

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ
ANAHTARLAMA OLAYLARININ DİNAMİK ANALİZİ
VE HARMONİK BİLEŞENLERİN BU OLAYLAR
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Elektrik Yük. Müh. Oktay ARIKAN

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi :

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR

: Prof. Dr. Serhat ŞEKER

: Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

: Doç. Dr. Nurettin UMURKAN

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Dünyada Güç Sistemlerinin Gelişimi	4
1.2 Türkiye’de Güç Sistemlerinin Gelişimi	7
1.3 Güç Sistemlerinde Geçici Olaylar	9
1.4 Güç Sistemlerinde Harmonikler	10
1.5 Güç Sistemlerindeki Geçici Olayların İncelenmesi.....	10
2. DİNAMİK SİSTEMLERİN DURUM UZAYI TEKNİĞİ KULLANILARAK ANALİZİ.....	13
2.1 Lineer Sistemlerin Diferansiyel Eşitlikler ve Durum Uzayı Gösterimi ile Analizi.....	13
2.1.1 Lineer Homojen Sistemler	14
2.1.2 Lineer Homojen Olmayan Sistemler	14
2.2 Nonlinear Sistemlerin Diferansiyel Eşitlikler ve Durum Uzayı Gösterimi ile Analizi	15
2.2.1 Nonlinear Sistemlerin Lineerleştirilmesi	16
2.3 Durum Matrisinin Özözellikleri	18
2.4 Dinamik Sistemlerin Özdeğerler İle Kararlılık Analizi	19
3. GÜÇ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE GÜÇ SİSTEMİNİN DURUM UZAYI GÖSTERİMİ	23
3.1 İletim Hattı Modelleri	23
3.1.1 Kısa İletim Hatları	24
3.1.2 Orta Uzunluktaki İletim Hatları	24
3.1.3 Uzun İletim Hatları	25
3.2 Yük Modelleri	26
3.2.1 Sabit Empedans Yük Modeli.....	26
3.2.2 Sabit Güç Yük Modeli	27
3.3 Güç Sisteminin Durum Uzayı Gösterimi	28
3.3.1 Güç Sisteminin Kayıplı Hat Modeli	28

3.3.2	Güç Sisteminin Kayıpsız Hat Modeli.....	31
3.3.3	Hat Modeline Kondüktansın ve Korona Direncinin Dahil Edilmesi.....	32
3.3.4	Durum Uzayı Tekniği ile Harmonikli Bileşenlerin Modellenmesi.....	34
4.	GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ GEÇİCİ OLAYLAR.....	38
4.1	Geçici Olayların Etkisi.....	38
4.2	Geçici Olayların Sınıflandırılması.....	39
4.3	Güç Sistemlerindeki Geçici Olayların Tipleri ve Nedenleri.....	40
4.3.1	Yük Anahtarlanması.....	40
4.3.2	Arıza Akımlarının Temizlenmesindeki Anahtarlamalar.....	41
4.3.3	Kondansatör Grubunun Anahtarlanması.....	44
4.3.4	Enterkonnekte Bağlantı İçin Anahtarlama.....	44
4.3.5	Transformatörlerin Enerjilendirilmesindeki Anahtarlamalar.....	45
5.	GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ.....	46
5.1	Harmoniklerle İlgili Tanım ve Kavramlar.....	46
5.2	Harmonikli Durumda Elektriksel Büyüklükler.....	48
5.2.1	Harmoniklerin Etkilerinin Belirlenmesi.....	49
5.2.1.1	Toplam Harmonik Distorsiyonu.....	50
5.2.1.2	Tekil Harmonik Distorsiyonu.....	50
5.2.1.3	Toplam Talep Distorsiyonu.....	50
5.3	Harmonik Kaynakları.....	51
5.4	Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler.....	54
5.5	Harmonik Standartları.....	56
5.6	Harmoniklerle İlgili Ölçümler.....	59
6.	SAYISAL UYGULAMALAR.....	63
6.1	Sayısal Uygulama 1.....	67
6.1.1	Lineer Yüklü Anahtarlamasız Durum İçin Modellerin Karşılaştırılması.....	70
6.1.2	Hat Başında Anahtarlama Olması Hali İçin Modellerin Karşılaştırılması.....	72
6.1.3	Hat Başında Anahtarlama Olması Hali İçin Hat Modellerinin Karşılaştırılması..	73
6.1.4	Hat Başında Anahtarlama Olması Hali İçin Hat Modelinde Eşdeğer Kondüktansın Kullanılması.....	75
6.1.5	Nonlineer Yüklü Anahtarlamasız Durum İçin Modellerin Karşılaştırılması.....	77
6.1.6	Nonlineer Yüklenme Halinde Geçici Olayların İncelenmesi.....	80
6.2	Sayısal Uygulama 2.....	83
6.3	Sayısal Uygulama 3.....	90
6.4	Sayısal Uygulama 4.....	93
6.5	Sayısal Uygulama 5.....	99
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	103
	KAYNAKLAR.....	110
	ÖZGEÇMİŞ.....	114

SİMGE LİSTESİ

A	Durum matrisi
C	Kapasite
$\cos\phi$	Güç faktörü
D	Distorsiyon gücü
f	Frekans
G	Kondüktans
HD_I	Akım için tekil harmonik bozulması
HD_V	Gerilim için tekil harmonik bozulması
i	n. harmonik akımının ani değeri
I	Akım
I_n	n. harmonik akımının efektif değeri
I_L	Ortak bağlantı noktasından ölçülen maksimum yük akımı
I_{SC}	Ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı
L	Endüktans
n	Harmonik mertebesi
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
Q_C	Kapasitif reaktif güç
Q_L	Endüktif reaktif güç
R	Direnç
S	Görünür güç
THD_I	Akım için toplam harmonik bozulması
THD_V	Gerilim için toplam harmonik bozulması
v	n. harmonik gerilimin ani değeri
V	Gerilim
V_n	n. harmonik geriminin efektif değeri
Δ	Küçük sapma
δ	Yük açısı
θ	Gerilimin açısı
λ	Özdeğer
ω	Açısal frekans
ζ	Osilasyon genliğinin azalma hızı

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternatif Current (Alternatif Akım)
ÇYG	Çok Yüksek Gerilim
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DSİ	Devlet Su İşleri
EİEİ	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
EMTP	Elektromanyetik Transient Programı
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
GF	Güç Faktörü
HVDC	Yüksek Gerilim Doğru Akım (High Voltage Direct Current)
IEC	International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
MTA	Maden Tetkik ve Arama
ODE	Ordinary Differential Equation (Adi Diferansiyel Denklem)
OG	Orta Gerilim
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu (Total Demand Distortion – TDD)
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEK	Türkiye Elektrik Kurumu
TETAŞ	Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
THD	Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozulması)
TNA	Geçici Olay Şebeke Analizörü (Transient Network Analyzer)
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
YG	Yüksek Gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması	19
Şekil 2.2 Farklı özdeğer kombinasyonuna bağlı olarak oluşan denge noktaları	22
Şekil 3.1 İletim hattının tek faz eşdeğer devresi.....	24
Şekil 3.2 Kısa iletim hattının tek faz eşdeğer devresi.....	24
Şekil 3.3 Orta uzunluktaki iletim hattının tek faz eşdeğer devreleri	25
Şekil 3.4 Uzun iletim hattı eşdeğer π modeli	25
Şekil 3.5 Kapasitif yük için sabit empedans yük modelleri	26
Şekil 3.6 Endüktif yük için sabit empedans yük modelleri.....	27
Şekil 3.7 Sabit güç yük modelleri.....	27
Şekil 3.8 Güç sisteminin kayıplı hat modeli	29
Şekil 3.9 Güç sisteminin kayıpsız hat modeli	31
Şekil 3.10 Güç sisteminin kondüktans dahil kayıplı hat modeli	32
Şekil 3.11 Güç sisteminin harmonik bileşenler dahil eşdeğer modeli	35
Şekil 3.12 Güç sisteminin harmonikli durumda tek faz eşdeğer modeli	36
Şekil 3.13 Harmonik bileşenlerin etkisinin durum değişkenine eklenmesi	37
Şekil 4.1 Yük anahtarlama.....	41
Şekil 4.2 Arıza akımlarının temizlenmesi için yapılan anahtarlama.....	42
Şekil 4.3 Kondansatör grubu anahtarlama.....	44
Şekil 4.4 İki sistemin enterkonnekte bağlanması	45
Şekil 4.5 Transformatörlerin enerjilendirilmesi	45
Şekil 5.1 Nonsinüsoidal dalga ve bileşenleri.....	47
Şekil 5.2 Transformatörün mıknatıslanma akımı ve harmonik spektrumu.....	52
Şekil 5.3 Demir-çelik tesisine ait harmonik ölçümleri	53
Şekil 5.4 Bilgisayar ve klimaya ait harmonik spektrumları ve dalga şekilleri.....	54
Şekil 5.5 Demir-çelik tesisine ait harmonik ölçümleri	60
Şekil 5.6 Primer akımının 22. ,24. ,26. ,28. ve 30. harmonik bileşenleri.....	61
Şekil 5.7 Primer akımı toplam talep bozulumu	61
Şekil 5.8 Fazlararası gerilimin 3., 5. ve 7. harmonik bileşenleri	62
Şekil 6.1 Sayısal uygulamalarda incelenen sistemin tek hat şeması ve ölçüm yapılan nokta .	63
Şekil 6.2. Ölçüm yapılan tesise ait 380 kV'luk şalt merkezinden bir görüntü.....	64
Şekil 6.3 Ölçüm cihazları ve bağlantılarına ait örnek görüntüler.....	64
Şekil 6.4 L1 fazına ait akım harmoniği spektrumu.....	66
Şekil 6.5 Modellenen örnek güç sistemi	68

Şekil 6.6 Hat başı anahtarlama işlemi yapılan örnek sistem	69
Şekil 6.7 Lineer yük ve anahtarlamasız halde hat sonundaki gerilim değişimleri	71
Şekil 6.8 Lineer yük ve anahtarlamasız halde hat akımının değişimleri	71
Şekil 6.9 Lineer yük ve anahtarlamasız halde yük akımının değişimleri	72
Şekil 6.10 Geçici durumda hat kapasitesi üzerinde oluşan gerilimin değişimleri.....	72
Şekil 6.11 Geçici durumda hat akımının değişimleri	73
Şekil 6.12 Geçici durumda kayıplı ve kayıpsız hat modeli için yük uçlarındaki gerilimin değişimleri	74
Şekil 6.13 Geçici durumda kayıplı ve kayıpsız hat modeline göre hat akımının değişimleri..	74
Şekil 6.14 Geçici durumda korona direncinin etkisinin olmaması ve olması için hat kapasitesi üzerinde oluşan gerilimin değişimleri	76
Şekil 6.15 Geçici durumda korona direncinin etkisinin olmaması ve olması için hat akımının değişimleri	76
Şekil 6.16 Geçici durumda kayıplı hat modeli için kondüktans ve korona direncinin modelde olmaması ve olması için yük akımının değişimleri	77
Şekil 6.17 Nonlinear yüklü durum için hat akımının değişimleri	78
Şekil 6.18 Nonlinear yüklü durum için hat sonundaki gerilim değişimleri	78
Şekil 6.19 Durum uzayı modeli ile farklı yüklerin hat akımlarının karşılaştırılması	79
Şekil 6.20 Durum uzayı modeli ile farklı yüklerin hat sonu gerilimlerinin karşılaştırılması ..	79
Şekil 6.21 Yükün lineer ve nonlinear olması halinde hat kapasitesi ile yük uçlarındaki gerilimin değişimi	81
Şekil 6.22 Yükün lineer ve nonlinear olması halinde hat akımının değişimi	81
Şekil 6.23 Yükün lineer, nonlinear yük olması ve akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat büyük olması halinde hat kapasitesi geriliminin değişimi	82
Şekil 6.24 Yükün lineer, nonlinear yük olması ve akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat büyük olması halinde hat akımının değişimi	83
Şekil 6.25 Sayısal uygulama 2 için analizi yapılan anahtarlama durumları	84
Şekil 6.26 Hat başında anahtarlama hali için hat akımının değişimleri (Durum A)	86
Şekil 6.27 Hat başında anahtarlama hali için yük akımının değişimleri (Durum A)	86
Şekil 6.28 Hat başında anahtarlama hali için yük uçlarında oluşan gerilimin değişimleri (Durum A)	87
Şekil 6.29 Yükün devreden çıkıp tekrar devreye girmesi hali için hat akımının değişimleri (Durum B).....	87
Şekil 6.30 Yükün devreden çıkıp tekrar devreye girmesi hali için yük akımının değişimleri (Durum B).....	88

Şekil 6.31 Çalışma 2 için Durum A ve Durum B'nin hat akımlarına etkisinin karşılaştırılması	88
Şekil 6.32 Çalışma 2 için Durum A ve Durum B'nin yük akımlarına etkisinin karşılaştırılması	89
Şekil 6.33 Çalışma 2 için Durum A ve Durum B'nin yük uçlarındaki gerilime etkisinin karşılaştırılması	89
Şekil 6.34 İncelenen güç sistemi için araştırılan çalışma koşulları	90
Şekil 6.35 Hat akımının farklı çalışma koşullarına göre değişimi	92
Şekil 6.36 Yük akımının farklı çalışma koşullarına göre değişimi	92
Şekil 6.37 Lineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için hat akımının değişimi	94
Şekil 6.38 Lineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için hat sonundaki gerilim değişimi	94
Şekil 6.39 Lineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için yük akımının değişimi	95
Şekil 6.40 Nonlineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için hat akımının değişimi	95
Şekil 6.41 Nonlineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için hat sonundaki gerilim değişimi	96
Şekil 6.42 Akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat olması hali için hat akımının değişimi.....	96
Şekil 6.43 Akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat olması hali için hat sonundaki gerilim değişimi	97
Şekil 6.44 Sabit güçlü yük modelinde, yükün lineer, ölçülen nonlineer yük olması ve akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat büyük olması halinde hat akımının değişimi...	97
Şekil 6.45 Sabit güçlü yük modelinde, yükün lineer, ölçülen nonlineer yük olması ve akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat büyük olması halinde hat kapasitesi (yük uçları) üzerinde oluşan gerilimin değişimi	98
Şekil 6.46 Özdeğerlerin imajiner kısımlarının değişimi	100
Şekil 6.47 Özdeğerlerin reel kısımlarının değişimi	101
Şekil 6.48 Hat başında anahtarlama meydana gelmesi durumu için hat akımının değişimi..	101
Şekil 6.49 Hat başında anahtarlama meydana gelmesi durumu için yük akımının değişimi.	102
Şekil 6.50 Hat başında anahtarlama meydana gelmesi durumu için hat sonu gerilim değişimi	102

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 OECD ülkelerinin 2006 yılına ait güç ve enerji değerleri	6
Çizelge 3.1 Meydana gelen geçici olaya göre α ve β değerleri	34
Çizelge 4.1 Güç sistem elemanlarında meydana gelen arızaların dağılımı	42
Çizelge 4.2 Havai hatlarda değişik tipteki arızaların oluşma sıklığı	43
Çizelge 5.1. Çeşitli ülkelerdeki harmonik standartları.....	56
Çizelge 5.2. IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları.....	57
Çizelge 5.3. 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri	57
Çizelge 5.4. 20 - 154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri.....	58
Çizelge 5.5 Kabul edilebilir akım harmonik limitleri	59
Çizelge 6.1 Yüke ait elektriksel değerler	65
Çizelge 6.2 L1 Fazı akım harmoniği bileşenlerine ait ölçülen değerler	65
Çizelge 6.3 Güç sistemine ait simülasyonlarda kullanılan değerler	66
Çizelge 6.4 Sayısal uygulamalarda gerçekleştirilen analizler	67
Çizelge 6.5 Hattın kayıplı ve kayıpsız olarak modellenme durumları için elde edilen efektif değerler	75
Çizelge 6.6 İncelenen sisteme ait elektriksel değişkenlerin THD değerleri	85
Çizelge 6.7 Tüm yükler devrede iken hat akımı ve geriliminin toplam harmonik distorsiyonu değerleri.....	93
Çizelge 6.8 Hat akımı, gerilimi ve yük akımına ait %THD değerleri	98
Çizelge 6.9 Simülasyonlarda kullanılan güç sistemine ait değerler	99
Çizelge 6.10 Hat uzunluğunun ℓ ve 3ℓ olduğu haller için durum matrisinin özdeğerleri ...	100

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgisi ve katkıları ile destek olan çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye, çalışmalarımı yönlendiren ve yakın ilgisini gördüğüm Yrd. Doç .Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na, Anabilim Dalı Başkanımız çok kıymetli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR'a ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bana destek olan ve büyük yardımlarını gördüğüm aileme ve arkadaşlarıma özellikle teşekkür etmek isterim.

Elektrik Yük. Müh. Oktay ARIKAN

ÖZET

Elektrik güç sisteminden beklenen, kaliteli, güvenilir, kararlı ve sürekli bir elektrik enerjisi sağlamasıdır. Güç kalitesinin sağlanması açısından, güç sistemlerinde meydana gelen geçici olayların incelenmesi ve etkilerinin belirlenip, gerekli önlemlerin alınması büyük önem arz eder.

Güç sistemlerinin tasarımında, hatlardaki ve şalt merkezlerindeki yalıtım seviyeleri ile koruma elemanlarının belirlenmesi önemli bir yere sahiptir. Bunların belirlenmesinde yıldırım düşmesi, anahtarlama olayları ve arızalar nedeniyle oluşan geçici olayların etkileri gözönüne alınır.

Güç sisteminde her geçen gün artan nonlinear yükler, sistem içerisinde harmonik bileşenlere neden olmaktadır. Harmonik bileşenler, güç kalitesinin sağlanması açısından önemli bir problemi ortaya çıkarmaktadır. Harmonik bileşenlerin sistem davranışına etkilerinin analizi, güç sisteminin işletiminde büyük yarar sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, güç sisteminde meydana gelen geçici olaylardan olan anahtarlama işlemlerinin, sistemde meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Analizlerde farklı hat ve yük kombinasyonları için, lineer ve nonlinear yüklenme durumları gözönüne alınmıştır. Böylece harmonik bileşenlerin anahtarlama işlemleri esnasında sistem davranışına etkileri ortaya konulmuştur. Analizlerde, durum uzayı tekniği kullanılarak oluşturulan modeller ve dinamik elektriksel modeller kullanılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile modellerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler : Güç sistemleri, geçici olaylar, harmonikler, hat modelleme, yük modelleme, durum uzayı tekniği

Dynamic Analysis of Switching Operations in Electric Power Systems and Influence of Harmonic Components on These Operations

ABSTRACT

Electric power systems have to provide a qualified, reliable, stable and continual electrical energy. Analyzing the power system transients and determining their effects are important for power quality.

Determination of power system transient and their effects, caused by lightning, switching operations and faults, is necessary for design of protective devices and selection of insulation levels. Adequate insulation levels and protection is indispensable for transmission lines and stations.

At the present time, increased numbers of nonlinear loads are the source of power systems harmonic components. Harmonic components are the considerable factor for distortion of power quality. Analyzing the influence of harmonics on system behaviour is beneficial for power system operations.

In this thesis, power system switching transients and their effects on the system behaviour are analyzed. Linear and nonlinear load conditions are considered for various line and load combinations in the analyses. By this way, influences of harmonics on switching operations are exhibited. State-space model and dynamic electrical model are used for the simulations. Comparisons of the models are realized by the simulations.

Keywords : Power systems, transients, harmonics, line modelling, load modelling, state-space technique

1. GİRİŞ

Dünyada elektrik enerjisine olan talep, nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojiadaki gelişmelerle birlikte giderek artmaktadır. Elektrik enerjisine olan bu gereksinim, daha kaliteli, güvenilir, kararlı ve sürekli bir elektrik enerjisi arzına olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir.

Güç sistemlerinin gelişmesi ile birlikte, elektrik enerjisinin üretiminde, iletiminde ve dağıtımında karşılaşılan problemlerde farklılıklar ve artışlar meydana gelmiştir. Sistemde meydana gelen geçici (transient) olaylar da bu problemlerin başlıcaları arasında yer almaktadır.

Geçici olayların sebepleri, yıldırım düşmesi, anahtarlama olayları ve arızalardır. Yıldırım düşmesi, sistemin normal çalışma koşulları içerisinde yapılan anahtarlama veya devre kesicisinin açması veya kapaması ile oluşan geçici olaylar, sistemde aşırı akım ve gerilimler oluşturmaktadır (Deshpande, 1984). Güç sistemlerinde oluşan akım ve gerilimlere genel olarak elektromagnetik geçici olaylar (transientler) denir. Bu olayların etkisiyle, iletim hatlarında darbe akım ve gerilimleri, transformatör ve generatör sargılarında ise osilasyonlar meydana gelmektedir (Dommel, 1974).

Güç sistemlerinin tasarımında, hatlardaki ve şalt merkezlerindeki yalıtım seviyeleri ile koruma elemanlarının belirlenmesi önemli bir yere sahiptir. Bunların belirlenmesi normal çalışma koşullarındaki akım ve gerilim seviyelerine göre yapılmaz. Güç sistemlerinde meydana gelebilecek geçici olayların etkileri de göz önüne alınır. Sistemin bu etkilere dayanabilecek şekilde tasarlanması veya geçici olaylar sonucu oluşan etkilerin koruma cihazları ile azaltılması gerekmektedir. Geçici olayların analizi, yalıtım seviyelerinin doğru biçimde yapılması ve koruma şemalarının uygun tasarımı için çok önemlidir. Geçici olaylar, yakındaki iletişim hatlarını olumsuz etkileyebilir, kullanılan teçhizatları hasara uğratabilir, rezonans ve kuplaja sebep olabilirler. Bu yüzden, geçici olayların etkilerinin neler olduğunun belirlenebilmesi için analizleri gereklidir. Sistem güvenilirliği için yalıtım seviyelerinin yüksek seçilmesi gerekir, fakat ekonomik sebeplerden dolayı da olabildiğince düşük olması gerekir (Mamış, 1997).

Güç sisteminde karşılaşılan anahtarlama olayları da sistemin sürekliliğini etkileyen faktörlerin en önemlilerindendir. Anahtarlama işlemleri esnasında aşırı akım ve gerilimler meydana gelir. Bunlar sebebiyle, sistem ekipmanlarında hasarlar ve sistemin kararlılığının bozulması gibi problemler ortaya çıkabilir.

Güç sisteminde meydana getirebilecekleri olumsuz etkiler sebebi ile geçici olayların analiz edilmesi büyük önem arz eder. Geçici olayların analizi için deneysel ve teorik pekçok çalışma yapılmıştır (Zdravkovic ve Vukelja, 1992; Kolcio vd.,1991; Macias vd., 2005; Semlyen ve Ramires, 2008; Mamış ve Nacaroglu, 2002; IEEE Committee Report, 1970; Chapman vd., 1999).

Geçici olayların analizi esnasında, yüksek gerilim seviyelerinde saha çalışmalarının getirdiği zorluklar, maliyetler ve güvenlik problemleri vardır. Bu nedenle, analizler için çeşitli metod, teknik ve programlar kullanılmaktadır.

Önceleri, güç sisteminde meydana gelen geçici olaylarla ilgili yapılan çalışma ve analizlerde, geçici olay şebeke analizörü (TNA-Transient Network Analyzer) kullanılmaktaydı (Kimbark ve Legate, 1968; Legate, 1971; Truax vd. 1978).

Çok basit durumlar hariç, geçici olayların elle hesaplanması pratik olarak imkansızdır. Bu zorluk, 1930'ların sonlarına doğru geçici olay şebeke analizörlerinin (TNA – Transient Network Analyzer) geliştirilmelerine sebep olmuştur. Bilgisayarların ve bilgisayar programlarının gelişmesiyle birlikte geçici olayların analizi için yapılan simülasyon programları TNA'lara rakip olmuştur.

TNA'lar analog olarak güç sistemi yapısını kullanarak analizleri gerçekleştirir. Bilgisayar tabanlı analiz teknikleri ise güç sisteminin geçici olaylar karşısındaki davranışını belirlemek için matematiksel modelinin oluşturulmasını gerektirir (Nelms vd., 1989).

Bilgisayar teknolojisindeki ilerleme, daha hızlı analizlere imkan vermiştir. Zaman ve frekans domeninde geçici olayların analizi için kullanılmaya başlanan programlar, çeşitli metodlar ile oluşturulmuşlardır (Gomez vd., 2005; Shinh vd., 2006). Bunlar, yürüyen dalga metodları (lattice diyagramı tekniği ve Bergeron metodu) (Bickford, 1980; Branin, 1967), elektromanyetik transientler programı (Dommel, 1969) ve Laplace ile Fourier dönüşümleri (Moreno, 1991; Al-Fuhaid, 1988; Zhi-yong vd., 2003;) olarak sıralanabilir. Ayrıca , güç sistemlerinde oluşan geçici olayların durum uzayı yaklaşımı kullanılarak da modellenmesi mümkündür (Nelms vd., 1989; Semlyen, 1984; Mamış, 1997; Mamış ve Köksal, 2000; Cao vd.,2004).

Yürüyen dalga problemleri, bilgisayarların kullanılmaya başlanmasından çok önce, grafiksel metodlar ile 1920 ve 1930'lardan beri kullanılmaktaydı; örneğin bu metodlar Bewley'in lattice diyagramı tekniği ve Bergeron'un metodudur. Lattice diyagramı tekniğinde, iletilen ve yansıyan dalgalar yansıma ve kırılma katsayılarıyla hesaplanmaktadır. Karakteristikler

metodu, Löwy ve Schnyder tarafından hidrolik darbeler için kullanılmıştır. Bergeron bu metodu çok çeşitli problemlere uygulamış ve şiddetle savunmuştur. Bu yüzden günümüzde Bergeron metodu olarak bilinir. Bu yöntemde yansıma ve kırılma katsayılarına ihtiyaç yoktur. Bunların yerine lineer akım ve gerilim ilişkileri kullanılır (Dommel 1974).

Elektromanyetik transient programı (EMTP) ise Dommel'in fikirlerini temel almaktadır (Dommel 1969; Dommel, 1971; Dommel, 1974). Dommel'in geliştirdiği, tek veya çok fazlı sistemlerde toplu ve dağılmış parametrelili olması halleri için, elektromanyetik geçici olayların zaman cevaplarını bulmayı amaçlayan genel bir çözüm metodudur. Bu metodu temel alan bir bilgisayar programı BPA'da (Bonneville Power Administration – Bonneville Güç İdaresi) ve Münih Teknoloji Enstitüsünde, güç sistemleri ve elektronik devrelerdeki geçici olayların analizleri için kullanılmıştır (Dommel, 1969). Bu programda sistemde bulunan bütün bileşenler için oluşturulmuş basit eşdeğer şebekeler (sistemler - networks) kullanılır. Eşdeğer şebekelerle temsil edilen sistemin düğüm eşitlikleri formüle edilir. Bu eşitliklerin çözümü ile sistemdeki geçici olaylar analiz edilir (Nelms, 1989).

Bergeron'un metodu ve lattice diyagramı tekniği, kayıpsız ve bozulmaların olmadığı (distortionless) hatlar için geçerlidir (Dommel, 1974). Fakat, hatlardaki bozulmalar ve kayıpların dikkate alınması geçici olaylar ile ilgili daha gerçekçi analizlere imkan verecektir.

Geçici olayların analizlerinde kullanılan programların çoğu tek fazlı sistemler için oluşturulmuştur. Daha sonra çok fazlı sistemler için de genişletilmişlerdir (Dommel 1974). Bu programlar HVDC sistemleri için de kullanılmışlardır (Hingorani, 1970; Long, 1973).

Geçici olayların analizleri için Laplace ve Fourier dönüşüm teknikleri de kullanılmaktadır (Moreno, 1991; Al-Fuhaid, 1988, kaynak ver yöntemlerde var birkaç tane). Ayrıca, çözüm zamanlarını kısaltmak amacıyla süperpozisyon teknikleri de önerilmekte ve kullanılmaktadır (Kalra ve Stanek, 1973; Nakanishi ve Ametani, 1986).

Durum uzayı tekniği ise güç sisteminin durum modelinin formüle edilmesi ile geçici olayların analiz edilmesinde kullanılır. Bu teknikte durum değişkenleri yardımıyla, güç sisteminin geçici olaylar karşısındaki davranışları incelenebilir. Durum değişkenleri olarak sistemdeki kondansatör gerilimleri ve endüktans akımları seçilir. Elde edilen durum eşitliğinin çözümünden faydalanılarak analizler gerçekleştirilir (Nelms vd.,1989).

Durum uzayı tekniğinde iletim hattının toplu parametrelili gösterimi, durum eşitliklerini yazmak için kullanılır. İletim hattını çok sayıda toplu parametrelili bölümden oluşturularak modelleme imkanı vardır. Durum eşitlikleri analitik olarak çözülebilir veya çözüm için sayısal

integrasyon metodları da kullanılabilir (Mamış, 1997).

Durum uzayı tekniği kullanılarak, zaman domeninde yapılan analizlerde yüksek doğrulukla sistemler modellenebilmekte ve sonuçlar alınmaktadır. Herhangi bir sınırlama olmadan, güç sistem elemanları modele dahil edilebilmektedir. Yürüyen dalga metodlarındaki gibi sadece kayıpsız hat için analizlerin yapılması yerine çok geniş bir yelpazede araştırma ve analiz imkanları sunmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, güç sistemlerinin transient (geçici) olayların dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elektrik güç sistemlerinde anahtarlama operasyonları ile arızalar sonucu meydana gelen geçici olaylar incelenmiş olup, saha ölçümleri sonucunda elde edilen değerlerden de faydalanılarak, ülkemizde bulunan radyal bir iletim hattı ve bu hattan beslenen yük için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Bu konularda daha önce yapılan çalışmalarda, ihmal edilen güç sistem harmoniklerinin etkileri simülasyonlara dahil edilerek, geçici olayların nonsinüsoidal şartlardan etkilenmesi ortaya konulmuştur. Ayrıca, farklı modelleme durumlarının sistem davranışı üzerindeki etkileri analiz edilirken etkin kondüktans kullanılarak, korona direncinin modele eklenmesi ve etkilerinin analizi sağlanmıştır.

Çalışmanın gerçekleştirilmesinde, dinamik sistemlerin çalışmalarını incelemede de kullanılan durum uzayı tekniği kullanılarak anahtarlama olaylarının etkileri incelenmiştir. Ayrıca, hat parametrelerindeki değişimlerin sistem kararlılığı ve davranışı üzerindeki etkileri özdeğerlerin analizi ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, ülkemizde ulusal enerji ağıımızda bulunan bir güç sistemi modellenerek dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Durum uzayı tekniği ile matematiksel model gerçekleştirilmiş ve daha sonra Matlab SimpowerSystems programı kullanılarak gerçekleştirilen dinamik elektriksel model ile karşılaştırmaları yapılmıştır.

1.1 Dünyada Güç Sistemlerinin Gelişimi

Dünyada kurulan ilk güç sistemi Thomas Edison'a ait olan ve Eylül 1882'de işletmeye alınan New York'taki tarihi Pearl Street Santrali'dir. Bu sistem yaklaşık 1,5 km yarıçapındaki bir bölgedeki 59 müşteriye güç sağlayan bir buhar makinesi ile DC generatörü içeren bir DC sistem olup (Kundur, 1993), her biri 83 W'lık 400 lambadan oluşan bir yükü beslemekteydi (Weedy, 1998). Enerji dağıtımında 110V'luk yeraltı kablo sistemi kullanılmıştı (Kundur, 1993). Düşük gerilim seviyesinden dolayı oluşan aşırı hat kayıpları sebebi ile Edison'un

firmaları enerjiyi santrallerden sadece kısa mesafelere dağıtabilmekteydi (Saadat, 1999).

DC enerji sistemleri başlangıçta yaygın olarak kullanılmalarına karşın zamanla yerlerini AC sistemlere bırakmışlardır. 1890'lı yıllar elektrik enerjisi iletiminin AC ya da DC olması konusunda yaşanan önemli tartışmalarla geçmiştir. Yüzyılın sonlarında AC sistemlerin DC sistemlere göre üstünlüğü kabul edilmiş ve AC sistemler tüm dünyada yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu yaygınlaşmada, transformatörün icadı ve gelişimi ile birlikte AC iletim sistemlerde gerilim seviyeleri arasında kolaylıkla dönüşüm yapılabilmesi ve böylece, üretim, iletim ve tüketim için değişik gerilim seviyelerinin kullanımına esneklik sağlanması, AC generatörlerin DC generatörlere göre daha basit olması ve AC motorların, DC motorlara göre daha basit ve ucuz olması etkin olmuştur.

Bu gelişim sırasında dünyada pekçok elektrik enerjisi üretim firması kurulmuştur. Başlangıçta, çeşitli firmalar farklı frekanslarda (25Hz, 59Hz, 60Hz, 125Hz ve 133Hz gibi) enerji üretimi gerçekleştirmişlerdir. Enterkonnekte sistemin ve paralel çalışma ihtiyacının ortaya çıkması ile Amerika Birleşik Devletleri (A.B.D.) ve Kanada'da 60Hz'lik frekans benimsenirken, Avrupa ülkelerinin çoğu 50Hz'lik sistemleri seçmişlerdir (Kundur, 1993).

Daha büyük miktarlardaki güçlerin uzak mesafelere iletilme ihtiyacı, daha yüksek gerilim seviyelerine çıkılmasına neden olmuştur. İlk AC sistemlerde fazlararası 12, 44 ve 60kV'luk gerilimler kullanılmıştır. 1922'de 165kV, 1923'te 220kV, 1935'de 287kV, 1953'te 330kV ve 1965'de 500kV seviyelerine çıkmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde 1966'da 735kV ve 1969'da 765kV seviyelerine çıkmıştır. Sınırsız sayıda gerilim seviyesinin olmasını önlemek amacıyla, endüstri gerilim seviyelerini standartlaştırmıştır. Bu standart değerler, yüksek gerilim sınıfı için 115, 138, 161 ve 230kV ve ekstra yüksek gerilim sınıfı için 345, 500 ve 765kV olmuştur (Rustebake, 1983; Gross, 1986).

Dünyadaki elektrik kullanımındaki artış yaklaşık senelik %7'dir ve kurulu güce olan ihtiyaç 10 yılda bir, iki katına çıkmaktadır. Dünyadaki genel ticari faaliyetlerle doğrudan ilişkili olan bu oran, olumsuz ekonomik süreçlerde azalmalar göstermektedir. A.B.D'deki ve diğer sanayileşmiş ülkelerde 1973'ten itibaren artış oranında azalma eğilimi ortaya çıkmıştır. İngiltere'de birkaç yıl tüketimdeki artış oranı %2'nin altına düşmüştür (Weedy, 1998).

Kriz dönemlerinde ticari faaliyetlerin azalması dışında, dünyadaki elektrik enerjisi talebi giderek artış göstermektedir. Kişi başına düşen tüketim miktarları ülkelerin gelişmişlik düzeylerini göstermektedir. Çizelge 1.1'de OECD ülkelerine ait 2006 yılındaki kurulu güç, brüt ve kişi başına üretim ile net tüketim değerleri görülmektedir (TEİAŞ, IEA Statistics,

Electricity Information 2008).

Çizelge 1.1 OECD ülkelerinin 2006 yılına ait güç ve enerji değerleri

Ülkeler	Toplam Kurulu Güç (GW)	Brüt Üretim (TWh)	Kişi Başına Düşen Üretim (kWh/kişi)	Net Tüketim (TWh)
AVUSTURALYA	51,4	251,7	12,13	219,8
AVUSTURYA	19,2	63,5	7,67	60,0
BELÇİKA	16,3	85,6	8,12	86,3
KANADA	125,8	612,6	18,78	527,8
ÇEK CUMHURİYETİ	17,5	84,4	8,21	59,5
DANİMARKA	13,0	45,7	8,40	34,9
FİNLANDİYA	16,6	82,3	15,62	86,8
FRANSA	116,2	574,5	9,09	446,1
ALMANYA	131,6	636,8	7,73	542,5
YUNANİSTAN	13,6	60,8	5,45	54,8
MACARİSTAN	8,6	35,9	3,56	36,6
İZLANDA	1,7	9,9	33,10	9,2
İRLANDA	6,4	28,1	6,60	25,7
İTALYA	89,5	314,1	5,34	317,5
JAPONYA	278,8	1100,4	8,61	994,0
KORE	70,1	404,0	8,36	371,3
LÜKSEMBURG	1,7	4,3	9,21	6,6
MEKSİKA	53,8	249,7	2,38	197,5
HOLLANDA	23,0	98,4	6,02	111,3
YENİ ZELANDA	8,9	43,5	10,51	38,8

NORVEÇ	29,5	121,7	26,11	111,1
POLONYA	32,4	161,7	4,24	121,2
PORTEKİZ	14,5	49,0	4,64	48,5
SLOVAKYA	8,2	31,4	5,83	25,0
İSPANYA	82,1	303,1	6,88	256,8
İSVEÇ	34,1	143,3	15,78	133,5
İSVİÇRE	19,1	64,0	8,47	57,7
TÜRKİYE	40,6	176,3	2,42	144,1
İNGİLTERE	83,1	398,3	6,58	351,3
ABD	1077,7	4300,1	14,34	3816,8
OECD TOPLAMI	2484,9	10535,0	8,94 (ort.)	9291,9

Elektrik enerjisine olan talep arttıkça, üretim noktalarından tüketim noktalarına elektrik enerjisini ulaştırmak için kullanılan enerji iletim hatlarının uzunlukları ve karşılaşılan problemler de artış göstermiştir. Üretim noktalarından uzak olan tüketim bölgelerinin iletim için olabildiğince (teknik ve ekonomik bakımdan) yüksek gerilim seviyelerine çıkılması ihtiyacı vardır. Böylece kayıpların düşük olması ve istenen gücün uygun biçimde tüketicilere ulaştırılması hedeflenmektedir.

1.2 Türkiye’de Güç Sistemlerinin Gelişimi

Ülkemizdeki enerji sisteminin ait geçmişe ve günümüze ait veriler, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) ve Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) tarafından yayınlanan ve internet sitelerinde mevcut bulunan istatistik ve faaliyet raporlarından elde edilmiştir.

Ülkemizde kurulan ilk elektrik üreticisi, 1902 yılında Tarsus’ta tesis edilen, su değirmenine bağlanmış 2 kW gücündeki bir dinamodur. İlk büyük santral ise 1913 yılında İstanbul Silahtarağa’da kurulmuştur. Bu tarihte ülkemizin kurulu gücü 17,3 MW idi.

Ülkemizin kurulu gücü 1923 yılında 32,8 MW iken 2007 yılında yaklaşık olarak 1.245 kat artarak 40.835,7 MW’a ulaşmıştır. 1923 yılında 44,5 GWh olan üretimimiz ise 2007 yılında yaklaşık olarak 4.304 kat artarak 191.558,1 GWh’e ulaşmıştır. 1923 yılında kişi başına düşen

kurulu güç miktarı 2,7 Watt ve tüketim miktarı 3,3 kWh değerlerindeyken, 2007 yılı itibariyle kişi başına düşen kurulu güç 579 Watt'a ve net tüketim miktarı ise 2.198 kWh'e yükselmiştir.

1935 yılına gelindiğinde, Etibank, Maden Tetkik ve Arama (MTA) ile Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) kurulmuş, daha sonra İller Bankası ve Devlet Su İşleri (DSİ) devreye girmiştir. Bu tarihte kurulu güç 126,2 MW, brüt üretim 222,9 GWh ve elektrikleştirilmiş il merkezi sayısı da 43 olmuştur.

1948 yılında Çatalağzı Termik Santrali devreye girmiş ve 1952 yılında İstanbul'a 154 kV'luk bir iletim hattı bağlantısı yapılmıştır.

1950'li yıllarda devlet ve özel sektör eliyle santraller yapılmaya ve işletilmeye başlanmıştır. Bunlar, imtiyazlı şirket olarak kurulan, Adana ve İçel yöresine elektrik veren Çukurova Elektrik A.Ş. (ÇEAŞ) ile Antalya yöresine elektrik veren Kepez Elektrik A.Ş.'dir. 1950 yılının başında kurulu gücümüz 407,8 MW'a, üretimimiz 789,5 GWh'e ulaşmıştır.

1970 yılına gelindiğinde; artan üretim, dağıtım ve tüketim sonucunda hizmetin yaygınlaşması, kurumsal bir yapıyı zorunlu kılmış ve Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) kurulmuştur. Böylelikle, Belediyeler ve İller Bankası dışında bütünlük sağlanmıştır. Bu tarihte kurulu gücümüz 2.234,9 MWA ve üretimimiz 8.623 GWh seviyelerine yükselmiştir.

1970-1980 tarihleri arasındaki yıllarda, Dünya'daki enerji krizinden Türkiye de etkilenmiş, termik santrallerin yakıtlarının, çoğunlukla dışa bağımlı olmasından arz ve talep dengesi bozulmuş, dolayısıyla zorunlu enerji kısıtlamalarına başvurulmuştur. Bütün bu olumsuzluğa karşın, Türkiye kurulu gücü 1980 yılında 5.119 MW ve üretim değeri 23.275,4 GWh'e ulaşmıştır.

1982 yılında Belediyeler ve Birliklerin ellerindeki elektrik tesisleri TEK'e devredilmiş, bundan böyle tüm satışların, köy satışları da dahil olmak üzere TEK tarafından yapılması sağlanmıştır. Bu tarihte kurulu gücümüz 6.639 MW, üretimimiz 26.552 GWh olarak gerçekleşmiştir. 1970 yılında toplam köy sayısının %7'si elektrikleştirilmişken, 1982 yılına gelindiğinde bu oran % 61'e ulaşmıştır.

1984 yılında, enerji sektöründeki TEK tekeli kaldırılmış, gerekli izinli alınarak kurulacak özel sektör şirketlerine de enerji üretimi, iletimi ve dağıtımı konusunda olanaklar sağlanmıştır.

1993 yılında TEK, "Türkiye Elektrik Üretim, İletim A.Ş." (TEAŞ) ve "Türkiye Elektrik

Dağıtım A.Ş.” (TEDAŞ) adı altında iki ayrı İktisadi Devlet Teşekkülüne ayrılmıştır.

2001 yılında TEAŞ kurumu, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ) ve Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi (TETAŞ) olacak şekilde üç ayrı İktisadi Devlet Teşekkülü olarak yeniden teşkilatlandırılması kararlaştırılmıştır.

Yıllar boyunca gelişim gösteren ulusal güç sistemimiz bugün artık ulaştığı üretim, iletim ve tüketim değerleriyle dünyanın en büyük güç sistemlerinden biri haline gelmiştir. 2007 yılı değerlerine göre ülkemizin kurulu gücü 40.835,7 MW’a, toplam brüt üretimi 191.558,1 GWh’e ve net tüketim ise 155.135,2 GWh’e ulaşmıştır. Kişi başına değerler ise 579 W kurulu güç, 2.714 kWh brüt üretim ve net tüketim 2.198 kWh olmuştur. Ülkemizde halen 380 kV, 220 kV, 154 kV ve 66 kV’luk gerilim seviyelerindeki enerji iletim hatları mevcuttur. 2007 yılı sonunda 380 kV’luk hatların uzunluğu 14.338,4 km’ye, 220 kV’luk hat uzunluğu 84,6 km’ye, 154 kV’luk hatların uzunluğu 31.383 km’ye ve 66 kV’luk hat uzunluğu 477,4 km değerlerindedir. İletim hatlarımızın toplam uzunluğu 46.283,4 km’ye ulaşmıştır

1.3 Güç Sistemlerinde Geçici Olaylar

Enerji sistemi, sisteme eklenen hatlar ve yükler ile sürekli genişlemektedir. Güç sisteminin çok büyük olması sistemin kontrolünü de zorlaştırmaktadır. Sistem üzerinde meydana gelen her olayın istenilen sürede tespit edilip, kontrol altına alınması enerjinin sürekliliği ve kalitesi açısından önemlidir.

Güç sisteminde meydana gelen geçici olaylar arızalara, enerjide süreksizliğe ve sistem kararlılığının bozulmasına neden olurlar

Devreye yük girip çıkması, kompanzasyon elemanlarının işletmeye alınıp çıkarılması, ring şebekelerde kaynaklardan (hattan) birinin devreye girip çıkması veya arıza sebebi ile ringin diğer tarafından yükün beslenmeye başlanması, hat tarafında veya yük tarafında meydana gelen arızalar sebebiyle devre kesicinin açması gibi anahtarlama olaylarının gerçekleşmesi, geçici olaylar olarak adlandırılır.

Geçici olaylar sonucu, sistemde görülecek büyüklüklerin belirlenmesi ve bunlara karşı önlem alınması güç sistem işleticilerinin en önemli hedefleri arasındadır.

Geçici olaylarda meydana gelen kısa süreli geçici davranışların etkilerinin incelenmesi güç

sisteminin tasarlanması, işletilmesi, koruma şeklinin ve seviyelerinin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, çeşitli durumlarda karşılaşılan geçici olaylar irdelenmiş ve nonsinüoidal şartlardaki etkileri ortaya konulmuştur.

1.4 Güç Sistemlerinde Harmonikler

Güç sistemlerinin analizleri önceleri, akım gerilim karakteristikleri lineer kabul edilerek gerçekleştirilmekteydi. Fakat son 20 yılda yarı-iletken teknolojisindeki gelişmeler sonucu bu teknolojinin kullanılması giderek yaygınlaşmıştır. Yarı-iletken elemanların büyük güçlü nonlinear yüklerle birlikte kullanımının yaygınlaşması, akım ve gerilim dalga şeklinde bozulmalara ve bunun getirdiği problemlerin artmasına neden olmuştur. Giderek artan bu problemler sebebi ile temel frekans olan 50 Hz'den farklı akım ve gerilim bileşenlerin dikkate alınması ve bunlara sınırlamalar getirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır.

Güç sistemindeki harmoniklerin etkilerinin incelenebilmesi için elektriksel büyüklükler, harmonikli durumlar için tekrar tanımlanmıştır. Harmoniklerin tespiti, ölçümü ve analizi önem kazanmış ve sistem davranışı nonsinüoidal şartlar için incelenmeye çalışılmıştır. Güç sistem elemanları harmonik bileşenler için yeniden modellenmiş ve frekans bağımlı modellemelerin analizde kullanılması sağlanmıştır.

Harmonikler sadece sistemdeki akım ve gerilimin dalga şeklini bozmakla kalmayıp, ek kayıplar, arızalar, ...v.s. gibi hem teknik hem ekonomik problemlere de sebep olmaktadır. Bu konu ile ilgili olarak açıklamalar Bölüm 5'te detaylı verilmiştir.

Bu çalışmada harmonik bileşenlerin bulunduğu gerçek bir sistem ele alınmış ve geçici olaylara nonsinüoidal şartların etkisi araştırılmıştır. Güç sistem analizindeki geçici olaylar nonsinüoidal şartlar altında irdelenmiştir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, geçici olaylar lineer yüklenme durumu için analiz edilirken bu çalışma ile nonlinear yüklenme durumu ortaya konulmuştur. Böylece sistemin gerçek çalışma şartlarındaki geçici olayları analiz edilmiş, sistem tasarımı ve işletimi için sonuçlar çıkarılmıştır.

1.5 Güç Sistemlerindeki Geçici Olayların İncelenmesi

Bu tez çalışmasında güç sistemlerinde sürekliliği, güvenilirliği ve kararlılığı olumsuz etkileyen ve güç sisteminde meydana gelen geçici olaylardan biri olan anahtarlama işlemlerinin sistem davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Analizlerde durum uzayı tekniği ile oluşturulan analitik model ile dinamik elektriksel modelin davranışları karşılaştırılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda ihmal edilen harmonik bileşenlerin etkileri de modellere dahil edilerek, harmonik bileşenlerin anahtarlama olayları üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Hat anahtarlama, yük anahtarlama ve sisteme yük eklenmesi için yapılan anahtarlama durumları incelenmiştir.

Bölüm 1’de güç sistemlerinde meydana gelen geçici olaylar tanıtılmış ve bunların analizi için kullanılan metod ve teknikler ile ilgili literatür çalışması yapılmıştır. Güç sistemlerinin dünyadaki ve ülkemizdeki gelişimi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Güç sistemlerindeki geçici olayların neler olduğu hakkında kısa bilgiler verilmiş ve güç sistem harmonikleri ile ilgili kısa bir tanıtım yapılmıştır .

Bölüm 2’de dinamik bir sistem olan güç sisteminin dinamik analizinde kullanılan durum uzayı tekniği açıklanmıştır. Farklı tipteki dinamik sistemler için kullanılan yöntemler tanıtılmıştır. Durum uzayı yaklaşımı, güç sistemlerindeki geçici olayların analizinde kullanılan ve iyi sonuçlar alınmasını sağlayan bir tekniktir. Daha önce yapılan çalışmalarda kullanılmış, olan EMTD programı ve dönüşüm teknikleri ile yapılan çalışmalarla kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada, durum uzayı tekniği ile ülkemiz enerji sisteminde yer alan bir güç sistemi modellenmiştir. Bu model ile MATLAB SimpowerSystems programı kullanılarak gerçekleştirilen dinamik elektriksel modelin geçici olaylar esnasındaki davranışları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, önceki çalışmalarda ihmal edilen harmonik bileşenlerin etkilerinin de bu yaklaşım ile modellere eklenebileceği ve analizlerde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bölüm 3’te güç sistemlerinin elemanlarından olan iletim hatlarının ve yüklerin modellenmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Sayısal uygulamalar kısmında durum uzayı tekniği ve dinamik elektriksel model kullanılarak analizleri gerçekleştirilen, kayıplı hat modeli, kayıpsız hat modeli, kondüktans ve korona direncinin sisteme dahil edildiği model ve harmonik bileşenlerin ihmal edilmediği haller için durum uzayı yaklaşımı ile gerçekleştirilen güç sistem modelleri açıklanmıştır.

Bölüm 4’te güç sistemlerinde meydana gelen geçici olaylar, oluşma sebepleri ve sınıflandırmaları anlatılmıştır. Geçici olayların en önemlilerinden biri olan anahtarlama olayları ile ilgili açıklayıcı bilgiler verilmiştir. Hat anahtarlama, yük anahtarlama, kapasitör gruplarının anahtarlama, enterkonnekte bağlantı ve transformatör enerjilendirilmesi için yapılan anahtarlama gösterilmiş ve etkileri anlatılmıştır. Yapılan

sayısal uygulamalarla gerçekleştirilen analizlerde, hat ve yük anahtarlama ele alınmış ve iletim hattı ile yük modellerinin sistem davranışına etkileri ortaya konulmuştur. Bu olayların etkilerinin daha gerçekçi analizi için harmonik bileşenler de modele dahil edilip anahtarlama olayları üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Bölüm 5'te, güç sistemimizde etkileri giderek artan harmonik bileşenlerle ilgili bilgiler verilmiştir. Güç sistemlerinde bulunan nonlinear yükler sebebi ile oluşan harmonikler, harmonikli durumdaki tanımlar, harmonik üreten güç sistem elemanları ve harmonik bileşenlerin sistemde meydana getirdiği olumsuz etkiler açıklanmıştır. Bu tez çalışmasında, harmoniklerin dahil edildiği modeller kullanılarak, anahtarlama işlemleri esnasındaki sistem davranışları analiz edilmiştir.

Bölüm 6'da, durum uzayı tekniği ve dinamik elektriksel model kullanılarak sayısal uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal uygulamalarda, enerji sistemimizde bulunan bulunan 174 km uzunluğundaki, 380 kV'luk yüksek gerilim enerji iletim hattı ve ona bağlı olan yük incelenmiştir. Gerçek veriler kullanılarak sistem modellenmiş ve anahtarlama olaylarının etkileri analiz edilmiştir.

Birinci sayısal uygulamada, farklı hat modelleri için harmonik bileşenlerin ihmal edildiği ve modele dahil edildiği haller için analizler gerçekleştirilmiştir. Durum uzayı modeli ile dinamik elektriksel modelin davranışları karşılaştırılmıştır. İkinci sayısal uygulamada, farklı yüklenme şartlarında hatbaşı ve yük anahtarlama etkileri analiz edilmiştir. Sayısal uygulama 3'te, sisteme farklı özelliklerdeki harmonik bileşenlere sahip yükün ilave edilmesinin incelemesi yapılmıştır. Dördüncü sayısal uygulamada, yük modellemesinin etkilerinin ortaya konulması için sabit empedans ve sabit güç modellerinin kullanılması durumlarındaki sistem davranışları ortaya konulmuştur. Son sayısal uygulamada ise, dinamik analizlerde özdeğerlerin değişiminin etkileri analiz edilmiştir.

Bölüm 7'de, çalışmada yapılan analizlerden ulaşılan tespitler ve değerlendirmeler verilmiştir. Tüm uygulamalarla, elde edilen sonuçlar ortaya konulmuş ve öneriler yapılmıştır.

2. DİNAMİK SİSTEMLERİN DURUM UZAYI TEKNİĞİ KULLANILARAK ANALİZİ

Dinamik sistemlerin analizinde, sisteme ait adi diferansiyel denklem (Ordinary Differential Equation - ODE) eşitliklerinin çözümünden faydalanılır. Adi diferansiyel eşitlikler kümesi ile tanımlanan dinamik sistem davranışı, bu eşitliklerin matrisyel formda yazılması ile durum uzayı tekniği kullanılarak analiz edilebilir.

Lineer, nonlinear, homojen ve homojen olmayan sistemlerin dinamik analizi, olağan diferansiyel eşitliklerin kullanımı ile yapılabileceği ve analizde hangi yöntemlerin kullanılması gerektiği çeşitli kaynaklarda verilmiştir (Guckenheimer ve Holmes, 1983; Wiggins, 1990; Sastry, 1999; Kolman vd., 2002; Kundur, 1994).

Güç sistemleri de dinamik davranış gösteren sistemler olduğundan, olağan diferansiyel eşitlikler kümeleri ile ifade edilerek dinamik analizleri gerçekleştirilebilir. Vektör-matris notasyonu kullanılarak durum uzayı tekniği ile elektriksel büyüklükler tanımlanarak sistemin dinamik analizleri ve kararlılık tayinleri yapılabilir.

Bu çalışmada, ulusal elektrik sistemimiz içerisinde yer alan bir sistemin dinamik analizleri durum uzayı tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellemedeki farklılık ve ihmallerin dinamik davranışlara etkileri analiz edilmiştir. Elektrik sistemindeki nonlinear yükler sebebi ile oluşan harmonik bileşenlerin bulunması durumunda da analizlerde, durum uzayı tekniğinin kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Bu analizlerde kullanılabilecek teoriler aşağıda incelenmiştir.

2.1 Lineer Sistemlerin Diferansiyel Eşitlikler ve Durum Uzayı Gösterimi ile Analizi

Dinamik lineer sistemlerin en genel hali aşağıdaki eşitlikler ile gösterilebilmektedir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.2)$$

Burada, $x = x(t)$, $u = u(t)$; A, B, C ve D sabit katsayılarıdır.

Yukarıda verilen diferansiyel denklem formunu, bir dinamik sistem için n tane birinci derece adi diferansiyel denklem kümesi olarak düşünülerek matris formunda yazılırsa,

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \vdots \\ b_{n1} \end{bmatrix}$$

şeklinde gösterilebilir. Burada, sütun vektör olan $\mathbf{x}$, durum vektörüdür. $x_1, x_2, \dots, x_n$ 'ler ise durum değişkenleri olarak adlandırılırlar. $\mathbf{A}$ ve $\mathbf{B}$ sabitlerdir. $\mathbf{A}$, $n \times n$ boyutlu matris olup durum matrisi olarak adlandırılır ve çözümünden sistemin özdeğerleri elde edilir. $\mathbf{u}$, kaynak fonksiyonudur ve sistemin girdilerini ifade eder. $\mathbf{y}$, durum değişkenleri ve giriş değişkenleri ile ifade edilen çıkışların vektörüdür. Lineer sistemler kaynağın mevcut olup olmamasına göre homojen sistemler ve homojen olmayan sistemler olarak ikiye ayrılırlar.

2.1.1 Lineer Homojen Sistemler

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{2.3}$$

Bu durum, sistem girdilerinin olmaması halidir. $\mathbf{B}\mathbf{u}(t) = 0$ 'dır. $\mathbf{x}(x_0, t)$ 'nin, zamana ve ilk koşullara bağlı çözümü ($\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$),

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}t} \mathbf{x}_0 \tag{2.4}$$

olarak bulunur.

2.1.2 Lineer Homojen Olmayan Sistemler

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \tag{2.5}$$

Bu durum, sistem girdilerinin mevcut olması halidir. Zamana ve ilk koşullara göre çözümü,

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{x}_0 + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B}\mathbf{u}(\tau) d\tau \tag{2.6}$$

olarak bulunur.

2.2 Nonlinear Sistemlerin Diferansiyel Eşitlikler ve Durum Uzayı Gösterimi ile Analizi

Nonlinear sistemler en basit halde,

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.7)$$

Eşitliği ile gösterilebilir (Kundur, 1990; Guckenheimer ve Holmes, 1983). Dinamik sistemin davranışı, n tane 1. dereceden nonlinear olağan diferansiyel eşitlikler kümesi ile aşağıdaki formda tanımlanabilir:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.8)$$

burada n, sistemin sırası ve r, girdilerin sayısıdır. Bu vektör-matris notasyonu kullanılarak aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2.9)$$

Burada,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

olarak ifade edilir. Sütun vektör olan x, durum vektörü olarak gösterilir, ve x_i 'ler durum değişkenidir. Sütun vektörü u, sistem girdileri vektörü olup, sistem davranışını etkileyen dış sinyalleri belirtir. Zaman t ve durum vektörü x'in zaman göre türevi $\dot{x}$ ile gösterilmiştir. Eğer durum değişkenlerinin türevi zamanın fonksiyonu olarak belirtilememişse, sistem belirsizdir. Bu durumda, Eşitlik (2.9) basitleştirilerek,

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.10)$$

elde edilir.

Sistemin çıkış değişkenleri ile ilgilenildiğinde, durum değişkenleri ve giriş değişkenleri cinsinden aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$y = g(x, u) \quad (2.11)$$

burada,

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix}$$

olarak verilir. Sütun vektörü y , çıktıların vektörüdür ve g durum vektörü ile giriş değişkenlerinin çıkış değişkenleriyle ilgili nonlinear fonksiyonların vektörüdür.

2.2.1 Nonlinear Sistemlerin Lineerleştirilmesi

x_0 , başlangıç durum vektörü olup u_0 , araştırılacak küçük sinyal performansında denge noktasına karşılık gelen giriş vektörüdür. x_0 ve u_0 Eşitlik (2.10)'u sağladığında (Kundur, 1994),

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (2.12)$$

eşitliği gerçekleşir. Sistemin yukarıdaki durumdan küçük bir sapması için,

$$x = x_0 + \Delta x \quad u = u_0 + \Delta u$$

şeklinde yazılabilir, burada Δ küçük sapmayı göstermektedir.

Yeni durum Eşitlik (2.10)'u sağlamalıdır. Bu durumda,

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (2.13)$$

olur. Bozulmanın küçük olduğu kabul edilirse, lineer olmayan $f(x,u)$ fonksiyonları Taylor serilerinin açılımı cinsinden belirtilebilir. Δx ve Δu 'nun ikinci ve daha yüksek güçlerini içeren terimler gözardı edildiğinde,

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f_i[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \\ &= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \end{aligned}$$

$\dot{x}_{i0} = \dot{f}_i(x_0, u_0)$ olduğundan, aşağıdaki eşitliği elde ederiz,

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

$i = 1, 2, \dots, n$. Benzer biçimde Eşitlik (12.4)'ten,

$$\Delta \dot{y}_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r$$

elde edilir. Burada $j = 1, 2, \dots, n$. Bu nedenle, Eşitlik (2.10) ve (2.11)'in lineerleştirilmiş formları,

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.14)$$

$$\Delta \dot{y} = C \Delta x + D \Delta u \quad (2.15)$$

olur. Burada,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} ; \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki kısmi türevler, küçük bozulmanın analiz edildiği denge noktasında değerlendirilmektedir.

Eşitlik (2.14) ve (2.15)'te,

Δx : n boyutlu durum vektörünü,

Δy : m boyutlu çıkış vektörünü,

Δu : r boyutlu giriş vektörünü,

A : $n \times n$ durum veya işletme (plant) matrisini,

B : $n \times r$ boyutlu kontrol veya giriş matrisini,

C : $m \times n$ boyutlu çıkış matrisini,

D : m x r boyutlu, çıkışta direkt olarak görünen giriş oranını tanımlayan matrisi, belirtmektedir.

2.3 Durum Matrisinin Özözellikleri

Bölüm 2.1’de durum matrisi olarak tanımlandığı üzere A matrisinin, n x n boyutunda bir matris olduğu göz önüne alındığında, bu matrsten faydalanılarak dinamik sistemin özözellikleri olan özdeğerleri ve özvektörleri bulunabilir (Kundur, 1994; Kolman vd., 2002). A matrisini,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

olarak yazarsak, bu matrsten yararlanılarak elde edilen,

$$\lambda I - A = \begin{bmatrix} \lambda - a_{11} & -a_{12} & \cdots & -a_{1n} \\ -a_{21} & \lambda - a_{22} & \cdots & -a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{n1} & -a_{n2} & \cdots & \lambda - a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

matrisinin determinantına A’nın karakteristik polinomu denir. Burada I, n x n boyutunda birim matrisi ifade etmektedir. A’nın karakteristik denklemi,

$$p(\lambda) = \det(\lambda I - A) = 0 \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir.

$$\det(\lambda I - A) = 0$$

Eşitliğin çözümünden elde edilen n tane, $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ çözümü, A durum matrisinin özdeğerleridir.

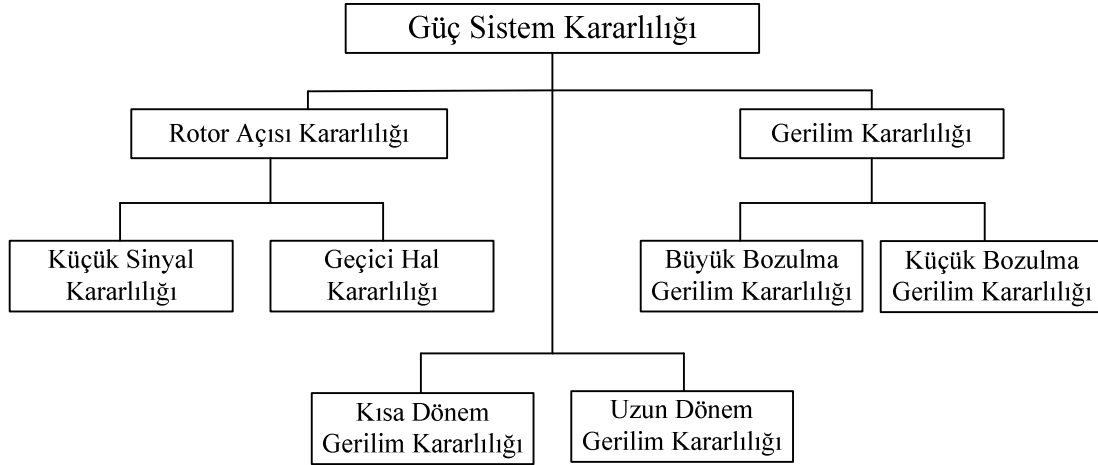
Herbir λ ’ya karşılık gelen,

$$(\lambda I - A)x = 0 \quad (2.19)$$

sisteminin çözümleri bulunabilir. Bunlar A’nın özvektörleridir.

2.4 Dinamik Sistemlerin Özdeğerler İle Kararlılık Analizi

Güç sistem kararlılığı geniş anlamda, güç sisteminin normal işletme koşullarında bir denge noktasında çalışması ve bozucu etki sonrasında kabul edilebilir yeni bir denge noktasında çalışma kabiliyeti olarak tanımlanır (Kundur, 1994). Güç sistemi de dinamik bir sistem olduğundan, diferansiyel denklemler yardımıyla yapılan çözümlerle sistemin kararlılığı ile ilgili bilgiler elde edilebilmektedir. Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması Şekil 2.1’de görülmektedir (Kundur, 1994).



Şekil 2.1 Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması

Sistemlerin kararlılık analizinde diferansiyel denklemleri kullanan ilk kişi Airy’dir. Daha sonra, Newton (1642-1727), G. W. Leibniz (1646-1716), J. F. Ricatti (1676-1754), Bernoulli kardeşler ve diğerleri tarafından sonsuz küçük hesabının keşfi ile diferansiyel denklem teorisi iyice geliştirilmiştir. Dinamik sistemlerin analizinde diferansiyel denklemlerin kullanımı, J. L. Lagrange (1736-1813) ve W. R. Hamilton (1805-1865) tarafından gerçekleştirilmiştir (Uyaroglu, 2002).

Kararlılık teorileri, 1800’ün ortalarından itibaren gelişmiştir. Bu konuda ilk çalışma J. C. Maxwell’in 1868’deki çalışmasıdır. Bu çalışmada, doğrusallaştırılmış diferansiyel denklemi kullanarak sistemin karakteristik denklemini ve karakteristik denklemin kararlılığa etkisi incelenmiştir (Uyaroglu, 2002).

A.M. Lyapunov’un çalışması, kontrol ve kararlılık teorilerinde önemli bir kaynaktır. 1892’de genelleştirilmiş enerji fikrini kullanarak doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin kararlılığını incelemiştir (Uyaroglu, 2002).

Güç sistemlerinin dinamik davranışları, sistem parametrelerindeki değişimlerle beraber değişmektedir. Bunlar yüke, iletim hattına veya kaynağa ait parametrelerdeki değişimler olabilir. Kararlılık analizlerinde diferansiyel denklem eşitlikleriyle yapılan modellemeler ve bunların çözümüyle elde edilen özdeğerler kullanılmaktadır. Dinamik sistemin kararlılığı ile ilgili analizler, durum matrisi A 'nın özdeğerlerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Sistem parametrelerindeki değişiklikler durum matrisini değiştirdiğinden matrisin özdeğerlerini de değiştirmektedir. Böylece, sistemin denge noktaları etrafındaki davranışları belirlenen özdeğerlere göre yorumlanabilmektedir.

Lyapunov'un ilk metoduna göre karakteristik denklemin köklerinin bulunmasıyla elde edilen A matrisinin özdeğerleri yardımıyla sistem kararlılığı hakkında şunlar söylenebilir (Kundur, 1994):

- Özdeğerler negatif reel kısımlara sahipse, sistem asimptotik kararlıdır.
- Özdeğerlerden en az birinin pozitif reel kısmı var ise, orijinal sistem kararsızdır.
- Eğer özdeğerlerin reel kısmı yoksa yani sıfır ise, genel olarak sistem kararlılığı ile ilgili olarak bir şey söylenemez.

Herhangi bir λ özdeğerinin zamana bağlı karakteristik gösterimi $e^{\lambda t}$ olarak belirtilebilir. Buna bağlı olarak, sistem kararlılığı aşağıda tarif edildiği gibi belirlenebilir. Bu özdeğere bağlı olarak sistemin davranışı kestirilebilir (Kundur, 1994).

- Reel özdeğerler osilasyonsuz moda uymaktadırlar. Negatif reel özdeğerler ise azalan modu temsil etmektedirler. Genlik büyüdükçe azalma daha hızlı olur. Pozitif reel özdeğerler periyodik olmayan kararsızlığı ifade ederler.
- Kompleks özdeğerler eşlenik çiftler olarak ortaya çıkarlar ve her çift bir salınımlı moda uymaktadır.

Kompleks çift özdeğerleri,

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.20)$$

ile gösterebiliriz. Özdeğerlerin reel bileşenleri, sönümü ve imajiner bileşenleri, salınım frekansını vermektedir. Negatif reel kısımlar sönümlü salınımları temsil ederken, pozitif reel kısımlar artan genlikli salınımları ifade etmektedir (Kundur, 1994).

Eşitlik (2.20)'den faydalanılarak, osilasyon frekansı,

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.21)$$

olarak belirlenebilir. Bu sistemin sönümlü frekansını temsil etmektedir. Sönüm oranı ise,

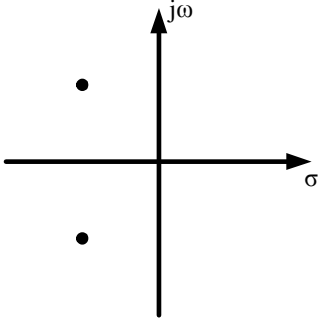
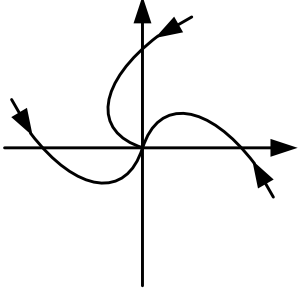
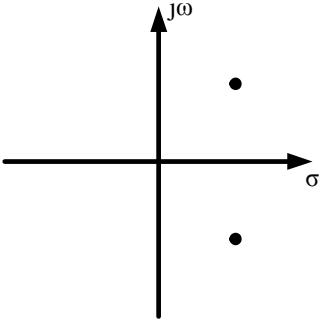
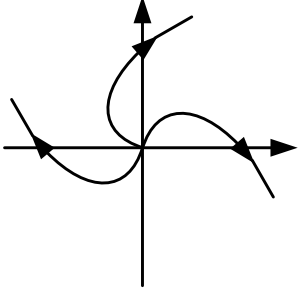
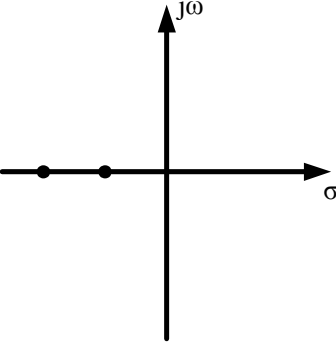
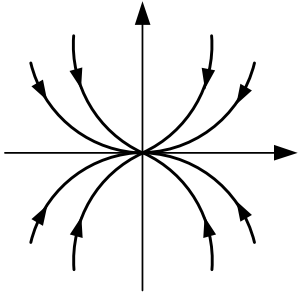
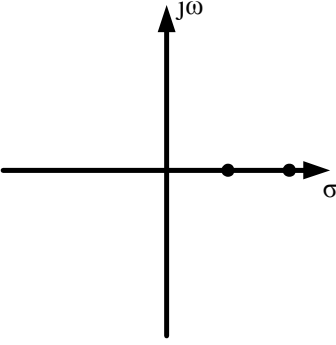
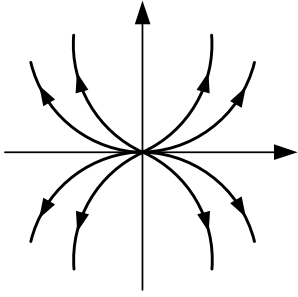
$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir. Sönüm oranı ζ , osilasyon genliğindeki azalma hızını belirtmektedir.

Dinamik sistemin davranışı sistem parametrelerinin değişimi ile değişmektedir. Örnek olarak iki boyutlu (2 durum değişkeni – 2 diferansiyel denklem ile modellenen) sistemin çözümü göz önüne alınarak, özdeğerlerin farklı değerleri için dinamik sistemin denge noktaları etrafındaki davranışlarının neler olacağı ortaya konulmuştur (Kundur, 1994; Kolman vd., 2002).

Dinamik sistemin özdeğerleri ve bunlara karşılık gelen özvektörlerinden yararlanılarak sistemin faz portresinin yapısı tanımlanabilir. Faz düzleminde, diferansiyel denklemlerin eşitliklerinin sıfır olduğu nokta dinamik sistemin denge noktasıdır. Denge noktası yakınındaki yörüngelerin davranışları, denge noktaları farklı tiplere ayırmak için kullanılan bir yoldur. Denge noktasının komşuluğundaki yörüngeler denge noktasına yakınsıyorsa denge noktası kararlıdır. Denge noktası orijin olan sistemde, denge noktası yakınındaki yörüngeler denge noktasından belirli bir uzaklıkta kalıyorlarsa denge noktası marjinal kararlıdır. Yörüngeler denge noktasından uzaklaşıyorsa, denge noktası kararsızdır. Yörüngelerin bir kısmının uzaklaşıp bir bölümünün de yaklaştığı denge noktaları ise eyer olarak tanımlanır.

Özdeğerlerin farklılıklarına göre dinamik sistemin davranışı iki boyutlu durumda farklı özdeğer kombinasyonları için değişimler göstermektedir. Şekil 2.2'de farklı özelliklerdeki özdeğerler için denge noktaları etrafında sistem davranışları hakkında örnekler verilmiştir (Kundur, 1994).

Özdeğerler ($\lambda = \sigma \pm j\omega$)	Denge Noktasının Tipi	Yörüngeler
	Kararlı odak	
	Kararsız odak	
	Kararlı düğüm	
	Kararsız düğüm	

Şekil 2.2 Farklı özdeğer kombinasyonuna bağlı olarak oluşan denge noktaları

3. GÜÇ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE GÜÇ SİSTEMİNİN DURUM UZAYI GÖSTERİMİ

Bu bölümde, öncelikle iletim hatları ve yük modellemeleri genel olarak verilmiştir. Daha sonra analizlerde kullanılan modellerin durum uzayı tekniği ile durum denklemleri kullanılarak modellenmesi gösterilmiştir. Modellemelere ait denklemler elde edilmiştir.

Diğer sistemler için de, bu tezde kullanılan dışındaki hat ve yük modelleri ile durum uzayı tekniği kullanılarak modellemenin ve analizin mümkün olacağı, bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada, güç sistemlerinin iletim hattı ve yük modellerinden faydalanılarak dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kaynak, sonsuz güçlü olarak modellenmiştir. Güç sisteminin analitik olarak modellenmesini sağlayan durum uzayı modeli ile SimpowerSystems kullanılarak gerçekleştirilen dinamik elektriksel model karşılaştırılmıştır. Farklı koşullardaki anahtarlama operasyonlarının etkileri ve modellerin davranışları incelenmiştir.

3.1 İletim Hattı Modelleri

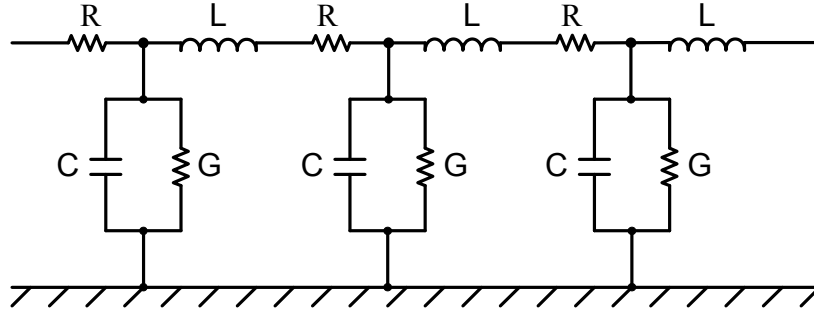
Dengeli sistemlerde iletim hatları tek faz eşdeğerleri ile modellenirler ve analizler bu modeller üzerinden yapılır. İletim hatları, uzunluklarına göre, kısa, orta ve uzun iletim hatları olarak adlandırılmaktadır (Saadat, 1999; Kundur, 1994; Çakır, 1989, Weedy ve Cory, 1998). Kısa ve orta uzunluktaki iletim hattı modellerinde toplu parametrelili gösterimi kullanılır. Uzun iletim hattı modelinde ise daha doğru modelleme için dağılmış parametrelili eşdeğer devrelerden faydalanılır.

Bu tez çalışmasında, 174 km uzunluğundaki, 380 kV'luk üç-fazlı havai hat ile beslenen yükten oluşan gerçek bir güç sistemi üzerinde analizler yapıldığından, bunlara ait modellemeler kullanılmıştır. Bu nedenle, bu kısımda havai hat modelleri ve eşdeğer devreleri verilmiştir.

Bir iletim hattını tanımlamak için dört parametreden faydalanılır. Bu parametreler, iletken öz direncine bağlı olarak gösterilen R seri direnci, iletkeni çevreleyen manyetik alandan dolayı L seri endüktansı, iletkenler arasındaki elektrik alan sebebiyle oluşan şönt kapasite C ve faz ile toprak arasındaki sızıntı akımlarından dolayı kullanılan şönt kondüktans G'dir. Yeraltı kabloları da aynı parametreler ile ifade edilir. Fakat kabloların karakteristikleri sebebiyle bu parametrelerin değerleri önemli ölçüde farklıdır (Kundur, 1994). Kullanılan modele göre bu parametrelerden bazıları ihmal edilebilir. Hattın kaçak geçirgenliği G, özellikle havai iletim

hatlarında ihmal edilmektedir (Stevenson, 1988).

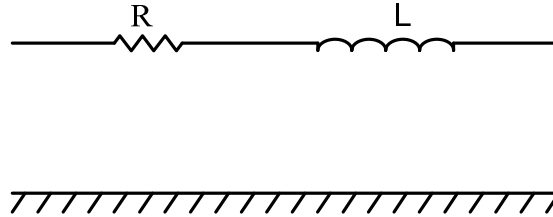
İletim hattının eşdeğerinin en genel gösterimi Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1 İletim hattının tek faz eşdeğer devresi

3.1.1 Kısa İletim Hatları

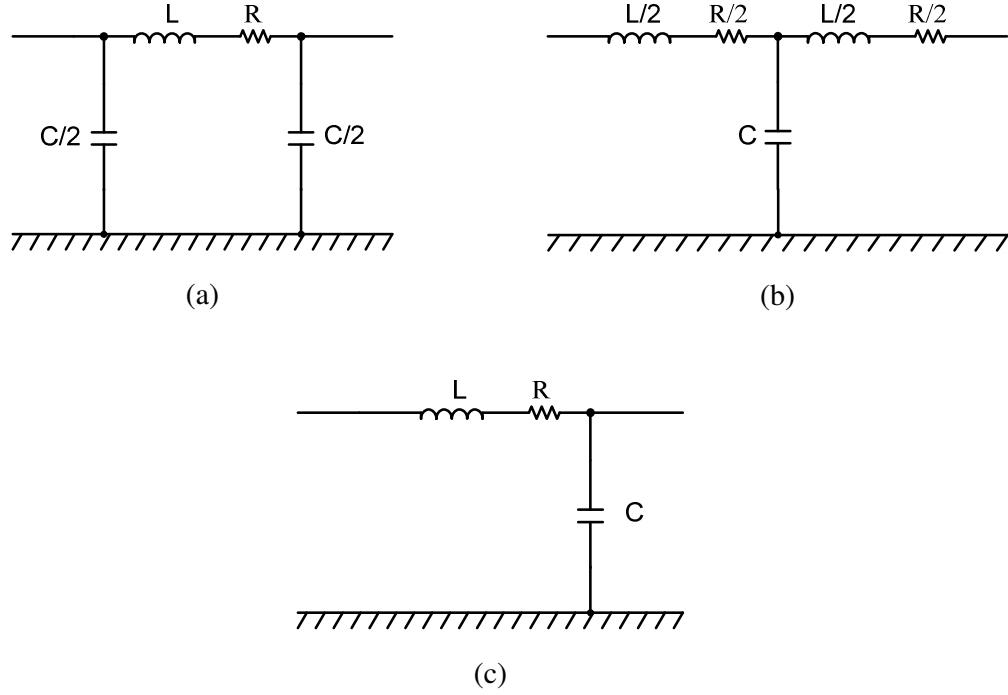
Uzunluğu 80 km'ye kadar olan iletim hatları kısa iletim hatları olarak tanımlanır. Değeri çok küçük olduğundan hattın şönt kapasitesi C , ihmal edilir. Kısa iletim hattının tek faz eşdeğer devresi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Kısa iletim hattının tek faz eşdeğer devresi

3.1.2 Orta Uzunluktaki İletim Hatları

Uzunluğu 80 km ile 240 km arasında olan iletim hatları orta uzunluktaki iletim hatları olarak tanımlanırlar. Hattın şönt kapasitesi ihmal edilmez ve tek faz eşdeğeri nominal π , nominal T veya L modeli olarak gösterilir. Şönt kapasite, nominal π modelinde hattın başında ve sonunda, nominal T modelinde hattın ortasında bulunur. L modelinde ise hattın başında veya sonunda (genellikle hattın sonunda) gösterilir (Mamış ve Herdem, 2003; Griffith vd., 1989). Orta uzunluktaki iletim hatlarının tek faz eşdeğer devreleri Şekil 3.3'te verilmiştir.

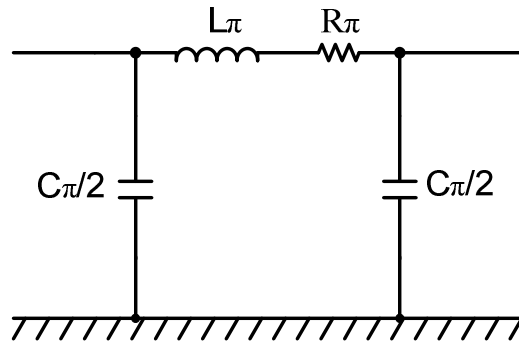


Şekil 3.3 Orta uzunluktaki iletim hattının tek faz eşdeğer devreleri

(a) Nominal π modeli, (b) Nominal T modeli, (c) Nominal L model

3.1.3 Uzun İletim Hatları

Ortalama uzunluğu, 240 km'den daha uzun olan hatlar, uzun iletim hattı olarak adlandırılır (Bazı kaynaklarda bu sınır 250 km veya 200 km olarak da geçmektedir (Saadat,1999; Kundur, 1994)). Uzun iletim hatlarının modellenmesinde toplu parametrelili gösterim kullanılmaz. Hat, eşdeğer π modeli kullanılarak dağılmış parametrelili olarak gösterilir. Uzun iletim hattın eşdeğer π modeli Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Uzun iletim hattı eşdeğer π modeli

3.2 Yük Modelleri

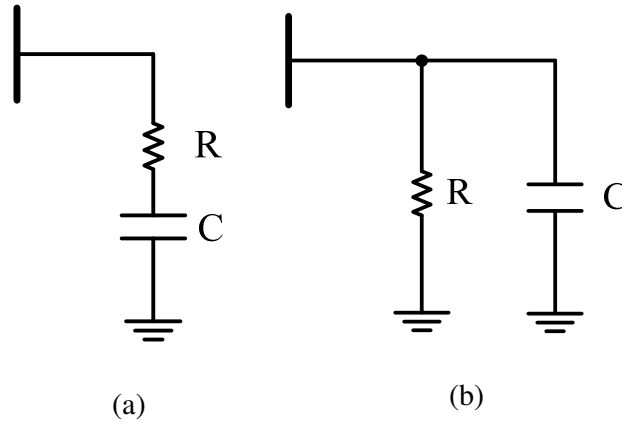
Güç sistemlerini meydana getiren önemli elemanlardan biri olan yüklerin modellenmesi için sabit empedans veya sabit güç modellerinden faydalanılmaktadır. Tez çalışmasında sabit empedanslı ve sabit güçlü yük modelleri kullanıldığından, bu kısımda yüklerin sabit empedans ve sabit güç olarak modellenmesi gösterilmiştir.

3.2.1 Sabit Empedans Yük Modeli

Güç sistemlerinin analizinde yükler, yükün özelliğine bağlı olarak farklı şekillerde modellenir, bunlardan biri de sabit empedans yük modeli kullanılarak modellemedir. Örneğin, ısıtıcılar gibi rezistif özellikteki yükler için sabit empedans modeli kullanılmaktadır. Modellemede yükler, birbirine seri veya paralel bağlı R, L ve C elemanları ile temsil edilir.

Yükün kapasitif veya endüktif olmasına göre sabit empedans yk modellerindeki elemanlar değişmektedir. Kapasitif yüklerde R ve C elemanları, endüktif yüklerde ise R ve L elemanları kullanılmaktadır.

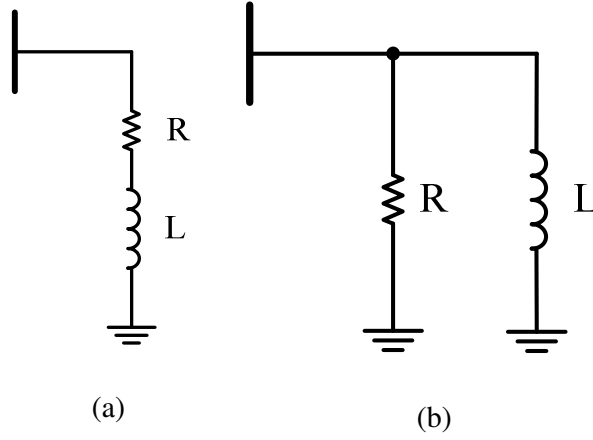
Yükün kapasitif olması halinde kullanılabilecek seri ve paralel bağlı sabit empedans yük modelleri Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5 Kapasitif yk için sabit empedans yük modelleri

(a) Seri Bağlı, (b) Paralel Bağlı

Endüktif yük olması durumu için kullanılacak seri ve paralel bağlı yük modelleri Şekil 3.6’da görülmektedir.



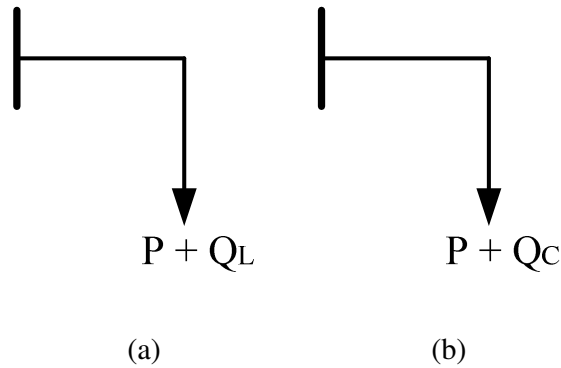
Şekil 3.6 Endüktif yük için sabit empedans yük modelleri

(a) Seri Bağlı, (b) Paralel Bağlı

3.2.2 Sabit Güç Yük Modeli

Güç sistemlerinde yapılan analizlerde yükün sabit güç çektiği durumlarda, örneğin asenkron makinada bu model kullanılır. Yüklerin sabit güç olarak modellenmesinde P-Q yük modelleri kullanılmaktadır. Yükün endüktif veya kapasitif olmasına göre, endüktif reaktif güç Q_L ya da kapasitif reaktif güç Q_C kullanılmaktadır.

Yükün endüktif ve kapasitif olması durumları için kullanılan yük modelleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Sabit güç yük modelleri

(a) Endüktif, (b) Kapasitif

3.3 Güç Sisteminin Durum Uzayı Gösterimi

Mühendislerce yapılan analizlerde yapılması gereken, önce sistemin modellenmesi gerçekleştirmek daha sonra sistemi matematiksel eşitlikler ile tanımlamaktır.

Bu çalışmada, durum uzayı modeli için, orta uzunluktaki iletim hattının toplu parametrelili gösterim ile L formunun eşdeğeri ve sabit empedans (seri R-L) yük modeli kullanılmıştır. Kullanılan güç sistemi modellerinin durum uzayı tekniği kullanılarak durum değişkenleri ile modellemeleri bu bölümde gösterilmiştir. Güç sisteminin durum uzayı tekniği analizinde kullanılan hat modelleri, kayıplı hat modeli, kayıpsız hat modeli, hattın kondüktansının ve korona direncinin dikkate alındığı hat modelleridir. Yük için ise, lineer yük modeli ve güç sistemlerinde bulunan akım harmoniği bileşenlerinin de sisteme dahil edildiği nonlinear yük modelleri kullanılmıştır.

Direnç, kapasite ve endüktansı ile akım ve gerilim kaynaklarından oluşan bir sistem, durum uzayı eşitliği olarak,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.1)$$

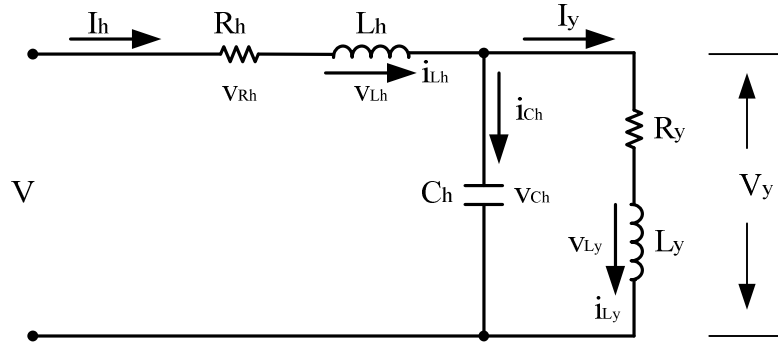
formunda ifade edilebilir. Bu eşitlikte, durum vektörü x , sistemde bulunan kapasitelerin uçlarında oluşan gerilimleri ve endüktanslar üzerinden akan akımları ifade eder. A ve B ise, sistemin parametrelerine bağlı reel sabit matrislerdir.

Güç sisteminde bulunan endüktans ve kapasitelerin akım ve gerilimleri, durum değişkeni olarak kabul edilerek diferansiyel denklem eşitlikleri ile ifade edilir. Bunları Eşitlik 3.1’de gösterildiği şekilde matrisyel formda yazarak güç sistemlerinin analitik olarak modellenmesi sağlanmış olur. Bu modeller kullanılarak sistemin geçici olaylardaki davranışları analiz edilebilir.

Tezde gerçekleştirilen analizlerde, sistemin dengeli olduğu kabulü ile tek faz eşdeğer devreler kullanılmıştır. Bu nedenle aşağıda, çalışmamızda kullanılan tek faz eşdeğerlerine ait modeller ve bunlarla ilgili durum uzayı gösterimleri yer almaktadır. Aynı yöntem ile üç fazlı modellemelerin yapılması da mümkündür.

3.3.1 Güç Sisteminin Kayıplı Hat Modeli

Analizleri yapılan güç sisteminin, hat başı sonsuz bara olarak kabul edilmiş olup iletim hattı toplu parametrelili L formu olarak ve yük sabit empedans olarak modellenmiştir. Şekil 3.8’de hattın direncinin ihmal edilmediği, kayıplı hat modelinin tek faz eşdeğeri görülmektedir.



Şekil 3.8 Güç sisteminin kayıplı hat modeli

R, L ve C gibi temel devre elemanlarının zaman domenindeki akım-gerilimleri arasında,

$$v_R(t) = R i_R(t) \quad (3.2)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (3.3)$$

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} \quad (3.4)$$

eşitlikleri geçerlidir. Bu temel eşitliklerle birlikte durum uzayı tekniği kullanılarak güç sisteminin matematiksel modeli oluşturulabilir. Enerji depo eden endüktans ve kapasite elemanlarının gerilim ve akımları durum değişkeni olarak alınabilir. Böylece diferansiyel eşitliklerle oluşturulan denklemler yardımıyla analiz edilmek istenen sistem modellenebilir.

Şekil 3.8’de görülen sistem için, iletim hattı endüktansının akımı i_{Lh} , hat kapasitesinin gerilimi v_{Ch} ve yük endüktansının akımı i_{Ly} , durum değişkenleri olarak seçildiğinde, bunlara ait diferansiyel denklem eşitlikleri ile sistemin analitik modeli oluşturulabilir. Bu modelin oluşturulmasında Eşitlik (3.2) – Eşitlik (3.4)’te verilen temel eşitliklerden faydalanılır. Eşdeğer devreden görüleceği üzere, hattın endüktansı üzerinden geçen akım hat akımına ($i_{Lh} = I_h$), kapasite üzerindeki gerilim aynı zamanda yük uçlarındaki gerilime ($v_{Ch} = V_y$) ve yük endüktansı üzerindeki akım da yük akımına ($i_{Ly} = I_y$) eşittir.

Gösterimde kolaylık sağlaması açısından bundan sonraki kısımlarda, $i_{Lh}(t) = x_1$, $v_{Ch}(t) = x_2$ ve $i_{Ly}(t) = x_3$ olarak gösterilmiştir.

Sistemin kaynak gerilimi, hat kapasitesi uçlarındaki gerilim ile hat direnci ve endüktansı üzerindeki gerilimlerin toplamına eşittir.

$$V = x_1 R_h + L_h \frac{dx_1}{dt} + x_2$$

Bu eşitliği düzenlediğimizde,

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{L_h} [V - R_h x_1 - x_2] \quad (3.5)$$

elde edilir. Hat akımı, hattın kapasitesi üzerinden geçen akım ile yük akımının toplamına eşittir.

$$x_1 = C_h \frac{dx_2}{dt} + x_3$$

Eşitliği düzenlediğimizde,

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{C_h} [x_1 - x_3] \quad (3.6)$$

elde edilir. Hat kapasitesi uçlarındaki gerilim yük gerilimine, yani yükün direnci ve endüktansı üzerindeki gerilimlerin toplamına eşittir.

$$x_2 = x_3 R_y + L_y \frac{dx_3}{dt}$$

Üçüncü durum değişkenin diferansiyel eşitliğini elde etmek üzere düzenlendiğinde,

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{L_y} [x_2 - x_3 R_y] \quad (3.7)$$

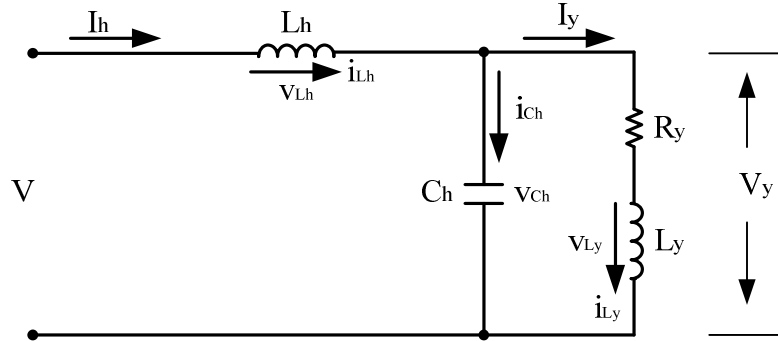
elde edilir. Bulduğumuz (3.5), (3.6) ve (3.7) eşitliklerini düzenleyip, durum uzayı eşitliği şeklinde matris formunda yazdığımızda,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_h}{L_h} & -\frac{1}{L_h} & 0 \\ \frac{1}{C_h} & 0 & -\frac{1}{C_h} \\ 0 & \frac{1}{L_y} & -\frac{R_y}{L_y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_h} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V \quad (3.8)$$

ortaya çıkar. Böylece kayıplı hat için sistem davranışı analitik olarak modellenmiş olur. Bilgisayar programları vasıtası ile çözüm gerçekleştirilerek sistem davranışı analiz edilebilir.

3.3.2 Güç Sisteminin Kayıpsız Hat Modeli

İletim hattının toplu parametrelili gösteriminde, hattın direnci ihmal edildiğinde hat kayıpsız olarak modellenmiş olur. Hat direncinin küçük olduğu sistemlerde, yapılan analiz ve simülasyon çalışmalarında sistemin davranışına direncin etkisi az olduğu için çalışmalarda ihmal edilmektedir. Hattın direncinin yüksek olduğu koşullarda bu ihmalden kaçınılmalıdır. Bu tezde incelenen güç sistemi için direncin ihmal edilip edilmemesinin sistem davranışı üzerindeki etkisini ortaya konmuştur. Yapılan analizde, hem direncin ihmal edildiği kayıpsız hat modeli ile (analitik olarak durum uzayı tekniği kullanılarak modellenmiş) hem de kayıplı hat modeli ile davranışları karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.9 Güç sisteminin kayıpsız hat modeli

Bölüm 3.3.1’de gösterildiği şekilde bu model içinde sistemin, durum uzayı modeli oluşturulabilir. Bu koşuldaki parametrelere göre çözüm yapıp diferansiyel eşitlikler düzenlendiğinde,

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{L_h} [V - x_2] \quad (3.9)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{C_h} [x_1 - x_3] \quad (3.10)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{L_y} [x_2 - x_3 R_y] \quad (3.11)$$

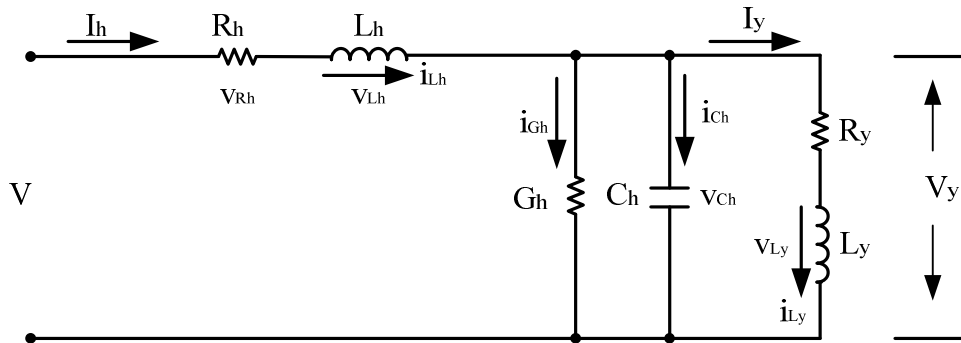
eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlikler düzenlenip, kayıpsız hat modelindeki durum uzayı eşitliği,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_h} & 0 \\ \frac{1}{C_h} & 0 & -\frac{1}{C_h} \\ 0 & \frac{1}{L_y} & -\frac{R_y}{L_y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_h} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V \quad (3.12)$$

olarak yazılır.

3.3.3 Hat Modeline Kondüktansın ve Korona Direncinin Dahil Edilmesi

İletim hatlarında, sızıntı akımlarını temsil etmek üzere kullanılan ve kaçak geçirgenliği ifade eden kondüktanslar, yapılan simülasyon ve analiz çalışmalarında genellikle ihmal edilmektedir. Fakat, yıldırım düşmesi ve anahtarlama olayları gibi, geçici aşırı gerilim ve akımların ortaya çıktığı durumlarda ihmal edilemez. Böyle durumlarda, hattın kondüktansının da göz önüne alınması gerekir.



Şekil 3.10 Güç sisteminin kondüktans dahil kayıplı hat modeli

Şekil 3.10'daki eşdeğer devre için durum uzayı eşitliğini yazabiliriz. Sistemin kaynak gerilimi, hat kapasitesi uçlarındaki gerilim ile hat direnci ve endüktansı üzerindeki gerilimlerin toplamına eşittir.

$$V = x_1 R_h + L_h \frac{dx_1}{dt} + x_2$$

Bu eşitliği düzenlediğimizde,

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{L_h} [V - R_h x_1 - x_2] \quad (3.13)$$

elde edilir. Hat akımı, hattın kapasitesi üzerinden geçen akım (i_{Ch}) ile hattın kondüktansı üzerinden geçen akım (i_{Gh}) ve yük akımının toplamına eşittir.

$$x_1 = x_2 + C_h \frac{dx_2}{dt} + x_3$$

Eşitliği düzenlediğimizde,

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{C_h} [x_1 - x_2 G - x_3] \quad (3.14)$$

eşitliği oluşur. Hat kapasitesi uçlarındaki gerilim yük gerilimine, yani yükün direnci ve endüktansı üzerindeki gerilimlerin toplamına eşittir.

$$x_2 = x_3 R_y + L_y \frac{dx_3}{dt}$$

Üçüncü durum değişkenin diferansiyel eşitliği,

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{L_y} [x_2 - x_3 R_y] \quad (3.15)$$

olarak elde edilir. Bulduğumuz (3.13), (3.14) ve (3.15) eşitliklerini düzenleyip, durum uzayı eşitliği şeklinde matris formunda yazdığımızda,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_h}{L_h} & -\frac{1}{L_h} & 0 \\ \frac{1}{C_h} & -\frac{G_h}{C_h} & -\frac{1}{C_h} \\ 0 & \frac{1}{L_y} & -\frac{R_y}{L_y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_h} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V \quad (3.16)$$

ortaya çıkar. Böylece kondüktans dahil kayıplı hat için sistem davranışı analitik olarak modellenmiş olur.

İletim hatlarında anahtarlama olayları veya yıldırım düşmesi sonucu yürüyen dalga oluştuğunda korona, iletken direnci ve toprak direncinden dolayı oluşan enerji kaybı sebebi ile genlikte zayıflama veya azalma meydana gelebilmektedir (Begamudre, 1990). Hattın şönt kondüktansı (G), korona direnci sebebi ile oluşacak etkiyi de içerecek şekilde etkin kondüktans (G_e) olarak gösterilebilir. Böylece korona etkisi de modele ve analizlere katılmış olur. Etkin kondüktansın değeri yaklaşık olarak,

$$G_e = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot K \cdot C}{(\beta - \alpha)} \quad (3.17)$$

eşitliği ile belirlenir (Begamudre, 1990). Bu eşitlikte, C, hattın kapasitesini ifade etmektedir. K, α ve β ise sabitlerdir. K'nın değeri 0,7 olarak alınır. α ve β değerleri ise Çizelge 3.1'de gösterildiği üzere yıldırım darbesi ve anahtarlama darbeleri için farklı değerler alırlar. Güç sisteminin korona direncinin modele dahil edildiği halde, durum uzayı modeli ile analiz edilmesi için, Eşitlik (3.16)'daki G_h yerine, Eşitlik (3.17) ile ifade edilen G_e gelecektir.

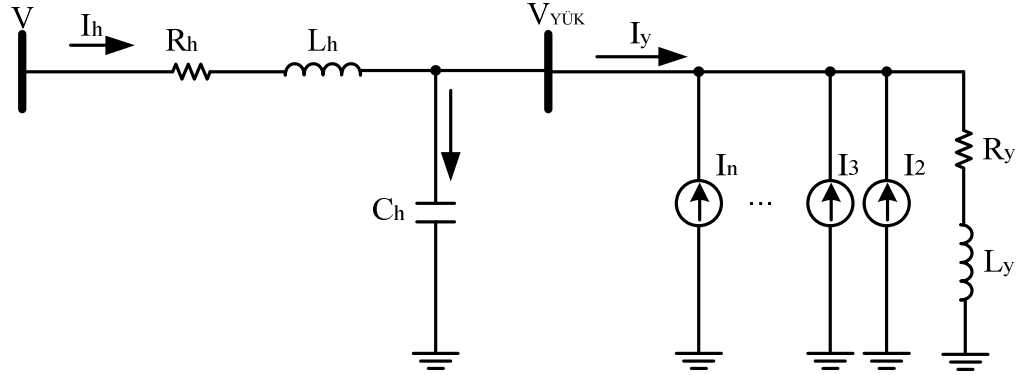
Çizelge 3.1 Meydana gelen geçici olaya göre α ve β değerleri

Geçici Olay	α	β
Yıldırım Darbesi 1,2/50 μ s	$14,5 \cdot 10^3$	$2,45 \cdot 10^6$
Anahtarlama Darbesi 250/2500 μ s	320	$12 \cdot 10^3$

3.3.4 Durum Uzaıı Tekniğı ile Harmonikli Bileşenlerin Modellenmesi

Güç sistemlerinde bulunan nonlinear yükler harmonik bileşenlere neden olmaktadır. Sistemde görülen akım harmoniğı bileşenleri, akım enjeksiyonu yöntemi ile modellere yansıtılabilmektedir (Au ve Milanovic, 2007). Bu çalışmada, nonsinüsoidal şartlarda analiz

hedeflenmiştir. Durum uzayı tekniği kullanılarak oluşturulan modele akım kaynağı olarak modellenen bu bileşenlerin yansıtılması sağlanmıştır.

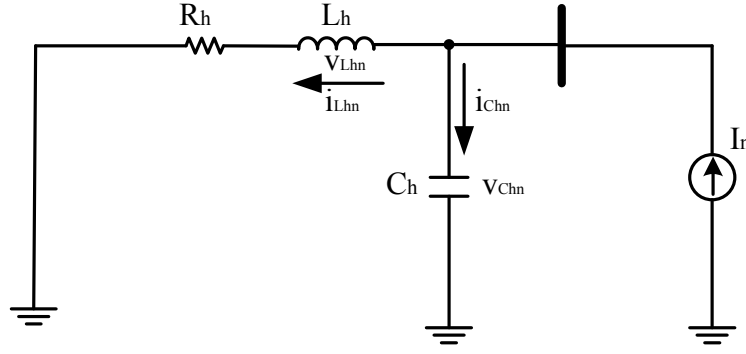


Şekil 3.11 Güç sisteminin harmonik bileşenler dahil eşdeğer modeli

Şekil 3.11’de gösterilen model kullanılarak, sistemde nonlinear yüklerin bulunması halinde ortaya çıkan harmonik bileşenlerin etkilerinin analize dahil edilmesi gerçekleştirilir.

Bundan önceki kısımlarda (3.3.1., 3.3.2. ve 3.3.3.) verilen modeller ve ortaya konulan durum uzayı eşitlikleri, sistemde harmoniklerin bulunmadığı lineer şartlar için çözümü sağlamaktadır. Harmoniklerin mevcut olduğu çalışma şartlarında, durum uzayı tekniği ile çözüm yapmak için, her bir harmonik bileşenin sisteme etkisini gösterecek çözümlerin yapılması gerekir. Harmonikli durumda, bundan önceki çözümlerde bulduğumuz durum değişkenlerine (akım ve gerilimlere) ait değerler sistemdeki akım ve gerilimlerin temel bileşenlerinin davranışlarını sağlamaktadır.

Her bir harmonik bileşen için aşağıda gösterildiği şekilde çözüm gerçekleştirilir. Her bileşen için çözümün toplamından ortaya çıkan değerler, güç sisteminin durum uzayı tekniği kullanılarak harmonikli durumlar için de analizin yapılmasına imkan vermektedir.



Şekil 3.12 Güç sisteminin harmonikli durumda tek faz eşdeğer modeli

Şekil 3.12’de, I_n , n’inci harmonik bileşen akımını, i_{Chn} , harmonik bileşen sebebiyle hattın kapasitesi üzerinden geçecek olan akımı, i_{Lhn} , harmonik bileşenin hat akımını göstermektedir. V_{Chn} ve V_{Lhn} ise sırasıyla, harmonik akımı bileşenleri sebebiyle hat kapasitesi ve endüktansı üzerinde oluşan gerilimleri ifade etmektedir.

Hat akımı ve hat kapasitesi üzerinde oluşan gerilimler durum değişkeni olarak belirlenip, bu değerler, temel bileşenlere ait değerler ile toplandığında, güç sisteminin harmoniklerin ihmal edilmediği analizlerinde durum uzayı tekniğinin kullanılması mümkün olacaktır. x_{1n} ve x_{2n} , sırasıyla harmonik bileşenler nedeniyle oluşan hat akımı ve hat kapasitesi gerilimini ifade etmek üzere,

$$x_{2n} = L_h \frac{dx_{1n}}{dt} + R_h x_{1n}$$

eşitliği düzenlendiğinde,

$$\frac{dx_{1n}}{dt} = \frac{1}{L_h} x_{2n} - \frac{R_h}{L_h} x_{1n} \quad (3.18)$$

elde edilir. Hat kapasitesi üzerinde oluşan gerilimin diferansiyel eşitliğini belirlemek için, akım eşitliği,

$$I_n = i_{Chn} + i_{Lhn}$$

kullanılarak durum değişkenleri cinsinden,

$$I_n = C_h \frac{dx_{2n}}{dt} + x_{1n}$$

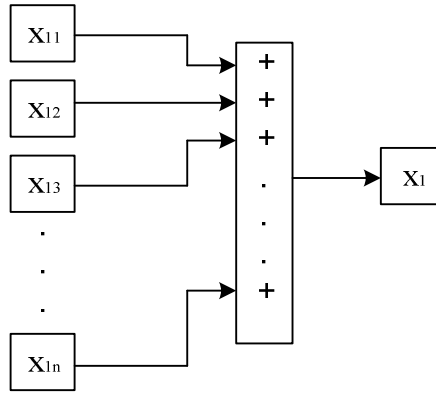
olarak ifade edilebilir. Denklem düzenlenerek,

$$\frac{dx_{2n}}{dt} = \frac{1}{C_h} I_n - \frac{1}{C_h} x_{1n} \quad (3.19)$$

elde edilir. Elde ettiğimiz (3.18) ve (3.19) eşitlikleri düzenlenerek, durum uzayı eşitliğini matris formunda yazarsak,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1n} \\ \dot{x}_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_h}{L_h} & \frac{1}{L_h} \\ -\frac{1}{C_h} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_h} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot I_n \quad (3.20)$$

eşitliği ortaya konur. Böylece, sistemin analizinde kullanılan her bir akım harmoniği bileşeni için durum uzayı eşitlikleri yazılarak, bunlardan elde edilen değerler ile temel bileşen toplandığında harmonikli durumdaki sistem davranışı durum uzayı tekniği ile modellenebilir (Şekil 3.13). Bu model sayısal uygulamalar kısmında, durum uzayı tekniği kullanılarak harmonikli durumda da sistemin analiz edilebileceğini göstermek amacıyla kullanılmış ve dinamik elektriksel model ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.13 Harmonik bileşenlerin etkisinin durum değişkenine eklenmesi

4. GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ GEÇİCİ OLAYLAR

Bu çalışmada, geçici olaylar olarak tanımlanan anahtarlama olaylarının güç sisteminin elektriksel büyüklükler (akım-gerilim) üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Analizler için analitik model ve dinamik elektriksel modeller kullanılmıştır. Bu modellerin karşılaştırılması yapılmış ve çeşitli durumlardaki davranışları incelenmiştir.

Sistem modellemesindeki farkların ve modellerdeki ihmallerin etkileri ortaya konmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda dikkate alınmayan harmonik bileşenler, analize dahil edilerek güç sistem harmoniklerinin geçici olaylar üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

Bu bölümde, güç sistemlerinde meydana gelen geçici olayların neler olduğu, oluşma sebepleri, çeşitleri ve etkileri incelenmiş olup, güç sistemlerindeki olası anahtarlama olayları detaylı olarak verilmiştir.

4.1 Geçici Olayların Etkisi

Güç sistemlerinin tasarımında önem verilen başlıca konulardan biri, iletim hatlarının, kabloların ve şalt merkezlerinin yalıtım ihtiyaçlarıdır (Weedy, 1998). Anahtarlama operasyonları, yıldırım düşmesi ve diğer sebeplerle oluşan geçici olaylar sonucu aşırı gerilim, aşırı akım ve osilasyonlar oluşabilir. Bunların değerleri, normal çalışma koşullarındaki değerlerin çok üzerindedir.

Geçici olaylar, enerji depo eden elemanlara sahip bir sistemin durumundaki ani değişimlerin ortaya çıkardığı olaylardır. Bu ani değişikliklerden, enerji depo eden elemanlar anında etkilenmezler. Depo ettikleri enerjinin dağılımı için belli bir süre gerekir. Bir sürekli halden diğerine geçişe kadar olan bu sürece, geçici dönem denir.

Elektriksel sistemlerde, endüktans ve kapasite elemanı enerji depo eden elemanlardır. Bu nedenle, sistemde meydana gelebilecek bir anahtarlama olayı ya da oluşan bir arıza gibi bu elemanların durumunu değiştirecek bir etki gerçekleştiğinde, geçici olaylar oluşur. Diğer bir deyişle, endüktans üzerinden akan akım veya kapasitör üzerindeki gerilim aniden değişmez (Ray, 2004). Belirli bir süre alan bu değişim sonucunda sistemde akım ve gerilim değerleri çok büyür ve salınımlı bir biçimde sönerler.

Sürekli hal çalışma koşulları dikkate alındığında, geçici dönem çok kısadır, ancak oldukça önemlidir. Bu sürelerde sistem elemanları hasara sebep olabilecek, aşırı akım veya gerilimlere

maruz kalmaktadırlar. Geçici davranışlar yalıtım problemlerine sebep olabilirler. Bu nedenle, geçici durumlar esnasında oluşan elektriksel büyüklüklerin genliklerinin ve sönümlenme sürelerinin analizlerinin yapılması ve sisteme olası etkilerinin belirlenmesi büyük önem taşır.

Geçici olayların sistemdeki cihazlar üzerindeki etkileri, cihazın özelliklerine ve geçici olayın oluşum yerine bağlıdır. Tespit edilmeleri, sürelerinin kısa olması sebebi ile zordur. Geçici olayların konvansiyonel ölçü cihazları ile belirlenmeleri ve ölçülmesi cihazların sınırlı frekans cevabı ve örnekleme periyodu nedeniyle zordur.

Geçici olayların etkisi ile oluşan problemler, güç sistemlerinde kullanılan kontrol elemanlarını oluşturan mikroelettronik cihazlar ve devrelerin hassasiyeti sebebi ile artış göstermektedir. Günümüzde mikroişlemci kontrolörlerinin üretim ve ticaret tesislerinde önemli işlevler yerine getirmesi sebebiyle, geçici olaylar, daha büyük öneme sahiptirler. Sağlık sektöründe kullanılan tıbbi elektronik cihazlar da giderek daha karmaşık ve hassas yapılara sahip olduklarından, geçici olayların bunlar üzerindeki olumsuz etkileri de dikkate değer bir problemidir.

4.2 Geçici Olayların Sınıflandırılması

Güç sistemlerindeki geçici olaylar hızlarına göre üçe ayrılırlar. Meydana gelen olayların her biri ayrı bir araştırma konusudur. Sınıflandırma geçici olayların süresine göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırmalar aşağıda açıklanmıştır (Ray, 2004).

1. **Çok Hızlı Geçici Olaylar:** Bu tip geçici olaylar yıldırım düşmesi veya anahtarlama olayları sebebi ile meydana gelmektedir. Anahtarlama olayları sistemdeki düzenli anahtarlama olayları olabilir. Genellikle birkaç milisaniyede sona ererler ve elektriksel (elektrik yükü) kaynaklıdır.
2. **Orta Hızdaki Geçici Olaylar:** Sistemdeki ani kısa devreler sonucu oluşan anormal yapılı değişimlerdir. Tümüyle elektriksel yapıya sahiptirler. Genelde kaynak geriliminin güç frekansına bağlı olup 10 periyot kadar sürerler (50 Hz'lik sistemde 200 ms).
3. **Yavaş Geçici Olaylar:** Bunlar, senkron makinanın rotorundaki mekanik osilasyonlar sebebiyle oluşan elektromekanik geçici olaylardır. Bu tür olaylar enterkonnekte sistemde kararlılığın bozulmasına sebep olabilirler. 1 saniye kadar veya daha fazla sürebilirler.

4.3 Güç Sistemlerindeki Geçici Olayların Tipleri ve Nedenleri

Güç sistemlerinde geçici olaylar, çeşitli nedenlerle meydana gelebilmektedir. Olası geçici olayların başlıcaları aşağıda sıralanmıştır (Ray, 2004; Sankaran, 2001; Begamudre, 1990; Fernandez v.d., 1998).

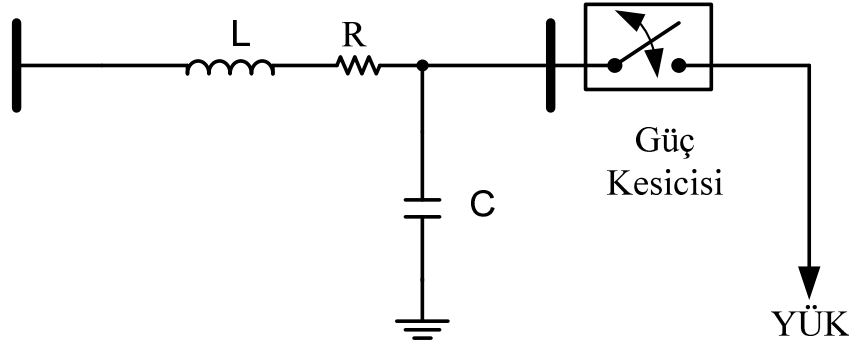
- Atmosferik olaylar (yıldırım düşmesi, güneş ışınları, jeomanyetik bozukluklar),
- Yük anahtarlama,lar,
- Arıza akımlarının temizlenmesi için yapılan anahtarlama,lar (devre kesicinin açması ve tekrar kapaması),
- İletim hattı ve kabloların enerjilendirilmesi ve enerjisinin kesilmesi için yapılan anahtarlama,lar,
- Kondansatör gruplarının anahtarlama,ması,
- Güç transformatörlerinin enerjilendirilmesi için yapılan anahtarlama,lar,
- Ferro-rezonans olayları.

Bu tez çalışmasında, bir güç sisteminde meydana gelen geçici olaylardan anahtarlama işlemleri üzerinde analizler yapılmıştır. Bu sebeple, yukarıda belirttiğimiz anahtarlama işlemleri ile ilgili açıklayıcı bilgiler bu kısmın devamında verilmiştir.

4.3.1 Yük Anahtarlama,ması

Yük anahtarlama,maları esnasında oluşan yüksek akımlar, güç sisteminin empedansı üzerinden akarak gerilim düşümlerine, alt frekanslardaki osilasyonlara, gerilim çentiklerine, ... v.b. olaylara sebep olurlar (Şekil 4.1). Bu tür olaylara karşı hassas olan güç sistemi elemanlarının, olumsuz etkilenmesine neden olurlar.

Akımların harmonik bileşenleri, güç sisteminin endüktans ve kapasitesi ile etkileşime girerek rezonans koşullarının oluşmasına yol açabilirler. Rezonans sebebi ile oluşabilecek yüksek seviyelerdeki aşırı gerilimler sistem elemanlarına zarar verebilirler.



Şekil 4.1 Yük anahtarlama

Yüksek değerli darbe akımları sebebi ile oluşabilecek manyetik alanlar, yakındaki kontrol devresi, sinyal veya veri kabloları üzerinde endüktif kuplaj etkisi ile büyük gerilimler indükleyebilir. Bu yüzden kontrol, sinyal ve veri kabloları ile güç hatları arasında belli bir mesafe bırakılması veya önleyici tedbirlerin alınması gerekir.

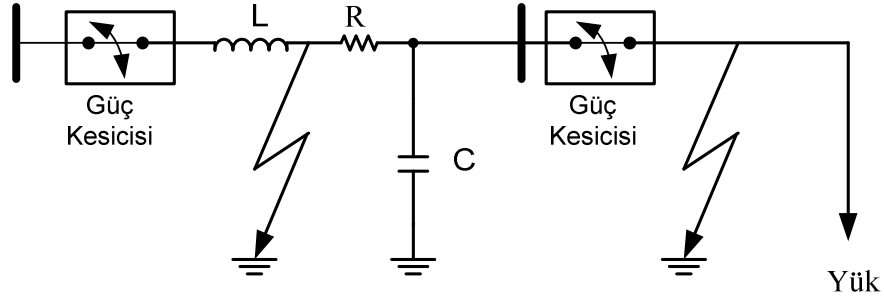
4.3.2 Arıza Akımlarının Temizlenmesindeki Anahtarlamalar

Güç sisteminde çeşitli arızalar meydana gelmektedir (Şekil 4.2). Sistemde meydana gelen kısa devre olayları genel biçimde arızalar olarak adlandırılır (Ram ve Vishwakarma, 1995). Arızaların meydana getirebileceği hasarlardan sistemi korumak için arıza akımı tespit ederek devreyi açan röleler ve devre kesicileri kullanılır.

Arızalar yalıtım hataları sebebiyle de oluşabilirler, bu hatalar sonucu oluşan kısa devreler, sistemden çok yüksek akımların geçmesine neden olurlar.

Havai hatlardaki arızalar, yıldırım düşmesi, ağaç dalları veya diğer iletken cisim ve canlıların teması, buz ve kar yükü, anormal yüklenme, fırtına, deprem gibi sebeplerden oluşabilirler.

Kablolar, transformatörler, generatörler ve diğer teçhizat için arıza sebepleri ise yaşlanmaya bağlı olarak toprak izolasyon hatası, ısınma, nem, aşırı gerilimler, mekanik hasar, kaza ile toprak ve toprak ekranları ile temas gibi olaylardır (Ram ve Vishwakarma, 1995).



Şekil 4.2 Arıza akımlarının temizlenmesi için yapılan anahtarlamalar

Enerji sistemindeki arızaların kaynağı, sistemi işleten ve enerji sağlayan kuruluşların dikkatini çektiğinden bunlarla ilgili araştırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu güç sisteminin çeşitli elemanlarında meydana gelen arızaların dağılımları belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir (Ram ve Vishwakarma, 1995).

Çizelge 4.1 Güç sistem elemanlarında meydana gelen arızaların dağılımı

Arıza Yeri	Arıza Oranları (%)
Havai hatlar	50
Yeraltı kabloları	9
Transformatörler	10
Generatörler	7
Şalt tesisleri elemanları	12
Akım Transformatörleri, Gerilim Transformatörleri, Röleler, kontrol ekipmanları, ..v.s.	12

Çizelge 4.1’den toplam arızaların en yüksek oranda havai hatlarda meydana geldiği görülmektedir. Bu tez çalışmasında, 380 kV’luk havai iletim hattı ile beslenen yükten oluşan bir üç sistemi üzerinde analizler yapılmıştır.

Havai hatlarda meydana gelen arıza tiplerinin dağılımı da Çizelge 4.2’de verilmiştir (Ram ve Vishwakarma, 1995).

Çizelge 4.2 Havai hatlarda değişik tipteki arızaların oluşma sıklığı

Arıza tipi	Arıza Oranları (%)
Faz – toprak	85
Faz – faz	8
İki faz – toprak	5
Üç faz	2

Havai hatlarda meydana gelen arızaların büyük çoğunluğu geçici yapıdadır. Eğer hat sistemden geçici bir süreliğine izole edilirse bu arızalar temizlenir. Havai hatta ait devre kesicilerin otomatik olarak açıp tekrar kapama yapması yoluyla bu arızaların birçoğu (sistem uzun süre enerjisiz kalmadan) temizlenebilmektedir. Bu işlem için tek faz ya da üç faz otomatik açıp tekrar kapama işleminden faydalanılmaktadır. Arızaların büyük çoğunluğu ilk tekrar kapamadan sonra temizlenmektedir. Küçük bir kısmı ise ikinci ve üçüncü açma kapamayı gerektirmektedir. Üçüncü tekrar kapamadan sonra arıza temizlenemediyse bu kalıcı bir arızadır ve sebebi bulunup onarılanaya kadar tekrar kapama yapılmaz.

Kablolarda ise, kısa devreye sebep olan izolasyondaki delinme sebebiyle oluşan arızalar kalıcı yapıya sahiptirler. Bu yüzden, kablo sistemlerinde tekrar kapama işlemi uygulanmaz.

İletim hattı veya yük tarafında meydana gelebilecek arızalar, devre kesicinin açılması yardımıyla temizlenip sistem tekrar kapama ile devreye alınmaktadır. Bu anahtarlamaların da analizi ve etkilerinin neler olduğunun bilinmesi güç sistemlerinin işletilmesi açısından önem arz etmektedir.

Arıza durumlarında, enerji sisteminde çok yüksek akımlar oluşur. Bu akımlar kesiciler yardımıyla kesilir. Arıza kesildiğinde oluşan yüksek gerilim darbeleri sistem endüktansı ve kapasitesi ile etkileşerek, temel frekansın çok üstünde frekanslı osilasyonlar meydana getirir. Oluşan aşırı gerilimler ve osilasyonlar sistemdeki cihazlar üzerinde zararlı etkiler meydana getirir.

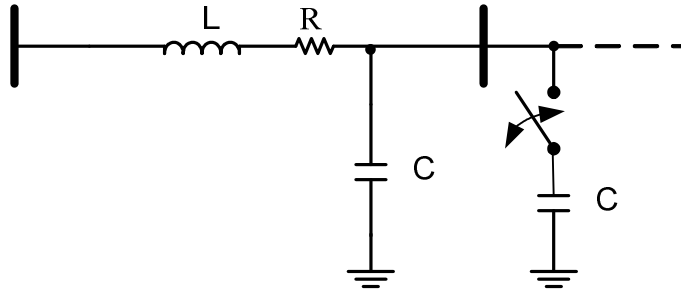
Havai hattan beslenen ve uzun bir yeraltı kablosuna bağlanan aşırı akım cihazlarının bulunduğu hallerde, çok tehlikeli aşırı gerilimler ve osilasyonlar oluşur. Büyük değerdeki yeraltı kablosu kapasitesi ile havai hattın endüktansının oluşturduğu kombinasyon, yüksek seviyelerdeki aşırı gerilimlerin ve uzun süre devam eden alçak frekanslı osilasyonların ortaya

çıkmasına sebep olur. bu tür geçici olaylar, transformatörlere, kablolar ve hattın beslenen motorlara büyük zararlar verirler.

4.3.3 Kondansatör Grubunun Anahtarlanması

Güç sistemlerindeki kondansatör gruplarının anahtarlanması geçici olayların sebeplerinden biridir (Şekil 4.3). Kondansatör gruplarının anahtarlanması, başlangıçta güç sisteminin karakteristik empedansı ve hattın direnci ile sınırlanan darbe akımlarını da beraberinde getirir.

Kondansatör grubunun anahtarlanması elektriksel büyüklüklerin dalga şeklinde salınımların çok olduğu bir bozulma meydana getirir. Akım ile gerilimde meydana gelen değişimlerin polaritesi temel frekans ile karşılaştırıldığında çok hızlı değişir. Kondansatör anahtarlaması ile meydana gelen geçici olaylar genel olarak 300 Hz ile 1 kHz aralığındadır (Parsons, 1999).

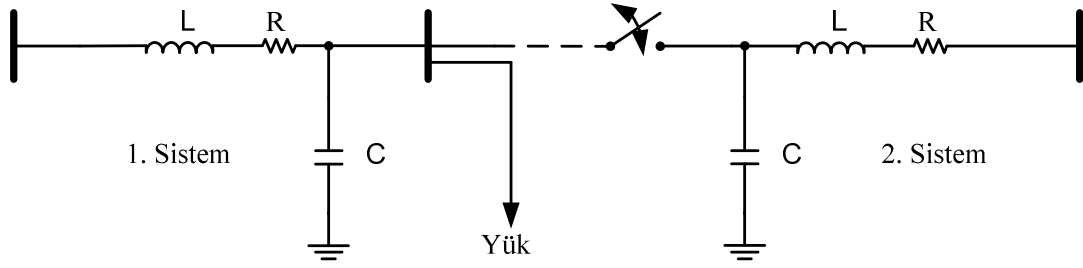


Şekil 4.3 Kondansatör grubu anahtarlaması

Oluşan aşırı akım, aşırı gerilim ve osilasyonlar, güç sistem elemanları üzerinde olumsuz etkiler meydana getirebilecek geçici olaylardır.

4.3.4 Enterkonnekte Bağlantı İçin Anahtarlama

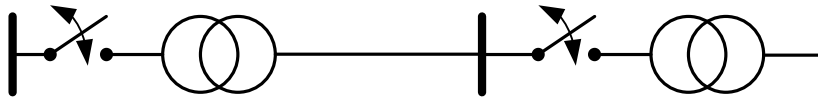
Güç sistemlerinde olağan biçimde gerçekleştirilen anahtarlama olaylarından biri de enterkonnekte bağlantı yapılmasıdır (Şekil 4.4). Enterkonnekte bağlantılar herhangi bir sebeple enerjisiz kalan veya daha fazla güce ihtiyaç duyulan bölümün, enerji ağının diğer bir sistemi ile bağlantısının sağlanılarak enerjilendirilmesidir. Bu anahtarlama sebepleri de güç sisteminde geçici olaylar oluşmaktadır. Oluşabilecek aşırı akım, aşırı gerilim ve osilasyonların analiz edilmesi ve etkilerinin araştırılması, güç sisteminin daha güvenli işletilmesi açısından gereklidir.



Şekil 4.4 İki sistemin enterkonnekte bağlanması

4.3.5 Transformatörlerin Enerjilendirilmesindeki Anahtarlamalar

Güç transformatörlerinin devreye alınmasında da geçici olaylar meydana gelir (Şekil 4.5). Güç transformatörlerinin enerjilendirilmesi esnasında yığılma akımları, nominal akımın 10 veya 20 katına kadar çıkabilirler. Bu akımlar neredeyse kısa devre akımlarının genliklerine ulaşırlar. Bu sebeple enerjilendirilen transformatörün veya yakındaki diğer transformatörlerin koruma sistemlerinde hatalı çalışmalar olabilir. Oluşan yüksek yığılma akımları, beslenen yükün hassasiyetine bağlı olarak güç sisteminde beklenmeyen gerilim osilasyonlarına yol açabilir (Fernandez v.d., 1998). Yüksüz bir transformatör enerjilendirildiğinde, kesici üzerinde sönümlü ve genellikle bozulmuş aşırı gerilimler oluşur (Chapman v.d., 1998-99).



Şekil 4.5 Transformatörlerin enerjilendirilmesi

5. GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ

Güç sistemlerinde, elektrik enerjisinin sürekli, güvenilir ve kararlı olmasının yanında, sinüsoidal dalga şeklinde de bozuklukların olmaması gerekmektedir. Bu özelliklerin sağlanması, güç sistemindeki enerjinin kalitesini göstermektedir. İstenen özelliklerin sağlanması konusu, literatürde genel olarak “Güç Sistem Kalitesi” olarak adlandırılmaktadır.

Enerjinin kaliteli olması için çeşitli standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlar, güç faktörü seviyesinin belirlenmesini, gerilimlerin dengeli olmasını, gerilimdeki kırışmanın (flikler) belirli bir seviyenin altında olmasını, sistemdeki harmonik bileşenlerin sınırlandırılmasını, gerilim ve frekanstaki değişimlerin belirli bir aralıkta kalmasını amaçlamaktadırlar.

Günümüzde güç sistemlerinde seviyesi giderek artmakta olan harmonik bileşenler, güç kalitesinin sağlanması açısından önemli bir problemi ortaya çıkarmaktadır. Güç sistemlerinde harmonikler, akım ve gerilimde temel frekansın dışındaki frekanslarda oluşan bileşenlerdir. Yarı-iletken teknolojisindeki ilerlemelere bağlı olarak doğrusal olmayan (nonlinear) yüklerin sayısında ve çeşidinde meydana gelen artış, enerji sisteminde yüksek oranda harmonik bozulmaya neden olmaktadır (Kocatepe vd., 2003). Bu artış, harmonik bozulmanın dikkate değer bir konu haline gelmesine neden olmuştur. Gelişen sanayi ile birlikte, standartların üzerine çıkan harmonikler sebebiyle oluşan dalga bozuklukları, sistemde ek kayıplara, kararlılığın bozulmasına, arızalara ve öngörülenin üzerinde akım ve gerilim seviyelerinin oluşmasına yol açmaktadır.

Demir-çelik tesisleri, gemi inşa endüstrisi ve yarı iletkenlerin yüksek oranda olduğu tesislerin sayısındaki çoğalma ile birlikte oluşan harmonik bileşenlerin, güç sistemindeki geçici olaylar üzerindeki etkilerinin araştırılması gerekmektedir. Geçici olayların analizi, sistem sürekliliği ve kararlılığı açısından önemli bir konudur.

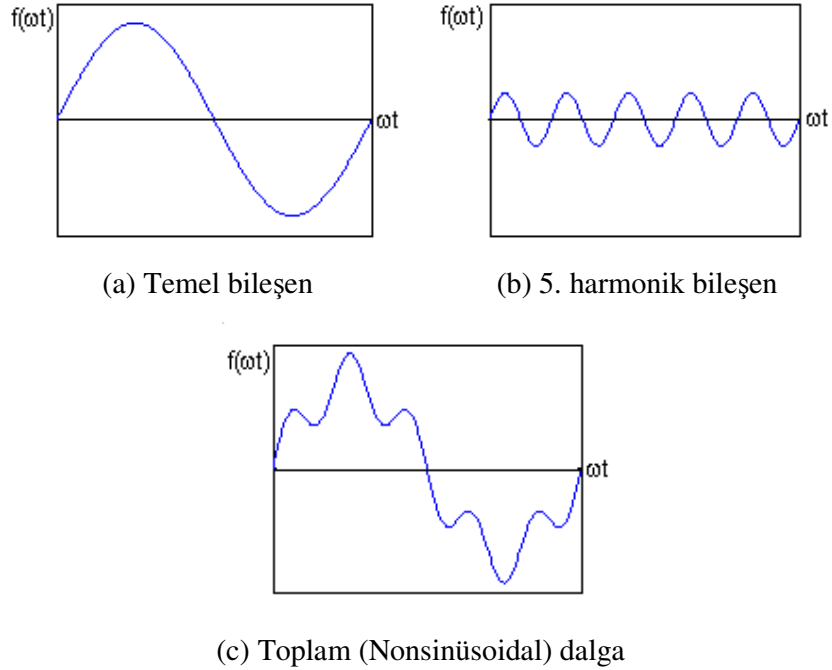
Güç sistemlerinde olağan çalışma şartları altında ya da arızalar sebebiyle yapılan anahtarlama işlemleri geçici olayların en önemlilerindendir. Anahtarlama işlemleri, süreklilik ve kararlılık açısından problemler meydana getirebilmekte ve oluşan aşırı akım ve gerilimler, sistem elemanlarında hasarlara sebep olabilmektedir. Bu tez çalışmasında, sistemdeki harmonik bileşenlerin, anahtarlama olayları esnasındaki sistem davranışına etkileri analiz edilmiştir.

5.1 Harmoniklerle İlgili Tanım ve Kavramlar

Güç sistemlerinin analizi için oluşturulan elektriksel büyüklükler sinüsoidal sürekli hal işletim sistemleri için tanımlanmıştır (Kocatepe vd., 2003). Enerji sistemlerindeki harmonik

bileşenlerin seviyesinin her geçen gün artmasıyla birlikte, belirlenmeleri, sınırlandırılmaları ve etkilerinin azaltılabilmesi için elektriksel büyüklüklerin nonsinüsoidal şartlar için yeniden tanımlanması zorunluluğu ortaya çıkmıştır (Shuter vd., 1989, Heydt vd., 1991, Kocatepe, 1995, Uzunoglu, 2000).

Alternatif akım güç sistemlerinde akım ve gerilim dalga şeklinin sinüsoidal olması istenir. Fakat, sistemde bulunan lineer olmayan yükler sebebi ile dalga şekli bozularak nonsinüsoidal (sinüsoidal olmayan) hale gelir. Nonsinüsoidal dalgalar, temel frekans ve temel frekansın tam katları olan periyodik sinüsoidal dalgaların toplamı olarak ifade edilebilir. Şekil 5.1’de temel frekans (50 Hz) ve 5. harmonik bileşen frekansındaki (250 Hz) iki periyodik dalga şekli ve bunların toplamı gösterilmiştir (Kocatepe vd, 2003).



Şekil 5.1 Nonsinüsoidal dalga ve bileşenleri

Harmoniklerin tanımlanabilmesi ve etkilerinin analiz edilebilmesi için bu nonsinüsoidal dalgaların çözülmesi gereklidir. Nonsinüsoidal dalgaların analizinde, ilk olarak Fransız fizikçisi ve matematikçisi olan Joseph Fourier tarafından 1882’de yayınlanan “Analytical Theory of Heat” isimli makalesinde tanıtılan Fourier Serileri kullanılır.

5.2 Harmonikli Durumda Elektriksel Büyüklükler

Sistemde harmonik bileşenlerin mevcut olduğu durumlarda elektriksel büyüklüklerin tanımları değişecektir. Fourier serileri yardımıyla gerilim ve akım ani değerleri,

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (5.1)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (5.2)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitliklerde

n : harmonik mertebesi

v_n : n. harmonik geriliminin ani değeri

i_n : n. harmonik akımının ani değeri

V_0 : gerilimin dc (doğru akım) bileşeni

I_0 : akımın dc bileşeni

V_n : n. harmonik geriliminin efektif değeri

I_n : n. harmonik akımının efektif değeri

ω_1 : temel frekansa ait açısal frekans

θ_n : n. harmonik geriliminin faz açısı

δ_n : n. harmonik akımının faz açısı

olarak ifade edilmiştir. DC bileşenler ihmal edilerek yukarıdaki eşitlikler yardımıyla aktif güç,

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (5.3)$$

olarak elde edilir. Aktif güç eşitliğinden görüleceği üzere, farklı frekanslardaki akım ve gerilimlerin aktif güce etkisi yoktur.

5.1 ve 5.2 eşitliklerinde verilen ifadelerinden harmonikli akım ve gerilimin efektif değerleri,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (5.4)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (5.5)$$

olarak elde edilir. Görünür güç;

$$S = V.I \quad (5.6)$$

eşitliği ile tanımlanır. Bu gücün, harmonikli durumda genel tanımı,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (5.7)$$

eşitliği ile verilir. Denklemden, D distorsiyon gücüdür ve,

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (5.8)$$

denkleminin gösterilmesi. Görünür güç eşitliğindeki Q reaktif güçtür ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (5.9)$$

AC güç sistemlerinde çekilen akımın ne kadar verimlilikle kullanıldığı güç faktörü kavramı ile tanımlanır. Sinüsoidal ve nonsinüsoidal durumlarda güç faktörü,

$$GF = \frac{P}{S} \quad (5.10)$$

eşitliği ile belirlenir.

5.2.1 Harmoniklerin Etkilerinin Belirlenmesi

Güç sistemlerinde harmonik bileşenlerin meydana getirdiği bozulmalarla birlikte, oluşturdıkları etkinin belirlenmesi ve sınırlamalar getirilmesi amacıyla çeşitli büyüklükler tanımlanmıştır. Uluslararası ve ulusal standartlar bu tanımlara göre geliştirmiştir. Güç sistemlerinde elektrik enerjisini sağlayan kurumlar ile müşterilerin bu tanımlar yardımıyla konulan sınırlara uymaları istenmiştir.

5.2.1.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu

Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD), gerilim ve akımda harmonik bileşenler sebebiyle oluşan bozulmayı belirlemede kullanılır ve yüzde olarak ifade edilir. Temel bileşen dışındaki harmonik bileşenlerin temel bileşene oranıyla belirlenir. Gerilim ve akım için THD değerleri sırasıyla,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (5.11)$$

ve

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (5.12)$$

eşitlikleri ile hesaplanır.

5.2.1.2 Tekil Harmonik Distorsiyonu

Tekil Harmonik Distorsiyonu (HD), her bir harmonik bileşenin temel bileşene göre büyüklüğünü gösterir. Gerilim ve akım için,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (5.13)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (5.14)$$

olarak ifade edilir.

5.2.1.3 Toplam Talep Distorsiyonu

Toplam Talep Distorsiyonu (TTD), bir yüke ait değer olup akım için,

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (5.15)$$

eşitliği ile belirlenir. I_L , yük tarafından ortak kuplaj noktasından 12 ay boyunca çekilen maksimum akımların ortalamasıdır.

5.3 Harmonik Kaynakları

İdeal elektrik sistemlerinde akım ve gerilimin dalga şekli sinüsoidaldir. Pratikte ise bu mümkün değildir. Harmonik bileşenler sebebi ile dalga şekillerinde sinüsoidallikten sapmalar meydana gelir. Akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar harmoniklerin üretilmesine neden olurlar.

Nonlineer elemanlar tarafından meydana getirilen bu lineersizlikler, demir çekirdekleri bulunan bobin, transformatör, generatör ve benzeri elemanların doymaya girerek magnetik bakımdan bir olayın meydana gelmesi, ark ocaklarının doğası gereği arkların oluşması ve yarı-iletken güç elektroniği elemanları kullanılarak sinüsoidal dalganın bazı kısımlarının kırılmasıdır (Kocatepe, 1995).

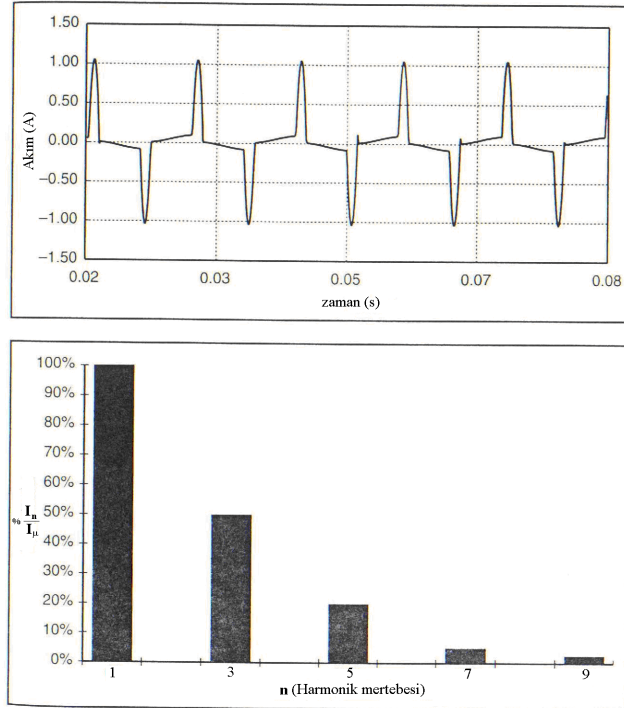
Güç sistemlerindeki harmonik kaynakları (Kocatepe, 2003),

- Konverterler,
- Generatörler,
- Motorlar,
- Transformatörler,
- Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler,
- Ofis ekipmanları (Bilgisayar, yazıcı, tarayıcı, ...v.b.),
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Kaynak makinaları,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüler,

- Statik VAR kompanzatorler,
- Ark ocakları,
- Yüksek gerilim doğru akım (HVDC) iletim sistemleri,
- Elektrikli ulaşım sistemleri,

olarak sıralanabilir. Harmonik kaynaklarından bazılarının harmonik bileşenleri meydana getirme sebepleri aşağıda açıklanmıştır.

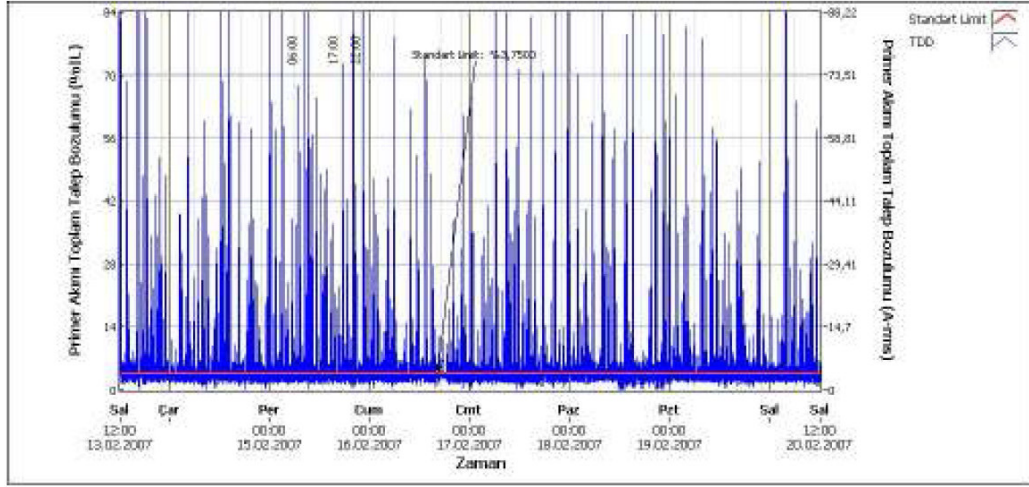
Transformatörler: Mıknatıslanma eğrisinin lineer olmaması ve demir çekirdeğinin doymaya girmesi sebebiyle transformatörün mıknatıslanma akımı harmonik bileşenler içerir ve nonsinüsoidal olur. Şekil 5.2’de örnek olarak transformatör mıknatıslanma akımına ait dalga şekli ve harmonik spektrumu gösterilmektedir (Kocatepe vd., 2006).



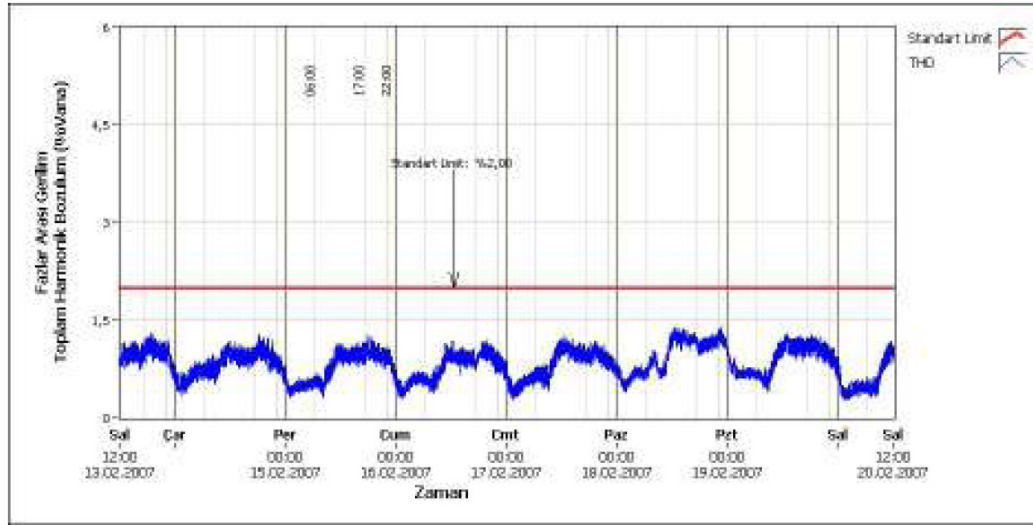
Şekil 5.2 Transformatörün mıknatıslanma akımı ve harmonik spektrumu

Ark Ocakları: Demir-çelik tesislerinde kullanılan ark ocakları güç sistemindeki başlıca harmonik kaynaklarındandır. Genellikle iletim sistemine direkt bağlantı yaparlar ve yüksek güçler çekerler. Elektrik arkının akım gerilim karakteristiğinin lineer olmaması sebebiyle harmonik üretirler. Ark olayı esnasında, ark gerilimi azalırken sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırılan ark akımı artar. Ark ocaklarının empedansı dengesiz olup,

sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişim göstermesine sebep olur. Şekil 5.3'te “Güç Kalitesi Milli Projesi” kapsamında ülkemizde bulunan bir demir-çelik tesisinden alınan ve akım ile gerilimdeki bozulmaları gösteren ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



a) İletim sistemine bağlantı noktasındaki akıma ait TTD ölçümleri

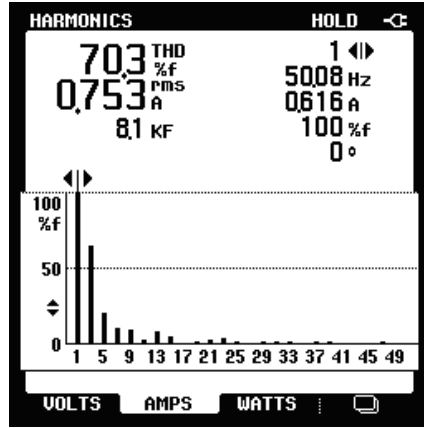


b) İletim sistemine bağlantı noktasındaki gerilime ait THD ölçümleri

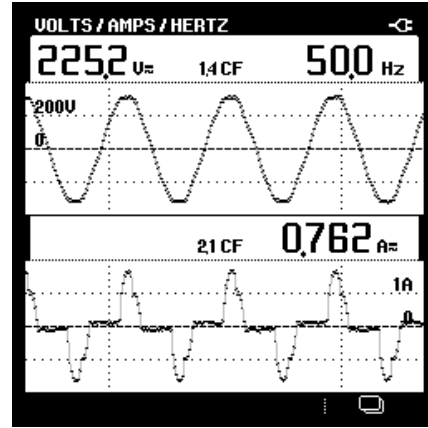
Şekil 5.3 Demir-çelik tesisine ait harmonik ölçümleri

Ofis Ekipmanları: Ofis ortamı gözönüne alınacak olursa, gelişen teknoloji ile birlikte ofiste kullanılan ekipmanlarda da önemli değişiklikler meydana geldiği görülecektir. Bu değişimler ile birlikte ofislerde bilgisayar, yazıcı, tarayıcı, klima v.b. gibi akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan ve yapısında yarı-iletken malzemeler içeren cihazlardan yoğun olarak yararlanılmaya başlanmıştır (Kekezoğlu vd., 2008). Kullanılan yarı-iletken elemanlar sebebi ile ofis ekipmanları da harmonik kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde sayıları

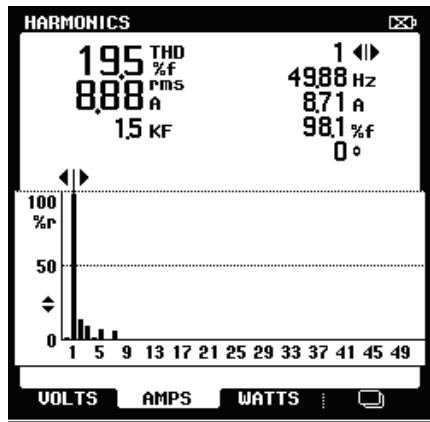
giderek artan iş merkezleri ve ofisler sebebi ile güç sisteminde meydana getirdikleri etkilerin önemi de giderek artış göstermektedir. Şekil 5.4'te bilgisayar ve klimaya ait akım harmoniği spektrumları ile gerilim ve akım dalga şekilleri gösterilmiştir.



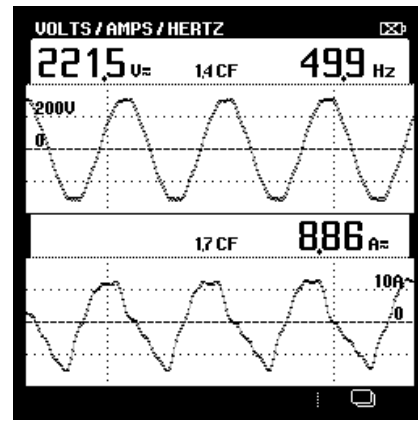
(a) Bilgisayar akım harmonik bileşenleri



(b) Bilgisayar gerilim-akım dalga şekli



(c) Klima akım harmonik bileşenleri



(d) Klima gerilim-akım dalga şekli

Şekil 5.4 Bilgisayar ve klimaya ait harmonik spektrumları ve dalga şekilleri

Fotovoltaik Sistemler: Fotovoltaik sistemler, üretilen doğru akımı alternatif akıma konverterler yardımıyla çevirmektedirler. Kullanılan yarı-iletken elemanlar sebebiyle harmoniklerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

5.4 Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler

Gerilim ve akım dalga şeklinde meydana getirdikleri bozulmalar sebebiyle harmonik bileşenler güç sisteminde pekçok olumsuz etkileri meydana getirmektedirler. Harmoniklerin meydana getirdiği olumsuz etkilerin bazıları,

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin bozulması,
 - Elektrik güç sistemi elemanlarında ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
 - Güç üretiminde, iletiminde ve dağıtımında verimin düşmesi,
 - Gerilim düşümünün artması,
 - Toprak kısa devre akımlarının daha büyük değerlere yükselmesi,
 - Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve yalıtım zorlanması nedeniyle hasar görmeleri,
 - Senkron ve asenkron motorlarda salınımların oluşması nedeniyle aşırı ısınmalar,
 - Koruma sistemlerinin hatalı çalışmaları,
 - Kesintisiz güç kaynaklarının veriminin düşmesi,
 - Aydınlatma elemanlarında ve monitörde görüntü titreşimi meydana getirmesi,
 - Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması,
 - Yalıtım malzemesinin zorlanması ve delinmesi,
 - Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde, harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması,
 - Elektrik cihazlarının ömrünün kısalması,
 - Sesli ve görüntülü iletişim araçlarının parazitli ve anormal çalışması,
 - Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
 - Harmoniklerden kaynaklanan gürültü nedeniyle kontrol sistemlerinin hatalı işletimi,
 - Başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültülere neden olması gibi özetlenebilir.
- olarak sıralanabilir (Kocatepe vd., 2003).

5.5 Harmonik Standartları

Elektrik güç sistemlerinde harmoniklerin meydana getirdiği olumsuz etkiler nedeniyle, sistemde dolaşan harmoniklerin azaltılması/ortadan kaldırılması gereği ortaya çıkmıştır. Uluslararası kuruluşlar ve ülkeler bu amaçla çeşitli standartlar geliştirilmiş ve uyulması gereken yönetmelikler hayata geçirilmiştir. için uyulması gereken standartlar ve yönetmelikler geliştirilmiştir. Bu standartlar enerji sağlayan kuruluşlara ve tüketicilere çeşitli sınırlamalar getirmektedir. Çizelge 5.1’de çeşitli ülkelerdeki gerilim seviyelerine göre, toplam harmonik distorsiyonuna getirilen sınırlamalar verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çeşitli ülkelerdeki harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)		THD _V (%)
A.B.D.	Genel	2.4-69	5
		115≤	1.5
		2.4-69	8
	Özel	115≤	1.5
Almanya	Tüm Gerilimler (15. harmoniğe kadar)		10
Avustralya	Dağıtım	33≥	5
	İletim	22,33,66	3
		110≤	1.5
Finlandiya	1		5
	3-20		4
	30-45		3
	110		1.5
Fransa	Tüm Gerilimler		1.6
İngiltere	0.415		5
	6.6-11		4
	33-66		3
	132		1.5
İsveç	0.43/0.25		4
	3.3-24		3
	84≥		1

IEEE tarafından gerilim için verilmiş harmonik distorsiyon sınırları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. IEEE’nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları

Bara gerilimi (V_n)	Tekil Harmonik (%)	THD $_{V_n}$ (%)
$V_n \leq 69\text{kV}$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$V_n > 161\text{kV}$	1.0	1.5

IEC ve IEEE tarafından önerilen, konut, endüstriyel santral, alçak gerilim, orta gerilim ve genel dağıtım sistemleri için verilen standartlar da mevcuttur (Kocatepe vd., 2003)

Ülkemizde, işletmedeki çeşitli gerilim seviyeleri için “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”nde verilen harmonik standartları uygulanmaktadır. Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’te bu değerler bulunmaktadır.

Çizelge 5.3. 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3’ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3’ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim(%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	1.25	3	1.0	2	0.75
7	1.0	9	0.4	4	0.6
11	0.7	15	0.2	6	0.4
13	0.7	21	0.2	8	0.4
17	0.4	>21	0.2	10	0.4
19	0.4			12	0.2
23	0.4			>12	0.2
25	0.4				
>25	0.2+0.2 (25/n)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 2					

Çizelge 5.4. 20 - 154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	3	1.5	2	1.0
7	1.5	9	0.75	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.75	>21	0.2	10	0.4
19	0.75			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
>25	0.2+0.3 (25/n)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 3					

10.11.2004 tarihli “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”ne göre yürürlükteki akım harmoniğine ait standartlar Çizelge 5.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Kabul edilebilir akım harmonik limitleri

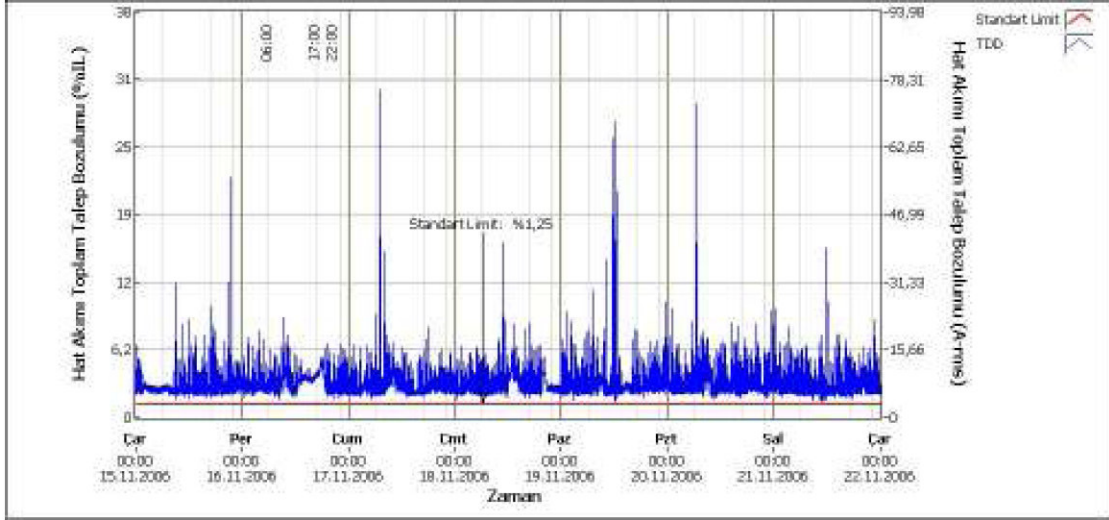
Harmonik Sırası		OG 1<Un≤34,5 kV					YG 34,5<Un≤380 kV					ÇYG Un>380 kV				
Grup	No	I _L /I _{SC}					I _L /I _{SC}					I _L /I _{SC}				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T E K H A R M O N İ K	3	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	5	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	7	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	9	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	13	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	15	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	19	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	21	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	25	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	27	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	29	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	31	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	33	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
K	h>33	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler izleyen tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
TTD		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5

Bu çizelgede I_{SC}, sistemin ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı, I_L ise ortak bağlantı noktasında ölçülen maksimum yük akımıdır.

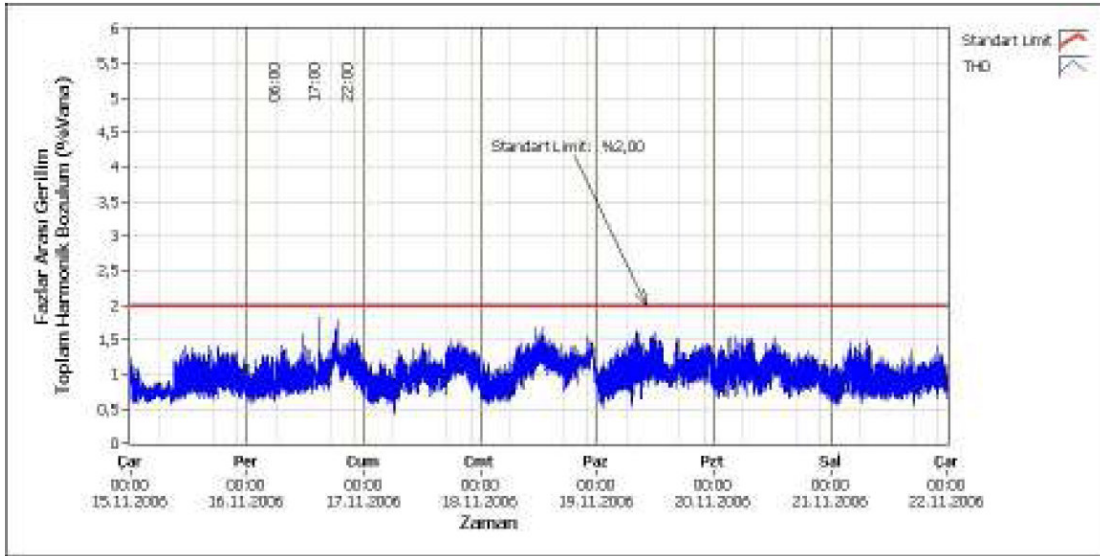
5.6 Harmoniklerle İlgili Ölçümler

Harmonik bileşenlerin etkilerindeki artışla beraber, ülkemizde bu konuya verilen önem de giderek artmaktadır. TÜBİTAK tarafından desteklenen “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” isimli proje kapsamında, ulusal güç sistemimizin enerji kalitesi bakımından durumunu ortaya koymayı, problemleri tespit edip çözüm önerilerini hayata geçirmeyi ve enerji kalitesi bilincini arttırmayı hedefleyen proje

kapsamında önemli çalışmalar yapılmaktadır. Kısa adı “Güç Kalitesi Milli Projesi” olan çalışma kapsamında yapılan ölçümlere ilişkin örnekler aşağıdaki şekillerde bulunmaktadır. Şekil 5.5’te bir demir çelik tesisine ait değerler verilmiştir.



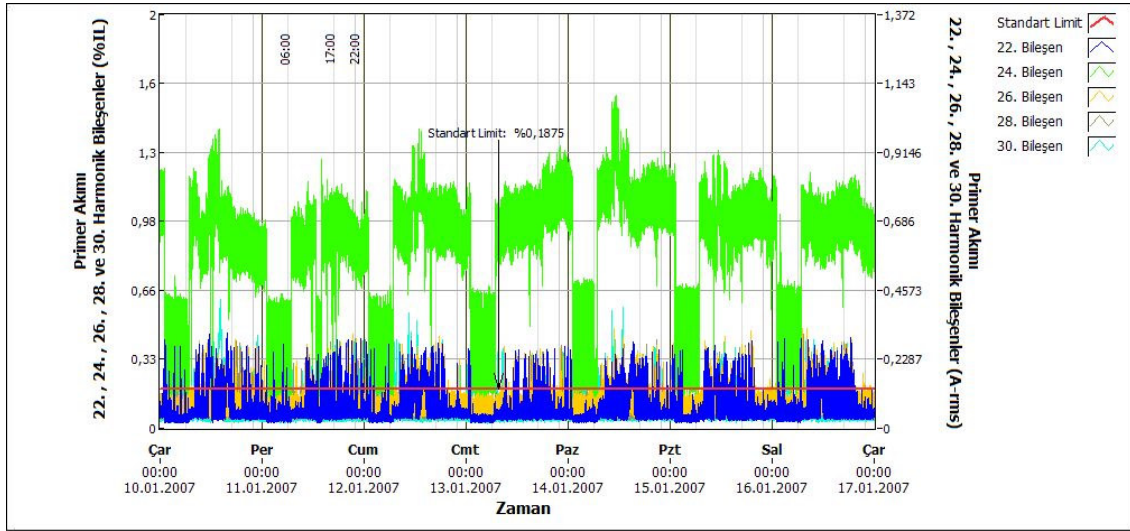
a) İletim sistemine bağlantı noktasındaki akıma ait TTD ölçümleri



b) İletim sistemine bağlantı noktasındaki gerilime ait THD ölçümleri

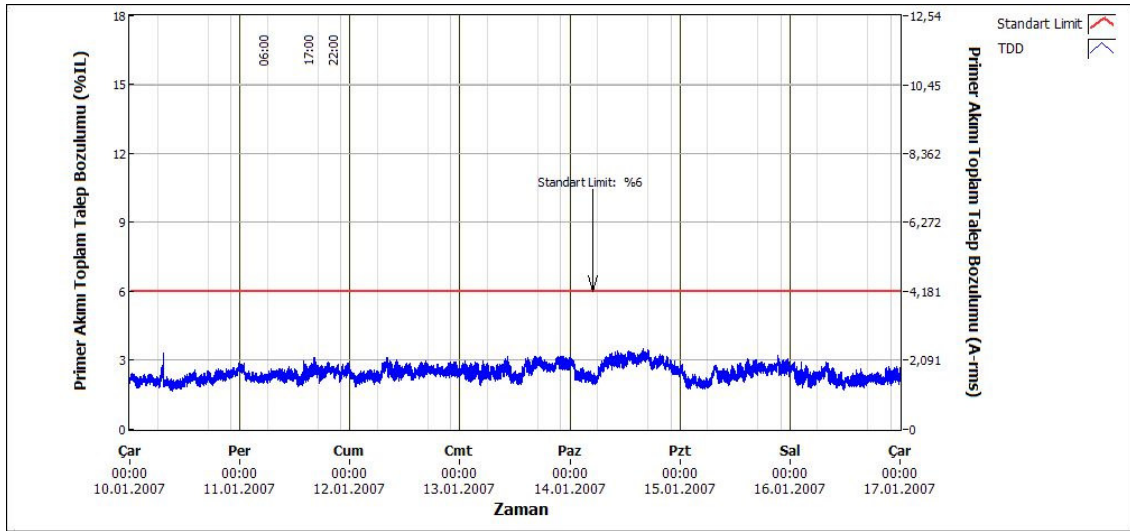
Şekil 5.5 Demir-çelik tesisine ait harmonik ölçümleri

Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de yine bölgemize ait bir tesiste gerçekleştirilen ölçümler sonucu 154/33,6 kV’luk transformatörün primerinden alınan ölçümlere ait sonuçlar verilmiştir.



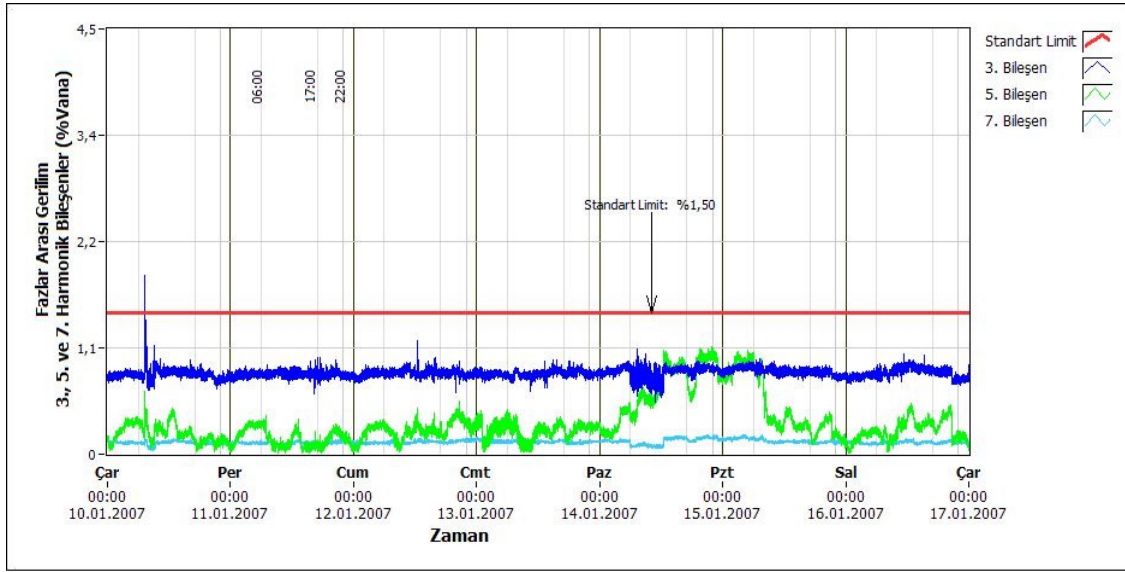
Şekil 5.6 Primer Akımının 22. ,24. ,26. ,28. ve 30. Harmonik Bileşenleri

(3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



Şekil 5.7 Primer akımı toplam talep bozulumu

(TTD - 3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



Şekil 5.8 Fazlararası Gerilimin 3., 5. ve 7. Harmonik Bileşenleri

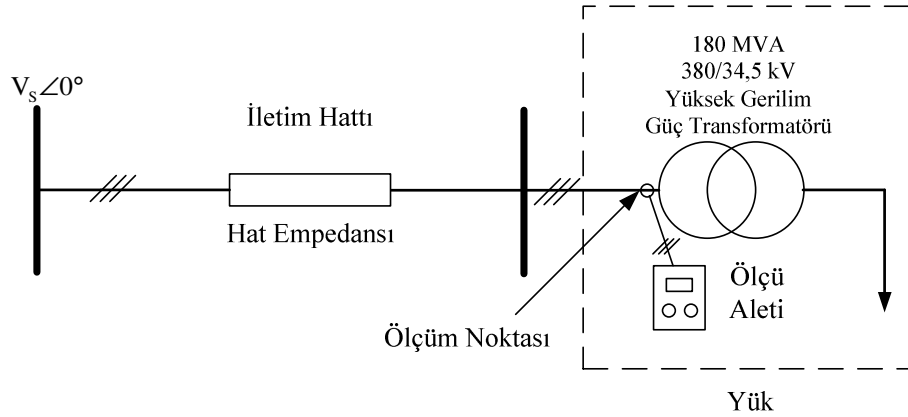
(3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

6. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde, “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” isimli TÜBİTAK projesi kapsamında alınmış olan Fluke 434 Güç Kalitesi Analizörü kullanılarak, yine proje kapsamında elde edilen, ulusal enerji ağıımız içerisindeki radyal bir hattın ölçüm değerleri ile yapılan sayısal uygulamalar açıklanmıştır. Ölçülen değerler kullanılarak bu hatta bağlı yük modellenmiş ve çeşitli çalışma şartlarına göre sistemin davranışını tespit etmek amacıyla simülasyonlar yapılmıştır.

Sayısal uygulamada, ulusal iletim sisteminde bulunan 174 km uzunluğundaki, 380 kV’luk yüksek gerilim enerji iletim hattı ve ona bağlı olan yük incelenmiştir. Bu hatta bağlı yük, R – L sabit empedans modeli kullanılarak modellenmiştir. Hat başı sonsuz bara olarak kabul edilmiş olup iletim hattına ait parametreler Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi’nden (TEİAŞ) temin edilmiştir. İletim hattına bağlı yükün modellenmesinde, ölçüm sonucu elde edilen değerler kullanılmıştır.

Şekil 6.1’de incelenen sistemin tek hat şeması ve ölçümlerin alındığı nokta gösterilmiştir. Şekil 6.2’de ise ölçüm yapılan transformatör merkezine ait örnek bir görüntü verilmiştir. Şekil 6.3’te ise ölçüm proje kapsamında yapılan ölçümler sırasında çekilen fotoğraflardan iki örnek verilmiştir.



Şekil 6.1 Sayısal uygulamalarda incelenen sistemin tek hat şeması ve ölçüm yapılan nokta



Şekil 6.2. Ölçüm yapılan tesise ait 380 kV'luk şalt merkezinden bir görüntü



Şekil 6.3 Ölçüm cihazları ve bağlantılarına ait örnek görüntüler

Yapılan ölçümlerde, yüke ait akım, gerilim ve güç değerlerinin yanı sıra nonlinear yükler sebebiyle oluşan harmonik bileşenlerin değerleri belirlenmiş olup modelleme çalışmalarında bu değerler gözönüne alınmıştır. Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de ölçüm sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.1’de P_{L1} , L1 fazına ait aktif güç değerini, V_{L1} , L1 fazına ait gerilimin efektif

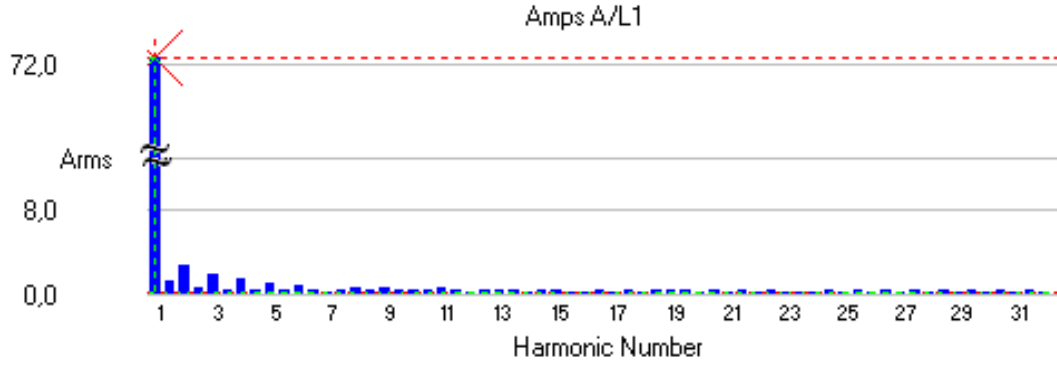
değerini, I_{L1} , L1 fazına ait akımın efektif değerini ve $\cos \varphi$, güç faktörünü belirtmektedir. Çizelge 6.2’de ölçü aleti ile ölçülen, akıma ait harmonik bileşenlerin tepe değerleri ve faz açıları verilmiştir. Şekil 6.4’te ise ölçüm cihazından alınan bir faza ait akım harmoniği bileşenlerini gösteren harmonik spektrumu görülmektedir. Bu spektrumdaki değerler skala değerleridir.

Çizelge 6.1 Yüke ait elektriksel değerler

Parametreler	Ölçülen Değerler
P_{L1}	34,36 MW
V_{L1}	236 kV
I_{L1}	145,6 A
$\cos \varphi$	$0.9998 \approx 1$

Çizelge 6.2 L1 Fazı akım harmoniği bileşenlerine ait ölçülen değerler

Harmonik Derecesi	Akımın Tepe Değeri (A)	Akımın Faz Açısı (°)
2	7,92	-91
3	5,1	175
4	4,5	-90
5	3,1	167
6	2,5	-108
7	0,85	-163
8	1,7	-106
9	1,98	-24
10	1,13	-101
11	1,98	13
12	0,85	-131
13	1,414	-21



Şekil 6.4 L1 fazına ait akım harmoniği spektrumu

Gerçek değerleri elde etmek için ölçü cihazından ölçülen akım, gerilim ve güç değerlerini ölçü transformatörünün ve ölçüm cihazlarının dönüştürme oranları ile (sırasıyla 2, 10 ve 20 ile) çarpılması gerekmektedir.

TEİAŞ'tan alınan veriler ve yapılan ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan hat parametreleri ve kullanılan sabit empedans (R-L) yük modeline ait değerler Çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 Güç sistemine ait simülasyonlarda kullanılan değerler

Parametre	Değeri
Hat direnci, R_{hat}	4 Ω
Hat endüktansı, L_{hat}	152,8 mH
Hat kapasitesi, C_{hat}	2244 nF
Yük direnci, $R_{\text{yük}}$	1634 Ω
Yük endüktansı, $L_{\text{yük}}$	90 mH
Kaçak iletkenlik, G_e	$5,1652 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1}$
Aktif güç, P	34,356367 MW
Reaktif güç, Q	599,693 kVAr

Gerçek bir iletim sistemi üzerinde karşılaşılan çeşitli çalışma koşullarında çeşitli transient analizleri (geçici olaylar için dinamik analizleri) gerçekleştirmek üzere aşağıdaki sayısal

uygulamalar yapılmıştır. Sayısal uygulamalarda yapılan analizler ve kullanılan modeller Çizelge 6.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.4 Sayısal uygulamalarda gerçekleştirilen analizler

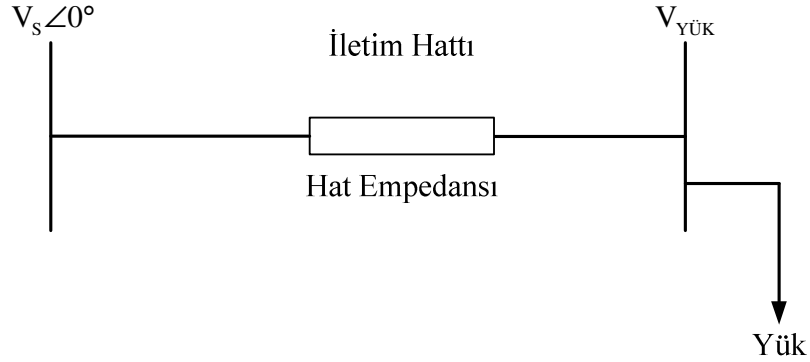
Sayısal Uygulama	Yapılan Analiz
Sayısal Uygulama 1	Normal çalışma şartlarında Durum Uzaı Modeli ile SimpowerSystems Modelinin karşılaştırılması (Kayıplı Hat Modeli)
	Hat başında anahtarlama olması hali için Durum Uzaı Modeli ile SimpowerSystems Modelinin karşılaştırılması (Kayıplı Hat Modeli)
	Hat başında anahtarlama olması hali için Durum Uzaı Modeli kullanılarak kayıplı ve kayıpsız hat modellerinin karşılaştırılması
	Hat başında anahtarlama olması hali için Durum Uzaı Modeli kullanılarak korona direncinin etkisinin analizi (Kondüktans Dahil Kayıplı Hat Modeli)
	Normal çalışma şartlarında Durum Uzaı Modeli ile SimpowerSystems Modelinin nonlinear yüklenme durumu için karşılaştırılması (Kayıplı Hat Modeli)
	Hat başında anahtarlama olması hali için elektriksel modelde yükün lineer ve nonlinear olması durumundaki davranışın karşılaştırılması (Kayıplı Hat Modeli)
Sayısal Uygulama 2	Farklı yüklenme şartlarında, hat başı ve yük anahtarlamaalarının etkilerinin analizi (Kayıplı Hat Modeli)
Sayısal Uygulama 3	Sisteme ilave bir yükün eklenmesinin sistem davranışına etkilerinin analizi (Kayıplı Hat Modeli)
Sayısal Uygulama 4	Yükün Sabit Empedans ve Sabit Güç Modellerinin davranışlarının karşılaştırılması (Kayıplı Hat Modeli)
Sayısal Uygulama 5	Güç sistemlerinin dinamik analizinde özdeğerlerin değişiminin sistemin davranışına etkilerinin analizi (Kayıplı Hat Modeli)

6.1 Sayısal Uygulama 1

Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere güç sistemlerinin analizinde hattın ve yükün modellenmesi ile çeşitli şartlarda davranışlarının incelenmesi için durum uzaı tekniği de kullanılmaktadır. Durum denklemlerine dayalı durum uzaı tekniği yardımıyla güç sisteminin

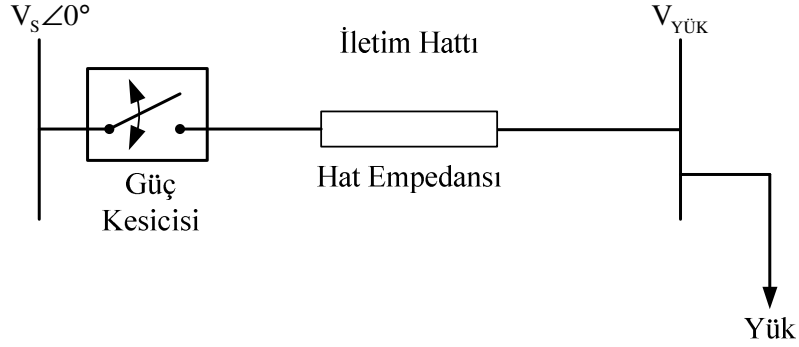
çeşitli çalışma şartları ile ilgili tespitler yapılabilir, yine çeşitli koşullara bağlı olarak elektriksel büyüklüklerin değişimi gözlenebilir. Gerçekleştirilecek simülasyonlar yardımıyla tasarım aşamasında ya da daha sonra sistemin genişletilmesi çalışmaları esnasında karşılaşılabilecek durumlar önceden kestirilebilir.

Bu sayısal uygulamada, durum uzayı tekniği kullanılmış olup analiz için sistemin iletim hattı ve yüke ait karakteristikleri durum uzayı tekniğine dayalı olarak ifade edilmiştir. Uygulamada, Şekil 6.5'teki güç sisteminin modellenmesi, durum uzayı tekniği ile (Matlab&Simulink Programı) gerçekleştirilmiştir. Bu model ile SimpowerSystems Toolbox'ı kullanılarak elde edilen dinamik elektriksel model kullanılarak analiz yapılmış ve her iki model birbiri ile karşılaştırılmıştır. Durum uzayı tekniği ile gerçekleştirilen modelin normal (sürekli hal- anahtarlama) çalışma şartlarında verdiği sonuçlar ile, dinamik elektriksel model sonuçlarının birbirine uyumlu olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 6.5 Modellenen örnek güç sistemi

Daha sonra, geçici olayların (transient) güç sistemi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacı ile Şekil 6.6'da gösterilen, hat başında anahtarlama operasyonu yapılması durumu incelenmiştir. Bu analizlerle, çeşitli hat modelleri için elektriksel büyüklüklerin nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.



Şekil 6.6 Hat başı anahtarlama işlemi yapılan örnek sistem

Yapılan analizlerde iletim hattı için Şekil 3.8’de gösterilen L hat modeli kullanılmıştır. Durum uzayı tekniğinden faydalanılarak oluşturulan modelin verdiği sonuçlar ile SimpowerSystems Toolbox’ı kullanarak gerçekleştirilen modelin sonuçlarının birbiri ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, hattın kayıplı hat olarak modellenmesi (Şekil 3.8) ile kayıpsız hat olarak (Şekil 3.9) modellenmesi durumu göz önüne alınmıştır. Bu modellerde hattın kondüktansının dahil edilmesi (Şekil 3.10) ve dahil edilmemesi durumları da dikkate alınarak, genellikle ihmal edilen korona direncinin etkisi araştırılmıştır. Böylece korona direncinin gözönüne alınması ve ihmal edilmesi halleri de dikkate alınarak farklılıklar ortaya konulmuştur. Yine genellikle bu tür çalışmalarda göz önüne alınmayan harmonik bileşenlerin modele katılması hedeflenmiş olup, geçici olaylar karşısında hattın davranışına etkileri gösterilmiştir. Daha önceki çalışmalarda lineer durumlarda kullanılan durum uzayı tekniğinin, sistemdeki harmonik bileşenlerin dikkate alındığı durumlar için de kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

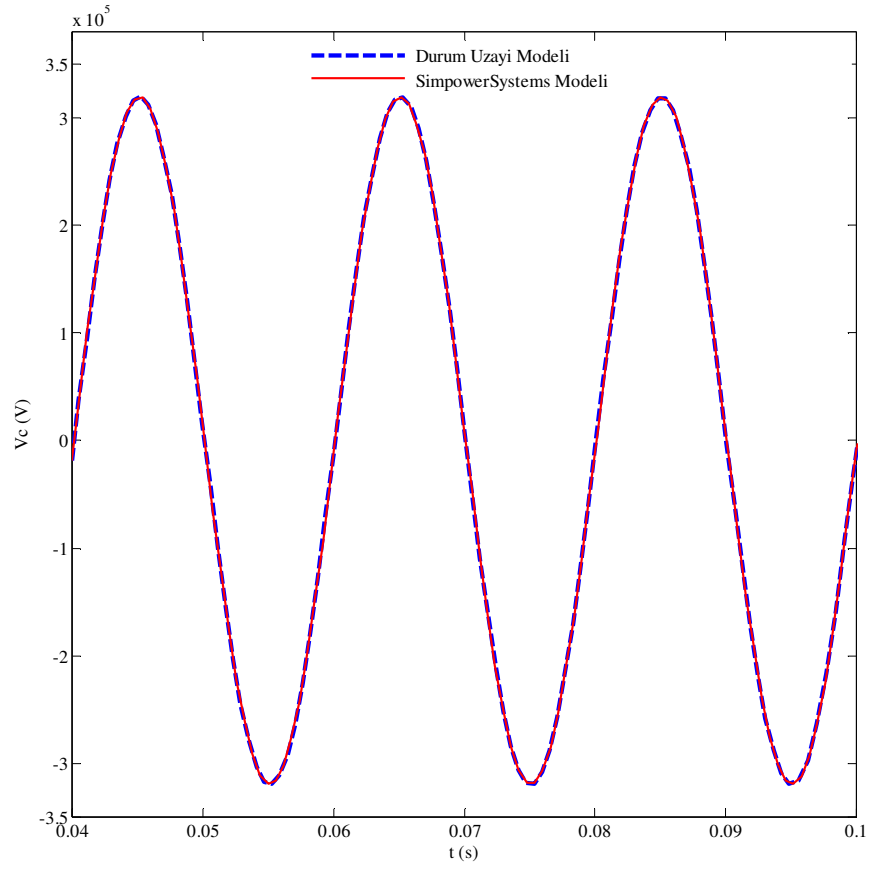
Bu kapsamda yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Normal çalışma şartlarında, kayıplı hat modeli kullanılarak durum uzayı modeli ile SimpowerSystems Toolbox’ı kullanarak oluşturulan elektriksel modelin birbiri ile karşılaştırılması,
- Hat başında anahtarlama olması hali için kayıplı hat modeli kullanılarak durum uzayı modeli ile SimpowerSystems Toolbox’ı kullanarak oluşturulan elektriksel modelin birbiri ile karşılaştırılması,
- Hat başında anahtarlama olması hali için durum uzayı modeli kullanılarak, geçici durumda kayıplı hat modeli ve kayıpsız hat modelinin davranışlarının karşılaştırılması,

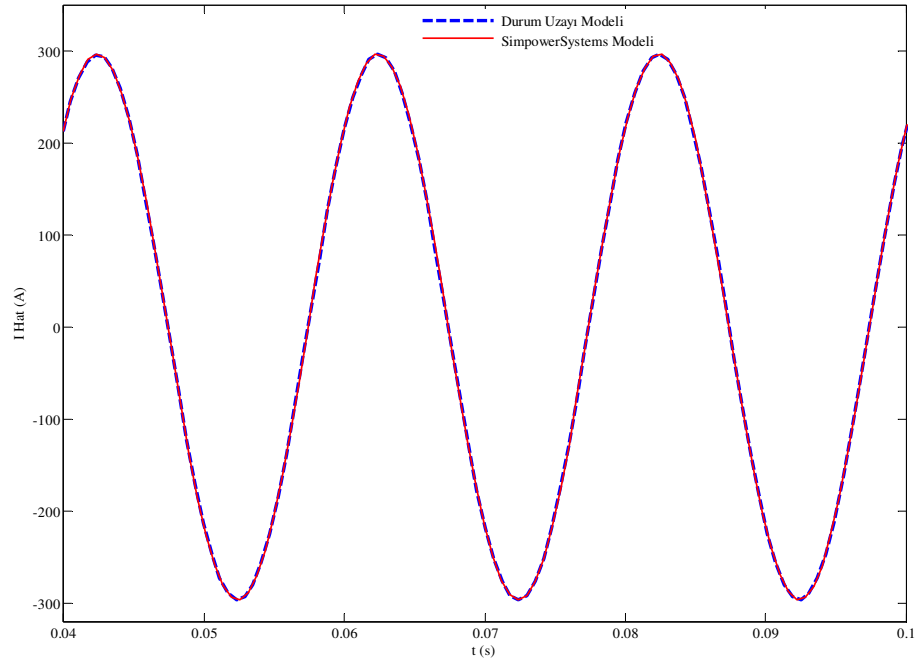
- Hat başında anahtarlama olması hali için durum uzayı modeli kullanılarak, anahtarlama operasyonu süresince hat modeline korona direnci ile birlikte oluşan eşdeğer kondüktansın eklenmesi durumunda sistem davranışının karşılaştırılması,
- Normal çalışma şartlarında, kayıplı hat modeli kullanılarak nonlinear yüklenme durumu için durum uzayı modeli ile SimpowerSystems Toolbox'ı kullanılarak oluşturulan elektriksel modelin birbiri ile karşılaştırılması,
- Nonlinear yükler sebebi ile oluşan harmonik bileşenlerin anahtarlama operasyonları üzerindeki etkilerini analiz etme amacı ile elektriksel modelde yükün lineer ve nonlinear olarak modellenmesi durumunda elektriksel büyüklüklerin davranışlarının incelenmesi.

6.1.1 Lineer Yüklü Anahtarlamasız Durum İçin Modellerin Karşılaştırılması

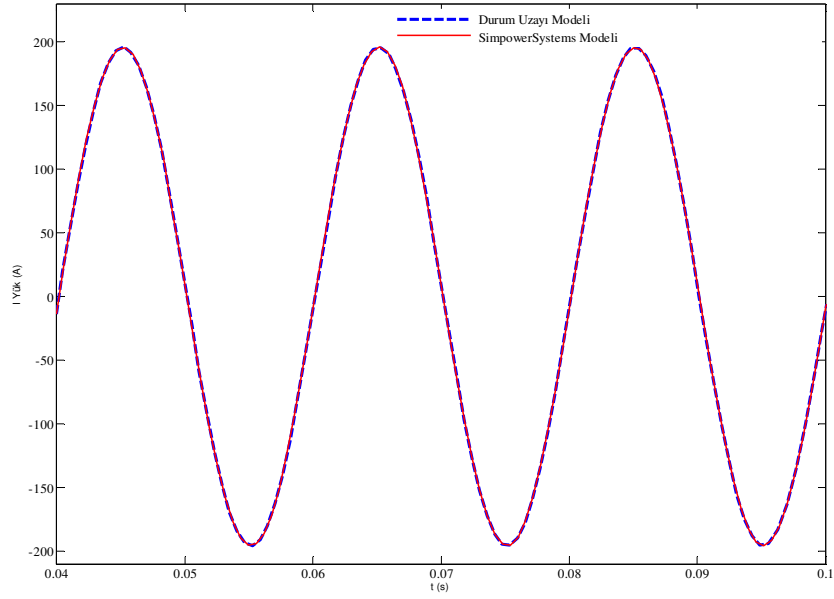
Öncelikle Şekil 3.8'de görülen kondüktansın dahil edilmediği kayıplı hat modeli kullanılarak, sistemde herhangi bir geçici olay olmadığı normal çalışma durumu için durum uzayı tekniği ile elektriksel modelin (SimpowerSystems modeli) karşılaştırılması yapılmıştır. Böylece modellerin birbiri ile uyumu araştırılmış olup sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6.7, hat kapasitesi ve yük üzerinde oluşan gerilimin değişimini göstermektedir. Aynı durum için Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da hat ve yük akımları gösterilmektedir. Durum uzayı modeli kullanılarak elde edilen değişim ile SimpowerSystems Toolbox'ı kullanılarak elde edilen değişimin normal çalışma koşulları için birbirini sağladığı görülmektedir. Bu durum, bize, modellerin kullanılmasının analizler için uygun olacağı sonucunu vermektedir.



Şekil 6.7 Lineer yük ve anahtarlamasız halde hat sonundaki gerilim değişimleri



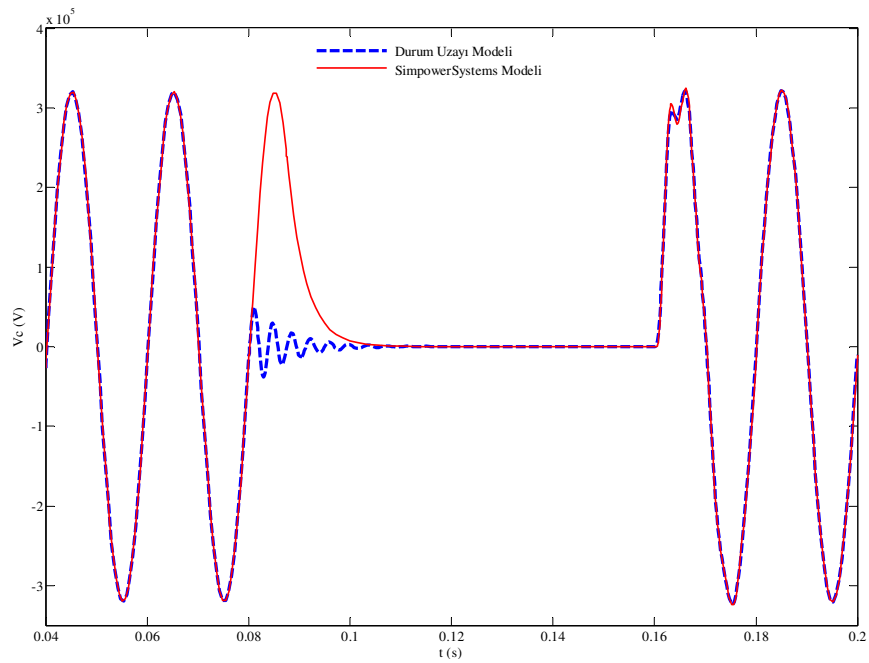
Şekil 6.8 Lineer yük ve anahtarlamasız halde hat akımının değişimleri



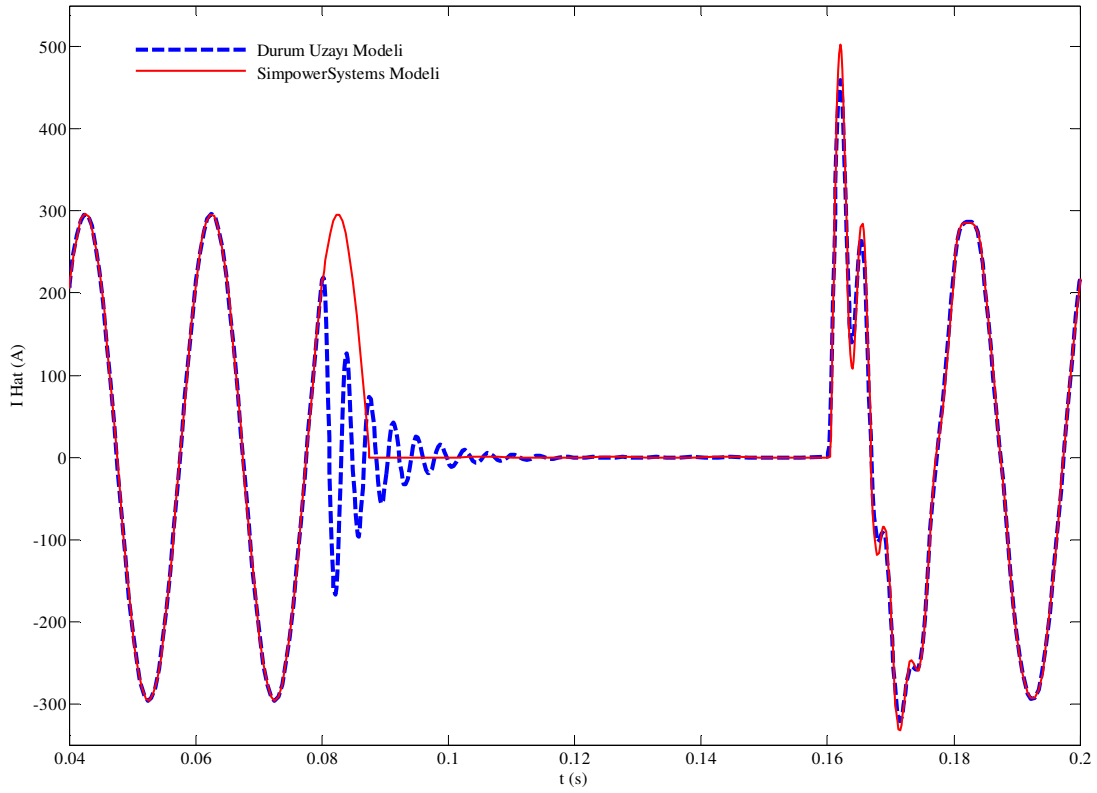
Şekil 6.9 Lineer yük ve anahtarlama yapılmamış halde yük akımının değişimleri

6.1.2 Hat Başında Anahtarlama Olması Hali İçin Modellerin Karşılaştırılması

Yukarıda verilen aynı hat modeli (Şekil 3.8) için, ele alınan sistemde Şekil 6.6’da gösterilen (devrenin önce açılıp sonra kapatılması) geçici olay meydana geldiğinde elektriksel büyüklüklerin değişimi incelenmiştir. Durum uzayı modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar ile elektriksel model oluşturularak elde edilen sonuçların değişimi Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de görülmektedir.



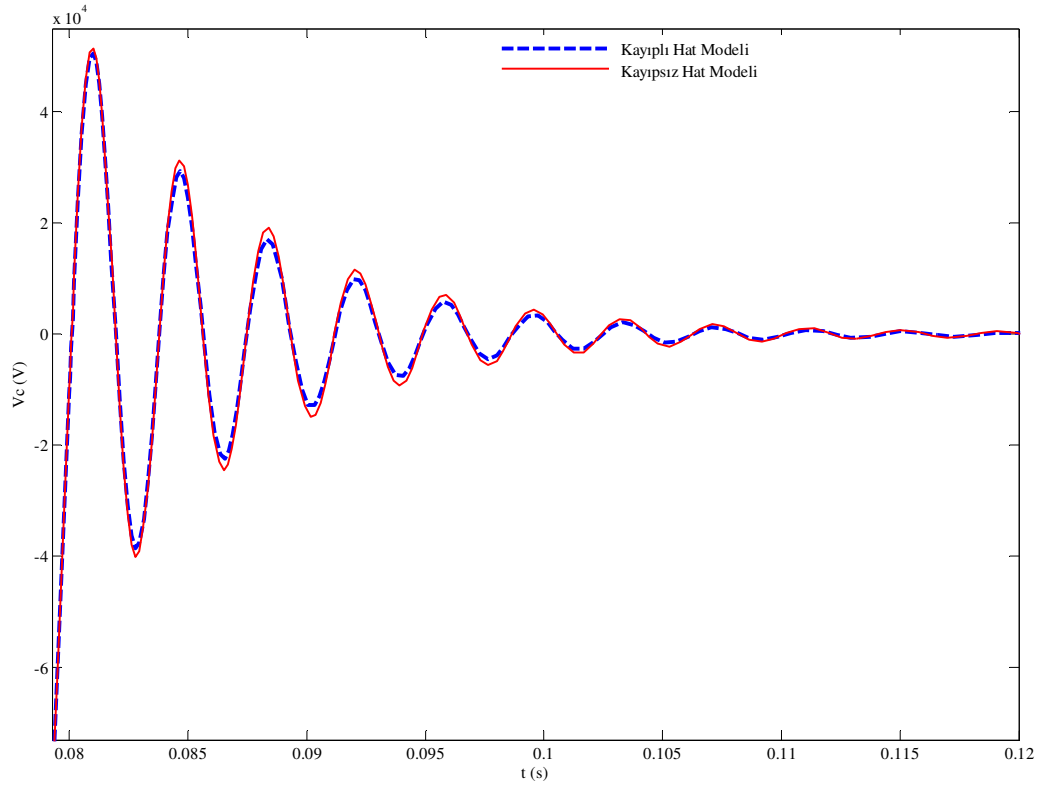
Şekil 6.10 Geçici durumda hat kapasitesi üzerinde oluşan gerilimin değişimleri



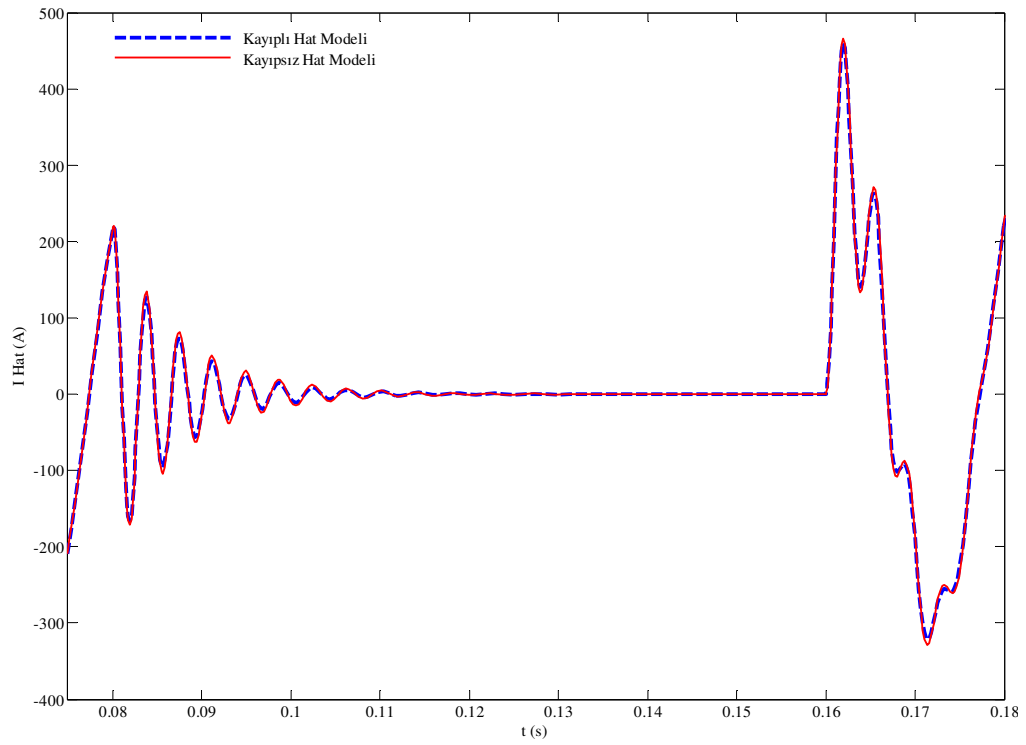
Şekil 6.11 Geçici durumda hat akımının değişimleri

6.1.3 Hat Başında Anahtarlama Olması Hali İçin Hat Modellerinin Karşılaştırılması

Literatürdeki yapılan çeşitli yayınlarda, iletim hatları kayıplı ve kayıpsız olarak modellenmektedir. İncelenen güç sisteminde hattın kayıplı olarak modellenmesi (Şekil 3.8) ve kayıpsız olarak modellenmesi (Şekil 3.9) hali için durum uzayı tekniği kullanılarak sistemdeki elektriksel büyüklüklerin değişimleri ve bu değişimlere modellemelerin etkisi karşılaştırılmıştır. Analiz sonucu elde edilen aşağıdaki şekillerde, hat kapasitesi ile yük uçlarında oluşan gerilim ve hat akımı, hattın iki farklı şekilde modellenmesi hali için verilmiştir (Şekil 6.12 – Şekil 6.13). Bu analizle, modellemenin etkisi, geçici durumlar için durum uzayı tekniği kullanılarak ortaya konulmuştur.



Şekil 6.12 Geçici durumda kayıplı ve kayıpsız hat modeli için yük uçlarındaki gerilimin değişimleri



Şekil 6.13 Geçici durumda kayıplı ve kayıpsız hat modeline göre hat akımının değişimleri

Kayıplı ve kayıpsız hat modeli kullanıldığında, incelenen gerilim ve akımların efektif değerleri Çizelge 6.5’te görülmektedir.

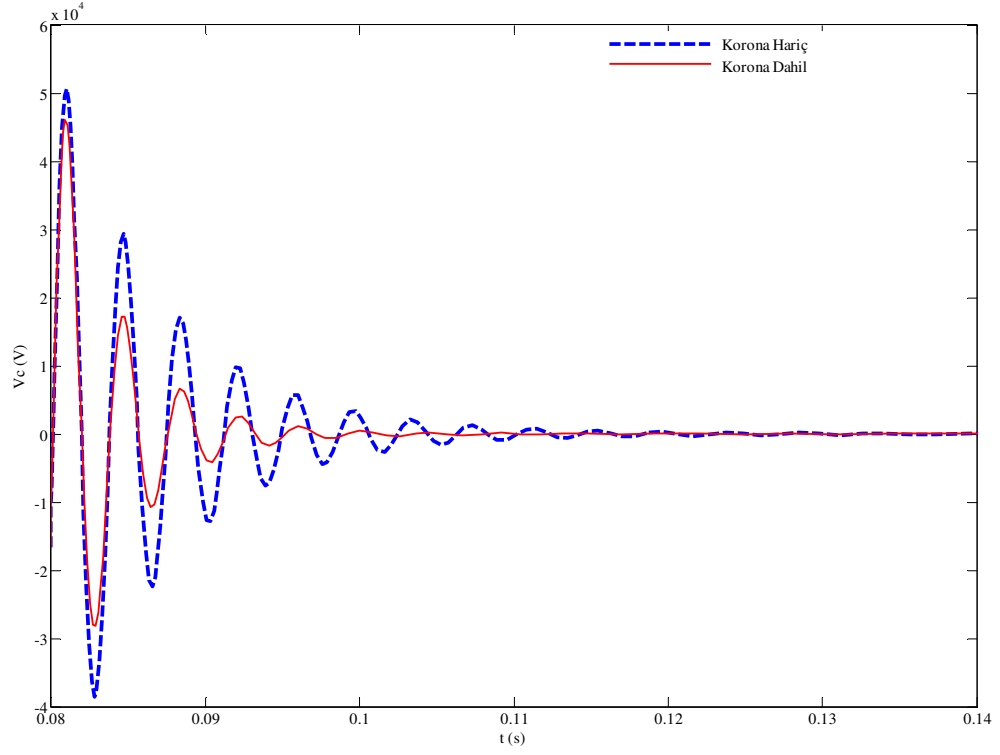
Çizelge 6.5 Hattın kayıplı ve kayıpsız olarak modellenme durumları için elde edilen efektif değerler

Büyüklik	Kayıplı Hat Modeli		Kayıpsız Hat Modeli	
	Genlik	Açı	Genlik	Açı
$V_C (V_{ef})$	226259.26	-1.90°	226852.15	-1.74°
$I_{Hat} (A_{ef})$	209.40	46.72°	209.94	46.88°
$I_{Yük} (A_{ef})$	138.45	-2.89°	138.81	-2.73°

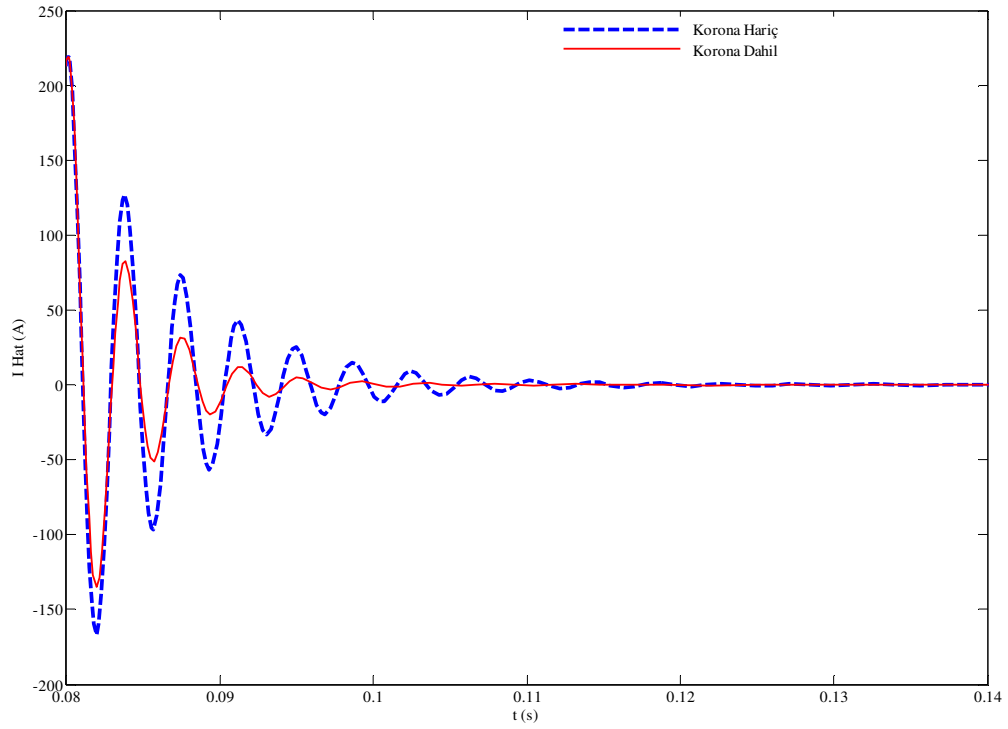
6.1.4 Hat Başında Anahtarlama Olması Hali İçin Hat Modelinde Eşdeğer Kondüktansın Kullanılması

Orta uzunluktaki iletim hatları ile ilgili yapılan çalışmalarda, sürekli hal çalışma koşulları göz önüne alındığında hattın şönt kondüktansı ve korona direnci genellikle ihmal edilir. Fakat anahtarlama operasyonları esnasında geçici durumlarda oluşan elektriksel değişkenlerin değerleri, normal koşulların üzerinde olduğundan yapılan çalışmalarda bunların da hesaba katılması daha doğru sonuçlara ulaşılması açısından önemlidir. Bu çalışmada korona direnci analize dahil edilmiştir. Uygulamada hat modelinde, şönt kondüktans ve korona direncinin paralel eşdeğeri olan etkin kondüktans kullanılmıştır. Anahtarlama esnasında hattın şönt kondüktansı ve korona direnci, Eşitlik (3.17)’de de gösterildiği üzere etkin kondüktans olarak gösterilmiştir.

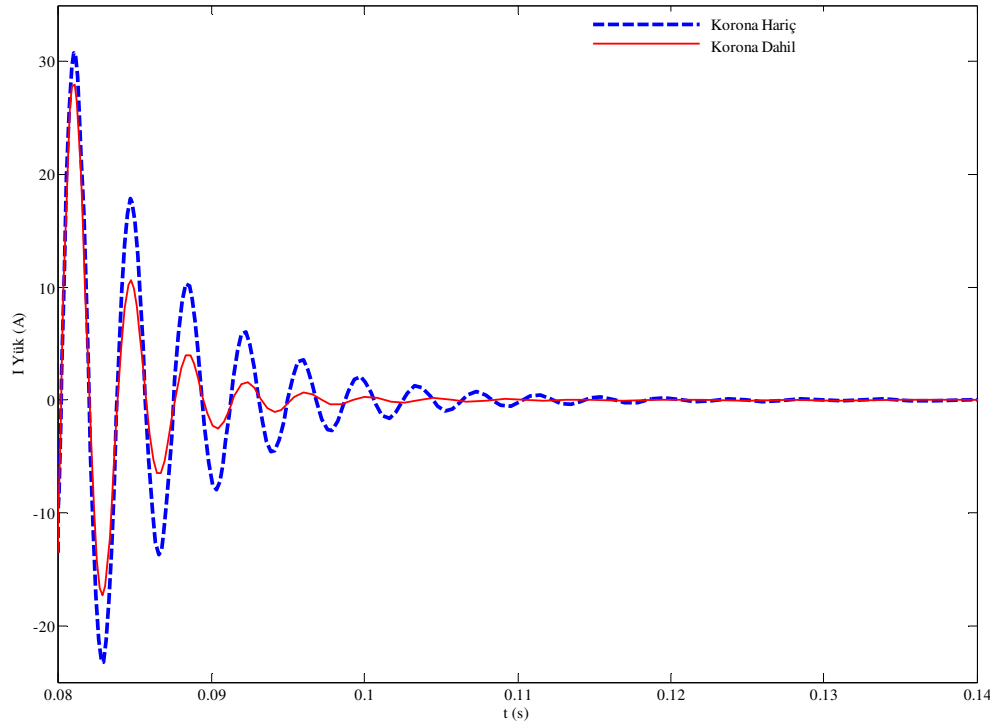
Analiz, durum uzayı modeli ile gerçekleştirilmiştir. Kondüktansın dahil edildiği kayıplı hat modeli ile anahtarlama operasyonu sırasında modele etkin kondüktans G_e ’nin dahil edildiği durum karşılaştırıldığında, aşağıdaki Şekil 6.14 – Şekil 6.16’daki değişimler elde edilir.



Şekil 6.14 Geçici durumda korona direncinin etkisinin olmaması ve olması için hat kapasitesi üzerinde oluşan gerilimin değişimleri



Şekil 6.15 Geçici durumda korona direncinin etkisinin olmaması ve olması için hat akımının değişimleri



Şekil 6.16 Geçici durumda kayıplı hat modeli için kondüktans ve korona direncinin modelde olmaması ve olması için yük akımının değişimleri

6.1.5 Nonlinear Yüklü Anahtarlama Durum İçin Modellerin Karşılaştırılması

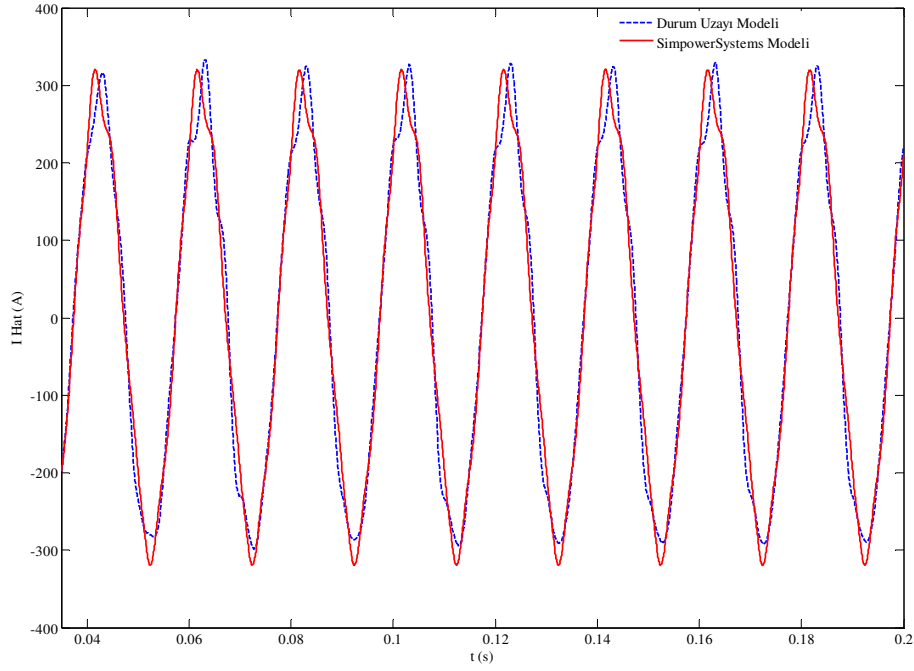
Lineer yüklü anahtarlama durum için durum uzayı tekniği kullanılarak oluşturulan model ile elektriksel modelin (simpowersystems modeli) karşılaştırılması önceki kısımda verilmiş ve uyumlu çalıştıkları ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada, güç sistemlerinde harmonik bileşenlerin bulunması hali hedeflenmiş ve nonlinear yüklerin olması hali için analizler gerçekleştirilmiştir.

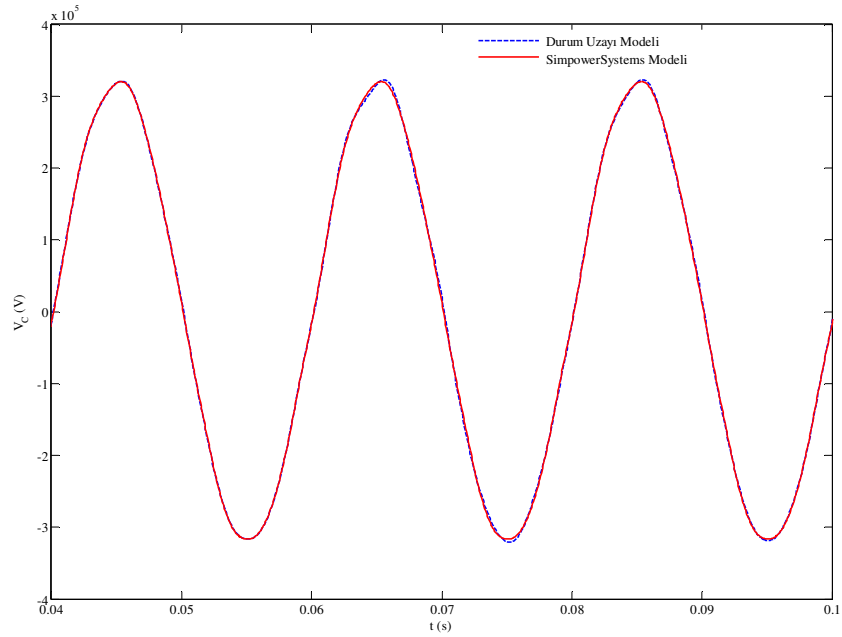
Analizini yaptığımız sistem nonlinear bir yüke sahiptir. Bu nedenle, sistemde nonlinear yüklerin mevcut olduğu durumlarda da durum uzayı tekniği ile elde edilen matematiksel modelin uygun sonuçlar verip vermediğinin araştırılması için, modellerin nonlinear yüklü durum için karşılaştırılması yapılmıştır.

Durum uzayı tekniği kullanılarak geliştirilen harmonikli model ile Simpowersystems harmonikli modelinin simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de, gösterilmiştir.

Ayrıca, harmonik bileşen seviyesindeki artışların etkisi, lineer, nonlinear ve iki kat harmonik bileşene sahip yüklerin (nonlinear yük) bulunması halleri için durum uzayı modeli ile analiz edilmiştir (Şekil 6.19 ve Şekil 6.20).

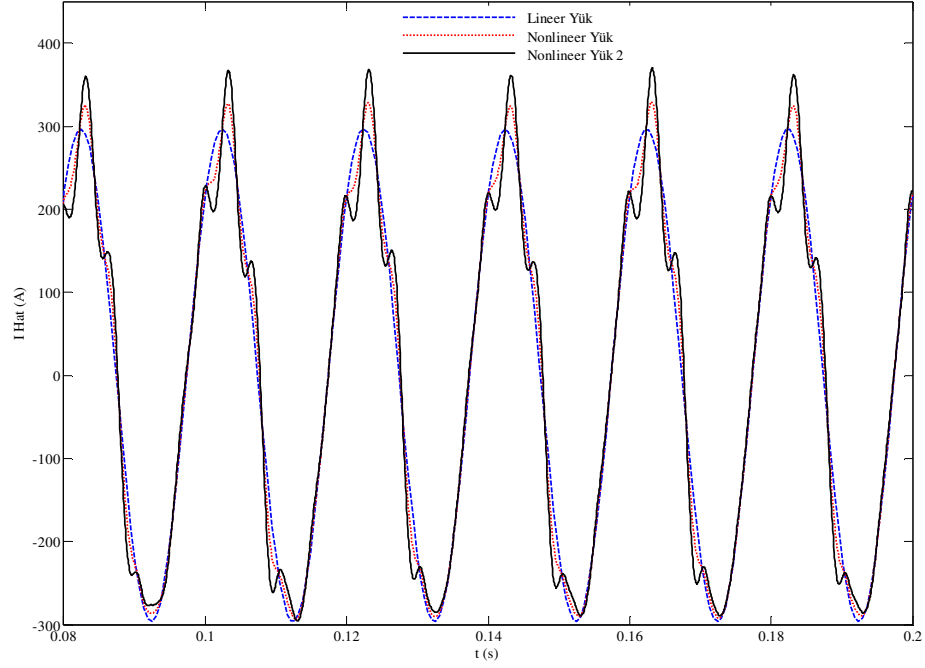


Şekil 6.17 Nonlinear yüklü durum için hat akımının değişimleri

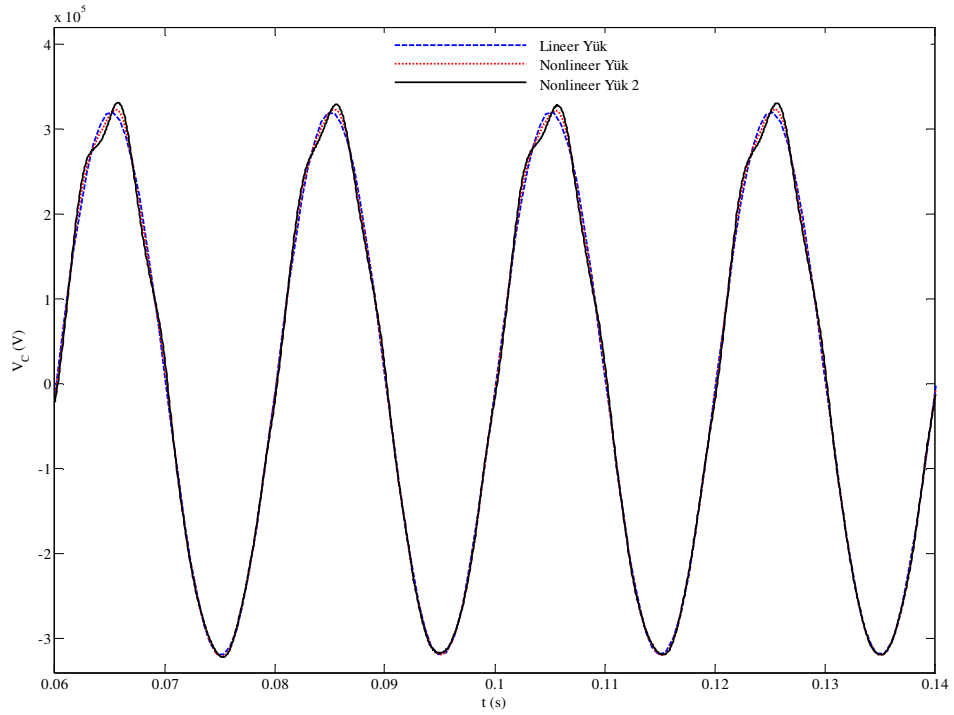


Şekil 6.18 Nonlinear yüklü durum için hat sonundaki gerilim değişimleri

Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'den görüleceği üzere, sistemin elektriksel büyüklüklerinin davranışlarının her iki modelde de uyumlu olduğu ve durum uzayı modelinin harmonikli sistemlerin analizinde de kullanılabileceği tespit edilmiştir.



Şekil 6.19 Durum uzayı modeli ile farklı yüklerin hat akımlarının karşılaştırılması



Şekil 6.20 Durum uzayı modeli ile farklı yüklerin hat sonu gerilimlerinin karşılaştırılması

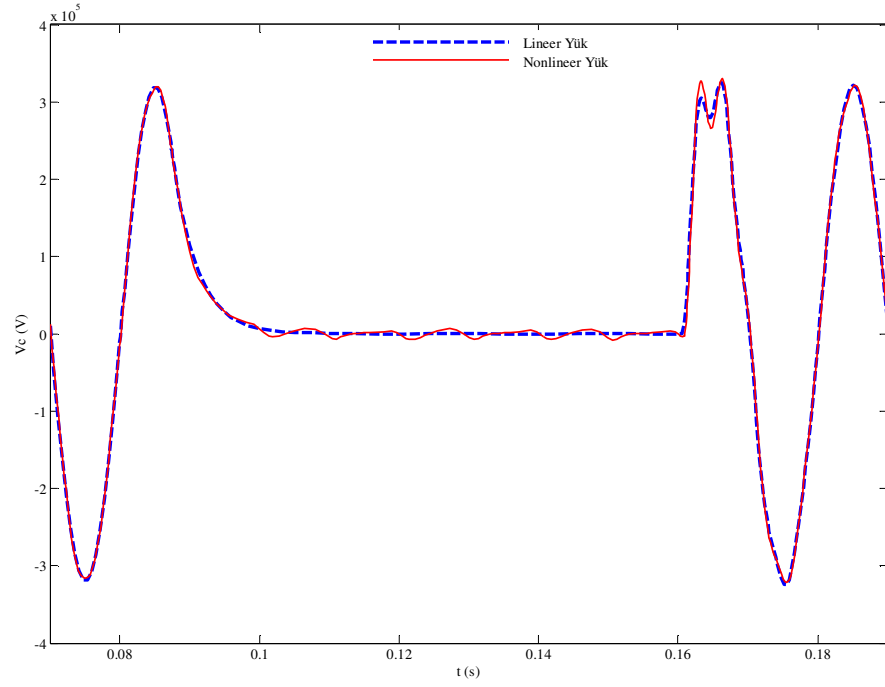
Modellemeler ve analiz sonunda farklı yüklenme durumları için elde edilen hat akımı ve gerilimi Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de görülmektedir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi lineer ve nonlinear yükler için beklenen değişimler elde edilmiştir. Böylece farklı değerlerdeki harmonik bileşenlere sahip sistemler için de durum uzayı modeli kullanımının uygun olduğu ortaya konmuştur.

6.1.6 Nonlinear Yüklenme Halinde Geçici Olayların İncelenmesi

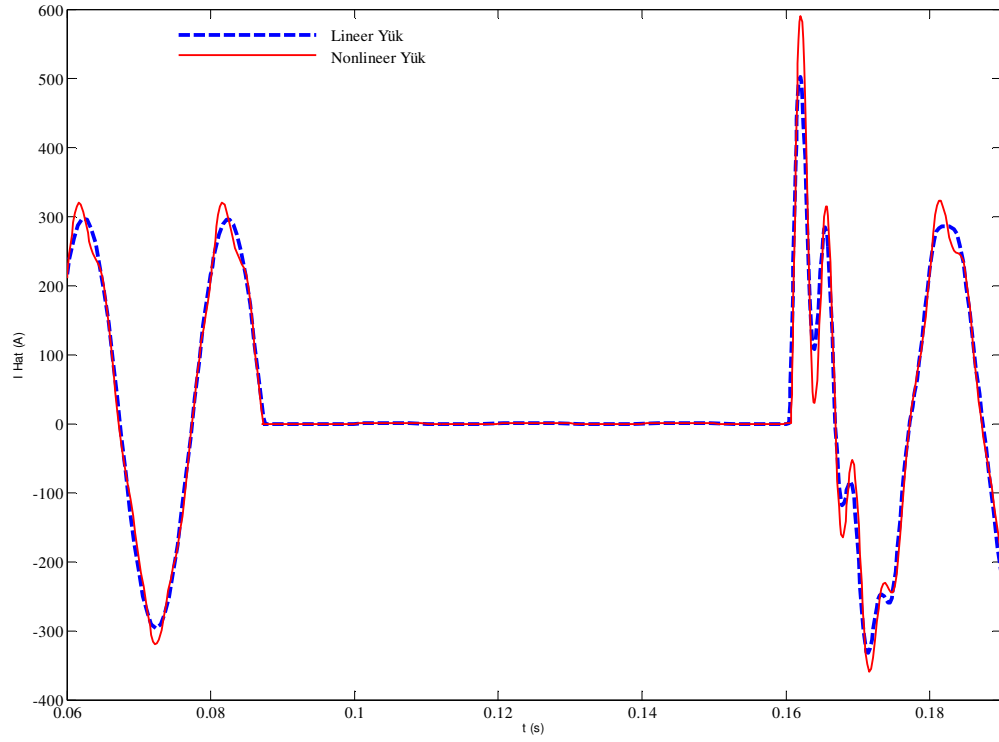
Güç sisteminde her geçen gün artan nonlinear yükler nedeniyle, harmonik bileşenlerin etkileri de giderek artış göstermektedir. Yapılan analizlerde bazen ihmal edilen harmonikler büyük değerlere ulaştığında analize dahil edilmesi gerekmektedir. Nonlinear yükler sebebi ile karşımıza çıkan harmoniklerin etkisi bu çalışmada geçici olaylar için analiz edilmiştir.

Enerji sistemlerinde geçici olaylar olarak adlandırılan anahtarlama olaylarını incelemek için örnek olarak alınan hat başında açma ve tekrar kapama olayı için harmoniklerin anahtarlama olayları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

TEİAŞ’a ait enerji iletim sistemimiz üzerinde ölçümü yapılan yükte bulunan akımın harmonik bileşenleri, akım enjeksiyonu yöntemi kullanılarak elektriksel modele dahil edilmiş ve kayıplı hat modeli kullanılarak elektriksel büyüklüklerin davranışları analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’deki değişimler elde edilmiştir.

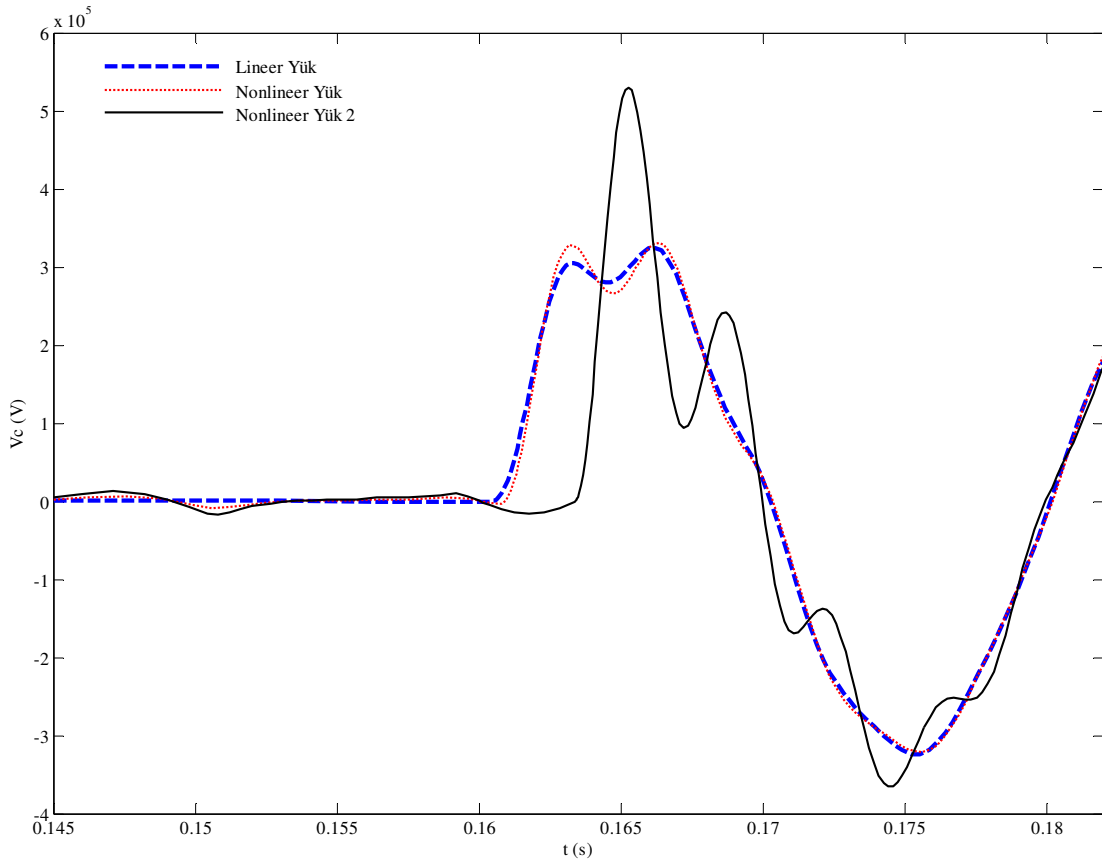


Şekil 6.21 Yüken lineer ve nonlinear olması halinde hat kapasitesi ile yük uçlarındaki gerilimin değişimi



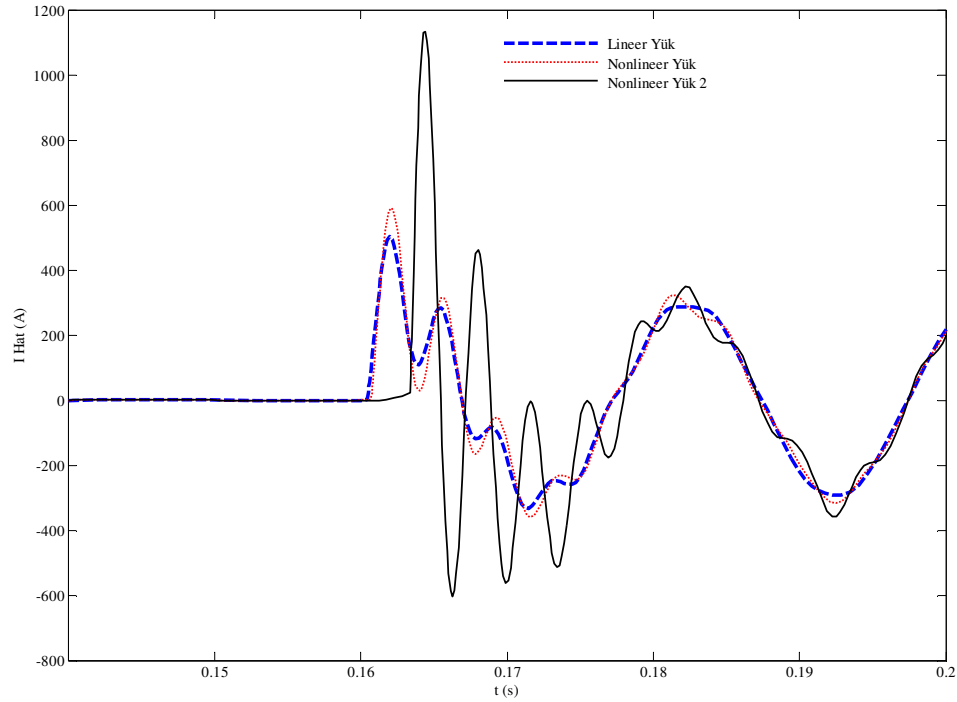
Şekil 6.22 Yüken lineer ve nonlinear olması halinde hat akımının değişimi

Güç sistemimizde bulunan bazı tesislerde, uygun filtreleme ya mevcut değildir ya da istenilen düzeyde harmonik bileşenleri filtre edememektedir. Bu durumda, harmoniklerin geçici olaylar esnasında etkisinin daha fazla olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Standartların çok üzerinde harmonik bileşenlere sahip olan yükler için de yukarıda sözü edilen bu model kullanılarak analizler yapılmıştır. Örnek olarak yük akımında, ölçülen değerlerin iki katı genlikli (Nonlinear Yük 2) harmonik bileşenlerin olduğu varsayılarak yapılan simülasyon sonucu elde edilen gerilim ve akıma ait değişimler aşağıda Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te verilmiştir.



Şekil 6.23 Yükün lineer, nonlinear yük olması ve akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat büyük olması halinde hat kapasitesi geriliminin değişimi

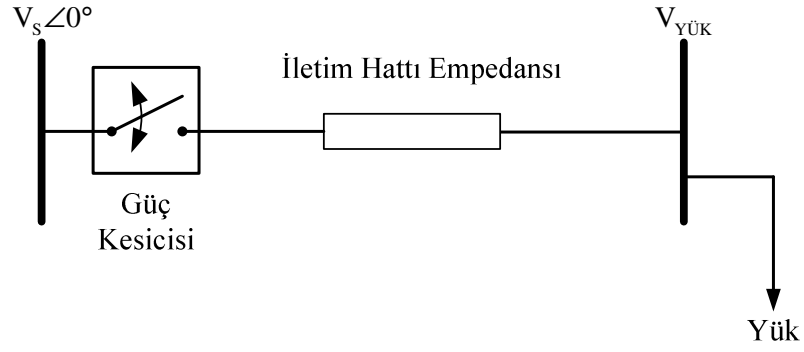
Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'de de görüldüğü üzere harmonik değerlerin artması halinde geçici olaylardaki gerilim ve akım değerleri artış göstermektedir. Bu artışlar nedeniyle sistemdeki izolasyon zorlanmaları, aşırı akım rölelerinin etkilenmeleri söz konusudur. Ayrıca nonlinear yükün karakterine bağlı olarak rezonans etkisinin de görülebileceği araştırılmalıdır.



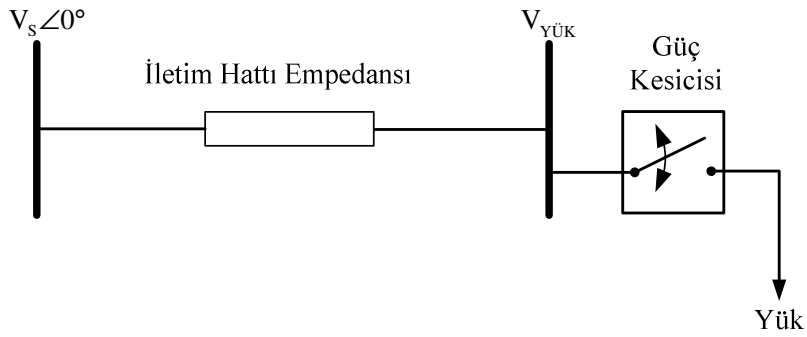
Şekil 6.24 Yüken lineer, nonlineer yük olması ve akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat büyük olması halinde hat akımının değişimi

6.2 Sayısal Uygulama 2

Bu uygulamada, hat başında anahtarlama operasyonu yapılmasının ve yük ucunda anahtarlama gerçekleşmesi durumlarının elektriksel büyüklükler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu analizde, sistemi besleyen hat ve yük için ölçüm değerleri kullanılarak simülasyonlar Matlab & Simulink SimpowerSystems Toolbox'ı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu konudaki çalışmalarda harmoniklerin etkileri göz ardı edilmektedir. Giderek artan harmonik bileşenler nedeniyle nonlineer yüklerin bulunması hali, analize dahil edilmiş ve yapılan bu çalışma ile harmoniklerin anahtarlama esnasındaki etkileri ortaya konulmuştur. Sistemdeki harmonikli yükler, akım enjeksiyonu yöntemi kullanılarak modellenmiş olup, yük sabit empedans yük modeli (R-L yük modeli) kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, yükün sürekli aynı gücü çekmeyeceği göz önüne alınarak iki anahtarlama durumu için de yükün ölçülen değere göre %50, %100 ve %150 oranları gözönüne alınmıştır. Böylece farklı güçler için de analizler gerçekleştirilmiş olup güç değişimlerinin etkileri ortaya konulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 6.25 Sayısal uygulama 2 için analizi yapılan anahtarlama durumları

(a) Hat başında anahtarlama yapılması – Durum A

(b) Yüken devreye girip çıkması – Durum B

Şekil 6.25’de analizler için kullanılan iki durum gösterilmiştir. Şekil 6.25’de verilen her iki durum için de üç farklı çalışma uygulanmıştır:

Çalışma 1: Yüken, ölçülen gücün %50’si oranında olması hali (Yüklenme oranı: 0,5).

Çalışma 2: Yüken, ölçümlerde tespit edilen güç değerlerinde olması hali (Yüklenme oranı: 1).

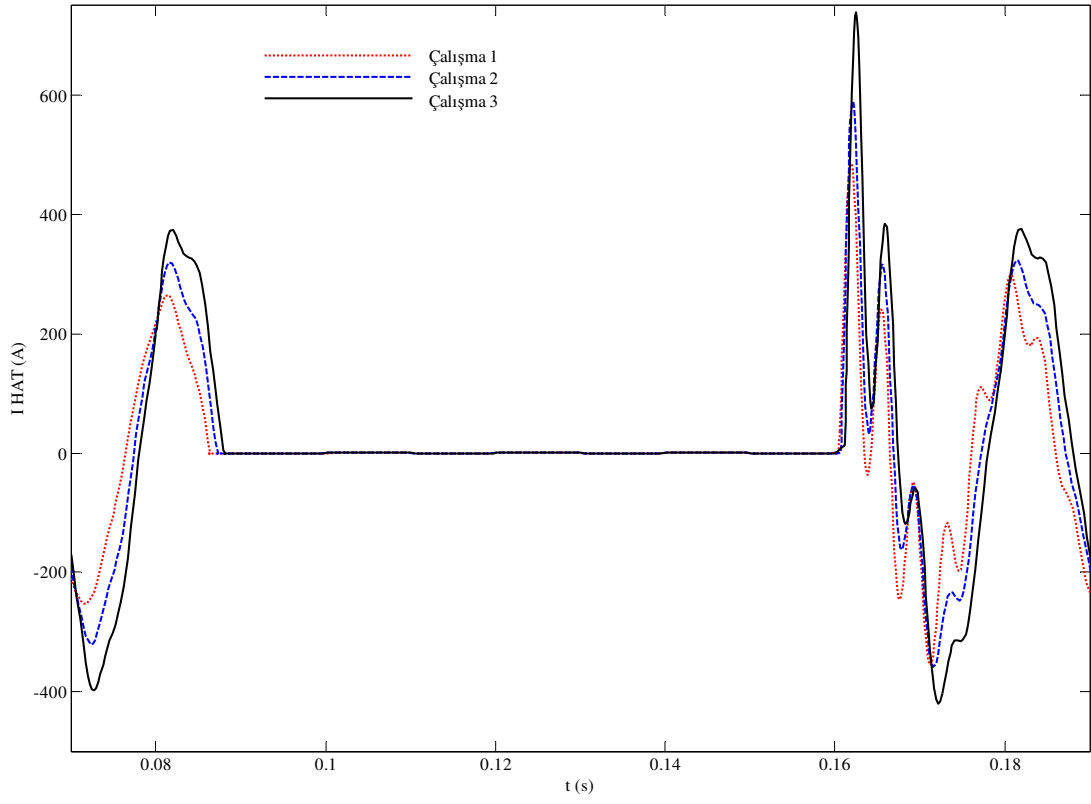
Çalışma 3: Yüken, ölçülen gücün %150’si oranında olması hali (Yüklenme oranı: 1,5).

Her çalışma koşulunda, yüklenme oranı ile çekilen güce göre hesaplanan karakteristik değerler kullanılarak yükün modellenmesi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda verilen üç çalışma hali uygulandığında hat akımı toplam harmonik distorsiyonu (THD_{IHAT}), yük akımı toplam harmonik distorsiyonu ($THD_{IYÜK}$) ve hat kapasitesi ile yük geriliminin toplam harmonik distorsiyonlarının ($THD_{VYÜK}$) değişimleri Çizelge 6.6'daki değerlerle elde edilmiştir. L hat modeli kullanıldığı ve hattın kapasitesi hat sonunda modellendiği için hattın kapasitesi uçlarında oluşan gerilim ile yük uçlarında oluşan gerilim aynıdır. Bu nedenle hat gerilimi distorsiyonu ile yük gerilimi distorsiyonu aynıdır.

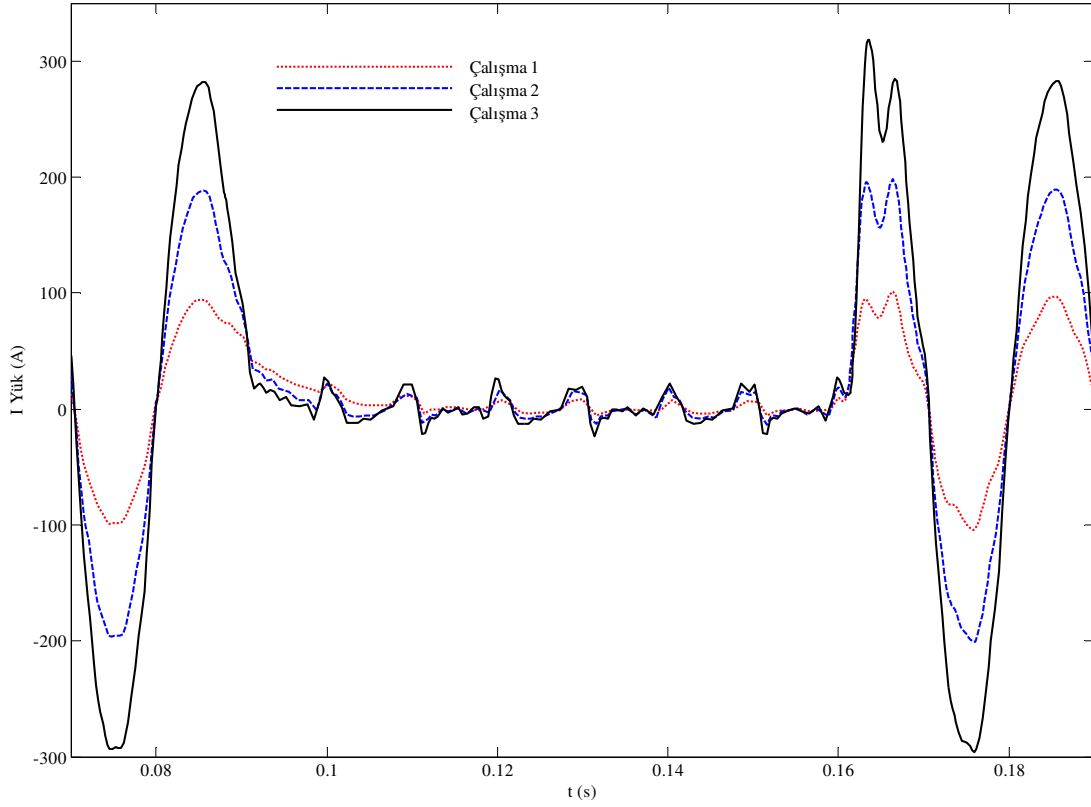
Çizelge 6.6 İncelenen sisteme ait elektriksel değişkenlerin THD değerleri

THD	Çalışma 1	Çalışma 2	Çalışma 3
% THD_{IHAT}	5,14	7,4	7,96
% $THD_{VYÜK}$	0,89	1,5	1,91

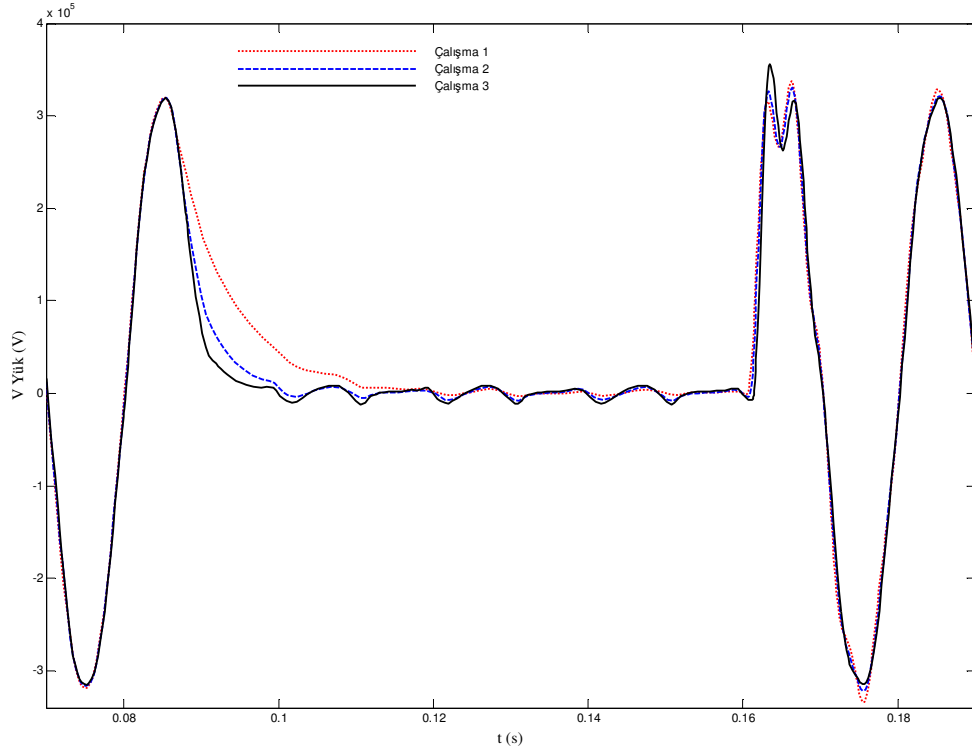
Durum A ve Durum B için yukarıda verilen çalışma halleri uygulandığında, analiz sonucu elde edilen sisteme ait akım ve gerilimlerin değişimleri Şekil 6.26 - Şekil 6.30'da verilmiştir. Ayrıca Çalışma 2 için Durum A ve Durum B'nin gerilim ve akımlarının değişimleri Şekil 6.31 – Şekil 6.33'te gösterilmiştir.



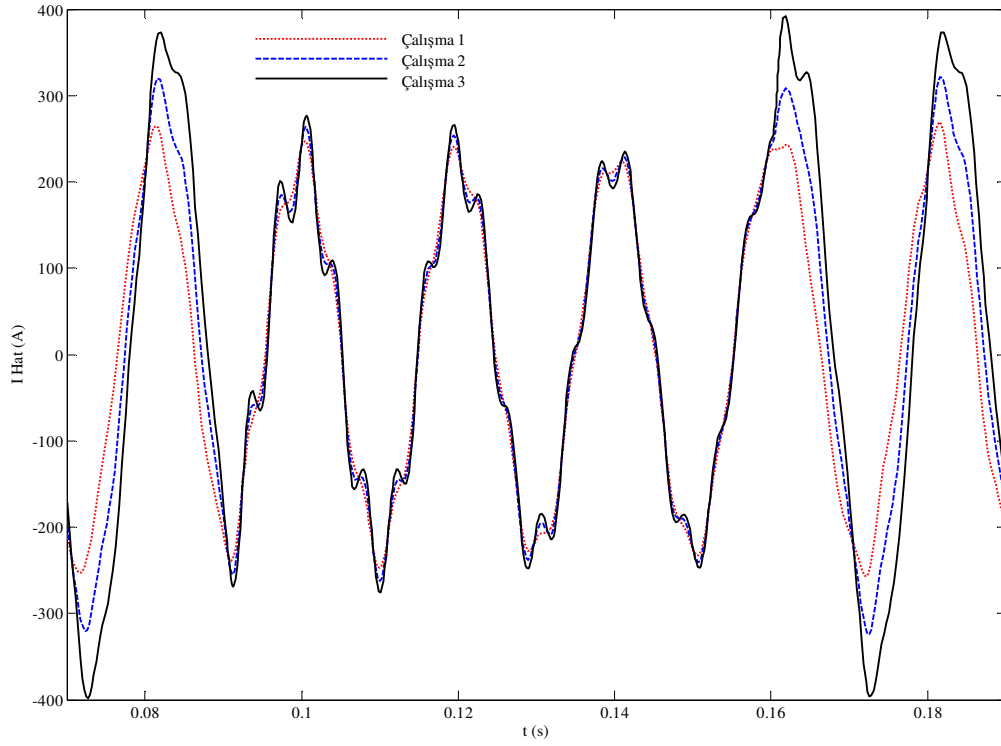
Şekil 6.26 Hat başında anahtarlama hali için hat akımının değişimleri (Durum A)



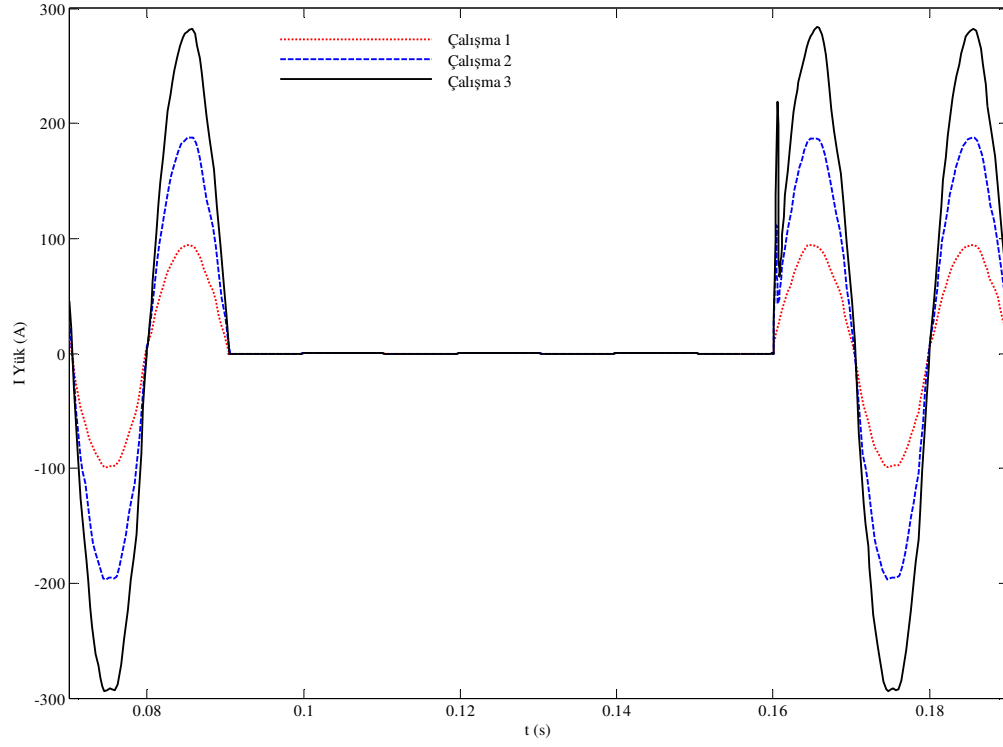
Şekil 6.27 Hat başında anahtarlama hali için yük akımının değişimleri (Durum A)



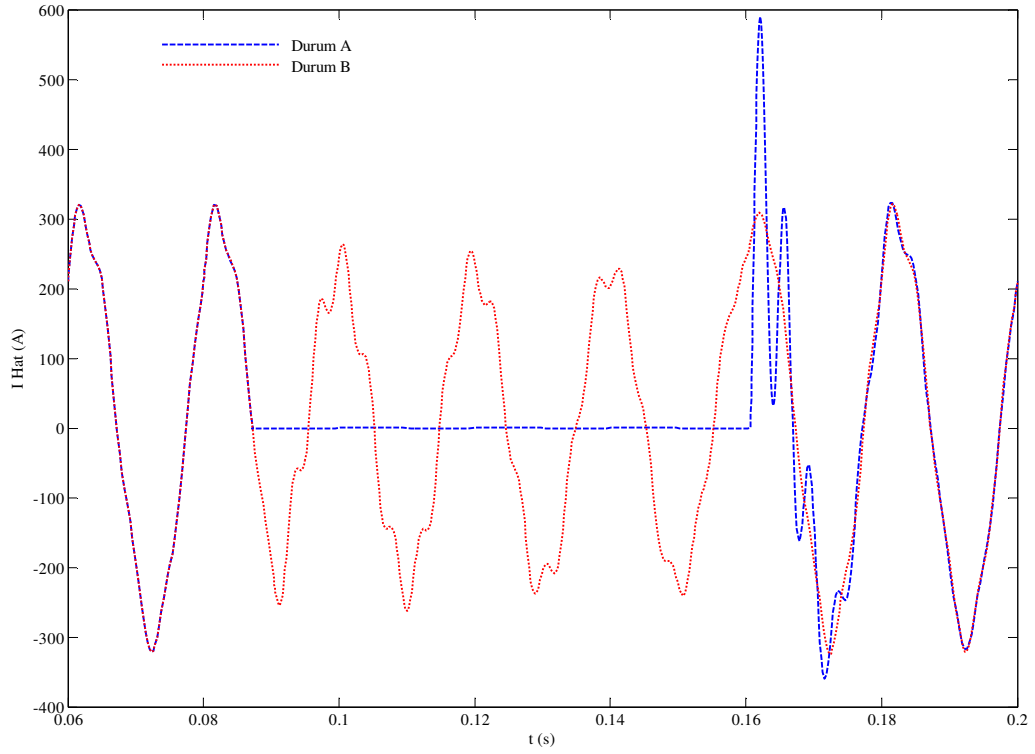
Şekil 6.28 Hat başında anahtarlama hali için yük uçlarında oluşan gerilimin değişimleri (Durum A)



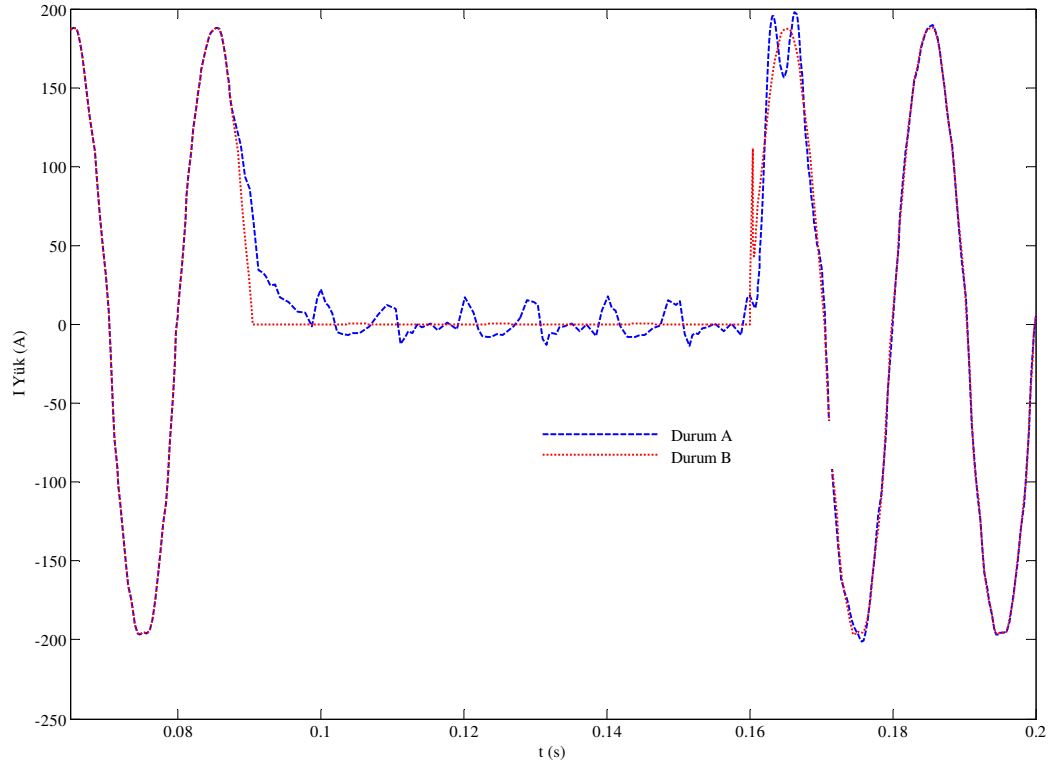
Şekil 6.29 Yükün devreden çıkıp tekrar devreye girmesi hali için hat akımının değişimleri (Durum B)



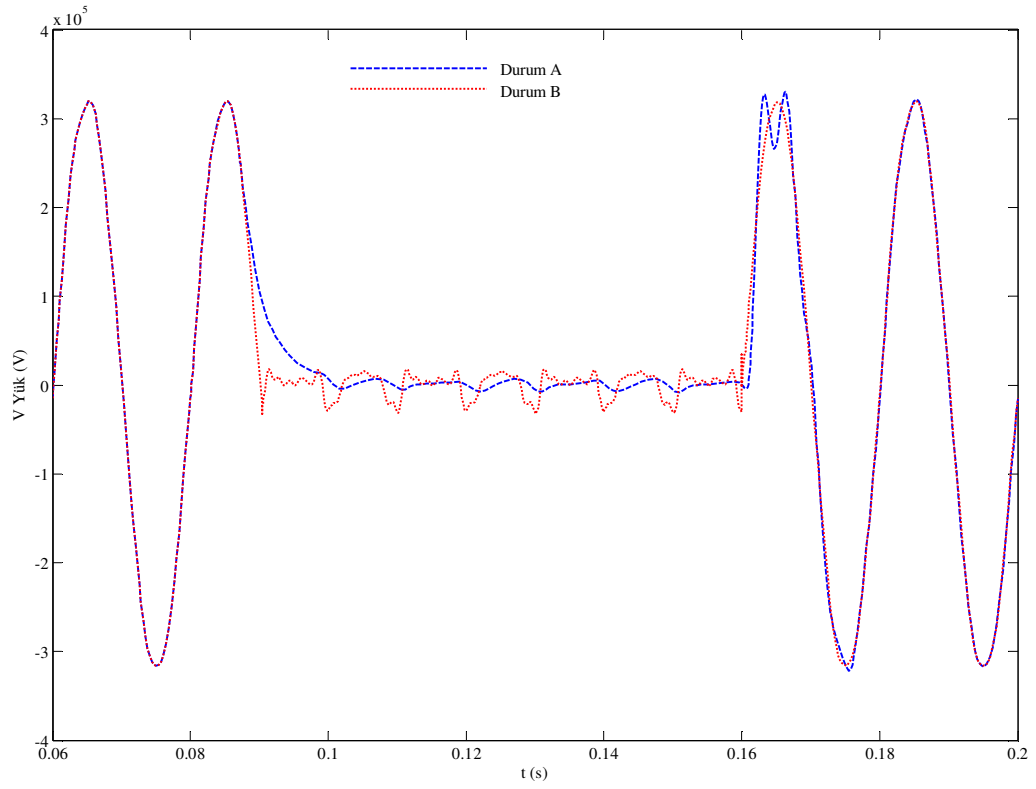
Şekil 6.30 Yükün devreden çıkıp tekrar devreye girmesi hali için yük akımının değişimleri (Durum B)



Şekil 6.31 Çalışma 2 için Durum A ve Durum B'nin hat akımlarına etkisinin karşılaştırılması



Şekil 6.32 Çalışma 2 için Durum A ve Durum B'nin yük akımlarına etkisinin karşılaştırılması

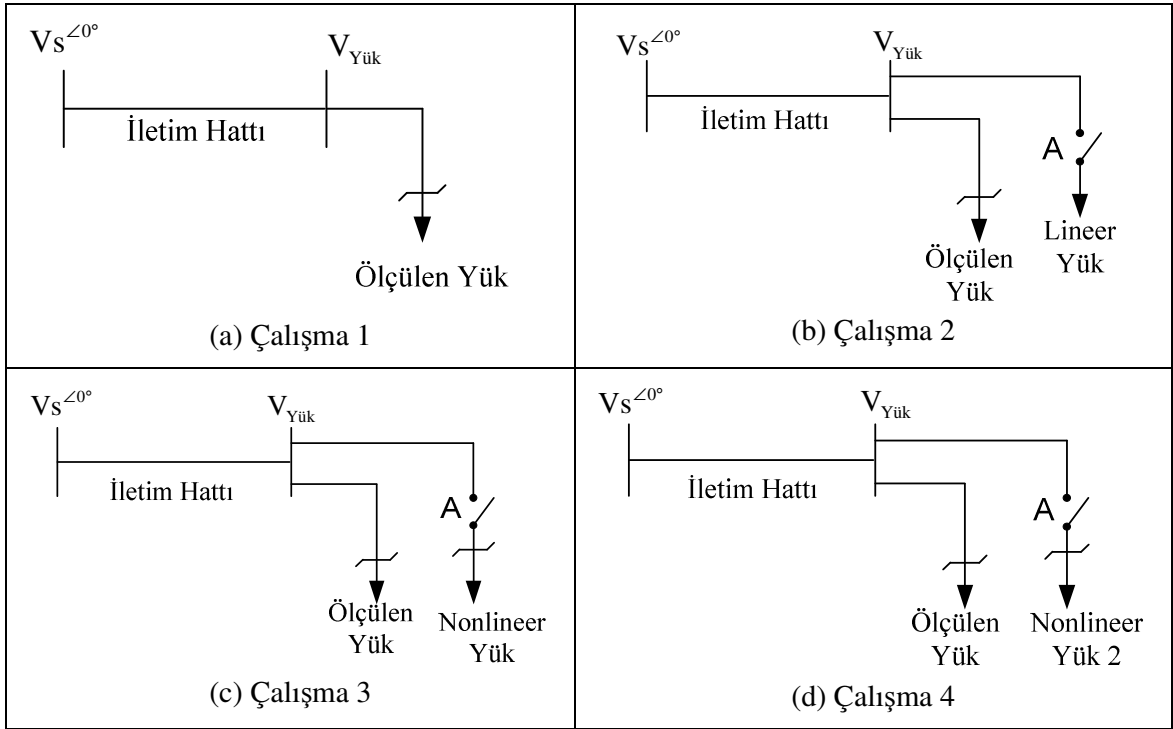


Şekil 6.33 Çalışma 2 için Durum A ve Durum B'nin yük uçlarındaki gerilime etkisinin karşılaştırılması

6.3 Sayısal Uygulama 3

Güç sistemlerinde belirli yükler devrede iken, ikinci bir yükün devreye girmesi veya devreden çıkması ile oluşan geçici olaylar önemlidir. Bu tür olaylar sistemde daha önceden olmayan bir yükün sisteme eklenmesi (yeni bir tesis kurulması, var olan bir tesisin genişletilmesi, ...) veya arıza sonucu devre dışı kalan enerji hattı sebebi ile yükün ring şebekenin diğer ucundan beslenmeye başlanması halinde meydana gelir. Bu durumlarda yapılan çalışmalarda genellikle nonlinear yüklerin etkileri ihmal edilmektedir.

Bu çalışmada, nonlinear yükler sebebi ile oluşan harmonik bileşenler de gözönüne alınarak sistemde ikinci bir yükün devreye girmesi ve devreden çıkması halleri için, hat akımının ve geriliminin davranışları incelenmiştir. Modelde yükün devreye girmesi 0,08'inci saniye ve devreden çıkması 0,16'ncı saniyede gerçekleşmektedir. Ölçüm yapılan tesisin gündeminde tesisi büyütmek ve çekeceği gücü arttıracak yeni tesisler kurma planları bilindiğinden yapılacak çalışmanın gerekliliği düşünülerek bu uygulama gerçekleştirilmiştir. Ulusal enerji sisteminin herhangi bir yerindeki güç artırımı isteklerinin sistemde oluşturacağı etki göz önüne alınarak cevap verilmesi uygun olacağından, bu tür çalışmaların yapılmasının gerekliliği açıktır.



Şekil 6.34 İncelenen güç sistemi için araştırılan çalışma koşulları

- (a) Ölçümü yapılan yükün devrede olması hali,
- (b) Ölçülen yüke ilave lineer yükün devreye alınması hali,
- (c) Ölçülen yüke ilave nonlinear yükün devreye alınması hali,
- (d) Ölçülen yüke ilave daha büyük nonlinear yükün devreye alınması hali,

Bu uygulamada, ulusal enerji ağıımızında bulunan bir güç sisteminde yapılan ölçümler kullanılmıştır. Bu bölgedeki güç artırımı talepleri bilindiğinden analizin gerçekleşmesi sistem davranışı bakımından önemlidir. Analizler, Matlab & Simulink SimpowerSystems Toolbox'ı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yük sabit empedans yük modeli (R-L yük modeli) kullanılarak modellenmiş olup Şekil 6.34'te verilen 4 çalışma durumu için analizler yapılmıştır.

Şekil 6.34'te verilen çalışma koşulları aşağıda belirtilmiştir:

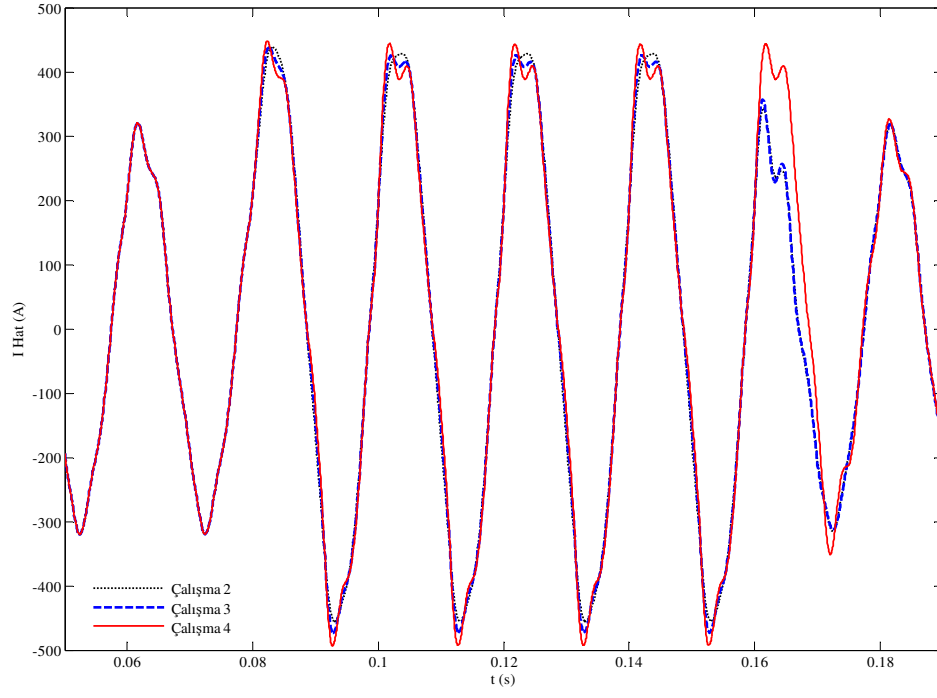
Çalışma 1: Yük olarak, tesiste elde edilen değerlere ait harmonik bileşenler kullanılmıştır.

Çalışma 2: Ölçümü yapılan sisteme, ölçülen yük büyüklüğünde lineer bir yük bağlanması durumudur.

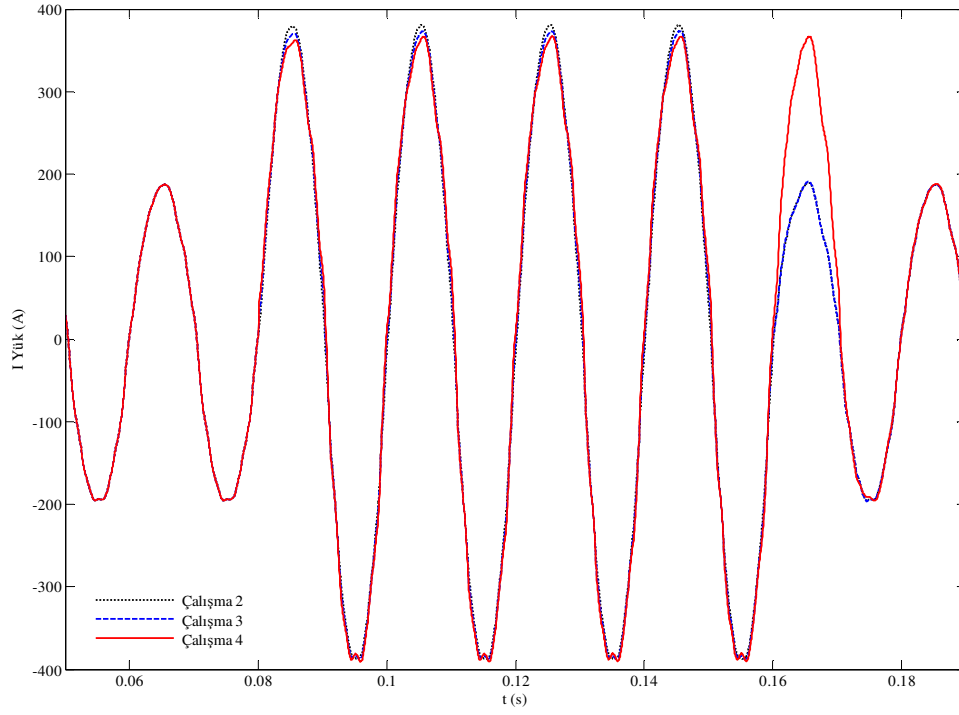
Çalışma 3: Ölçümü yapılan güç sistemine, ölçülen yük ile aynı özelliklere sahip nonlinear bir yükün bağlanması halidir.

Çalışma 4: Ölçümü yapılan güç sistemine, ölçülen yükün iki katı büyüklüğünde harmonik bileşenlere sahip bir yükün bağlanması halidir.

Şekil 6.34'deki çalışma 2, 3 ve 4 için A anahtarının önce kapanıp sonra açılması hali için yapılan analizler sonucu elde edilen hat ve yük akımının değişimleri Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da verilmiştir. Çalışma 2, 3 ve 4'te ilave ikinci yükün de devrede olması halinde hat akımı ve gerilimine ait THD değerleri Çizelge 6.7'deki değerler olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.35 Hat akımının farklı çalışma koşullarına göre değişimi



Şekil 6.36 Yük akımının farklı çalışma koşullarına göre değişimi

Çizelge 6.7 Tüm yükler devrede iken hat akımı ve geriliminin toplam harmonik distorsiyonu değerleri

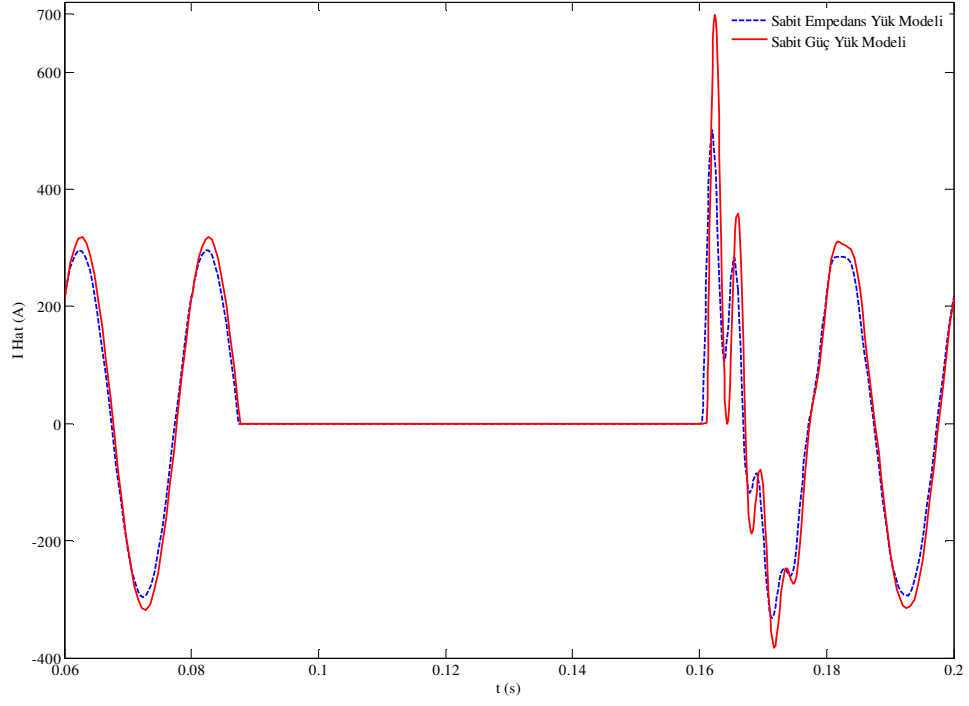
Durumlar	% THD _{IHAT}	% THD _{VHAT}
Çalışma 1	9,74	1,5
Çalışma 2	5,67	1,12
Çalışma 3	11,35	2,24
Çalışma 4	17,02	3,36

6.4 Sayısal Uygulama 4

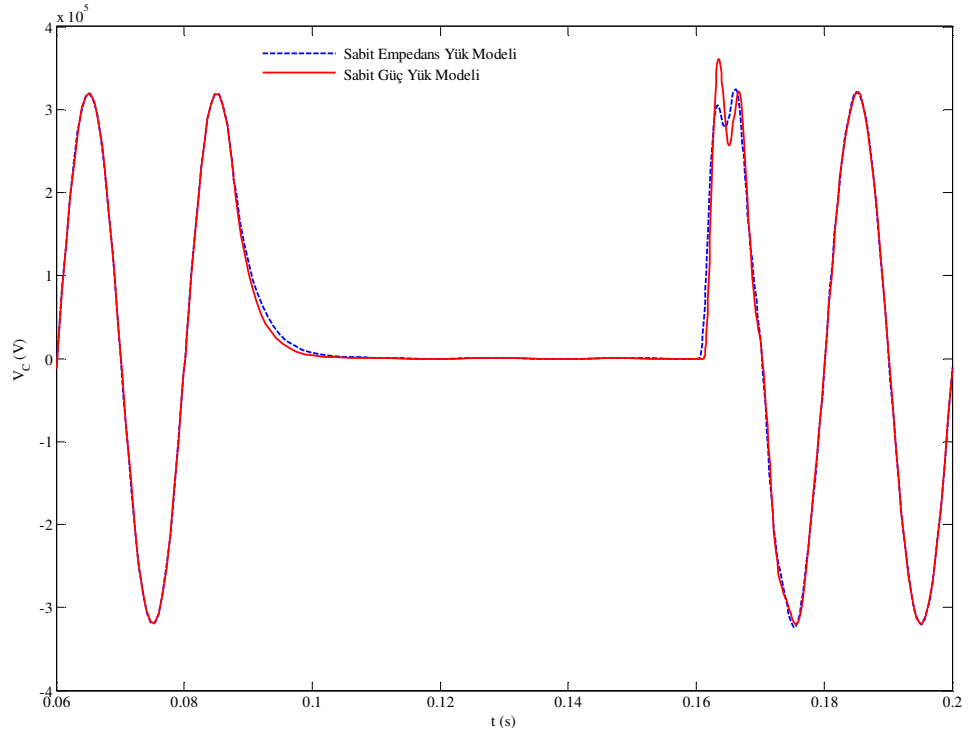
Bilindiği üzere yük modellemelerinde sabit empedans ve sabit yük modelleri kullanılmaktadır. Şimdiye kadar yapılan sayısal uygulamalarda sabit empedans yük modeli kullanılmıştır. Bu sayısal uygulamada, güç sistemi modellemelerinde seçilen yük modelinin geçici olay analizine etkisini belirlemek için ölçüm yapılan yüke ait sabit güç modeli ile sabit empedans modelleri dahil edilmiş ve sistem davranışına etkileri tespit edilmiştir. Ölçüm yapılan yük, lineer, nonlineer ve iki kat akım harmoniği bileşenine sahip nonlineer yük olarak modellenmiştir.

Yapılan simülasyon çalışması sonucunda, her bir yük modeli için hat akımı, hat sonu gerilimi ve yük akımının değişimleri birbiri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca modellemenin, incelenen güç sisteminin elektriksel büyüklüklerinin ve toplam harmonik distorsiyonu değerleri üzerindeki etkisi incelenmiş olup Çizelge 6.8’de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

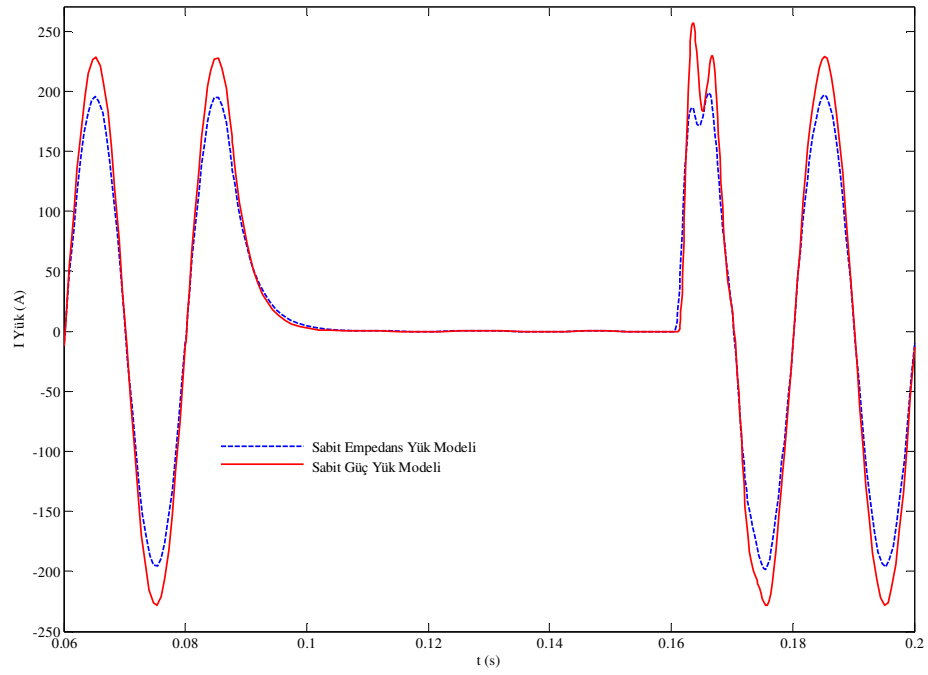
İlk analizde, yükün harmonik bileşenleri ihmal edilmiştir. Analiz sonunda, lineer yük için ele aldığımız sistemin hat akımı, hat sonu gerilimi ve yük akımının değişimleri Şekil 6.37 - Şekil 6.39’da gösterilmiştir.



Şekil 6.37 Lineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için hat akımının değişimi

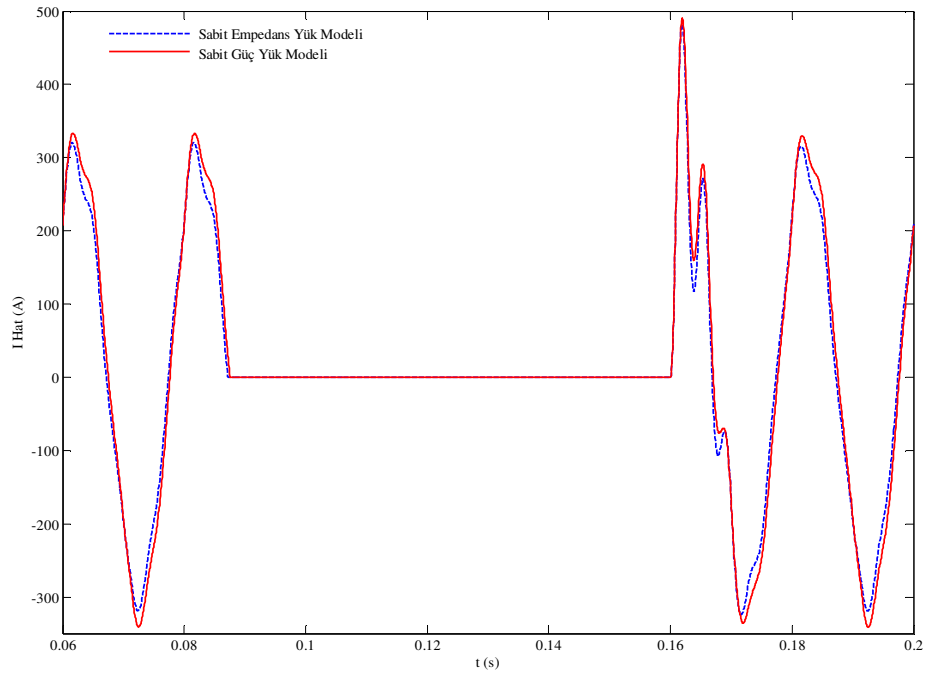


Şekil 6.38 Lineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için hat sonundaki gerilim değişimi

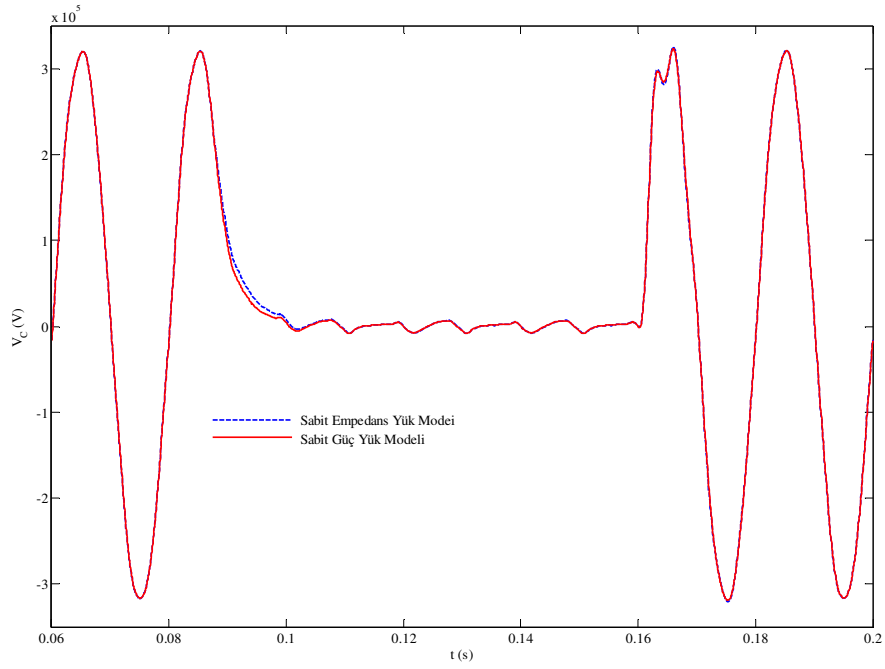


Şekil 6.39 Lineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için yük akımının değişimi

İkinci analizde, incelenen sisteme ölçüm değerleriyle belirlenen harmonik bileşenler yük modeline dahil edilmiştir. Gerçek değerlerin uygulanmış olduğu nonlineer yük modeli için yapılan analiz sonucunda, Şekil 6.40 ve Şekil 6.41'deki gerilim ve akım değişimleri elde edilmiştir.

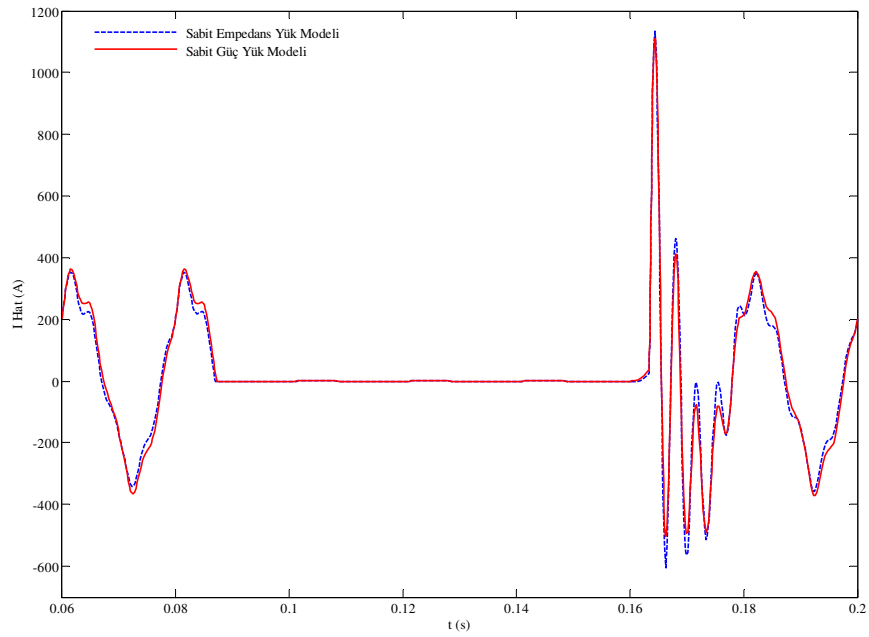


Şekil 6.40 Nonlineer yük ve hat başında anahtarlama olması hali için hat akımının değişimi

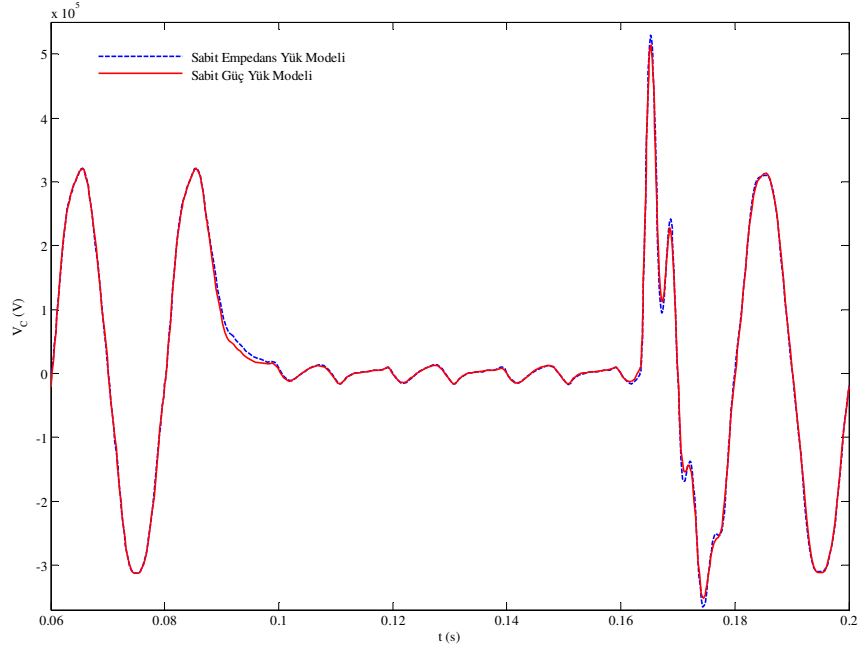


Şekil 6.41 Nonlinear yük ve hat başında anahtarlama olması hali için hat sonundaki gerilim değişimi

Harmoniklerin daha yoğun olduğu sistemlerdeki etkinin araştırılması için, ölçülen yük akımına ait harmonik bileşenlerin iki kat olduğu kabulü ile yapılan simülasyonlar sonucu, gerilim ve akımların anahtarlama esnasındaki davranışlarını gösteren Şekil 6.42 – Şekil 6.43’deki değişimler elde edilmiştir.

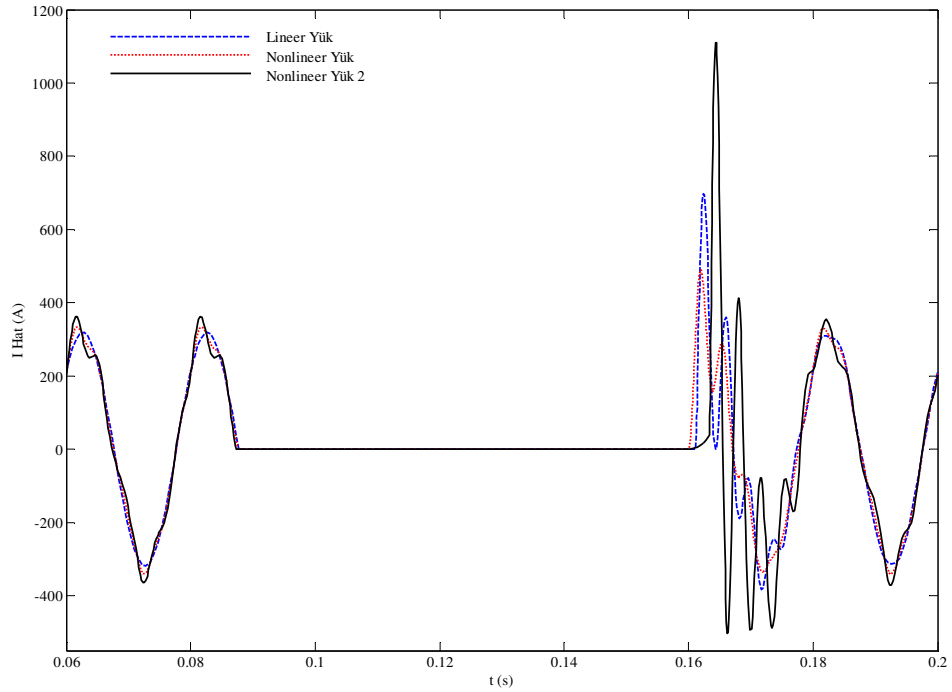


Şekil 6.42 Akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat olması hali için hat akımının değişimi

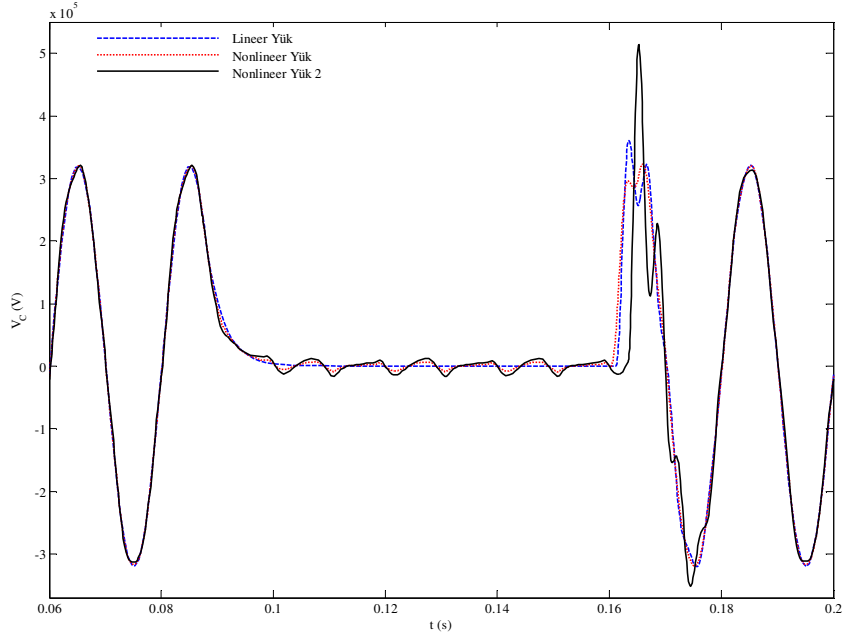


Şekil 6.43 Akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat olması hali için hat sonundaki gerilim değişimi

Sabit güçlü yük modeli kullanılarak harmoniklerin etkinliklerinin gösterilmesi amacıyla, lineer, nonlinear ve iki kat akım harmoniği bileşenine sahip nonlinear yüke sahip modellerde gerilim ve akımların davranışları Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'te gösterilmiştir.



Şekil 6.44 Sabit güçlü yük modelinde, yükün lineer, ölçülen nonlinear yük olması ve akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat büyük olması halinde hat akımının değişimi



Şekil 6.45 Sabit güçlü yük modelinde, yükün lineer, ölçülen nonlinear yük olması ve akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat büyük olması halinde hat kapasitesi (yük uçları) üzerinde oluşan gerilimin değişimi

Yapılan simülasyonlar sonucunda, yükün sabit güç veya sabit empedans olarak modellenmesinin elektriksel büyüklüklerin toplam harmonik distorsiyonlarına etkisi ortaya konulmuştur. Kullanılan iki farklı yük modeli için elde edilen gerilim ve akımlara ait THD değerleri, nonlinear yük ve akım harmoniği bileşenlerinin iki kat fazla olduğu daha büyük distorsiyonlu nonlinear bir yük modeli için Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8 Hat akımı, gerilimi ve yük akımına ait %THD değerleri

Yüklenme	Parametre	Yük Modeli	
		Sabit Güç	Sabit Empedans
Nonlinear Yüklü	%THD _{I_{HAT}}	6,65	7,45
	%THD _{I_{YÜK}}	4,93	5,8
	%THD _{V_{HAT}}	1,42	1,5
Nonlinear Yüklü (Akım harmoniği 2 kat)	%THD _{I_{HAT}}	13,30	14,9
	%THD _{I_{YÜK}}	9,86	11,59
	%THD _{V_{HAT}}	2,84	3

6.5 Sayısal Uygulama 5

Bölüm 2’de açıklandığı üzere, durum uzayı tekniği kullanılarak dinamik sistemlerin analizi yapılabilmektedir. Bu bölümdeki sayısal uygulamalar ile güç sistemlerinin de durum denklemleri ile dinamik analizinin yapılabileceği gösterilmiştir. Yine Bölüm 2’de durum matrisinin özdeğerleri yardımıyla sistemin davranışının belirlenebileceği, kararlılık analizlerinin yapılabileceği anlatılmıştır. Bu çalışmada, durum uzayı tekniği kullanılarak sistemin dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sisteme ait durum matrisinin özdeğerleri yardımıyla kararlılık analizi ortaya konmuştur.

Bölüm 3’te çeşitli güç sistemi modelleri için durum matrisleri gösterilmiştir. Hattın ve yükün parametrelerinin değişimine bağlı olarak durum matrisinin ve dolayısıyla matrisin özdeğerlerinin değişeceği aşikardır.

Güç sistemlerinin tasarım aşamasında veya sistemin genişletilmesi planları hazırlanırken bu özelliklerden faydalanılarak sistem davranış analizlerinin yapılması mümkündür.

Bu sayısal uygulamada teorik olarak, ülkemiz güç sistemi içerisinde bulunan 34,5 kV’luk bir orta gerilim hattının hat parametreleri ve akım taşıma kapasitesine göre hesaplanmış olan yük parametreleri kullanılmıştır. İletim hattı, L eşdeğer ve yük, sabit empedans (R-L) olarak modellenmiştir. Hat akımı, hat sonu gerilimi (V_C) ile yük akımı durum değişkenleri olarak belirlenmiş ve elde edilen durum denklemleri vasıtası ile çalışmalar yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında kullanılan sisteme ait parametreler Çizelge 6.9’da verilmiştir.

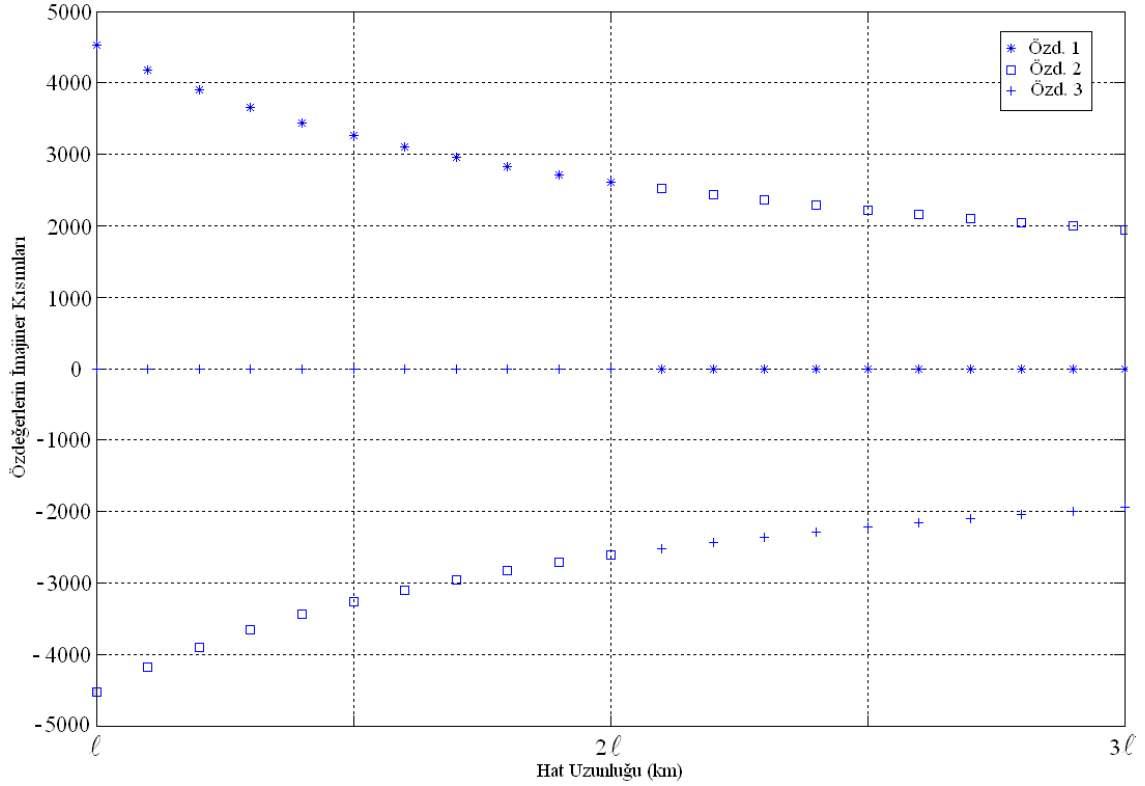
Çizelge 6.9 Simülasyonlarda kullanılan güç sistemine ait değerler

Parametre	Değeri
R_{hat}	21,72 Ω
L_{hat}	188 mH
C_{hat}	388 nF
$R_{\text{yük}}$	88,5 Ω
$L_{\text{yük}}$	375,6 mH

Hat parametrelerinin değişiminin özdeğerler üzerindeki etkisi örnek olarak gösterilmiş ve bu değişimin elektriksel büyüklükler üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. Teorik olarak yapılan bu

çalışmada, yük parametrelerinde oluşabilecek değişiklikler ve sistemde bulunabilecek harmonikler sebebiyle meydana gelebilecek etkiler göz önüne alınmamıştır.

Hat uzunluğu başlangıçta 80 km olarak alınmış ve yüzde 10'luk dilimler halinde üç katına kadar artması durumu incelenmiştir. Hat uzunluğunun değişimi ile birlikte hatta ait parametreler değiştiğinde, durum matrisinin özdeğerlerinin imajiner ve reel kısımlarının değişimleri Şekil 6.46 – Şekil 6.47'de gösterilmiştir.



Şekil 6.46 Özdeğerlerin imajiner kısımlarının değişimi

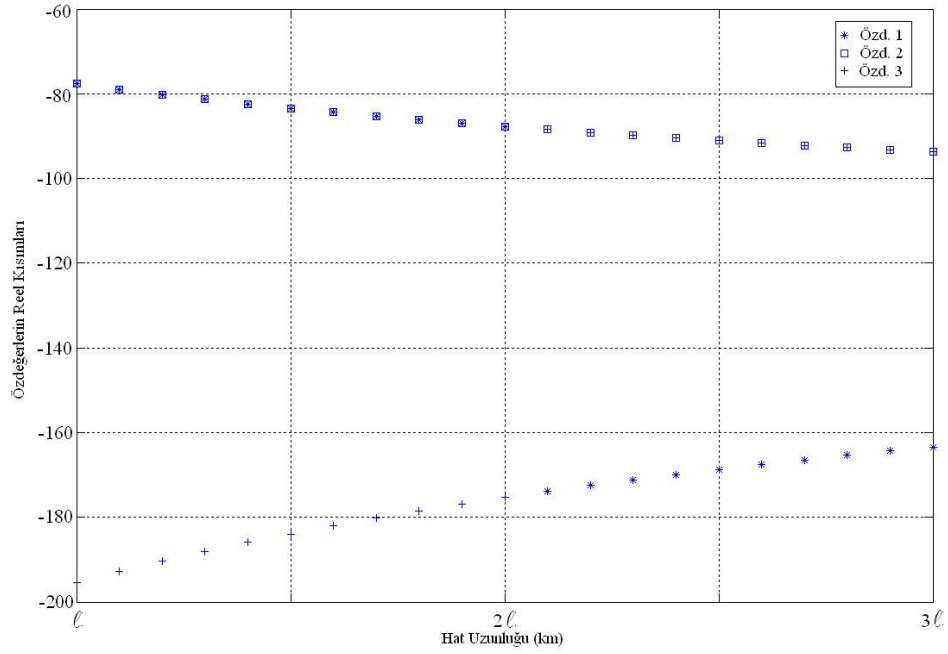
İlk hal ve son hal için durum matrisinin özdeğerleri Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.10 Hat uzunluğunun ℓ ve 3ℓ olduğu haller için durum matrisinin özdeğerleri

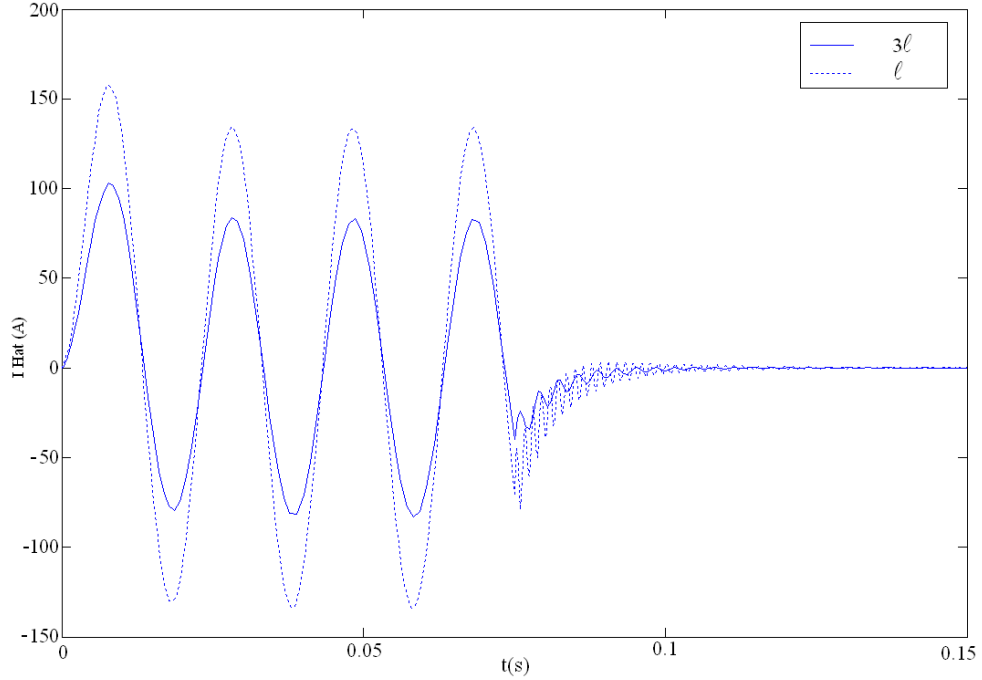
Hat Uzunluğu	Özdeğerler		
	λ_1	λ_2	λ_3
ℓ	$-77,7 + 4528,4i$	$-77,7 - 4528,4i$	$-195,4$
3ℓ	$-163,4$	$-93,7 + 1.947i$	$-93,7 - 1.947i$

Özdeğerlerin reel kısımları negatif olduğundan sistem kararlıdır. Hat uzunluğundaki artış ile özdeğerler değişmektedir fakat reel kısımlar hala negatif olduğundan sistem kararlılığını

kaybetmeyecektir. Özdeğerlerin değişimi transient durumda meydana gelen salınımların genlik ve osilasyon frekanslarını etkilemektedir.



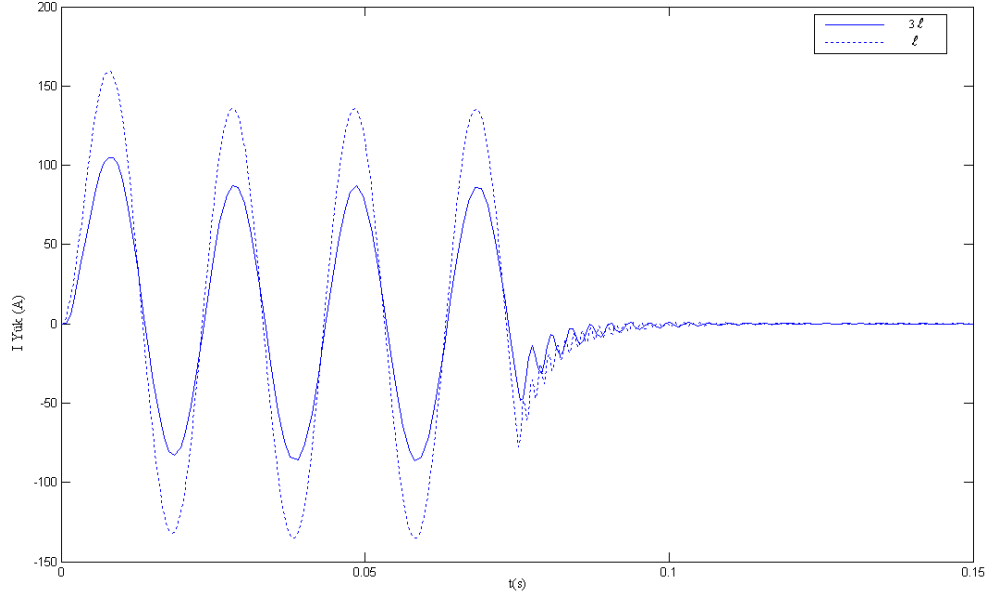
Şekil 6.47 Özdeğerlerin reel kısımlarının değişimi



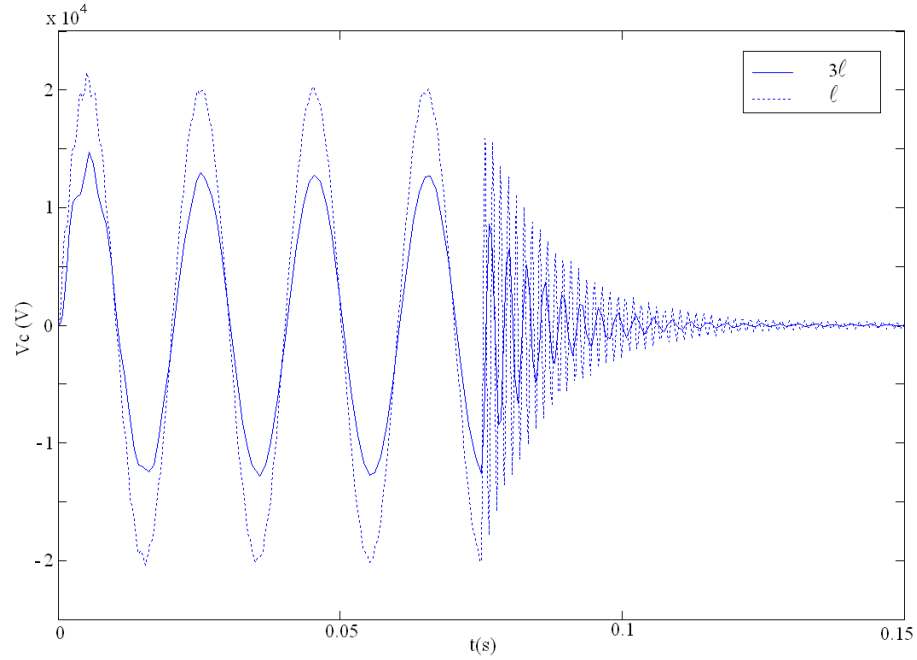
Şekil 6.48 Hat başında anahtarlama meydana gelmesi durumu için hat akımının değişimi

Özdeğerlerin değişiminin transient durumdaki etkisini görmek amacıyla hat başında açma olayı modellenmiştir. Hat başında anahtarın açması olayı meydana geldiğinde, hat

parametrelerindeki değişimin elektriksel büyüklüklerin davranışı üzerindeki etkisi Şekil 6.48 – Şekil 6.50’de gösterilmiştir. Bu şekillerde, durum matrisinin değişmesi ile değişen özdeğerler sonucu elektriksel büyüklüklerin değişimi görülmektedir. Diğer bir deyişle durum matrisinin değişmesi ile değişen özdeğerlerin etkisi bu değişimi ortaya çıkarmıştır.



Şekil 6.49 Hat başında anahtarlama meydana gelmesi durumu için yük akımının değişimi



Şekil 6.50 Hat başında anahtarlama meydana gelmesi durumu için hat sonu gerilim değişimi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Güç sistemleri generatörlerden, transformatörlerden, iletim hatları ve yüklerden oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu yapıya sahip yüksek gerilimli havai enerji iletim hatları, enerji iletim sisteminde önemli yere sahiptir. İletim hatlarında meydana gelen olaylar ise güç sisteminin çalışmasını büyük ölçüde etkilerler. Bu nedenle, enerji iletim hatlarında meydana gelen geçici olayların analizi, güç sisteminin kararlılığı, sürekliliği ve güvenilirliği açısından büyük önem arz eder.

Güç sistemlerinde, geçici (transient) olaylar olarak adlandırılan anahtarlama olayları, arızalar ve yıldırım düşmesi sonucu oluşan geçici aşırı gerilimler ve akımlar, sistemin tasarımı, sisteme yeni yükler eklenmesi, sistem elemanlarının korunması ve yalıtım (izolasyon) seviyelerinin belirlenmesi bakımından büyük öneme sahiptir.

Bu tezde, durum uzayı tekniği kullanılarak oluşturulan model ve SimpowerSystems adlı bilgisayar programı kullanılarak oluşturulan güç sistem modelleri ile sistemde meydana gelebilecek olan geçici olayların, elektriksel büyüklükler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çeşitli işletme koşullarına uygun olarak yapılan analizlerin sonuçları ortaya konmuştur.

Farklı anahtarlama işlemleri için, çeşitli modellerin kullanılmasının, harmonik bileşenlerin sisteme katılmasının ve yük değişimlerinin etkileri incelenmiştir. Daha önceki (anahtarlama sonucu oluşan) geçici olaylar ile ilgili çalışmalarda göz önüne alınmayan harmoniklerin anahtarlama sonucu oluşan geçici olaylar üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca, durum uzayı tekniği kullanılarak güç sisteminin dinamik kararlılık analizi yapılmış, hat parametrelerinin değişimi örnek alınarak durum matrisinin değişimi sonucu özdeğerlerin değişiminin sistem davranışına etkisi ortaya konmuştur.

Durum uzayı tekniği kullanılarak geçici olayların etkilerinin analizi lineer şartlar için gerçekleştirilmekteydi. Bu çalışma ile, güç sistem harmoniklerinin ihmal edilmediği durumlar için de durum uzayı tekniği ile analizlerin gerçekleştirilebileceği, yapılan sayısal uygulamalarla gösterilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, L biçimi toplu parametrelili iletim hattı modeli ve sistemin tek faz eşdeğeri kullanılmıştır. Yapılan analizlerde “TÜBİTAK Güç Kalitesi Milli Projesi” kapsamında yapılan ölçüm sonuçları ve TEİAŞ’tan alınan veriler kullanılmıştır. Böylece gerçek bir sistem ve verileri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir.

Analizler, ulusal güç sistemimizde bulunan 174 km'lik, 380 kV'luk bir enerji iletim hattı ve bu hatta bağlı olan yük için yapılmıştır.

Bu tezin, sayısal uygulamalar kısmında gerçek veriler kullanılmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalarda dikkate alınmayan, nonlinear yükler sebebi ile oluşan harmonik bileşenlerin geçici olaylar üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Ayrıca, literatürde yapılan çalışmalarda lineer sistemlerin dinamik analizinde kullanılan durum uzayı tekniği, harmonikli sistemler için kullanılmış ve uygun sonuçlar alındığı ortaya konularak, durum uzayı tekniği ile nonlinear yük durumlarında analizin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen beş sayısal uygulamadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

İlk sayısal uygulamada, öncelikle kullanılan modellerin cevabı arasında kıyaslama yapılmış ve daha sonra ülkemiz güç sisteminde mevcut olan orta uzunluktaki 380 kV'luk enerji iletim hattı ve ona bağlı yükten oluşan sistemin geçici olay (transient) analizleri çeşitli durumlar için gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, ilk sayısal uygulamadan şu tespitler yapılabilir:

- Sinüsoidal halde, lineer yüklü ve anahtarlama çalışması için her iki modelde de sistemin davranışının aynı olduğu görülmüştür. Şekil 6.7 – Şekil 6.9'dan da görüldüğü üzere gerilim ve akımların değişimleri her iki modelde de üst üste çakışmaktadır. Bu durum, sinüsoidal şartlar için normal çalışmada analizin her iki yöntemde de fark oluşturmadığını ve uygun sonuçların elde edildiğini göstermektedir.
- Sinüsoidal olmayan hal için, nonlinear yüklü ve anahtarlama çalışması durumunda ölçüm verileri kullanılarak sistem modellenmiştir. Her iki modelde de sistem davranışı karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları görülmüştür. Yapılan bu çalışma ile daha önce yapılan çalışmalarda, sistemde harmoniklerin bulunmadığı sinüsoidal şartlarda kullanılan durum uzayı tekniğinin, nonlinear yüklerin bulunduğu sistemlerin analizi için de kullanılabileceği ortaya konmuştur.
- Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'den de görüleceği üzere, hattın başındaki anahtarlama elemanı açıldığında durum uzayı tekniği ile oluşturulan modelde elektriksel elemanların geçici olaylara karşı davranışları diğer modelden daha belirgindir. Bu

nedenle yapılacak transient analizlerinde durum uzayı tekniğinin kullanımının daha uygun olacağı belirlenmiştir.

- Kayıplı ve kayıpsız hat modellerinin kullanıldığı iki farklı durum karşılaştırıldığında, hat başındaki anahtarlama elemanı açıldığında, beklendiği üzere kayıplı hat durumunda geçici durumda elektriksel büyüklüklerin genliklerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Bu etkinin, direnç değerindeki artış ile daha da artacağı anlaşıldığından, büyük direnç değerine sahip hatlar için hat direncinin göz ardı edilmemesi gerektiği tespit edilmiştir.
- Geçici durumda, korona direnci de dikkate alınarak etkin kondüktansın (G_e) modele eklendiği durum ile ihmal edildiği hal, durum uzayı modeli kullanılarak karşılaştırıldığında, korona direncinin ihmal edilmediği etkin kondüktansın kullanılmasının elektriksel büyüklüklerin davranışı üzerindeki etkisi, ilgili şekillerden (Şekil 6.14 – Şekil 6.16) açık olarak görülmektedir. G_e 'nin ihmal edildiği modelde transient durumda genliklerin daha yüksek olduğu ve sönümlenme süresinin daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Transient durumların daha doğru modellenebilmesi için bu parametrelerin dikkate alınmasının daha uygun olacağı ortaya konmuştur.
- Nonlineer yükler sebebi ile oluşan ve güç sistemlerinin incelenmesinde genellikle ihmal edilen harmonik bileşenlerin, anahtarlama işlemleri sırasındaki etkileri incelenmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen yüke ait akım harmoniği bileşenleri, akım uygulama yöntemi kullanılarak modele eklenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu, harmonik bileşenlerin, anahtarlama işlemleri ile oluşan transientler üzerinde etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Sistemdeki THD'nin yüksek olması durumunda bu etkinin çok daha büyük olduğu ve elektriksel büyüklüklerin, anahtarlama sonucu oluşan transient durumdaki genliklerinin çok daha yüksek seviyelere çıktığı görülmüştür. Bu nedenle, anahtarlama işlemlerinin etkilerinin daha gerçekçi olarak belirlenmesi ve önlemlerin alınabilmesi için harmoniklerin gözardı edilmemesi gerektiği ortaya konmuştur. Özellikle nonlineer yüklerin yoğun olduğu sistemlerde, koruma elemanları, yalıtım seviyesi, sistem kararlılığı ve güvenilirliği açısından, güç sistemlerinde gerçekleştirilen işletim ve tasarım çalışmaları için harmonik etkilerinin de gözönüne alınması gerektiği belirlenmiştir.

İkinci sayısal uygulamada, farklı yüklenme şartları için, hat başı ve yük anahtarlamalarının etkilerinin analizi yapılmıştır. Bu sayısal uygulamadan şu sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- Yüklenme oranı arttığında, hat akımlarındaki THD'nun da arttığı görülmektedir.
- Yüklenme oranı arttığında, gerilimdeki THD'nun arttığı görülmektedir, bu durum, harmonik bileşenlerin sistem gerilimi üzerindeki etkilerinin arttığı anlamını vermektedir.
- Anahtarlama olayında tekrar kapama gerçekleştiğinde, hat başı anahtarlama olayının yük anahtarlama göre geçici durumda etkisinin daha yüksek olduğu (daha yüksek genlikli geçici akımların geçtiği) görülmüştür (Şekil 6.31). Bu nedenle hatbaşı kapamalarında, aşırı akım değerinin dikkate alınarak ayarlamaların gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Mecbur olunmadıkça hat başı anahtarlamasının yapılmamasının gerektiği ve yük anahtarlamasının uygun olduğu sonucunu vermiştir.
- Tekrar kapama durumunda hat başındaki anahtarlama olayının, dalga şeklini yük anahtarlamasına göre çok daha fazla bozduğu görülmüştür (Şekil 6.31 – Şekil 6.33).

Üçüncü sayısal uygulamada, sisteme ilave bir yükün eklenmesinin sistem davranışına etkilerinin analizi yapılmış olup, bu uygulamadan sonuç olarak şunlar elde edilmiştir:

- Sisteme bağlanacak diğer yüklerin veya sistem genişletme çalışmalarının önceden analiz edilmesi gerektiği, bunların getireceği olumlu veya olumsuz etkilerin yapılacak simülasyon çalışmaları ile belirlenip uygun çözümlerin tespit edilebileceği görülmüştür.
- Her iki yükün de devrede olduğu durumda iletim sisteminde oluşan toplam harmonik distorsiyonu değerleri, ilgili yönetmelikler ve standartlarla karşılaştırılarak sınır değerleri aşıp aşmadığı kontrol edilebilir.

- Nonlineer yüklerin yoğun olduğu bölgelerde bu tür analizlerle, devreye yeni girecek yüklerin ne gibi özellikleri sağlaması gerektiği konusunda ve yeni yatırımlardan istenecek yaptırımlarla ilgili sonuçlar çıkarılabilir.
- Nonlineer yükün harmonik seviyesi arttıkça, yükün devreden çıkması esnasında oluşacak transient akım seviyesinin daha da artacağı görülmüştür.

Dördüncü sayısal uygulamada, yükün sabit empedans ve sabit güç modellerinin kullanılmasının sistem davranışına etkilerinin karşılaştırılması yapılmış olup, şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Lineer yüklü durumda, gerilim ve akım genliklerinin, sabit güç modeli için daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Sisteme harmonik bileşenlerin etkisi yansıtıldığında, harmoniklerin etkinliği arttıkça bu farkın azaldığı görülmüştür. Bu durum, harmonik bozulması (distorsiyonu) arttıkça, modeller arasındaki davranışın birbiri ile uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 6.42 – Şekil 6.43).
- Tekrar kapama gerçekleştirildiğinde transient akım ve gerilim büyüklüklerinin, sabit güç modelinde daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. Bu durum bize harmonik etkinliği bakımından sabit güç davranışı sergileyen yüklerde ve riskli durumlarda bu modelin kullanılmasının emniyet payını yükselteceği sonucunu vermektedir (Şekil 6.37 – Şekil 6.39).
- Nonlineer yüklü durumda hat başında anahtarlama esnasında her iki modellemenin de birbiri ile uyumlu davranış sergiledikleri, bu nedenle nonsinüsoidal koşullar için kullanımının uygun olacağı belirlenmiştir (Şekil 6.41).
- THD değerlerinin, sabit güç modelinde daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Sabit güç modeli kullanılmasının THD değerlerini azaltıcı yönde etki yaptığı ve yük modellemesinin THD değerlerinin belirlenmesinde etkin ve önemli olduğu ortaya konmuştur.

Son sayısal uygulamada, güç sistemlerinin dinamik analizinde özdeğerlerin değişiminin sistem davranışına etkilerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama sonunda şu sonuçlar verilebilir:

- Yapılan sayısal uygulama ile dinamik bir sistem olan güç sistemi davranışının durum uzayı tekniği kullanılarak elde edilen özdeğerler ile değerlendirilebileceği ortaya konmuştur.
- Güç sistemine ait parametrelerin değişiminin durum matrisini değiştireceği ve dolayısı ile sistemin özdeğerlerinin değişeceği hat parametreleri değiştirilerek gösterilmiştir. Sistemin planlama aşamasında veya sistemin genişletilmesinden önce bu tip analizler yapılarak sistemin kararlılığı ve transient durumlardaki davranışı hakkında bilgi edinilebilir. Hat parametreleri dışında, sisteme yeni yükler eklenmesi veya çıkarılması gibi, sistemde bulunan harmonik bileşenlerin de durum matrisinin yapısını değiştireceğinden sistem davranışına etki edecektir. Gerekli durumlarda bu etkiler de analizlerde göz önüne alınmalıdır.
- Yapılan sayısal uygulamada, hattın uzunluğunun artmasıyla özdeğerlerin nasıl değiştiği ve bu değişimin anahtarlama ile oluşan transient davranış süresince, genliklerin artmasına ve osilasyon frekansının artmasına sebep olduğu görülmüştür.
- Bu uygulama ile durum uzayı tekniği kullanımıyla oluşturulan durum matrisinin özdeğerlerinden faydalanılarak güç sisteminin kararlılığı ve transient durumlardaki davranışının analiz edilebileceği ortaya konmuştur.

Yapılan tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ışığında, anahtarlama olayları üzerinde harmoniklerin olumsuz etkilerinin olduğu ortaya konulmuştur. Sistem tasarımları, sistem elemanlarının ve yalıtım seviyelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilecek çalışmalarda, nonlinear yükler sebebi ile oluşan harmonik bileşenlerin dikkate alınması daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada, ülkemiz ulusal güç sisteminin bir parçasını oluşturan sistem için analizler, sistem dengeli kabul edilerek tek faz eşdeğeri üzerinden yapılmıştır. Dengesizliğin olduğu durumlar için de aynı yöntemler kullanılarak, üç fazlı sistemlerin analizlerinin gerçekleştirilmesi de mümkündür.

Ayrıca farklı hat (toplu parametrelili π ve T gösterimi veya dağılmış parametrelili) ve yük modelleri için de yapılacak analizlerde, lineer ve nonlineer durumların incelenmesi amacıyla da bu çalışma genelleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- AlFuhaid, A. S. ve Saied, M. M., (1988), "A Method for the Computation of Fault Transients in Transmission Lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 2, 288-297.
- Allen, E. H. ve Ilic, M. D., (2000) "Interaction of Transmission Network and Load Phasor Dynamics in Electric Power System, IEEE Transaction on Circuit and Systems – I. Fundamental Theory and Applications, Vol. 47, No. 11, 1613-1620.
- Au, M. T., ve Milanovic, J. V., (2007) "Development of Stochastic Aggregate Harmonic Load Model Based on Field Measurements", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.22, No.1, 323-330.
- Begamudre, R. D., (1990- Reprint 2004), Extra High Voltage AC Transmission Engineering (Second Edition), New Age International (P) Limited, New Delhi.
- Bickford, J. P. ve Abdel-Rahman, (1980), "Application of Travelling-Wave Methods to the Calculation of Transient-Fault Currents and Voltaged in Power-System Networks", IEE Proc. Vol. 127, No. 3, 153-168.
- Branin, F. H., (1967), "Transient Analysis of Lossless Transmission Lines", Proceedings of IEEE, Vol. 55, No. 11, 2012-2013.
- Cao, Y., Ding, R. T. ve Zhang, Q. J., (2004), "A New Nonlinear Transient Modeling Technique for High-speed Integrated Circuit Applications Based on State-Space Dynamic Neural Network", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Vol. 3, 1553-1556.
- Chapman, M. A., Martinez, A., Sabir, E., Xing, K., Wang, Z. ve Liu, Y., (1999), "Switching and Fault Caused Transients in Electric Power Systems", Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, 1015-1021.
- Çakır, H., (1989), Enerji İletimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Deshpande, M. V., (1984), Electric Power System Design, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- Dommel, H. W., (1969), "Digital Computer Solutions of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, 388-399.
- Dommel, H. W., (1971), "Nonlinear and Time-Varying Elements in Digital Simulation of Electromagnetic Transients", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, 2561-2567.
- Dommel, H. W. ve Meyer, W. S., (1974), "Computation of Electromagnetic Transients", Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No. 7, 893-993.
- Fernandez, P. C., Esmeraldo, P. C. V., Carvalho, F. M. S., Camara, A. S. B., Bronzeado, H. S., Vaisman, R., (1998), "Mitigation of Power System Switching Transients to Improve Power Quality", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-16 Oct. 1998, Athen, Greece.
- Gomez, P., Moreno, P. ve Naredo, J. L., (2005), "Frequency-Domain Transient Analysis of Nonuniform Lines With Incident Field Excitation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, 2273-2280.

Griffith, J. P., Paul, B. B. ve Arora, R. K., (1989), "State-Variable Simulation of Transients on Transmission Lines", Twenty-First Southeastern Symposium on System Theory, Proceedings, 600-602.

Gross, C. A., (1986), Power System Analysis, second edition, John Wiley & Sons, New York.

Guckenheimer, J. ve Holmes, P., (1983), Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcation of Vector Fields, Springer-Verlag, New York.

Heydt, G. T., Kish, D. J., Holcomb, F. ve Hill, Y., (1991), "A Methodology for Assessment of Harmonic Impact and Compliance with Standarts for Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-6, No. 4, 1748-1754.

Hingorani, N. G., (1970), "Transient Overvoltages on a Bipolar HVDC Overhead Line Caused by DC Line Faults", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, 592-602.

IEEE Committee Report, (1970), "Switching Surges, Part III: Field and Analyzer Results for Transmission Lines Past, Present, and Future Trends", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 2, 173-189.

Kimbark, E. W. ve Legate, A. C., (1968), "Fault Surge Versus Switching Surge A Study of Transient Overvoltages Caused by Line-to-Ground Faults", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 9, 1762-1768.

Kalra, P. C. ve Stanek, E. K., (1973), "An Indirect Technique Utilizing the Lattice Approach and Superposition for Computing Switching Surges", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-92, 916-925.

Kekezoğlu, B., Arıkan, O., Kocatepe, C., Yumurtacı, R., Baysal, M. ve Bozkurt, A., (2008) "Elektrikli Ofis Donanımlarının Harmonik Etkilerinin İncelenmesi", 3e Electrotech, Sayı: 168, Haziran, 150-156.

Kocatepe, C., (1995), Sinüsoidal Olmayan Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Kocatepe, C., Umurkan, N., Attar, F., Yumurtacı, R., Uzunoğlu, M., Karakaş, A., Arıkan, O. ve Baysal, M., (2006), Enerji Kalitesi ve Harmonikler (Kurs Notu), TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, EMO Yayın No. EG/2006/1.

Kolcio, N., Halladay, J. A., Allen, G. D., Fromholtz, E. N., (1991), "Transient Overvoltages and Overcurrents on 12.47 kV Distributed Lines: Field Test Results", IEEE-PES 1991 Winter Meeting, Paper 91 WM 097-6-PWRD.

Kolman, B. ve Hill, D. R., Çeviri Editörü: Akın, Ö., (2002), Uygulamalı Lineer Cebir, Palme Yayıncılık, Ankara.

Kundur, P., (1994), Power System Stability and Control, Mc Graw-Hill Inc., New York.

Legate, A. C., (1971), "Comparison of Field Switching Surge Measurements with Transient Network Analyzer Measurements", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 3, 1347-1354.

- Long, W. F., (1973), "A Study on Some Switching Aspects of A Double Circuit HVDC Transmission Line", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-92, 734-741.
- Macias, J. A. R., Exposito, A. G., Soler, A. B., (2005), "A Comparison of Techniques for State-Space Transient Analysis of Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, 894-903.
- Mamiş, M. S., (1997), Steady State and Transient Analysis of Multi-Phase Power Transmission Lines By Using State-Space Techniques, Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- Mamiş, M. S. ve Köksal, M., (2000), "Solution of Eigen Problems for State-Space Transient Analysis of Transmission Lines", Electric Power Systems Research, 55, 7-14.
- Mamiş, M. S. ve Nacaroğlu, A., (2002), "Transient Voltage and Current Distributions on Transmission Lines", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No. 6, 705-712.
- Mamiş, M. S. ve Herdem, S., (2003), "Computation of Corona Effects in Transmission Lines Using State-Space Techniques", Computers and Electrical Engineering, 29, 603-611.
- Moreno, P., Rosa, R. ve Naredo, J. L., (1991), "Frequency Domain Computation of Transmission Line Closing Transients", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, 275-281.
- Nakanishi, H. ve Ametani, A., (1986), "Transient Calculation of a Transmission Line Using Superposition Law", IEE Proceedings, Vol. 133, No. 5, 263-269.
- Nelms, R. M., Sheble, G. B., Newton, S. R., Grigsby, (1989), "Using A Personal Computer to Teach Power System Transients", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, 1293-1297.
- Parsons, A. C., (1999), Automatic Location of Transient Power Quality Disturbances, Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin, U.S.A.
- Ram, B. ve Vishwakarma, D. N., (1995 – Twelfth reprint 2004), Power System Protection and Switchgear, Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Ray, S., (2004), An Introduction to High Voltage Engineering, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi.
- Rustebakke, M., (1983), Electric Utility Systems and Practices, John Wiley & Sons, New York.
- Saadat, H., (1999), Power System Analysis, Mc Graw-Hill Companies, New York.
- Sankaran, C., (2001), Power Quality, CRC Pres, New York.
- Sastry, S., (1999), Nonlinear Systems - Analysis, Stability, and Control –, Springer-Verlag New York, Inc.
- Semlyen, A. ve Abdel-Rahman, M. H., (1984), "State Equation Modelling of Untransposed Three Phase Lines", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 11, 3402-3408.
- Semlyen, A. ve Ramires, A., (2008), "Direct Frequency Domain Computation of Transmission Line Transients Due to Switching Operations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, 2255-2261.

Shinh, G. S., Nakhla, N. M., Ahcar, R., Nakhla, M. S., Dounavis, A. ve Erdin, I., (2006), "Fast Transient Analysis of Incident Field Coupling to Multiconductor Transmission Lines", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 48, No. 1, 57-73.

Shuter, T. C., Volkommer, H. T. ve Kirkpatrick, T. L., (1989), "Survey of Harmonic Levels on the American Electric Power Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, No. 4, 2204-2213.

Stevenson, W., D., (1988), Elements of Power System Analysis, Mc Graw-Hill Inc., New York.

Truax, C. J., Brown, J. D., Neugebauer, W, (1978), "TNA Study of Reclosing Transients on a 765 kV Shunt Compensated Transmission Line", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 4, July/Aug 1978, 1447 – 1457.

Uyaroğlu, Y., (2002), Elektrik Güç Sistemlerinde Çatallaşma Analizi İle Kaotik Olayların İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

Uzunoğlu, M., (2000), Nonlineer Yükler İçeren Elektrik Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılık Analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Weedy, B. M. ve Cory, B. J., (1998), Electric Power Systems, Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York.

Wiggins, S., (1990), Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos, Springer-Verlag, New York.

Zdravkovic, Z. S. and Vukelja, P. I., (1992), "Switching Overvoltages and Risk of Flashover on Yugoslav 400 kV Transmission Lines", IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 2, 141-151.

Zhi-yong, Y., Hua-long, X. ve Guang-bin, L., (2003), "Transient Analysis of Unequal Length Multiconductor Transmission Lines Via Haar Transform Wavelets-Based Numerical Inversion of Laplace", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics CEEM 2003, Hangzhou, China, 260-264.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	08.03.1978	
Doğum yeri	Uzunköprü/EDİRNE	
Lise	1989-1996	Edirne Anadolu Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı
Doktora	2003-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı

Çalıştığı kurumlar

2001-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi
-------------------	---

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 105G129 nolu “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” konulu proje tarafından desteklenmiştir.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı tarafından Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.