $\angle$ 97,42°	0,9294 $\angle$ 12,44°	47,9067 $\angle$ -84,98°	-
12	0,0032 $\angle$ 143,21°	0,1275 $\angle$ 56,73°	39,8492 $\angle$ -86,48°	-
13	0,0095 $\angle$ 91,12°	0,3257 $\angle$ -0,30°	34,2859 $\angle$ -91,42°	-
14	0,0023 $\angle$ 126,44°	0,0695 $\angle$ 38,41°	30,1976 $\angle$ -88,03°	-
15	0,0174 $\angle$ 130,27°	0,4708 $\angle$ 38,82°	27,0546 $\angle$ -91,46°	-
16	0,0039 $\angle$ -137,25°	0,0958 $\angle$ 133,98°	24,5550 $\angle$ -88,77°	-
17	0,0026 $\angle$ 143,13°	0,0585 $\angle$ 54,13°	22,5138 $\angle$ -89,00°	-
18	0,0011 $\angle$ 100,09°	0,0229 $\angle$ 12,91°	20,8116 $\angle$ -87,18°	-
19	0,0149 $\angle$ -138,26°	0,2886 $\angle$ 132,43°	19,3676 $\angle$ -89,31°	-
20	0,0051 $\angle$ 113,21°	0,0924 $\angle$ 23,80°	18,1251 $\angle$ -89,42°	-
21	0,0084 $\angle$ 155,70°	0,1432 $\angle$ 66,20°	17,0432 $\angle$ -89,50°	-
22	0,0047 $\angle$ 132,31°	0,0756 $\angle$ 42,74°	16,0916 $\angle$ -89,57°	-
23	0,0115 $\angle$ 141,29°	0,1753 $\angle$ 52,26°	15,2471 $\angle$ -89,03°	-
24	0,0031 $\angle$ -176,02°	0,0449 $\angle$ 94,31°	14,4920 $\angle$ -89,68°	-
25	0,0093 $\angle$ 161,48°	0,1285 $\angle$ 71,76°	13,8124 $\angle$ -89,72°	-
26	0,0015 $\angle$ 158,31°	0,0198 $\angle$ 68,56°	13,1970 $\angle$ -89,75°	-
27	0,0083 $\angle$ 143,19°	0,1049 $\angle$ 53,41°	12,6368 $\angle$ -89,78°	-
28	0,0039 $\angle$ 129,06°	0,0473 $\angle$ 39,26°	12,1245 $\angle$ -89,80°	-
29	0,0018 $\angle$ 140,26°	0,0210 $\angle$ 50,44°	11,6540 $\angle$ -89,82°	-
30	0,0021 $\angle$ -151,50°	0,0236 $\angle$ 118,66°	11,2202 $\angle$ -89,84°	-
31	0,0036 $\angle$ 134,62°	0,0389 $\angle$ 44,76°	10,8189 $\angle$ -89,86°	-
32	0,0020 $\angle$ 103,46°	0,0209 $\angle$ 13,59°	10,4464 $\angle$ -89,87°	-
33	0,0037 $\angle$ 99,29°	0,0374 $\angle$ 9,41°	10,0997 $\angle$ -89,88°	-
34	0,0023 $\angle$ 101,02°	0,0225 $\angle$ 11,13°	9,7760 $\angle$ -89,89°	-
35	0,0044 $\angle$ 113,35°	0,0417 $\angle$ 23,55°	9,4731 $\angle$ -89,80°	-
36	0,0051 $\angle$ 92,78°	0,0469 $\angle$ 2,88°	9,1891 $\angle$ -89,91°	-
37	0,0049 $\angle$ 127,63°	0,0437 $\angle$ 38,91°	8,9221 $\angle$ -88,72°	-
38	0,0088 $\angle$ 104,44°	0,0763 $\angle$ 14,52°	8,6706 $\angle$ -89,92°	-
39	0,0096 $\angle$ 148,03°	0,0810 $\angle$ 58,10°	8,4333 $\angle$ -89,93°	-

n	I(n) (A)	V(n) (V)	Z(n) (Ohm)	Rezonans Durumu
40	0,0112 $\angle$ -177,07°	0,0919 $\angle$ 93,00°	8,2090 $\angle$ -89,93°	-
41	0,0075 $\angle$ 122,88°	0,0600 $\angle$ 32,94°	7,9967 $\angle$ -89,94°	-
42	0,0081 $\angle$ 137,11°	0,0631 $\angle$ 47,33°	7,7953 $\angle$ -89,79°	-
43	0,0139 $\angle$ 99,67°	0,1057 $\angle$ 9,72°	7,6040 $\angle$ -89,95°	-
44	0,0093 $\angle$ 108,12°	0,0690 $\angle$ 19,49°	7,4221 $\angle$ -88,62°	-
45	0,0135 $\angle$ 113,46°	0,0979 $\angle$ 23,51°	7,2489 $\angle$ -89,95°	-
46	0,0111 $\angle$ 120,08°	0,0786 $\angle$ 30,12°	7,0838 $\angle$ -89,96°	-
47	0,0076 $\angle$ 103,33°	0,0526 $\angle$ 13,43°	6,9262 $\angle$ -89,90°	-
48	0,0020 $\angle$ 121,10°	0,0136 $\angle$ 31,14°	6,7755 $\angle$ -89,96°	-
49	0,0099 $\angle$ -125,75°	0,0657 $\angle$ 144,26°	6,6314 $\angle$ -89,99°	-
50	0,0034 $\angle$ 116,41°	0,0221 $\angle$ 26,44°	6,4935 $\angle$ -89,97°	-
T fazı				
n	I(n) (A)	V(n) (V)	Z(n) (Ohm)	Rezonans Durumu
2	0,0042 $\angle$ -36,42°	0,0396 $\angle$ -39,82°	9,4334 $\angle$ -3,40°	-
3	0,0136 $\angle$ -44,50°	0,1280 $\angle$ -49,59°	9,4127 $\angle$ -5,09°	-
4	0,0022 $\angle$ 120,27°	0,0206 $\angle$ 110,50°	9,3841 $\angle$ -9,77°	-
5	0,0223 $\angle$ -112,14°	0,2085 $\angle$ -120,58°	9,3476 $\angle$ -8,44°	-
6	0,0040 $\angle$ -107,49°	0,0372 $\angle$ -117,59°	9,3036 $\angle$ -10,10°	-
7	0,0155 $\angle$ 176,20°	0,1434 $\angle$ 164,46°	9,2523 $\angle$ -11,74°	-
8	0,0032 $\angle$ -116,07°	0,0294 $\angle$ -129,43°	9,1942 $\angle$ -13,36°	-
9	0,0280 $\angle$ -101,36°	0,2556 $\angle$ -111,32°	9,1297 $\angle$ -9,96°	-
10	0,0021 $\angle$ -82,11°	0,0190 $\angle$ -98,65°	9,0592 $\angle$ -16,54°	-
11	0,0084 $\angle$ -93,28°	0,0755 $\angle$ -111,37°	8,9831 $\angle$ -18,09°	-
12	0,0091 $\angle$ -69,35°	0,0810 $\angle$ -88,96°	8,9020 $\angle$ -19,61°	-
13	0,0082 $\angle$ -100,74°	0,0723 $\angle$ -121,84°	8,8162 $\angle$ -21,10°	-
14	0,0033 $\angle$ 167,22°	0,0288 $\angle$ 144,65°	8,7263 $\angle$ -22,57°	-
15	0,0162 $\angle$ -46,83°	0,1398 $\angle$ -75,83°	8,6327 $\angle$ -29,00°	-
16	0,0078 $\angle$ -91,71°	0,0666 $\angle$ -117,12°	8,5359 $\angle$ -25,41°	-
17	0,0036 $\angle$ 171,66°	0,0304 $\angle$ 144,88°	8,4364 $\angle$ -26,78°	-
18	0,0022 $\angle$ -40,97°	0,0183 $\angle$ -64,19°	8,3346 $\angle$ -23,21°	-
19	0,0139 $\angle$ -94,50°	0,1144 $\angle$ -123,92°	8,2309 $\angle$ -29,43°	-

n	I(n) (A)	V(n) (V)	Z(n) (Ohm)	Rezonans Durumu
20	0,0016 $\angle$ -152,29°	0,0130 $\angle$ 177,01°	8,1256 $\angle$ -30,70°	-
21	0,0050 $\angle$ 136,77°	0,0401 $\angle$ 104,83°	8,0192 $\angle$ -31,94°	-
22	0,0074 $\angle$ -68,99°	0,0585 $\angle$ -102,14°	7,9119 $\angle$ -33,15°	-
23	0,0101 $\angle$ 105,62°	0,0788 $\angle$ 71,29°	7,8042 $\angle$ -34,33°	-
24	0,0020 $\angle$ -87,44°	0,0154 $\angle$ -122,91°	7,6962 $\angle$ -35,47°	-
25	0,0083 $\angle$ -164,16°	0,0630 $\angle$ 159,26°	7,5883 $\angle$ -36,58°	-
26	0,0031 $\angle$ -43,25°	0,0232 $\angle$ -80,90°	7,4807 $\angle$ -37,66°	-
27	0,0040 $\angle$ 166,92°	0,0295 $\angle$ 128,21°	7,3735 $\angle$ -38,71°	-
28	0,0036 $\angle$ -73,68°	0,0262 $\angle$ -113,42°	7,2671 $\angle$ -39,74°	-
29	0,0017 $\angle$ 123,87°	0,0122 $\angle$ 87,14°	7,1615 $\angle$ -36,73°	-
30	0,0010 $\angle$ 160,34°	0,0071 $\angle$ 118,65°	7,0569 $\angle$ -41,69°	-
31	0,0033 $\angle$ -80,66°	0,0229 $\angle$ -123,28°	6,9534 $\angle$ -42,62°	-
32	0,0014 $\angle$ 142,30°	0,0096 $\angle$ 98,77°	6,8512 $\angle$ -43,53°	-
33	0,0056 $\angle$ -30,91°	0,0378 $\angle$ -75,32°	6,7503 $\angle$ -44,41°	-
34	0,0022 $\angle$ -47,77°	0,0146 $\angle$ -93,04°	6,6508 $\angle$ -45,27°	-
35	0,0103 $\angle$ -92,16°	0,0675 $\angle$ -138,26°	6,5529 $\angle$ -46,10°	-
36	0,0012 $\angle$ -171,84°	0,0077 $\angle$ 141,26°	6,4565 $\angle$ -46,90°	-
37	0,0094 $\angle$ -36,29°	0,0598 $\angle$ -83,98°	6,3616 $\angle$ -47,69°	-
38	0,0040 $\angle$ 142,63°	0,0251 $\angle$ 94,18°	6,2684 $\angle$ -48,45°	-
39	0,0109 $\angle$ -88,26°	0,0675 $\angle$ -132,62°	6,1936 $\angle$ -44,36°	-
40	0,0053 $\angle$ -23,30°	0,0323 $\angle$ -73,38°	6,1030 $\angle$ -50,08°	-
41	0,0039 $\angle$ 77,22°	0,0235 $\angle$ 26,45°	6,0141 $\angle$ -50,77°	-
42	0,0090 $\angle$ 160,08°	0,0533 $\angle$ -73,61°	5,9269 $\angle$ -51,45°	-
43	0,0112 $\angle$ -110,33°	0,0654 $\angle$ -162,43°	5,8415 $\angle$ -52,10°	-
44	0,0084 $\angle$ 78,55°	0,0484 $\angle$ 25,81°	5,7577 $\angle$ -52,74°	-
45	0,0104 $\angle$ 99,60°	0,0590 $\angle$ 46,24°	5,6757 $\angle$ -53,36°	-
46	0,0069 $\angle$ -137,22°	0,0387 $\angle$ 168,65°	5,6075 $\angle$ -54,13°	-
47	0,0043 $\angle$ -9,87°	0,0238 $\angle$ -64,58°	5,5283 $\angle$ -54,71°	-
48	0,0028 $\angle$ 164,16°	0,0153 $\angle$ 108,88°	5,4507 $\angle$ -55,28°	-
49	0,0036 $\angle$ 73,51°	0,0193 $\angle$ 17,68°	5,3748 $\angle$ -55,83°	-
50	0,0010 $\angle$ -43,62°	0,0053 $\angle$ -100,63°	5,3005 $\angle$ -57,01°	-

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ramazan Tuygun OTHAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara, 29.10.1985

Adres: Cevizli Mah. Altan Sok. Yonca Sitesi, I Blok Daire No.7
Maltepe / İSTANBUL

Lisans Üniversitesi: Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi,
Elektrik Mühendisliği Bölümü.

Yayın Listesi:

