

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ KALİTESİ PARAMETRELERİNİN
ÖLÇÜLMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Elektrik-Elektronik Mühendisi Fatih Tevfik APAY

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ	ivv
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GÜÇ KALİTESİ PARAMETRELERİ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
1.1 Güç Kalitesi	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
1.1.1 Güç Kalitesine Etki Eden Faktörler.....	5
1.1.2 Güç Kalitesinin Etkileri	8
1.2 Fliker (Kırpışma) Olayı	10
1.2.1 Gerilimin inip çıkmasının (voltage fluctuation) nedenleri	12
1.2.2 Gerilimin inip çıkmasının (voltage fluctuation) etkileri.....	13
1.2.3 Elektrik makineleri	13
1.2.4 Statik doğrultucular	14
1.3 Gerilim dengesizliği	14
1.3.1 Giriş	14
1.3.2 Tanım.....	14
1.3.3 Dengesizlik nasıl oluşur.....	15
1.3.4 Dengesizliğin Etkileri	16
1.3.5 Gerilim Dengesizliğinin Giderilmesi	18
1.3.6 Dengesizlik ile ilgili Sonuçlar	19
1.4 Frekans değişimi.....	19
1.4.1 Gerilim Frekans Değişimleri	19
1.5 Gerilim düşmeleri ve Yükselmeleri.....	20
1.6 Geçici Olaylar.....	22
1.7 Çentik (Notch)	25
1.8 Kesintiler	27
1.9 Ulusal Enerji Sistemimizde TEİAŞ Transformatör Merkezlerinde Yapılan Mobil . . .	
. Ölçümlerde Tespit Edilen Güç Kalitesi Olayları ile İlgili Örnekler.....	30
2. HARMONİKLER	38
2.1 Harmoniklerin Tanımı	38
2.2 Harmonik Kaynakları.....	39
2.2.1 Transformatörler	43
2.2.2 Ark Fırınları	45
2.2.3 Doğrultucular	47
2.2.4 Gaz desarjlı aydınlatma elemanları ve elektronik balastlar	48
2.2.5 Jeneratörler	49
2.2.6 Güç Elektroniği Sistemleri	49

2.3	Harmoniklerin Etkileri.....	50
2.3.1	Giriş	50
2.3.2	Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi.....	51
2.3.3	Harmoniklerin Kayıplara Etkisi.....	52
2.3.4	Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri.....	52
2.3.5	Harmoniklerin Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkileri.....	55
2.3.6	Harmoniklerin Akım ve Gerilim Ölçen Aletlere Etkileri.....	55
2.3.7	Harmoniklerin Güç Ölçü Aletlerine Etkileri	56
2.3.8	Harmoniklerin Röleler Üzerinde Etkileri	58
2.3.9	Harmoniklerin Koruma Rölelerine Etkileri.....	60
2.3.10	Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri	61
2.3.11	Elektrik Tesislerinde Harmonik Etkisi	64
2.3.12	İletkenler Üzerinde Harmonik Etkisi	66
3.	GÜÇ KALİTESİNİN ÖLÇÜLMESİ.....	68
3.1	Giriş	68
3.2	Güç Kalitesi Ölçü Cihazları.....	68
3.2.1	Harmonik Analizörü	68
3.2.2	Geçici Bozulma Analizörleri	70
3.2.3	Osiloskoplar	72
3.2.4	Gerçek RMS Ölçerler	74
3.2.5	Multimetreler	74
3.2.6	Flikermetreler	76
3.2.7	Gerilim Düşümünün (Sag) ve Yükselmesinin(Swell)Ölçülmesi.....	77
3.2.8	Geçici Gerilimlerin Ölçülmesi.....	78
4.	GÜÇ KALİTE STANDARTLARI.....	79
4.1	Standartların Amacı ve Önemi	79
4.1.1	Nominal çevrenin tespit edilmesi	79
4.1.2	Terminolojiyi tanımlamak	80
4.1.3	Güç Kalitesi Problemlerinin sayısının sınırlandırılması	80
4.2	Avrupa Gerilim Karakteristik Standartı	81
4.2.1	Gerilim Değişimleri.....	81
4.2.2	Geçici olaylar.....	85
4.3	IEEE ve IEC Standartlarına Göre Harmonik Sınır Değerleri.....	87
4.4	Fliker Değerlendirme Yöntemleri.....	95
4.4.1	Kesici Arıza Koruması ve Bara Koruma	96
4.4.2	IEC Fliker Standartları.....	99
4.5	IEC Elektromanyetik Uyumluluk Sınırları.....	100
5.	GÜÇ KALİTESİ İLE İLGİLİ ÖLÇÜMLER, ÖLÇÜMLERİN	
	DEĞERLENDİRİLMESİ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI.....	102
5.1	Giriş	102
5.2	Güç Kalitesi Ölçümlerinin Yapıldığı Sistemin Tanıtımı	102
5.2	Gerilim Ölçümleri.....	117
5.2.1	Gerilim Ölçümleri MATLAB Simulasyonu.....	120

5.3	Güç Kalitesi Ölçümleri	107
5.3.1	Gerilim Ölçümleri	107
5.3.1.1	Gerilimde Meydana Gelen Olaylar	107
5.3.1.2	Gerilim Harmonikleri ile İlgili Ölçümler	110
5.3.1.3	Gerilim kırpışması (Fliker) Ölçümleri.....	119
5.3.1.4	Gerilimdeki Frekans Değişimi.....	122
5.3.2	Akım Ölçümleri	123
5.3.2.1	Akım Harmonikleri ile İlgili Ölçümler.....	123
5.4	Simülasyon Çalışması.....	131
5.4.1	İşletme Modu-1 için Simülasyon Sonuçları	134
5.4.2	İşletme Modu-2 için Simülasyon Sonuçları	138
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	143
KAYNAKLAR.....		145
ÖZGEÇMİŞ.....		147

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Ark fırını tarafından üretilen flikerin dalga şekli	11
Şekil 1.2 Gerilim değişimlerinin sınıflandırılması.	11
Şekil 1.3 Ark fırınının neden olduğu ani gerilim değişimlerini gösteren dalga şekli.....	12
Şekil 1.4 Ani gerilim düşmesi ve yükselmesi	13
Şekil 1.5 Statik doğrultucunun neden olduğu ani gerilim düşmesi ve yükselmesi	14
Şekil 1.6 Simetrik bileşenlerin grafiksel gösterimi	16
Şekil 1.7 Dengesiz bir kaynak tarafından beslenen bir indüksiyon makinesinin tork – hız karakteristiği.....	17
Şekil 1.8 Gerilim düşmesi dalga şekli	20
Şekil 1.9 Kısa Süreli Gerilim Yükselmesi.....	21
Şekil 1.10 Kısa Süreli Gerilim Düşmesi.....	21
Şekil 1.11 Kısa süreli gerilim değişimleri	22
Şekil 1.12 Geçici olay dalga şekli	23
Şekil 1.13 Kapasitörün yüklenmesinin neden olduğu geçici olay dalga şekli.....	24
Şekil 1.14 Çentik dalga şekli.	26
Şekil 1.15 Yüksek reaktanslı,hız ayarlı sürücünün neden olduğu çentik dalga şekli.....	27
Şekil 1.16 Gerilim Kesintisi.	29
Şekil 1.17 Çolakoğlu TM, 154/34.5 kV Trafo-M primeri, Gerilim Dengesizliği.	30
Şekil 1.18 Gerilim dengesizliği olayı süresince faz akımlarının değişimi.	31
Şekil 1.19 Hınıs TM. 154/34,5 kV Trafo B Primeri, Gerilim Dengesizliği.	31
Şekil 1.20 Gerilim dengesizliği olayı süresince faz akımlarının değişimi.	32
Şekil 1.21 Çolakoğlu TM, 154/34.5 kV Trafo-M primeri, Gerilim Çukuru.	33
Şekil 1.22 Gerilim çukuru olayı süresince faz akımlarının değişim.	33
Şekil 1.23 Hınıs TM, 154/34,5 kV Trafo B primeri , Gerilim Çukuru.	34
Şekil 1.24 Gerilim çukuru olayı süresince faz akımlarının değişimi.	35
Şekil 1.25 Erzurum-3 TM, 380/154 kV Ototransformatör Gerilim Çukuru	35
Şekil 1.26 Gerilim çukuru olayı faz akımlarının değişimi.....	36
Şekil 1.27 Davutpaşa TM 154/34,5 kV Trafo-C Sekonderi , Gerilim Çukuru.	36
Şekil 1.28 Gerilim çukuru olayı süresince faz akımlarının değişimi.	37
Şekil 2.1 Harmonik Spektrumu.	39
Şekil 2.2 Bozucu Bir Dalga Biçimi	40
Şekil 2.3 Temel Bileşen ve 3. ile 5. Harmonik Bileşenleri	41
Şekil 2.4 . Transformatör mıknatıslanması (Histerezis dahil).....	44
Şekil 2.5 İdeal gerilim dalga şekline etki eden voltaj dalgalanması.....	45
Şekil 2.6 Doğrultucunu oluşturduğu harmonik dalga şekilleri.....	47
Şekil 2.7 Harmonikler nedeniyle enerji sisteminde seri rezonansın oluşumu.....	52
Şekil 2.8 Transformatörde kayıpların akımın THD değerine göre değişimi.....	54
Şekil 2.9 Elektrik tesislerinde paralel rezonans oluşumu ve eşdeğer devresi.	62
Şekil 2.10 Harmonikli gerilimin oluşumu.....	63
Şekil 2.11 h. harmonik frekansı için enerji sisteminin eşdeğer empedansı Z_h	65
Şekil 2.12 Asenkron makinenin harmoniklere ilişkin tek fazlı eşdeğer devresi.	66
Şekil 3.1 Güç ve Harmonik Analizörü	69
Şekil 3.2 Grafik tabanlı analizör	71
Şekil 3.3 Analog osiloskop.....	73
Şekil 3.4 Güç Kalitesi analizörü ile fliker ölçümü.	76
Şekil 3.8 Dijital multimetre	81
Şekil 3.9 Dijital filikermetre	83

Şekil 3.10 Geçici Gerilimlerin güç analizörü ile ölçülmesi	85
Şekil 3.11 Dengelenmiş ve dengelenmemiş durumlarda geçici gerilim ölçümleri	86
Şekil 4.1 ITIC Eğrisi.....	84
Şekil 4.2 IEEE fliker eğrisi.....	98
Şekil 5.1 Ölçümlerin yapıldığı Otosansit Trafo Merkezinin tek hat şeması.....	104
Şekil 5.2 Otosansit trafo merkezinin Türkiye Elektrik İletim Sistemindeki konumu	106
Şekil 5.3 154/33,6 kV Trafo A Sekonderi , Gerilim Çukuru (Voltage Sag).....	108
Şekil 5.4 Gerilim çukuru olayında faz akımlarının değişimi	109
Şekil 5.5 Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A Sekonderi , Gerilim Dengesizliği	109
Şekil 5.6 Gerilim dengesizliği olayında faz akımlarının değişimi	110
Şekil 5.7 7 GÜNLÜK, Fazlar Arası Gerilim Gerçek RMS Değişimi	110
Şekil 5.8 Ototransit TM,Trafo A sekonderi gerilim 2., 11. ve 13. harmonik bileşenleri	112
Şekil 5.9 Ototransit TM,Trafo A sekonderi gerilim 3., 5. ve 7. harmonik bileşenleri.....	113
Şekil 5.10 Ototransit TM,Trafo A sekonderi gerilim 4. harmonik bileşeni	114
Şekil 5.11 , Ototransit TM,Trafo A sekonderi gerilim 6., 23. ve 25. harmonik bileşenleri .	114
Şekil 5.12 Ototransit TM,Trafo A sekonderi gerilim 8. ve 10. harmonik bileşenleri.....	116
Şekil 5.13 Ototransit TM,Trafo A sekonderi gerilim 9., 17. ve 19. harmonik bileşenleri ...	116
Şekil 5.14 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 15. harmonik bileşeni	117
Şekil 5.15 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 12., 14., 16., 18., 20., 21., 22., 24., 26., 27., 28. ve 30. harmonik bileşenleri.....	117
Şekil 5.16 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 29. harmonik bileşeni	118
Şekil 5.17 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 31. harmonik bileşeni	118
Şekil 5.18 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim Toplam Harmonik Distorsiyonu.	119
Şekil 5.19 Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, P_{st} (Kısa Dönem Fliker) Değişimi.....	120
Şekil 5.20 Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, P_{lt} (Uzun Dönem Fliker) Değişimi.....	120
Şekil 5.21 Ototransit TM 154 kV barasındaki , 7 günlük Frekans Değişimi,	122
Şekil 5.22 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının temel bileşeni	123
Şekil 5.23 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 2., 4., 6. ve 8. harmonik bileşenleri.....	126
Şekil 5.24 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 3., 5., 7. ve 9. harmonik bileşeni	127
Şekil 5.25 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 10., 12. ve 14. harmonik	127
Şekil 5.26 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 11., 13. ve 15. harmonik bileşenleri	128
Şekil 5.27 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 16., 18. ve 20. HarmonikBileşeni	128
Şekil 5.28 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 17., 19. ve 21. Harmonik Bileşenleri.....	129
Şekil 5.29 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 22., 24., 26., 28. ve 30. Harmonik Bileşeni	129

Şekil 5.30 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 23., 25., 27., 29. ve 31. Harmonik Bileşenleri.....	130
Şekil 5.31 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının Toplam Talep Distorsiyonu	131
Şekil 5.32 Ölçüm yapılan üç fazlı sisteme ait MATLAB Simulink simülasyon modeli (İşletme modu-1 için).....	132
Şekil 5.33 İşletme Modu-1 için Tr-A sekonder barasına ait gerilim harmonik spektrumu....	134
Şekil 5.34 İşletme Modu-1 için Tr-A sekonder barasına ait akım harmonik spektrumu	135
Şekil 5.35 İşletme Modu-1 için Tr-B sekonder barasına ait gerilim harmonik spektrumu....	135
Şekil 5.36 İşletme Modu-1 için Tr-B sekonder barasına ait akım harmonik spektrumu.....	136
Şekil 5.37 İşletme Modu-1 için 154 kV barasına ait gerilim harmonik spektrumu	136
Şekil 5.38 Ölçüm yapılan üç fazlı sisteme ait MATLAB Simulink simülasyon modeli (İşletme modu-2 için)	139
Şekil 5.39 İşletme Modu-2 için Tr-A ve Tr-B sekonder barasına ait gerilim harmonik spektrumu	140
Şekil 5.40 İşletme Modu-2 için Tr-A sekonder barasına ait akım harmonik spektrumu	140
Şekil 5.41 İşletme Modu-2 için Tr-B sekonder barasına ait akım harmonik spektrumu.....	141
Şekil 5.42 İşletme Modu-2 için 154 kV barasına ait gerilim harmonik spektrumu	141

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Güç Kalite Problemlerinin Sebepleri	6
Çizelge 1.2 Proseslerdeki Kesintilerin Nedenleri.....	28
Çizelge 2.1 Bir ark ocağı için harmonik akım değerleri.....	46
Çizelge 2.2 Manyetik balastlı floresant lamba harmonik spektrumu	48
Çizelge 4.1 Kısa Süreli Değişimlerin Karakterize Edilmesi	82
Çizelge 4.2 Uzun Süreli Değişimlerin Karakterize Edilmesi	83
Çizelge 4.3 Gerilim Dengesizliğinin Karakterize Edilmesi	85
Çizelge 4.4 Güç Frekansı Değişimlerinin Karakterize Edilmesi.....	85
Çizelge 4.5 Geçici Olayların Karakterize Edilmesi.....	86
Çizelge 4.6 IEC Sınıflandırması.....	88
Çizelge 4.7 Konutlarda Alçak Gerilim Şebekesinde Gerilim Harmonik Distorsiyon Limitleri, IEC 61000-2-2	89
Çizelge 4.8 Konutlarda Alçak ve Orta Gerilimde Harmonik Distorsiyon, EN 50160 Gerilim . Harmonik Sınırları.....	90
Çizelge 4.9 IEE 519-1992 gerilim distorsiyon oranları.....	90
Çizelge 4.10 Akım Harmonik Sınırları	91
Çizelge 4.11 Gerilim Harmonikleri için Sınır Değerler	92
Çizelge 4.12 Akım Harmonikleri için Maksimum Yük Akımına (IL) Göre Sınır Değerler.....	93
Çizelge 4.13 380 kV İletim Sisteminde Kabul Edilebilir Harmonik Gerilim Seviyeleri.....	93
Çizelge 4.14 20 - 154 kV Arası İletim Sisteminde Kabul Edilebilir Harmonik Gerilim Seviyeleri.....	94
Çizelge 4.15 Kabul Edilebilir Harmonik Akım Seviyeleri	94
Çizelge 4.16 Orta Gerilim, Yüksek ve Ekstra Yüksek Gerilim Seviyelerinde Pst, Plt Planlama Seviyeleri.....	96
Çizelge 4.17 Alçak Gerilim ve Orta Gerilim Seviyelerinde Pst, Plt Uyarlık Seviyeleri.....	96
Çizelge 4.18 İzin Verilen Azami Flicker (Kırpışma) Şiddeti.....	97
Çizelge 4.19 Cihazların Dayanmak Zorunda Olduğu Elektrostatik Deşarj Gerilimleri, IEC 61000-4-2.....	100
Çizelge 4.20 ABD Eyaletlerindeki İletim Hattı Standartları.....	100
Çizelge 4.21 ICNIRP, 1998.....	101
Çizelge 4.22 ACGIH, 2001	101
Çizelge 5.1 Ölçüm yapılan transformatör merkezindeki güç transformatörlerinin teknik özellikleri	103
Çizelge 5.2 Gerilimde Meydana Gelen Olayların Listesi	107
Çizelge 5.3 Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri.....	111
Çizelge 5.4 Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'nde İzin Verilen Azami Fliker (Kırpışma) Şiddeti.....	121
Çizelge 5.5 Fliker ölçüm sonuçlarına göre kısa dönem fliker şiddetinin (Pst) standartta izin verilen 1,15 değerini geçme yüzdesi.....	121
Çizelge 5.6 Fliker ölçüm sonuçlarına göre uzun dönem fliker şiddetinin (Plt) standartta izin verilen 0,85 değerini geçme yüzdesi.....	121

Çizelge 5.7 Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği'nde kabul edilebilir akım harmonik limitleri	124
Çizelge 5.8 Transformatörlerin ölçümlerden elde edilen sekonder yük değerleri	133
Çizelge 5.9 Transformatörlerin ölçümlerden elde edilen sekonder harmonik akımı değerleri	133
Çizelge 5.10 Ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	137
Çizelge 5.11 İşletme Modu-1 ile İşletme Modu-2 simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması....	142

ÖNSÖZ

Endüstriyel ve ticari faaliyetlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli önemli girdilerin başında elektrik enerjisi gelmektedir. Bu nedenle de elektrik enerji kaynağının güvenilirliğinin bilinmesi ve enerji kalitesinde meydana gelebilecek değişikliklerin uygulanmakta olan süreç üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılması son derece önemlidir. Bu çalışmamda elektrik enerjisi güç kalite parametreleri incelenerek standartlar doğrultusunda tanımlanmış, kalitesiz bir enerjinin elektrik güç sisteminde yol açtığı problemler ve güç kalitesi ölçümleri incelenmiştir.

Öncelikle bu çalışmamda hiçbir desteğini benden esirgemeyen danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Recep Yumurtacı'ya teşekkür ederim. Bu süreç boyunca bana her konuda yardımcı olan ve anlayışlı davranan başta çalıştığım kurumdaki müdürüm Caner Şentürk ve diğer mesai arkadaşlarıma da teşekkür ederim. En son olarak bu çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans Tezi, TÜBİTAK 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 desteklenmektedir. Tez çalışmasının güç kalitesi ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi ve ölçüm yapılan sistemin simülasyonu bölümünde kullanılan TEİAŞ'a ait transformatör merkezlerinde yapılan güç kalitesi ölçümlerine ait mobil ölçüm verilerinin sağlanmasındaki katkılarından dolayı Proje Yürütücülüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Güç kalite problemlerinin doğru tanımlanması, sonrasında alınacak önlemlerin etkinliğini belirleyecek en önemli unsurdur. Eksik ya da yanlış tanımlama, içinde bulunulan durumu daha kötü kılabilir. Güç kalite parametrelerinin belirlenen değerlerin dışına çıkması durumunda, elektrik güç sisteminde ve elektrik güç sistemine bağlı ekipmanlar da yol açacağı problemler birbirinden farklı ve çeşitlidir. Problemlerin sebeplerinin iyi anlaşılması, problemi azaltmaya veya tamamen ortadan kaldırmaya yönelik çözüm ve tasarımların doğru ve daha hızlı gerçekleştirilmesine imkân tanınması bakımından önemlidir. Bu sebeple bu tezin birinci bölümünde güç kalitesi parametreleri ve güç kalitesi problemlerine önemli ölçüde değinilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde ülkemizde ve diğer ülkelerde güç kalitesini etkileyen faktörlerin başında gelen harmoniklerden detaylı bir biçimde bahsedilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde çeşitli güç kalitesi ölçü cihazlarına ve sistemlerine değinilmiştir.

Güç kalite parametrelerine yönelik, IEC, IEEE, EN gibi uluslar arası oluşumlar çeşitli standartlar geliştirmiştir. Bunun yanı sıra Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Japonya gibi ülkelerin geliştirdiği ulusal standartlar da mevcuttur. Türkiye’de kabul gören standartlar, genellikle uluslar arası standartlar ile uyumludur. Tezin dördüncü bölümünde beşinci bölümdeki ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan güç kalitesi standartları incelenmiştir. Beşinci bölümde ise TÜBİTAK 105G129 nolu Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında TEİAŞ Ototransit Transformatör Merkezi’nde yapılan güç kalitesi ölçümleri incelenmiş ve ölçüm sonuçları ilgili standartlara göre değerlendirilmiştir. Ayrıca ölçüm yapılan sistemin MATLAB Simulink ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Güç kalitesi, Harmonikler, Harmonik Ölçümü.

ABSTRACT

Defining the power quality problems truly is the main factor that will determine the precautions related. Incomplete or wrong definitions would make the current situation worse. The power quality parameters which were defined in chapter three causes different and various kind of problems, both in the electrical power system and at the equipments related, if they go out of the limits determined. Understanding the causes of the problems well is important since it enables to realize designations which mitigate or remove the problems more faster and proper. Because of this in the first chapter of this thesis power quality parameters and power quality problems are mentioned largely.

In the second chapter, harmonics, one of the most effective factors at power quality in our country and in other countries are examined detailed. In chapter three various power quality measurement equipments and systems are mentioned.

International formations like IEC, IEEE, EN developed standards for power quality parameters. Besides, countries like United States, Australia, Japan also have their national standards developed. Standards accepted in Turkey are generally concordant with international standards. Also in the chapter five power quality measurement results which are taken from TEİAŞ Ototransit Transformer Unit under the TÜBİTAK 105G129 Power Quality national project are examined according to related standarts and transformer unit from which power quality measurements are taken are simulated with the MATLAB program.

Keywords: Power Quality, Harmonics, Harmonics Measurement.

1. GÜÇ KALİTESİ PARAMETRELERİ

1.1 Güç Kalitesi

İnsanoğlunun yaşamında enerji gereksinimi her zaman var olmuştur. Çok çeşitli enerji türleri içerisinde bugüne kadar en çok kullanılan enerji, insanların yaşamına katkısından dolayı elektrik enerjisidir. İnsanoğlu tarafından sürekli kullanılmakta olan bu enerji türünün bazı problemleri de halen aşılamamış görünmektedir. Örneğin, elektrik enerjisi ekonomik olarak depolanamamakta ve kullanım esnasında kalitesi tamamen güvence altına alınamamaktadır.

Günümüzde elektrik enerjisine olan talepteki artış, daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji tanımını ortaya çıkarmıştır. Tüm alanlarda olduğu gibi elektrik enerjisinde de toplam kalite çok önemlidir. Güç kalitesine yaklaşım üretici, iletilci, dağıtıcı ve tüketici firma arasındaki bir ekip çalışmasıyla sağlanabileceğinden, her birinin sorumluluklarını bilmesi ve yerine getirmeye çalışması gerekmektedir.

Elektrik enerjisi bir ürün olarak değerlendirilmeli ve belirli kalite kriterlerini sağlamalıdır. Enerji ve sistem kapasitesinin optimum kullanılmasını sağlamak için, enerji kalitesi problemleri giderilmeli ve kalitesizliğe neden olan problemler kaynağında çözülmelidir. Bozucu etkiler üretim, iletim, dağıtım ve tüketici girişlerinde kaydedilmelidir. Sistemde kalitesizliklerden dolayı elde edilen veriler uzmanlar tarafından analiz edilmelidir.

Kaliteli bir elektrik enerjisi sağlayabilmek için, enerjinin sürekliliği, gerilim ve frekansın sabitliği, güç faktörünün bire yakınlığı, faz gerilimlerinin dengeli olması, akım ve gerilimlerdeki harmonik miktarlarının belirli değerlerde kalması gibi birtakım kriterlerin göz önüne alınması gerekmektedir.

Güç kalitesinin ekonomik etkisi göz ardı edilemeyecek seviyededir. Avrupa birliği ülkelerinde yapılan bir araştırmada, güç kalitesi problemlerinin endüstride ve ticari alanlarda meydana getirdiği zararın yılda 10 Milyar euro olduğu tahmin edilmektedir. Kalite problemlerinin giderilmesi için yapılan harcamalar ise tahminen bu rakamın % 5 i civarındadır.

Güç kalitesi çalışmalarında bir takım tanımlamalar ve standart eğerlerin bulunması kaçınılmazdır. Güç kalitesiyle ilgili sınırlayıcı bir standartın olmaması durumunda, elektrik enerjisi ve tüketicisi arasında kabul edilen kaliteli enerji tanımında farklılıklar görülebilmektedir. Güç kalitesi tüketici odaklı olan bir konudur ve bakış açısı olarak son kullanıcı temel alınmalıdır. Bu yüzden güç kalitesi için şu ifade kullanılabilir: Gerilim, akım veya frekans değişimleri, tüketicinin donanımında arızaya veya kötü işletmeye yol açtığında güç kalitesi problemi ortaya çıkar. Bir başka deyişle, güç kalitesi sorunu “ Kullanıcı cihazlarının yanlış veya hiç çalışmamasına neden olacak gerilim, akım ve frekanstaki değişmeler” olarak tanımlanabilir.

Çeşitli referanslara bağlı olarak güç kalitesi için farklı tanımlar yapılabilmektedir. Örneğin kuruluşlar güç kalitesini, sistemin istatistikî olarak %99,98 güvenilirliğe sahip olması, biçiminde tanımlarken, üreticiler güç kalitesini araç ve gereçlerin performansına uygun çalışmasını sağlayan güç kaynağı karakteristikleri olarak tanımlayabilmektedir. Güç kalitesi müşterinin referansını öncelikli olarak kabul eder. Bu nedenle gerilim, akım veya frekans sapmalarının hatayla veya kullanıcının araç ve gerecinin çalışmaması ile sonuçlanması bir güç kalitesi sorunu olarak görülmektedir.

Güç kalitesi seviyesi, elektriğin üretimine veya tüketimine bağlı olarak; iletim ve dağıtımdaki gerilimin $\pm$ % 5'lik seviyede dalgalanması olarak bilinmekteyken jeneratördeki güç kalitesi, genellikle jeneratörün küçük bir yük değişiminde 50 Hz'lik güç üretme kabiliyeti olarak bilinmektedir.

Bu durumda yapılacak bir değerlendirmede güç kalitesinin çoğunlukla gerilim kalitesiyle doğrudan ilişkili olduğu sonucuna varılabilir. Teknik olarak, mühendislik terimlerinde, güç; enerjinin dağıtım hızı olup gerilim ve akım ile orantılıdır. Güç kaynağı sisteminde sadece gerilimin kalitesinin kontrol edilebilmesi mümkün olup çekilen akım kontrol edilememektedir. Bu nedenle güç kalitesi alanında tespit edilen standartlar gerilimin belirli limitlerde korunmasına dayanmaktadır. Her ne kadar jeneratörler mükemmel yakın sinüsoidal dalgalı gerilim sağlasa da sistemin empedansından geçen akım çok değişik gerilim bozulmalarına yol açabilmektedir.

Alternatif akımlı güç sistemleri, verilen frekans (tipik olarak 50 veya 60 Hz) ve genlikteki sinüsoidal gerilimde çalıştırılmak için tasarlanmıştır. Gerilimin genliği, frekansı veya dalga biçimindeki saflığı üzerindeki herhangi bir kayda değer sapmalar potansiyel güç kalitesi problemlerini meydana getirir.

Günümüzde güç kalitesine olan ilginin artması şu gibi nedenlerden dolayı önem kazanmaktadır;

- Enterkonnekte sistem içinde bulunulması nedeniyle, herhangi bir yerdeki problemin etkisinin yerel kalmaması bütün bir sistemi etkilemektedir.
- Sistemde teknolojik gelişmelerin katkıları sonucu çok fazla sayıda harmonik.üreten.cihaz.bulunmaktadır.
- Dalga şekli bozulmalarına karşı duyarlı yüklerin sayısı gittikçe artmaktadır.
- Tüketicilerin güç kalitesi problemlerine karşı daha duyarlı ve bilgili hale gelmeye başlamaları

Çelik elde etmede kullanılan ark fırınları, kaynak makineleri, indüksiyon fırınları, haddehaneler, kömür ocağı çıkırıkları ve demiryolu çerleri gibi yüklerin bilinen özelliği, yük akımlarında ani değişiklikler meydana getirmeleri ve alıcı uç gerilimlerinde dalgalanmalara neden olmalarıdır. Çoğunlukla büyük endüstriyel yükler önemli olmasına rağmen, aynı zamanda donatım aygıtları, özellikle de tek tek ele alındığı zaman probleme neden olmayan, fakat toplu olarak ele alındığı zaman bağlı oldukları şebekenin besleme kalitesini etkileyebilen ticari binalar ve evlerde kullanılan cihazların da etkileri göz ardı edilmemelidir.

Yük akımındaki hızlı değişimler müşterilerin bağlantı noktasındaki gerilimde dalgalanmalara neden olabilmektedir. Ev video kayıt cihazlarından dijital saatlere, otomatik endüstriyel hatlardan hastane teşhis sistemlerine kadar mikroelektronik işlemcilerin çoğalması, bu tür cihazların sağladıkları yararlar yanında bazı güç kalitesi problemlerini de artırmıştır. Bu problemler, değişik tipteki hassas yükler üzerinde çok farklı etkileri olabilen çeşitli elektriksel problemlerden meydana gelmektedir. Ayrıca; bilgisayar, CNC Kontrollü tezgahlar, süreç denetim aygıtları gibi cihazlar da besleme geriliminin kalitesinden son derece etkilenmektedir.

Enerji sistemi ve tüketicilerdeki güç kalitesi ile ilgili problemler geniş kapsamlıdır ve birçok devreler bu problemlerden etkilenebilmektedir. Çok sayıda elektronik cihazların kullanılmasından dolayı hem enerji sistemi hem de tüketiciler dalga şekli bozulmalarına (distorsiyonlarına) karşı daha duyarlı hale gelmektedir. Güç sistemindeki dalga şekli distorsiyonları büyük bir önem taşımaktadır. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak sayıları gittikçe artan elektronik cihazlar üzerinde distorsiyonun olumsuz etkilerinin daha da artacağı değerlendirilmektedir.

Güç kalitesinin diğer gereç ve servislerdeki gibi, büyüklük olarak gösterilmesi zordur. Gerilim ve ölçülebilen diğer teknik kriterler için standartlar mevcuttur. Fakat güç kalitesinin ana ölçütü, son kullanıcıdaki ekipmanın üretkenlik performansıdır. Eğer güç kalitesi bu ihtiyaçları karşılamakta yetersiz ise kalite eksiktir.

Güç kalitesi sorunlarının çözümünde ekonomik faktörler de dikkate alınmalıdır. Çünkü güç kalitesi sorunlarının ortadan kaldırılması için alınacak tedbirler her zaman ekonomik olmayabilir. Çoğu durumlarda sorunun optimal çözümü için gerekli araç ve gereçlerin hassasiyeti, güç kalitesi seviyesinin istenilen sınırlar içerisinde tutulmasında yetersiz kalabilmektedir.

1.1.1. Güç Kalitesine Etki Eden Faktörler

Uygulamada, herhangi bir güç sisteminde akım ve gerilim arasında daima yakın bir ilişki bulunmaktadır. Her ne kadar jeneratörler sinüs dalgasına çok yakın bir şekilde gerilim üretseler de sistemin empedansından geçen akımlar, gerilimde de çeşitli bozulmalara neden olabilirler.

Bunların en önemlileri, kısa devre sonucu oluşan akımın, gerilim değerinin düşmesine veya tamamen yok olmasına neden olması, güç sisteminden geçen yıldırım darbelerinden kaynaklanan akımın yüksek darbeli gerilimlere yol açması, harmonik üreten yükler tarafından biçimi bozulan akımların, sistem empedansından geçtiklerinde gerilim biçimini de bozmaları gibi problemlerdir. Dalga biçimi bozulmuş gerilim sonuçta son kullanıcılara kadar ulaşabilmektedir.

National Electric Code tarafından yapılan araştırmaya göre uygun olmayan elektrik tesisatı ve topraklama sisteminin neden olduğu güç kalitesi problemleri toplam enerji kalitesi problemlerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu araştırmaya göre çoğunlukla güç kalitesi problemleri gevşek bağlantılardan, küçük kesitli nötr iletkeninden, hatalı topraklamadan, hasarlı iletkenlerden kaynaklanmaktadır.

Uzun süreli kesintiler, sistemde kullanılan cihazlardan, iletkenlerden veya çeşitli bağlantılardan kaynaklanabilir. Genel olarak uzun süreli kesintiler üreticiden, kısa süreli kesintiler ise tüketiciden kaynaklanmaktadır.

Bunlara ilave olarak güç yariletken devrelerinin gelişmesi ile, alt periyot geçici gerilim olaylarına olan duyarlılık önemli bir sorun olmuştur. Aynı zamanda harmonik üreten doğrusal olmayan (nonlinear) yükler hızla çoğalmaktadır. Düşük gerilimde ve yüksek frekans seviyesinde çalışan veri işleyen mikroişlemci esaslı devrelerin ortaya çıkmasıyla, bu cihazların alt periyot gerilim geçici olaylarına olan duyarlılığı daha da artmıştır. Aynı zamanda kısa süreli kesintiler bellekli kontrol sistemlerine çok ciddi zararlar verebilmektedir. Gerilim sapsmaları geçici ve sürekli olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Gerilim titreşimleri (flicker) ise geçici ve sürekli sapmanın bileşiminden oluşmaktadır.

Çizelge 1.1 Güç Kalite Problemlerinin Sebepleri

Kesintiler	Gerilim düşmesi	Aşırı gerilim	Harmonikler	Dengesizlik	Gerilim dalgalanmaları
Karakteristik dalga formları					
Kesinti kaynağı					
■ Güç sistemi					
□ İzolasyon hatası					
□ anahtarlama					
□ Aydınlatma					
■ Donanım					
□ Asenkron motor					
□ Senkron motor					
□ Kaynak makinesi					
□ Ark ocağı					
□ Doğrultucu					
□ Bilgi işlem yükleri					
□ Aydınlatma					
□ Çevirici					
□ Kondansatör grubu					
■ : ara sıra meydana gelen olay ■ : sık meydana gelen olay					

Yüksek harmonik bileşenli akımlar temel akıma göre amper basmada daha fazla kayıp üretir. Güç sistemi endüktansı ile güç faktörü düzeltici kondansatör veya kablo kapasitesi arasında meydana gelen rezonans, doğrusal olmayan (nonlinear) yükler tarafından üretilen akımı kuvvetlendirir.

Dört telli sistemlerdeki üç ve üçün katı harmonikler, nötr iletkeninde aritmetiksel olarak birbirleriyle toplanma eğilimi göstermektedirler. Bu durum aşırı akım koruma devresi bulunmayan nötr iletkenini yangın tehlikesiyle karşı karşıya getirmektedir. Özellikle elektrik motorları gibi cihazlar yüzünden meydana gelen temel frekanstaki aşırı akımlar, işletme geriliminin anma geriliminden daha küçük olmasına neden olmaktadır.

750 V'dan daha düşük işletme gerilimlerinde, bir kimsenin erişebileceği yerdeki iki metal cisim arasındaki öldürücü gerilimlerden insanları korumak ve düşük empedanslı bir hata akımı devresi elde etmek amacıyla topraklama sistemleri kullanılmaktadır. Bu düşük empedanslı devre, bir toprak hatasında aşırı akım korumasının daha hızlı çalışmasını sağlayacaktır. Şasi yerine güvenlik topraklama sisteminin kullanılması daha etkili bir yöntemdir

1.1.2 Güç Kalitesinin Etkileri

Kısa veya uzun süreli elektrik kesintileri kullanıcıların tamamını etkilemektedir. Ancak bu etkilenmeler birbirinden farklıdır. Yerleşim yeri müşterileri açısından kalitesiz enerjinin sebep olduğu ekonomik maliyet, ev aletlerinin onarım ya da yenilenme maliyeti olan birkaç yüz dolar seviyelerinde olabileceği gibi, endüstriyel üretici firmalar açısından ürün ve üretim kayıpları ile birlikte milyon dolarlar seviyesine çıkabilmektedir.

Bazı kritik yükler içeren kullanıcılar da bu elektrik kesintilerinden veya gerilim çökmelerinden çok daha fazla etkilenirler. Örneğin, çok kısa süreli bir kesinti bile olsa, birbiriyle eş zamanlı çalışan makineler bundan etkilenip daha ürüne dönüşmemiş büyük miktardaki malzemenin kullanılamayacak duruma gelmesine neden olabilir. Kâğıt ve tekstil endüstrisinin de bu tür durumlarla karşılaşılabilir. Birbirini zincirleme takip eden bant tipi üretime ait süreçlerde, herhangi bir aşamada süreksizliğin olması, daha önceki işlemlerinde boşa gitmesine neden olabilir.

Yarıiletken malzemeler kullanılarak yapılan elektronik devre imalatında butür durumlarla karşılaşılabilir. Bilgi işlem sistemlerinde bu tür gerilim çökmeleri çok yüksek miktarda kayıplara yol açabilir. Bir banka şubesinden sistem çöküntüsünden dolayı alınamayan karlı bir hissedenden veya tahvilden hem müşteri hem de banka zarar etmiş olabilir. İngiltere’de 20 dakikalık bir elektrik kesintisinin yol açtığı 10 M sterlinlik finansal kayıp yaşanmış bir örnektir. Enerji dağıtım sisteminin tipide, bozucu etkilerin tesirleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Yapılan araştırmalar, bozucu etkilerin meydana gelme yüzdesinin, yeraltı sistemlerinde ve yeraltı şebekelerinde havai hat sistemlerine göre önemli ölçüde az olduğu görülmüştür.

Güç kalitesizliğinin yol açtığı başlıca problemler şunlardır:

Gerilim düşmesi;

- Desarj prensibiyle çalışan lambaların sönmesine,
- Kontrol sistemlerinin hatalı çalışmasına,
- Motor hızının değişmesine veya motorun durmasına,
- Kontaktörün kontaklarının açılmasına,
- Bilgisayar sistemlerinde arızalara,
- Anahtarlama arızalarına neden olur.

Gerilim yükselmesi;

- Motor sürücülerini ve kontrol elemanlarını olumsuz yönde etkiler,
- Ayarlanabilir hız sürücülerini koruma elemanlarından dolayı durdurabilir,
- Bilgisayar donanımının ve akkor flemalı lambanın ömrünü azaltır.

Kırpışma;

- Motor sürücülerini ve kontrol elemanlarını olumsuz yönde etkiler.

Gerilim dalgalanması;

- Gerilim dalgalanmaları için öngörülen değer % 10 dur. Bu değer çoğu cihazın tolerans sınırları içerisindedir. Bu değer aşıldığı takdirde, kondansatör kullanılan cihazların performansında azalma, kontrol sistemlerinde bozulma ve elektronik cihazların iç akım ve gerilimlerinde kararsızlıklar oluşur.

Dengesizlik;

- Artan dengesiz akımlardan dolayı elektrik makinelerinde ısı artışı oluşur.

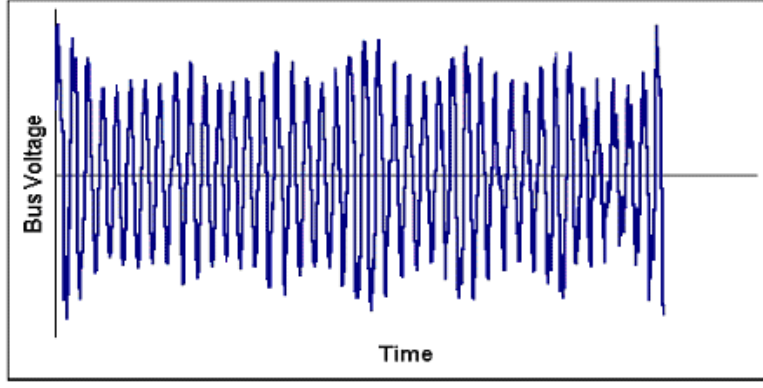
1.2 Fliker (Kırpışma) Olayı

Fliker olayı, ışık uyarımları, ışığın parlaklığının zamana bağlı olarak ani bir biçimde artıp azalması gibi durumların neden olduğu görme hassasiyetindeki kararsızlık etkisi olarak nitelendirilebilir. Genel olarak evimizde kullandığımız aydınlatma elemanlarının parlaklıklarının, besleme gerilimindeki düşüm ve artımlara bağlı olarak değişmesi şeklinde karşımıza çıkabilir. Gerilimin periyodik olarak 6–7 tam dalga (8-9 Hz) süresince azalması yada artması olarak ta adlandırılabilir. Bu gibi olayların oluşumunda rol oynayan en büyük etken ark fırınları gibi dalgalı aşırı yüke sahip sanayi tesisleridir.

İnsan gözü 8–20 Hz frekansına duyarlıdır ve bu frekans aralığındaki işaretlerden (kırpışmadan) rahatsız olmaktadır. Bu frekans aralığında insan gözünün kırpışmaya (fliker) en duyarlı olduğu frekans 8.8 Hz'dir. Bir dalganın frekansı 25 Hz den daha küçük frekanslara ayarlandığında bu dalga şeklinde gerilim kırpışmaları görülme olasılığı vardır. Bu değer (25 Hz) insan gözünün bir ampuldeki ışık şiddeti değişimini algılamaya başladığı eşik değeridir. Frekans değeri daha da düştükçe gözün kırpışmadan dolayı hissettiği rahatsızlık artar.

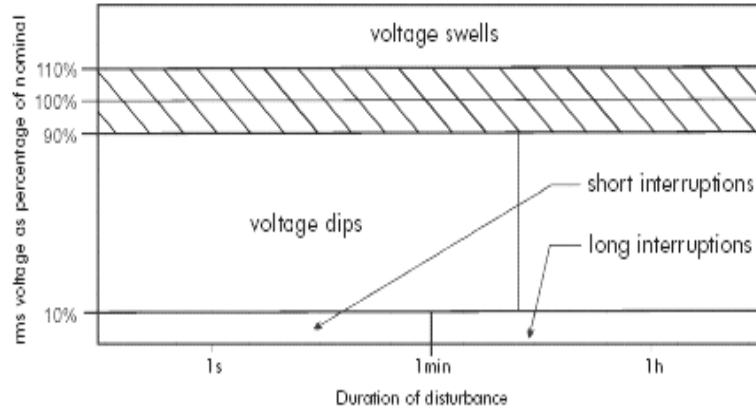
Gerilim kırpışmaları, güç sistemlerinde meydana gelen ark olayları neticesinde oluşur. Bu ark olayı, üretim prosesinin, kaynak makinesi ya da elektrik ark fırını gibi cihazlardan kaynaklanan doğal bir sonucu olabilir. % 3 oranından büyük gerilim adım değişimleri genellikle büyük motorların yol almasından kaynaklanır. Bu durum hafif kırpışmaların oluşmasına neden olabilir. Fakat bu kırpışmaların, gerilim büyüklüğünün frekansının ayarlanmasıyla bir ilgisi yoktur. Fliker olayları sisteme filtre ilave edilmesiyle giderilebilir. Diğer yöntemler ise statik VAR sistemleri ile statik dağıtım kompanzatorleridir

.



Şekil 1.1 Ark fırını tarafından üretilen flikerin dalga şekli

Fliker olayları gerilimin ani olarak düşüp yükselmesi sonucu oluşan semptomlardır. Bu ani düşümler ve yükselmeler elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması sırasında meydana gelen bozulmalardan kaynaklanmaktadır. Bu ani yükselmelerin ve düşümlerin en önemli sebebi şebekeye, aktif ve reaktif güç talebi çok ani değişen yüklerin bağlanmasıdır

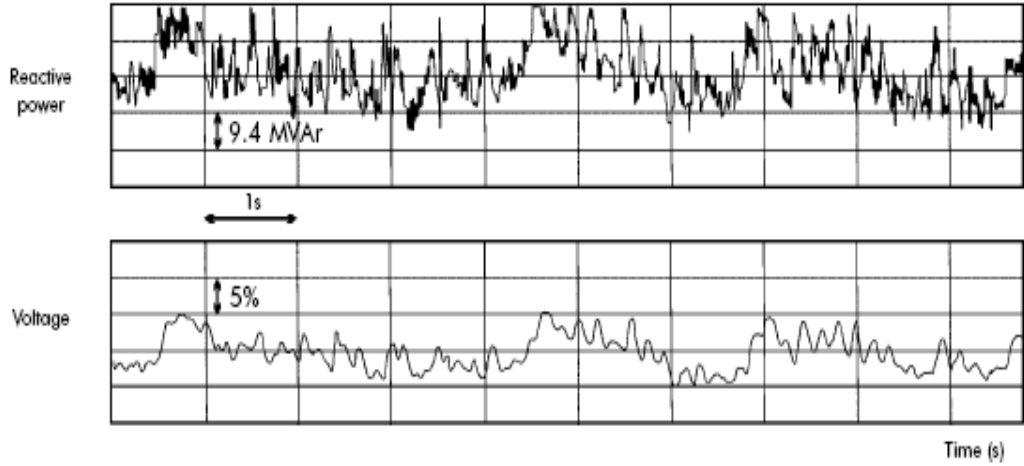


Şekil 1.2 Gerilim değişimlerinin sınıflandırılması

Fliker olaylarının iyi kavranabilmesi için bu olaylara sebebiyet veren ani gerilim düşüm ve yükselmelerinin nedenlerinin, etkilerinin ve ölçüm metodlarının incelenmesi gerekmektedir.

1.2.1 Gerilimin inip çıkmasının (voltage fluctuation) nedenleri

Ani gerilim değişimlerinin en önemli nedeni, enerji gereksinimi ani değişen yüklerin reaktif güç kısmının zamana bağlı olarak değişmesidir. Bu tip yüklere genel olarak, besleme kaynağına bağlantı noktasında, kısa devre kapasitesine göre güç değişim oranı yüksek olan yükleri örnek olarak verebiliriz. (Ark fırınları, matkap gibi) Ayrıca indüksiyon motorlarının yol almasında, güç regülâtörlerinde, kaynak makinelerinde, kazanlarda, elektrikli testerelerde, asansör gibi cihazlarda kullanılan küçük güçlerde fliker olaylarına neden olabilmektedir. Belli başlı diğer etkenler ise şunlardır: Kaynak empedansının endüktif kısmının değişmesine neden olabilen kapasitörlerin anahtarlanması, Rüzgâr türbinleri gibi enerji kaynaklarının üretim kapasitelerinin değişmesi, düşük frekanslı harmoniklerin bozucu etkileri.

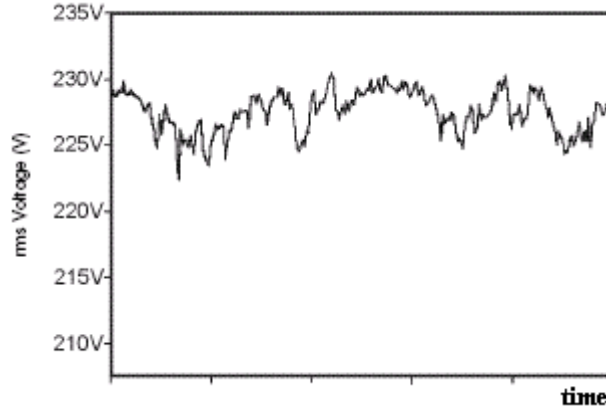


Şekil 1.3 Ark fırınının neden olduğu ani gerilim değişimlerini gösteren dalga şekli

1.2.2 Gerilimin inip çıkmasının (voltage fluctuation) etkileri

Güç sistemlerindeki ani gerilim artım ve düşümleri, büyük miktarda yatırımların yapıldığı üretim proseslerinin aksaması gibi önemli etkilere neden olabilecek çok sayıda zararlı teknik arızalara neden olabilmektedirler.

Fakat öte yandan, fliker olayının, üretim yapılan çevrenin ergonomisini etkilediği, çalışanlara aşırı yorgunluk hissi verdiği ve çalışanların konsantrasyon seviyelerini düşürdüğü için en önemli etkisi psikolojiktir.



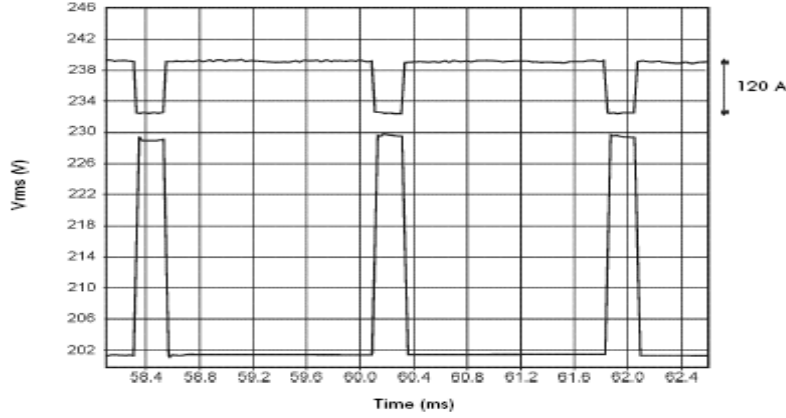
Şekil 1.4 Ani gerilim düşmesi ve yükselmesi

1.2.3 Elektrik makineleri

İndüksiyon motorunun uçlarındaki gerilim artım ve düşümleri tork kuvvetinin değişmesine ve kaymaya sebebiyet vermektedir. Bu da üretim prosesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu ani artım ve düşümlerin en kötü etkileri makinede aşırı titreşim oluşturmaları, mekanik gücünü azaltmaları ve makinenin servis ömrünü kısaltmalarıdır. Senkron jeneratör ve motorların uçlarındaki gerilim artım ve düşümleri torkun ve üretilen gücün değişmesine ve kayıplara neden olmaktadır.

1.2.4 Statik doğrultucular

Gerilim artım ve düşümlerinin faz kontrollü doğrultucular üzerindeki belli başlı etkileri güç faktörünün düşmesi ve karakteristiği olmayan harmoniklerin oluşturmalarıdır. Invertör modunda çalışması durumunda komutasyon hatalarına ve sistem bileşenlerinin zarar görmesine neden olabilir.



Şekil 1.5 Statik doğrultucunun neden olduğu ani gerilim düşmesi ve yükselmesi

1.3 Gerilim dengesizliği

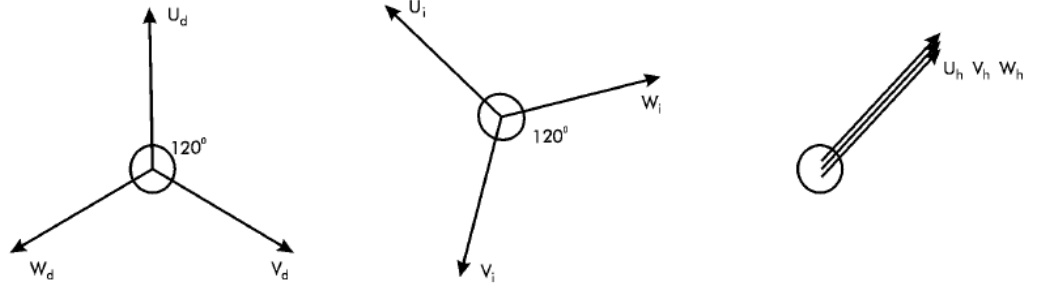
1.3.1 Giriş

Şebekedeki dengesiz akımlar simetrik olmayan gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Oluşan bu dengesiz gerilimler güç kalitesini önemli ölçüde etkiledikleri için güç kalitesi parametreleri arasında gösterilmektedir. Bu bölümde daha çok sinusoidal gerilim dengesizliklerinden bahsedilecektir. İlk olarak dengesizliğin tanımı yapılacak daha sonra dengesizliğin tespit edilebilmesi için gerekli olan parametrelerden bahsedilecektir.

1.3.2 Tanım

Üç fazlı bir güç sistemi, her üç fazın akım ve gerilimleri aynı büyüklüğe sahipse ve faz açıları arasında 120 derecelik bir fark varsa, simetrik veyahut dengeli olarak adlandırılır. Bu şartlardan herhangi biri yoksa o sistem dengesiz veya simetrik

olmayan bir sistem olarak nitelendirilir. Bu bölümde kavramların analizi yapılırken dalga şekillerinin saf sinüzoidal olduğu ve harmoniklerin mevcut olmadığı kabulü yapılmaktadır.



Şekil 1.6 Simetrik bileşenlerin grafiksel gösterimi

1.3.3 Dengesizlik nasıl oluşur

Sistem operatörleri, dağıtım şebekesi ile tüketicinin dahili şebekesi arasındaki bağlantı noktasında dengeli bir sistem gerilimi elde etmeyi amaçlarlar. Normal şartlar altında bu gerilim değeri şu etkenler tarafından belirlenir:

- Jeneratörlerin terminal gerilimleri
- Elektrik sisteminin empedansı
- Dağıtım ve iletim şebekeleri vasıtasıyla yükler tarafından çekilen akımlar

Üretim tarafındaki sistem gerilimleri, geniş merkezi enerji santrallerinde kullanılan senkron jeneratörlerinin yapıları ve çalışma şekilleri gereği genellikle büyük oranda simetriktir. Bu yüzden merkezi üretim sisteminin dengesizliğe bir katkısı yoktur.

Fakat küçük ölçekte dağıtılan üretimlerde şebekenin tüketici tarafında bu durum farklılık göstermektedir. Şebekeyle yüklerin bağlantı noktası göreceli olarak yüksek bir empedansa sahiptir. Bu da kısa devre gücünün düşük olmasına sebebiyet verir. Bu yüzden daha yüksek gerilim seviyelerindeki bağlantılara kıyasla potansiyel olarak daha dengesiz gerilimler oluşmaktadır.

Elektrik sistem bileşenlerinin empedansları her faz için aynı büyüklükte değildir. Üstteki hatların geometrik konfigürasyonunun nötr hattına göre asimetrik olması örneğin hattın elektriki parametrelerinde farklılıklara sebep olur. Genel olarak bu tip farklılıklar çok küçüktür ve gerekli önlemlerin alınmasıyla kolaylıkla giderilebilir. Pratikte karşılaşılan çoğu durumda, yüklerin asimetrik oluşu gerilim dengesizliğinin oluşmasının ana nedenidir.

Yüksek ve orta gerilim seviyelerinde, yükler genellikle üç fazlı ve dengelidir. Bu duruma istisna olarak AC tren hatları ve indüksiyon fırınları gibi tek ya da iki fazlı yüklerde vardır. Aydınlatma sistemleri gibi alçak gerilim yükleri genelde tek fazlıdır ve bu yüzden fazlar arası dengenin sağlanması müşküldür.

Anormal sistem koşulları da dengesizliğe neden olabilir. Bu anormal koşullara faz – nötr, faz-faz, açık devre hataları örnek olarak verilebilir. Bu tip hatalar bir ya da daha çok fazlarda gerilim düşümlerine sebebiyet verdikleri gibi diğer fazlar da aşırı gerilimlere neden olabilirler. Buda sistemde gerilim dengesizliğinin oluşmasına neden olur ve böylelikle sistem davranışı dengesiz bir karakter gösterebilir.

1.3.4 Dengesizliğin Etkileri

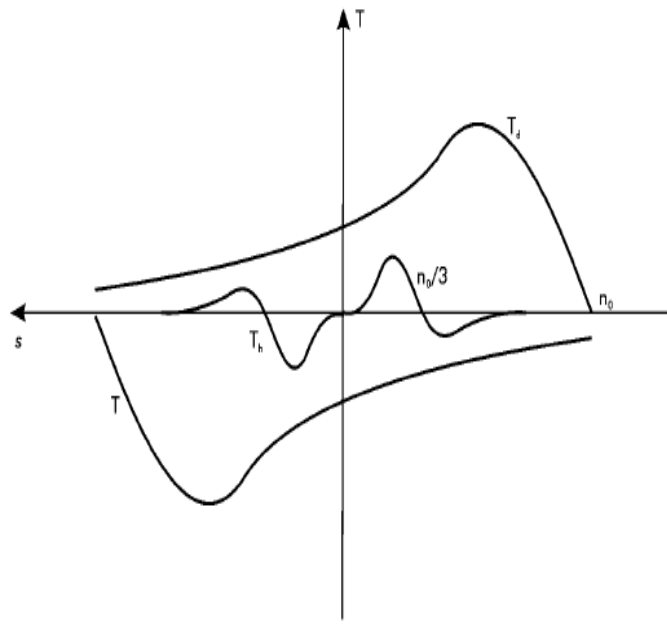
Elektrikle çalışan cihazların oluşan dengesizliğe gösterdikleri tepkiler uygulamanın türüne göre farklılık göstermektedir. Ortaya çıkan problemlerden belli başlıları şunlardır:

İndüksiyon Makineleri

Bu makineler indüksiyonlu döner manyetik alan prensibiyle çalışan AC senkron makinelerdir. Besleme kaynağının dengesiz bir gerilime sahip olması durumunda toplam manyetik döner alan, dairesel olması gerekirken oval şeklini almaktadır. İndüksiyon makineleri dengesizlik yüzünden 3 tip probleme maruz kalmaktadır. İlk olarak makinenin tam bir tork oluşturamaması ve bu yüzden negatif bir frenleme

torkunun oluşmasından bahsedilebilir. Şekil 1.7 dengesiz bir kaynak tarafından beslenen bir indüksiyon makinesinin tork – hız karakteristiğini göstermektedir.

İkinci olarak indüklenen torkun çift sistem frekansındaki bileşenleri mekanik zararlara yol açabilirler. Son olarak stator ve özellikle rotor, termal yaşlanmalarını hızlandıracak biçimde aşırı ısınabilirler. Bu ısınma rotor tarafından bakıldığında görülebilen ters manyetik alanın çok hızlı dönmesi ile oluşan akımların indüklemeleriyle oluşur. Bu aşırı ısınmayla başa çıkabilmek için motor nominal yükünün altında yüklenmelidir.



Şekil 1.7 Dengesiz bir kaynak tarafından beslenen bir indüksiyon makinesinin tork – hız karakteristiği

Senkron Jeneratörler

Senkron jeneratörlerde AC makinelerdir. Genellikle lokal enerji üretimlerinde kullanılırlar. Bu cihazlarda dengesizliğe indüksiyon makinelerine yakın tepkiler verirler. Fakat bu cihazlar açısından dengesizliğin meydana getirdiği en olumsuz etki aşırı ısınmadır. Bu sebeple senkron jeneratörün tasarımı yapılırken aşırı ısınma tehlikesine karşı önlemler alınması gerekmektedir.

Kabloların, hatların ve transformatörlerin kapasiteleri

Kabloların, hatların ve transformatörlerin kapasiteleri besleme kaynağındaki gerilimin dengesiz olmasından kaynaklanan negatif bileşenler yüzünden azalır. Aslında çalışma limitleri toplam akımın RMS oranı yardımıyla belirlenir. Bunların taşıyabileceği maksimum kapasite deretasyon faktörüyle belirlenir. Bu faktör üretici tarafından belirlenir.

1.3.5 Gerilim Dengesizliğinin Giderilmesi

Dengesizliğin oluşturduğu etkileri azaltabilmek için çeşitli teknik komplekslik derecelerine sahip birçok önlem alınabilir. İlk ve en temel çözüm sistem yükünü, sistemi daha dengeli bir hale getirecek biçimde yeniden ayarlamaktır. Bazı uygulamalarda sistemin çalışma parametrelerini değiştirmek dengesizliği azaltabilir. Besleme geriliminde negatif gerilim düşümleri meydana getiren negatif akımların etkilerini azaltmak için düşük değerde bir sistem empedansına ihtiyaç vardır. Bu empedans, dengesiz yüklerin daha yüksek bir kısa devre seviyesine sahip noktalara bağlanmasıyla sağlanabilir.

Dengesizliği gidermenin bir diğer yöntemi Scott- ve Steinmetz transformatörleri gibi özel trafoların kullanılmasıdır. Bu trafolar şebekeye, çıkışlarında 3 fazlı dengeli bir güç oluşturacak şekilde bağlanırlar. Ayrıca bu transformatörler, tek fazlı yüklerle orantılı olan kapasitörler ve endüktanslardan oluşan ekstra güçlü, dengeli yüke sahip üç fazlı transformatörlerdir. Yükün dengeli olması için bünyelerinde çeşitli işlemler gerçekleştirirler.

Son olarak, “Statik Var Kompanzatörleri” gibi özel, çok hızlı çalışan güç elektroniği devreleri dengesizliği sınırlamada kullanılabilirler. Bu tip cihazlar yüklerin empedanslarındaki ani değişimleri yakından takip edip, tamamlayıcı bir empedans gibi davranarak her faz için bu değişimleri kompanze ederek yüklerin dengeli kalmalarını sağlarlar. Ayrıca bu cihazlar arzu edilmeyen reaktif güçleri de kompanze ederler. Fakat bu gibi cihazlar oldukça pahalı olduklarından ötürü sadece diğer yöntemlerin fayda sağlamadığı ark fırınları gibi büyük çaptaki yükler için kullanılırlar.

1.3.6 Dengesizlik ile ilgili Sonuçlar

Gerilim dengesizliği, genelde alçak gerilim dağıtım şebekelerini etkileyen, ofis binalarındaki bilgisayarlarda ve aydınlatmada sorunlar meydana getiren ciddi bir güç kalitesi problemidir. Fakat sistem parametrelerinin standart değerleri ile ölçülen değerlerinin kıyaslanması gibi basit bir yöntemle tespit edilebilirler ve yukarıda bahsedilen yöntemlerle etkileri azaltılabilir.

1.4 Frekans değişimi

Şebeke frekansının anma değerinden sapması olayıdır. Şebeke ve jeneratörlerde frekans değişimi ayar düzensizliklerinden kaynaklanmaktadır. Güç frekansı değişimleri, 50 Hz veya 60 Hz nominal değerleriyle belirlenen güç sisteminin temel frekansından sapma olarak ifade edilmektedir. Güç sistem frekansı, sistemi besleyen generatörlerin açısal hızı ile doğrudan ilişkilidir. Yük ile üretim arasındaki dinamik denge değiştiğinde, frekansta önemsiz değişimler olmaktadır.

Frekanstaki sapmanın büyüklüğü ve süresi yük karakteristikleri ile üretim kontrol sisteminin yük değişimlerine verdiği cevaba bağlıdır. Frekans değişimleri, güç sisteminin normal sürekli hal çalışması için kabul edilen limitlerin dışına çıkması durumunda, iletim sisteminin büyük bir kısmında arızalara, geniş ölçekli yüklerin veya büyük güçlü generatörlerin devre dışı kalmasına neden olabilir.

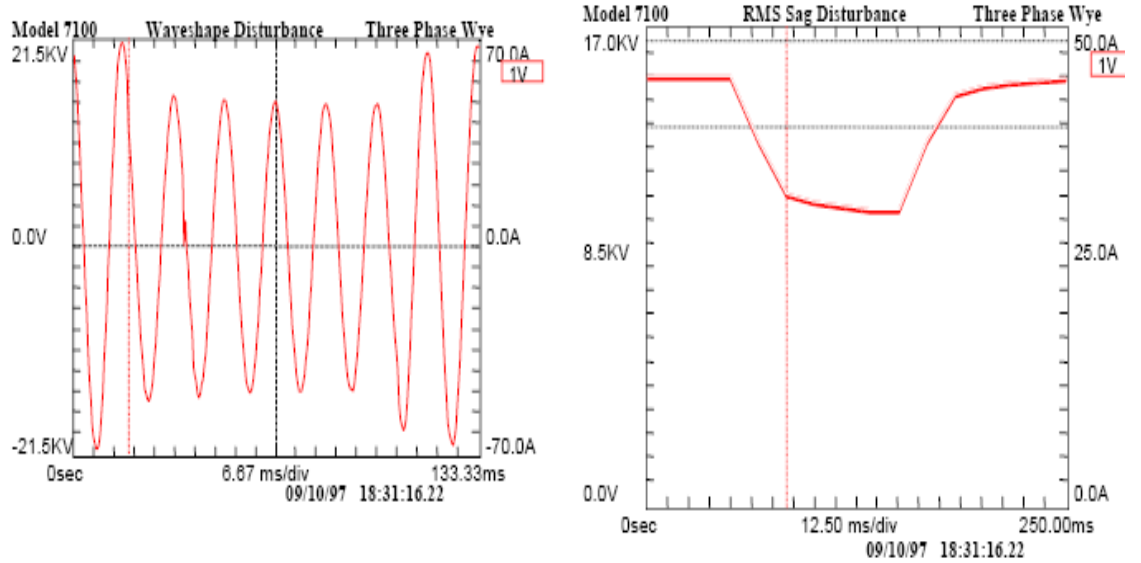
1.4.1 Gerilim Frekans Değişimleri

Şebeke besleme geriliminin frekansı, büyüklüğünde de olduğu gibi sabit değildir. Gerilim frekansının değişmesi yük ile üretim arasındaki dengesizlikten kaynaklanmaktadır. Bu değişimi ifade etmek için frekans sapması tabiri de kullanılır.

Gerilim frekans değişimleri, kısa devreler sonucu oluşan kısa süreli frekans tranziientlerini ve jeneratör istasyonlarındaki hataları da kapsar. IEC bu varyasyonları güç frekans değişimleri, IEEE ise frekans değişimleri olarak isimlendirir. Standartlarda frekans değerinin 49,5 Hz ile 50,5 Hz arasında değişebileceği öngörülmüştür. Bu değerlerin dışına çıktığında gerekli önlemler alınmalıdır.

1.5 Gerilim Düşmeleri ve Yükselmeleri (sags, swells)

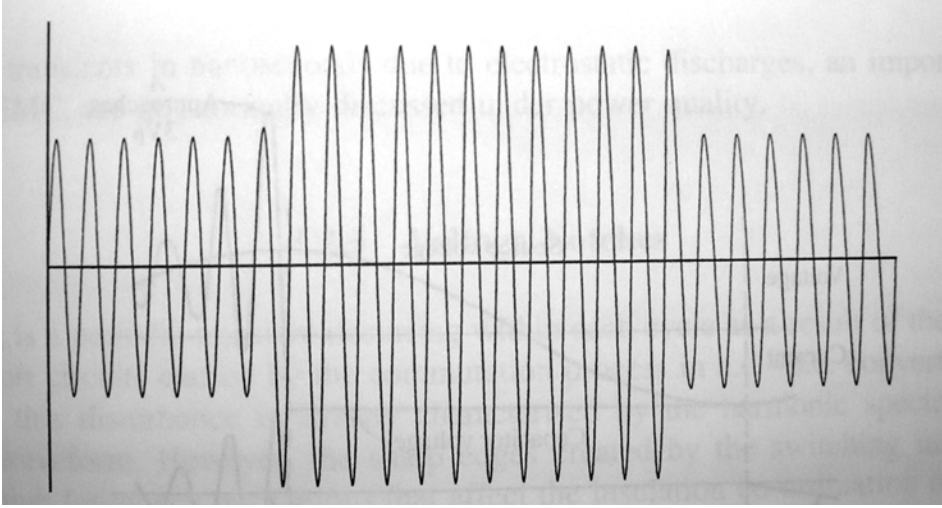
Gerilim düşmeleri(sags) , gerilimin bir tam dalgadan (20 ms'den) daha uzun sürelerde değerinde % 80 'den daha büyük düşmeler görülmesi olayıdır. 0.5 periyottan 1 dakikaya kadar geçen sürede gerilimin 0.1 ile 0.9 pu değerleri arasında bir azalma göstermesi, çökme olarak tanımlanır. Bu gerilim bozulmaları iletim hatlarında saniyenin onda biri kadar bir sürede gerçekleşir. Fakat bu ani olaylar geniş çaptaki tesis prosesinin durmasına neden olabilir. Üstelik bu prosesin normal çalışmasına dönmesi saatler sürebilir. Şekil 1.9 bu tür gerilim bozulmalarında gözlemlenen dalga şeklini göstermektedir. Gerilim düşmeleri genellikle sistem arızaları ile ilişkilidir. Bununla birlikte büyük yüklerin devreye girmesi veya güçlü motorların yol alması sırasında da oluşabilirler. Şebeke yetersiz kaldığında, aşırı yüklenmede ve kısa devre durumlarında da görülmektedir.



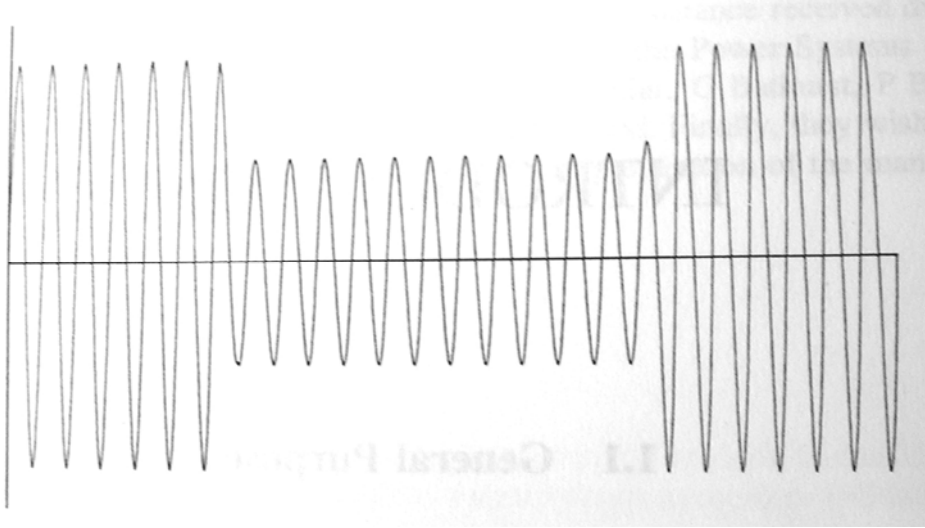
Şekil 1.8 Gerilim düşmesi dalga şekli

Gerilim yükselmeleri (swells), gerilimin bir tam dalgadan (20 ms'den) daha uzun sürelerde değerinin % 110 'dan daha büyük değerlere çıkması olayıdır. Gerilim yükselmeleri gerilim düşmeleri kadar yaygın değildir. Gerilim yükselmeleri gerilim düşmeleriyle aynı anda gerçekleşebilir. Bir gerilim yükselmesi, sistemdeki bir hat-nötr hatasından kaynaklanan hatanın olmadığı hattaki ani gerilim artışlarıdır.

Ayrıca şebekeden büyük çaplı bir yükü çıkarılması veya büyük bir kapasitör ilave edilmesi de gerilim yükselmesine neden olabilir. Fakat bu tip olaylar gerilim büyüklüğünde daha uzun süreli değişiklikler meydana getirirler ve uzun süreli değişimler olarak sınıflandırılırlar.

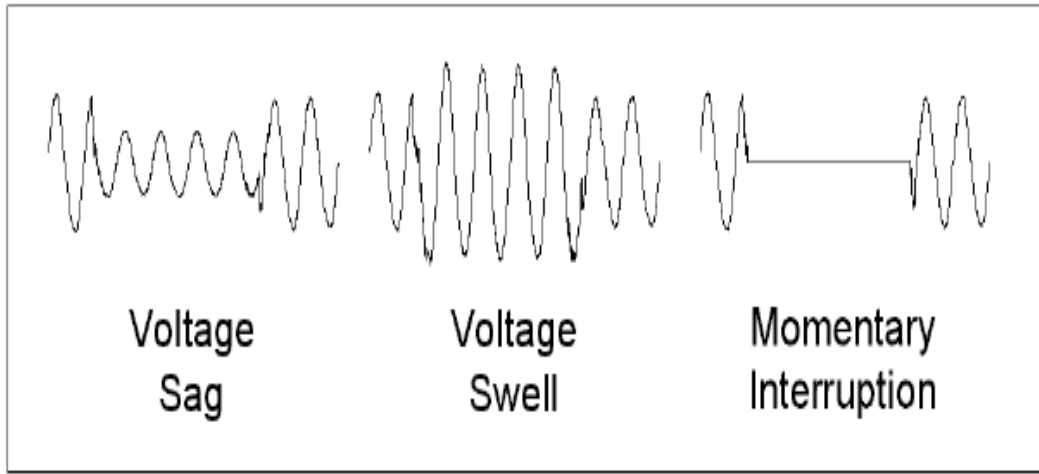


Şekil 1.9 Kısa Süreli Gerilim Yükselmesi



Şekil 1.10 Kısa Süreli Gerilim Düşmesi

Büyük bir yükün devre dışı kalması veya büyük ölçekte bir kondansatör grubunun devreye girmesi, gerilim yükselmesine neden olabilir. Gerilim yükselmeleri, efektif değer cinsinden genliklerine ve sürelerine bağlı olarak karakterize edilirler. Şebekedeki yük azalması ve ayar zayıflıkları da bu duruma sebebiyet verebilmektedirler.



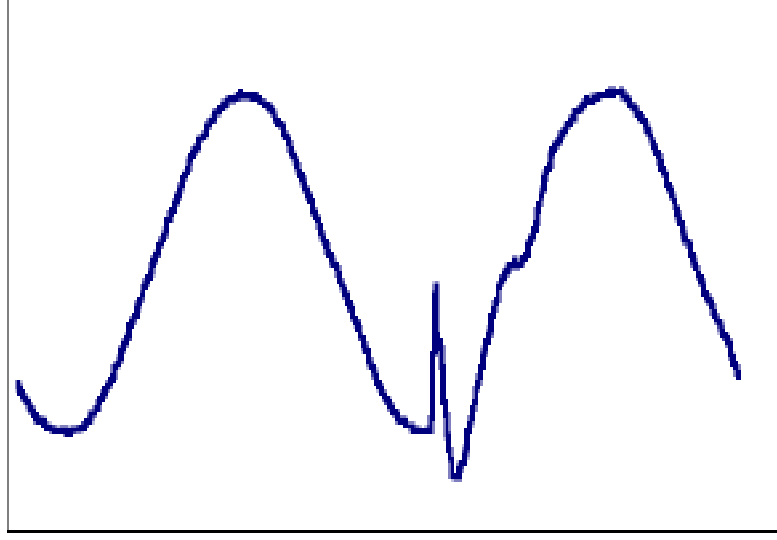
Şekil 1.11 Kısa süreli gerilim değişimleri

1.6 Geçici Olaylar

Güç sistemlerinin analizinde arzu edilmeyen ve anlık olarak gerçekleşen bir olayı belirtmek için “ Geçici Hal “ terimi uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Geçici olaylar çok kısa süren (birkaç milisaniye kadar) gerilim bozulmalarıdır. Fakat şiddetleri çok yüksektir ve yükselme çok hızlı olur. Geçici olayların çoğu, yıldırımlardan, büyük yüklerden ve reaktif yüklerden kaynaklanır.

Genellikle koruma sistemleri geçici etkileri belli bir güvenlik seviyesinin altında tutar. Geçici olayların meydana geldiği yer tesisata yakın veya tesisatın içinde ise problemler ortaya çıkabilir. Bu problemlerin başlıcaları şunlardır: Meydana gelen tahribat çok ani olabilir. Tesisat veya teçhizat onarılması imkansız bir biçimde

tahribata uğrayabilir. Bilgisayardaki veriler yok olabilir.Etkiler zaman içinde tekrarlanarak malzemelerin izolasyonuna zarar verebilir.

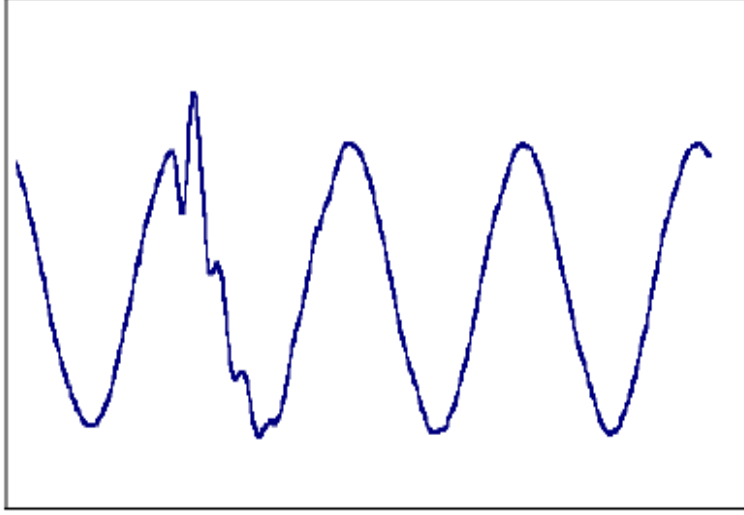


Şekil 1.12 Geçici olay dalga şekli

Bunlar gibi nedenlerin birikmesinden dolayı çok daha büyük çapta hasarlar meydana gelebilir. Önlem olarak yapılması gerekenler ise şu şekilde sıralanabilir: Toprak elektrot sisteminde düşük empedanslı iyi bir bağlantının yer aldığı, geniş frekans aralığında düşük empedanslı bir topraklama sistemi seçilmelidir.

Yıldırımdan korunma sistemlerinin tasarımı, bir yılda yıldırım olaylarının meydana geldiği günlerin sayısını saptamak gibi yerel faktörler göz önüne alınarak uygun şekilde yapılmalıdır. Koruma sistemleri, telefon ve diğer iletişim araçları da dahil, gelen hattın ilk giriş kısmına yerleştirilmelidir. Koruma sistemleri imal eden kuruluşlar, anahtarlama aygıtlarında meydana gelen geçici olaylara karşıda korumayı sağlamalıdır.

Geçici haller dalgalı ve salınımlı olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir. Bu terimler, akım ve gerilim geçici halinin dalga şeklini yansıtmaktadır. Darbe biçimindeki geçici olay, polarite bakımından tek yönlü (pozitif veya negatif) olan gerilim ve akım parametrelerinin her ikisinde, sürekli hal koşulunda güç frekansında olmayan ani değişim olarak tanımlanır. Normal olarak darbeli geçici olay, yükselme ve gecikme zamanlarıyla karakterize edilirler. Darbe biçimindeki geçici haller, güç sistemi devrelerinin doğal frekanslarını uyarıp salınım şeklinde geçici haller üretebilirler.



Şekil 1.13 Kapasitörün yüklenmesinin neden olduğu geçici olay dalga şekli

Salınım şeklindeki geçici haller, tek yönlü olmayan pozitif ve negatif polariteli değerler içeren gerilim ve akım parametrelerinin her ikisinin sürekli hal koşulunda güç frekansında olmayan ani değişim olarak tanımlanırlar. Salınım transiyentleri, ani değerleri hızlı bir biçimde polariteyi değiştiren akım ve gerilimleri içerir. Frekans içeriği, genliği ve süresi ile karakterize edilirler. Ardı ardına kapasitör gruplarının sırayla devreye alınması, salınım biçimindeki transiyent akımlarının oluşmasına neden olacaktır. Kablolu hatların kesicilerle devreye alınıp çıkarılması da aynı frekans bölgesinde salınan gerilim transiyentlerine neden olacaktır.

Şebekedeki geçici bozulmalar, anahtarlama ya da yıldırım olayları yüzünden sisteme fazladan enerji enjekte edilmesiyle oluşur. Yıldırım olayları, elektrostatik boşalma, yüklerin ya da kapasitörlerin anahtarlanması tek yönlü geçici bozulmalara neden olur. Bu tip bozulmalar tepe değerleriyle ve yükselme zamanlarıyla karakterize edilir. Salınımlı bozulmalar ise frekanslarıyla karakterize edilirler. Yüklerin çok kısa zaman

aralıklarıyla anahtarlanması temel frekansları 2 kHz den büyük yüksek frekanslı salınımlar oluşturabilir. Geçici olaylardan kaynaklanan problemlere en genel çözüm şebekeye kesiciler, aktif ve pasif filtreler ve de izolasyon trafolarının bağlanmasıdır.

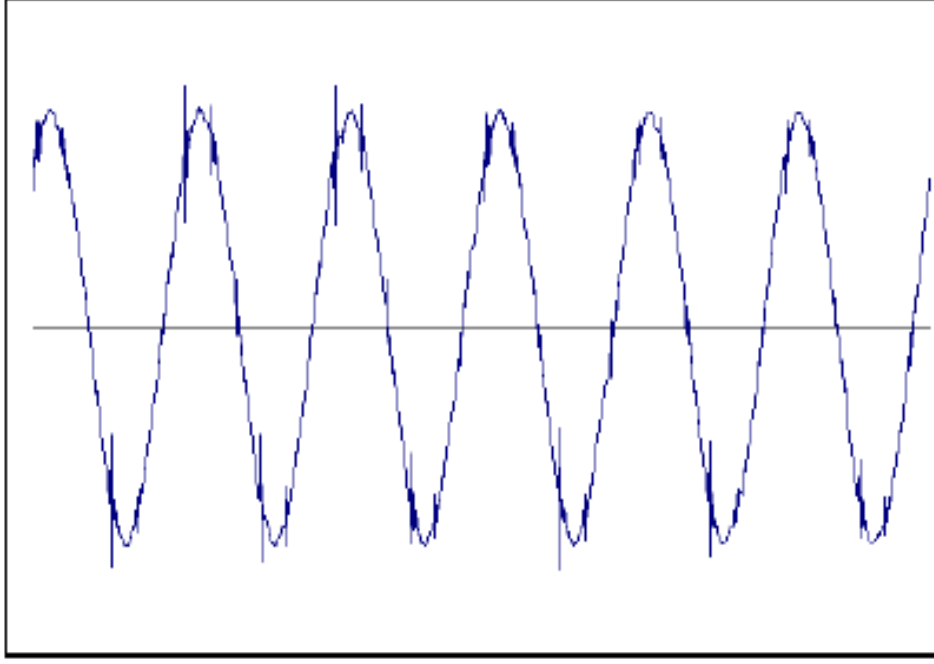
1.7 Çentik (Notch)

Normal çalışma durumunda güç elektroniği elemanlarında bir fazdan diğer faza akımın komutasyonu nedeniyle oluşan periyodik gerilim bozulmalarına denir. Şebeke geriliminin bir tam dalgasında (20 ms süresince) doğrultucu darbe sayısı kadar tekrarlanan çökmeler olarak ta isimlendirilebilir.

Genelde doğrultucuları besleyen trafo ve hat endüktanslarının anahtar aktarımını geciktirmesiyle oluşur. Çentik olayları, sürekli olmaları durumunda etkilenen gerilimin harmonik spektrumu ile karakterize edilebilirler. Çentiğin frekans bileşenleri oldukça yüksek olabilir ve harmonik analizi için kullanılan ölçüm donanımı ile kolayca karakterize edilemeyebilir.

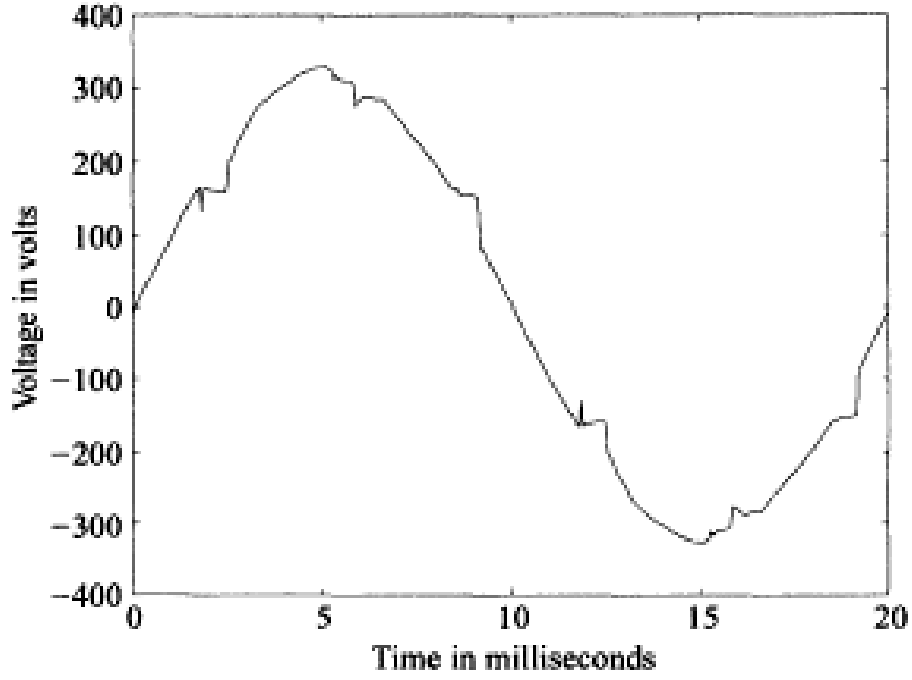
Gerilim çentikleri güç elektroniği doğrultucularındaki komutasyonlar yüzünden oluşur. Değişebilir hızlı sürücüler gibi solid-state doğrultucuların kullanıldıkları durumlarda güç kalitesini düşürücü etki gösterebilir. Bu etki sürücülerin girişindeki doğrultuculardaki anahtarlardan ileri gelir.

Sürücüdeki doğru akım (DC), bir doğrultucu tristörden bir diğerine komute olursa ani bir gerilim bozulması oluşur. Bu bozulma yüzünden şekilde de görüldüğü üzere her hangi bir fazın gerilim dalga şeklinde bir periyotta, 6 darbeleri elektronik doğrultucunun meydana getirdiği dört adet çentik görülür.



Şekil 1.14 Çentik dalga şekli

Üç fazlı bir doğrultucuda bir diyot ya da bir tristörden diğerlerine doğru gerçekleşen komutasyon 1 ms den daha kısa süreli bir kısa devre meydana getirir. Buda besleme geriliminde ani düşmelere neden olur. Çentik olayı, güç mühendisliğinde pekte göz önüne alınmayan yüksek dereceli harmoniklere sebebiyet verir. Çentik olayını karakterize etmenin en iyi yolu çentiğin derinliğini ve süresini, sinüs dalgası üzerindeki çentik olayının başladığı nokta ile kombine etmektir. Aşağıdaki şekilde bir gerilim çentiği örneği görülmektedir. Bu gerilim dalga şeklinin oluşmasına, dc akımı sabit tutabilmek için kullanılan yüksek reaktanslı, hız ayarlı sürücü neden olmuştur. IEEE gerilim çentiğini, gerilimdeki yarım periyottan daha kısa süren düşümler olarak tarif etmektedir.



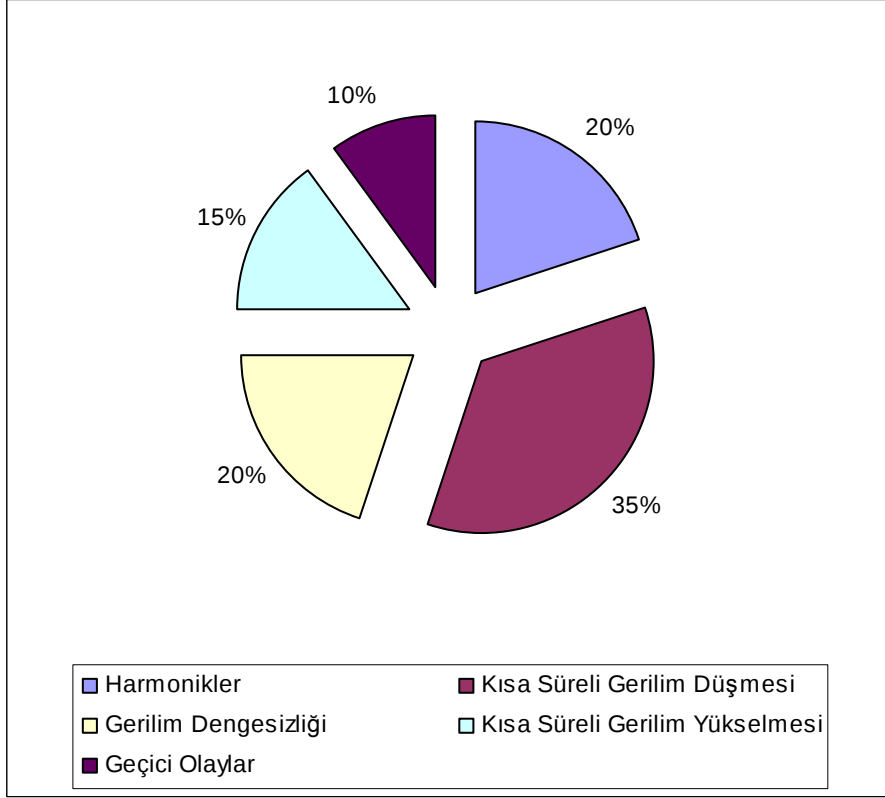
Şekil 1.15 Yüksek reaktanslı, hız ayarlı sürücünün neden olduğu çentik dalga şekli

1.8 Kesintiler

En az yarım dalga boyu süresince gerilimin sıfır değerini alması olayına denir.

Örneğin, 50 Hz frekanslı Türkiye dağıtım şebekesi için bir periyod 20 ms olduğuna göre 10 ms'den büyük kesintiler bu kapsama girmektedir. 1 dakikayı aşmayan bir zaman periyotunda kaynak geriliminin 0.1 pu nunda altına düşmesi halinde kesinti oluşur. Kesintiler güç sistemindeki hataların, donanımdaki arızaların ve kontrol sistemlerindeki bozulmaların neticesinde oluşabilir. Kesintiler, gerilimin genliğinin nominal değerinin % 10 undan daha az olduğu durumlarda ölçülür. Sistemde bir hatadan dolayı oluşan kesilmenin süresi, koruma cihazının devreye girme süresiyle belirlenir.

Çizelge 1.2 Proseslerdeki Kesintilerin Nedenleri

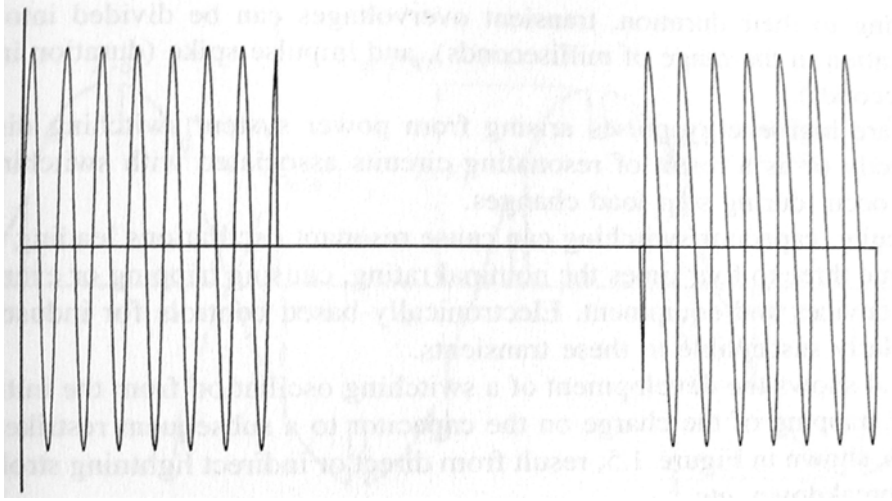


Gerilim kesintisi, besleme kaynağının terminallerindeki gerilimin sıfıra çok yakın olması durumudur. Sıfıra çok yakın olma durumu IEC için besleme geriliminin nominal gerilimin %1 inden düşük olması, IEEE için % 10 undan düşük olmasıdır. Gerilim kesintileri en çok tetiklemeli koruma cihazlarından kaynaklanır. Diğer başlıca sebepleri: herhangi bir hata olmaması durumunda koruma cihazlarının devreye girmesi, zarar görmüş iletkenler ve operatörlerin müdahalesidir. Gerilim kesintileri, genel olarak önceden ayarlanmış ve kaza durumları olarak ikiye ayrılabilir. Operatörler tarafından kontrol edilen önceden ayarlanmış kesintiler kullanıcılara tedbir alma imkânı tanır.

Gerilim kesintileri şu başlıklar altında incelenebilir.

- Otomatik anahtarlama
- Manual anahtarlama
- Hatalı kısmın devre dışı bırakılması

Bu ayrımlar için hâlihazırda çeşitli terminolojiler kullanılmaktadır. IEC, 3 dakikadan fazla süren kesintileri uzun süreli kesinti, 3 dakikadan daha kısa süren kesintileri kısa süreli kesintiler olarak isimlendirmektedir. IEEE ise anlık, geçici ve sürekli kesintiler olarak sınıflandırmaktadır.

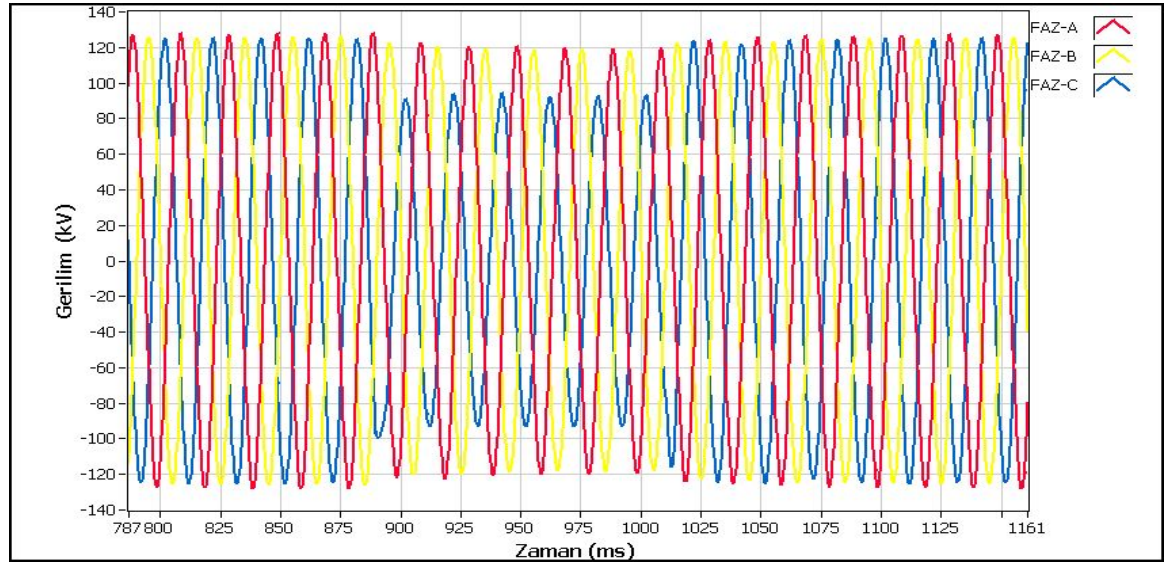


Şekil 1.16 Gerilim Kesintisi

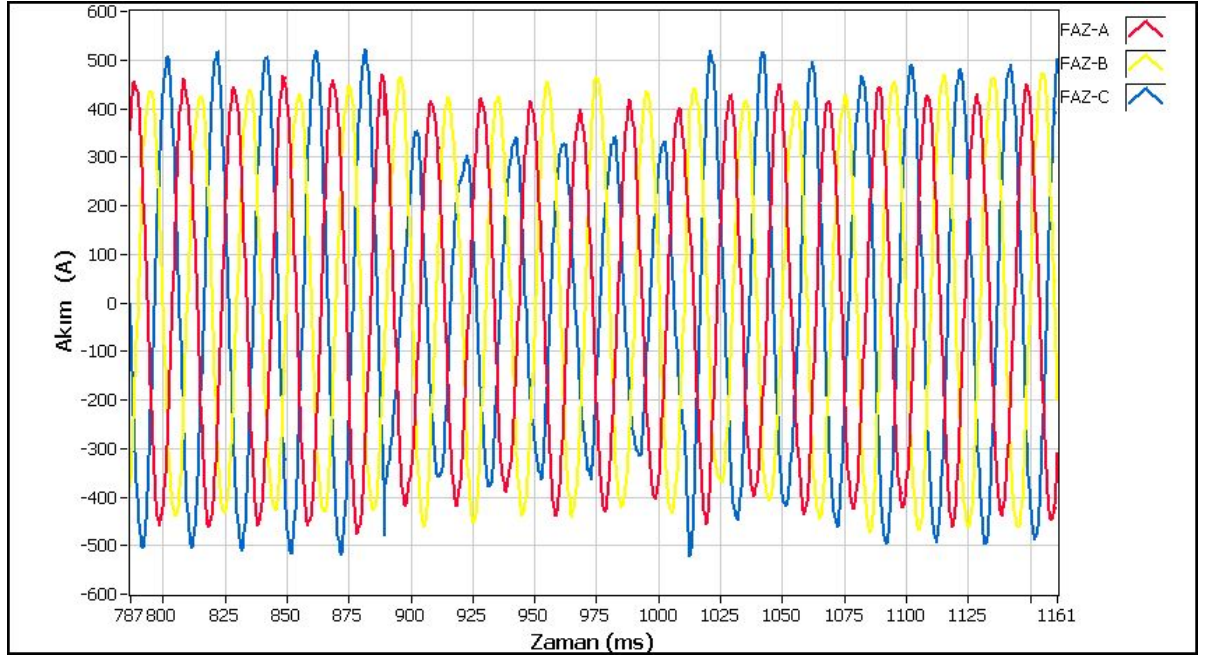
1.9 Ulusal Enerji Sistemimizde TEİAŞ Transformatör Merkezlerinde Yapılan Mobil Ölçümlerde Tespit Edilen Güç Kalitesi Olayları ile İlgili Örnekler

Bu kısımda TÜBİTAK 105G129 No'lu "Güç Kalitesi Milli Projesi" kapsamında Mobil Ölçüm Grubu tarafından TEİAŞ'a ait 380/154 kV ve 154/34,5 kV gerilimli transformatör merkezlerinde (TM) yapılan güç kalitesi ölçümlerinde belirlenen güç kalitesi olaylarından gerilim çukuru, gerilim tepesi ve gerilim dengesizliği ile ilgili olarak ulusal enerji sistemimizde ölçülerek kaydedilmiş örnek gerilim ve akım dalga şekilleri gösterilmiş ve meydana gelen olaylarla ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

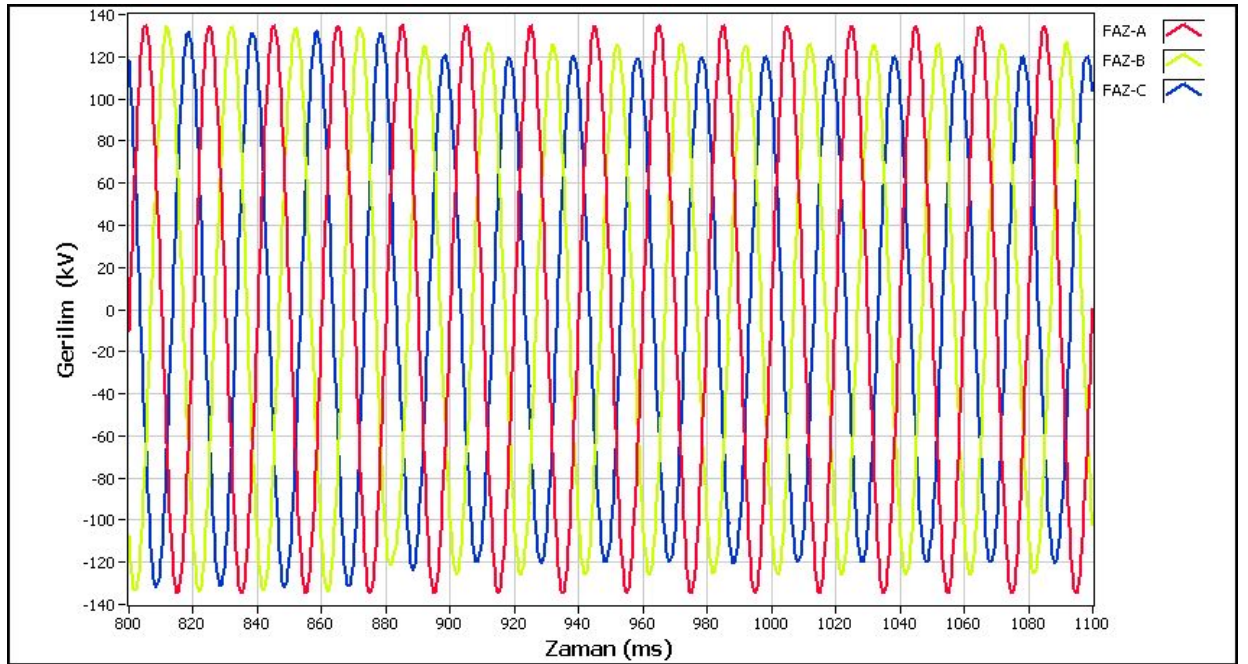
Şekil 1.17 'de TEİAŞ Çolakoğlu Transformatör Merkezi'nde yapılan ölçümlerde 154/34.5 kV gerilimli Trafo-M'in primer tarafında meydana gelen gerilim dengesizliği ve Şekil 1.18 'de bu gerilim dengesizliği olduğu anda transformatörün primerine ait faz akımlarının dalga şekli gösterilmiştir. C-fazı geriliminin genliği azaldığı anda C-fazı akımının da genliğinin azalması gerilim dengesizliği olayının transformatörün yüklerinden kaynaklanmadığı şebekedeki diğer yüklerden kaynaklandığını göstermektedir. (Bu olayda C-fazı gerilimi bakımından bir gerilim çukuru da oluşmaktadır.)



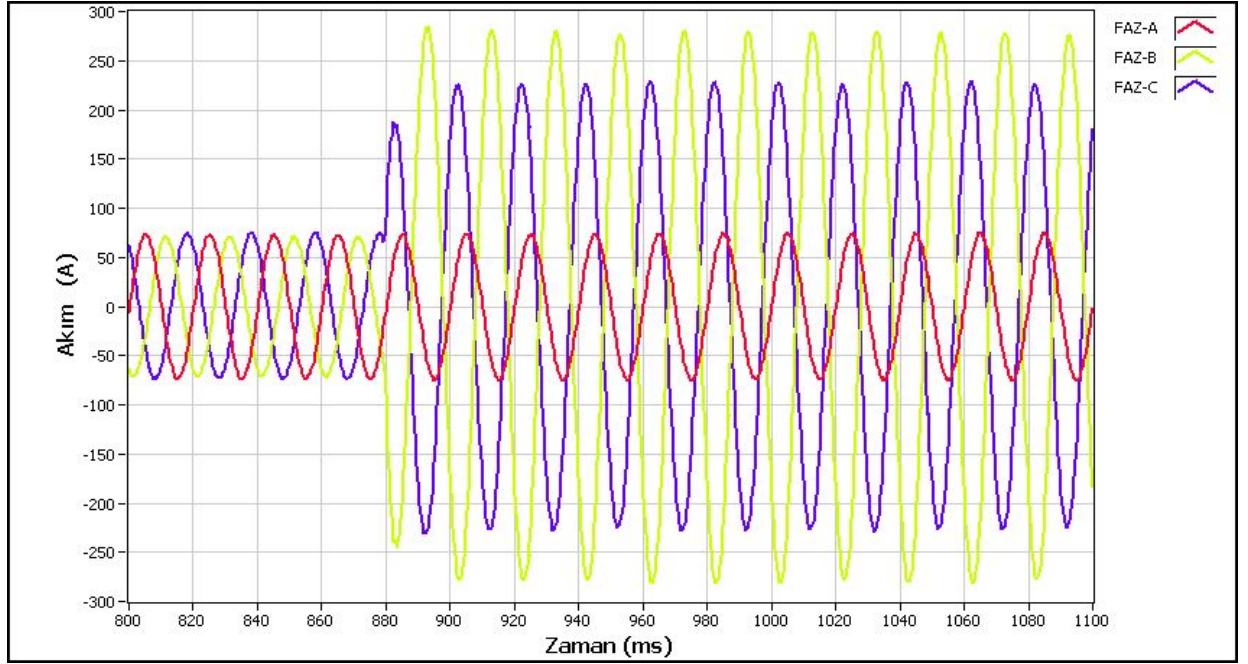
Şekil 1.17 TEİAŞ Çolakoğlu TM, 154/34.5 kV Trafo-M primeri, Gerilim Dengesizliği (Voltage Unbalance) başlangıç tarihi: 24.07.2007 saat: 05:22:59 olay süresi: 640 ms



Şekil 1.18 Şekil 1.17 'deki gerilim dengesizliği olayı süresince faz akımlarının değişimi



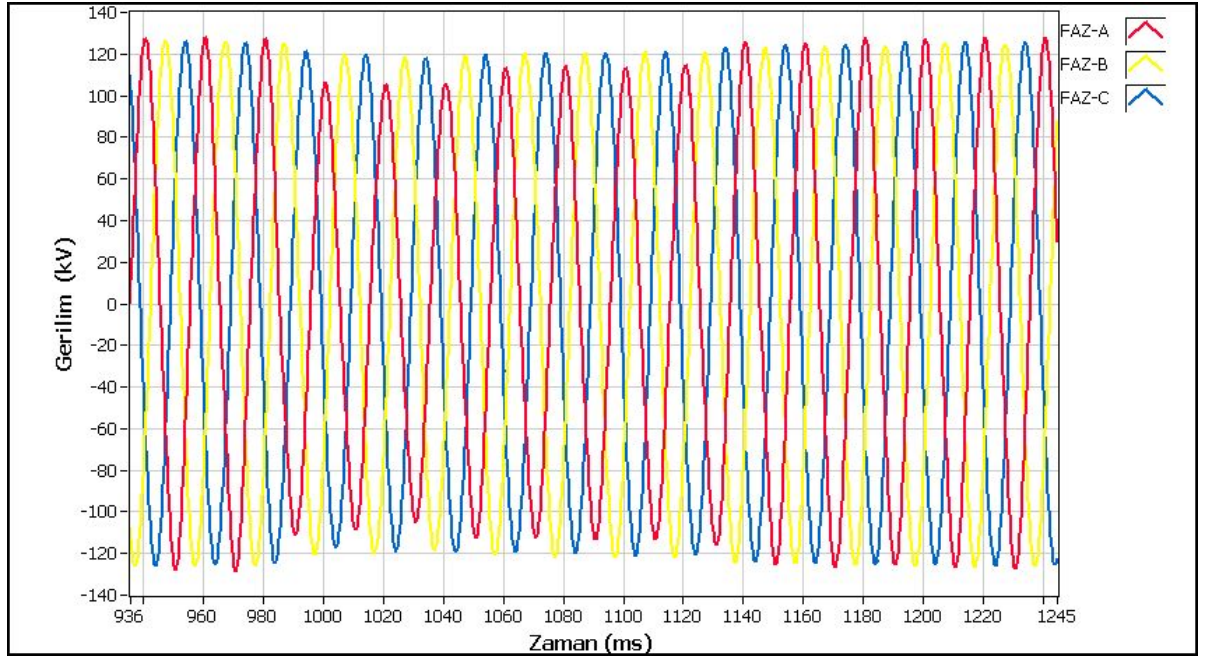
Şekil 1.19. TEİAŞ Hınıs TM. 154/34,5 kV Trafo B Primeri , Gerilim Dengesizliği (Voltage Unbalance) başlangıç tarihi: 02.03.2008 saat: 09:08:05 olay süresi: 400 ms



Şekil 1.20 Şekil 1.19'daki gerilim dengesizliği olayı süresince faz akımlarının değişimi

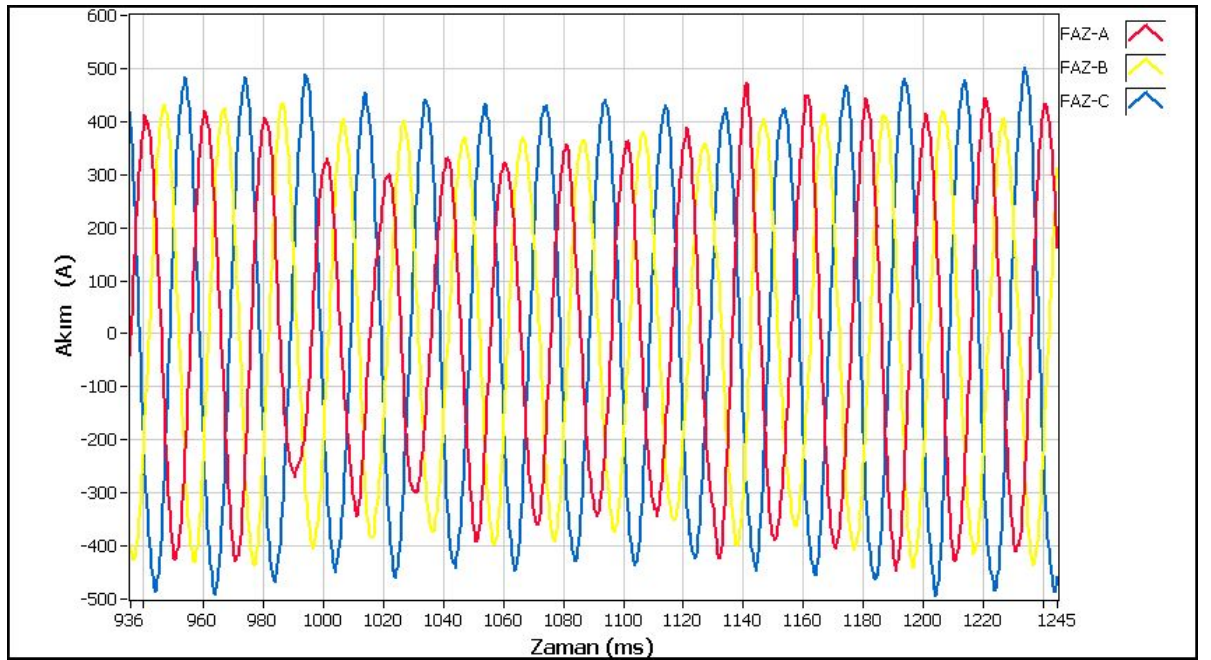
Şekil 1.19'da TEİAŞ Hınıs Transformatör Merkezi'nde yapılan ölçümlerde 154/34.5 kV gerilimli Trafo-B'nin primer tarafında meydana gelen gerilim dengesizliği ve Şekil 1.20 'de bu gerilim dengesizliği olduğu anda transformatörün primerine ait faz akımlarının dalga şekli gösterilmiştir.

Şekil 1.17 'de gösterilen Çolakoğlu TM'de oluşan gerilim dengesizliğinden farklı olarak bu olayda B-fazı ve C-fazı geriliminin genliği azaldığı anda B-fazı ve C-fazı akımının genliğinin anormal olarak artması gerilim dengesizliği olayında transformatörün yüklerinin dengesiz olmasının etkili olduğunu göstermektedir.



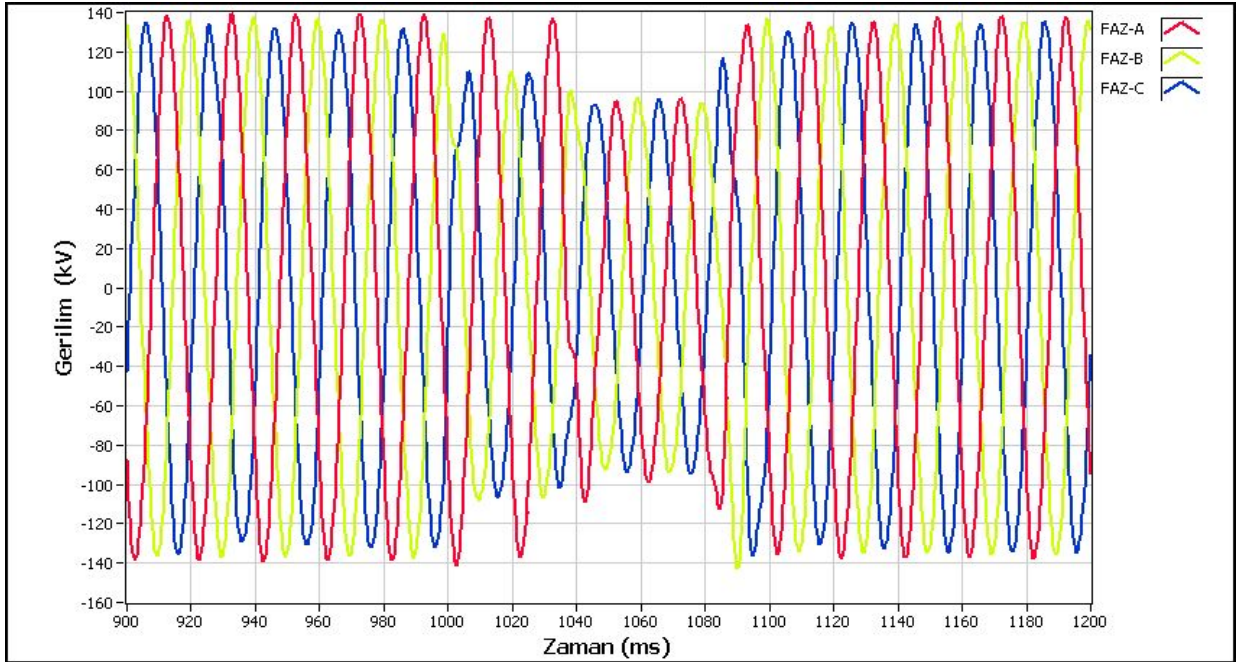
Şekil 1.21 TEİAŞ Çolakoğlu TM, 154/34.5 kV Trafo-M primeri, Gerilim Çukuru (Voltage Sag) başlangıç barihi: 24.07.2007 saat: 03:46:27 olay süresi: 416 ms

Şekil 1.21’de TEİAŞ Çolakoğlu Transformatör Merkezi’nde yapılan ölçümlerde 154/34.5 kV gerilimli Trafo-M’in primer tarafında meydana gelen gerilim çukuru ve Şekil 1.22’de bu gerilim çukuru oluştuğu anda transformatörün primerine ait faz akımlarının dalga şekli gösterilmiştir.

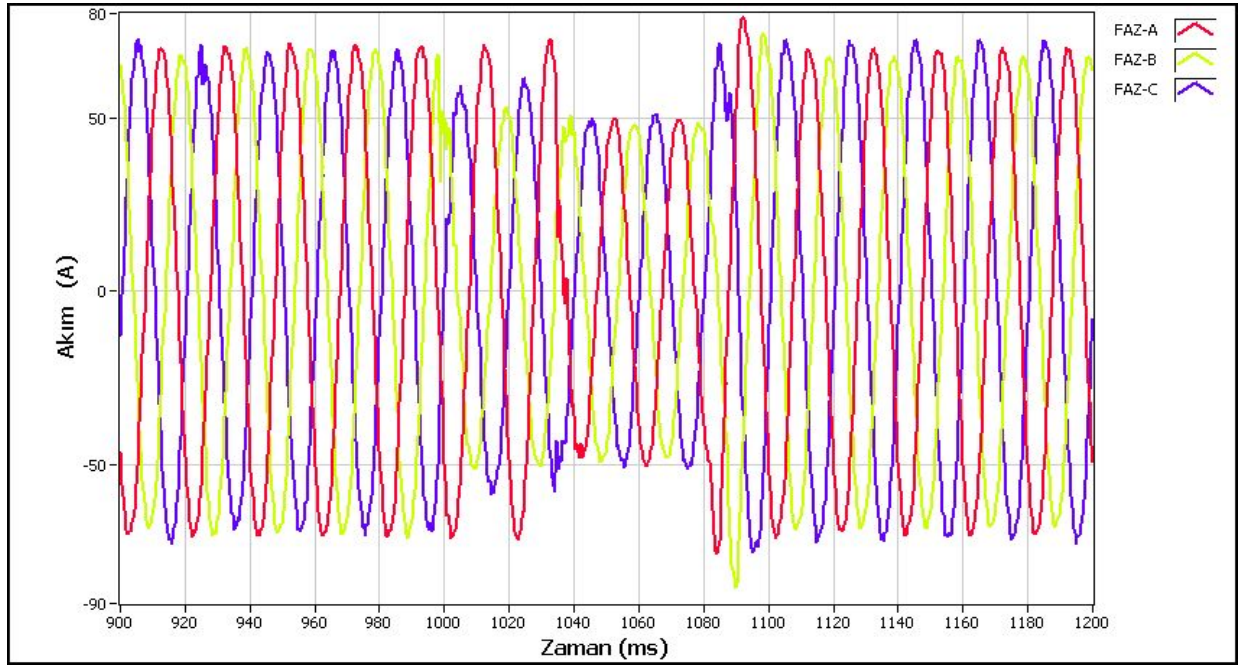


Şekil 1.22 Şekil 1.21’deki gerilim çukuru olayı süresince faz akımlarının değişim

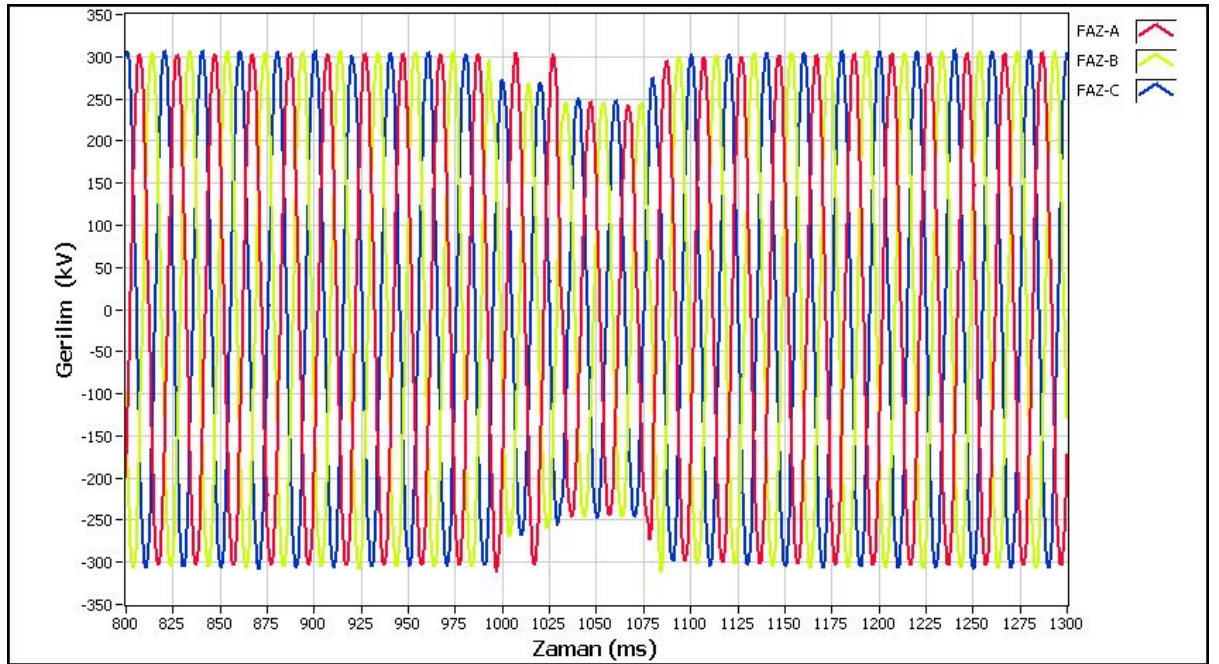
Şekil 1.21’de görüldüğü gibi gerilim çukuru özellikle A-fazında meydana gelmiştir. Şekil 1.22’deki faz akımları incelendiğinde A-fazı akımının gerilim çukuru oluştuğu anda azaldığı görülmektedir. Bu durumda gerilim çukurunun, ölçümün yapıldığı transformatörün ani yük artışından değil şebekedeki diğer yüklerdeki artıştan kaynaklandığı tespit edilmektedir. Eğer gerilim çukuru transformatörün yükünden kaynaklansaydı yük akımlarında ani artış olması beklenirdi. Şekil 1.23 ve Şekil 1.24’de gösterilen TEİAŞ Hınıs transformatör merkezinin, 154/34,5 kV Trafo-B’nin primer tarafında meydana gelen gerilim çukuru olayında da aynı durumun ortaya çıktığı görülmektedir.



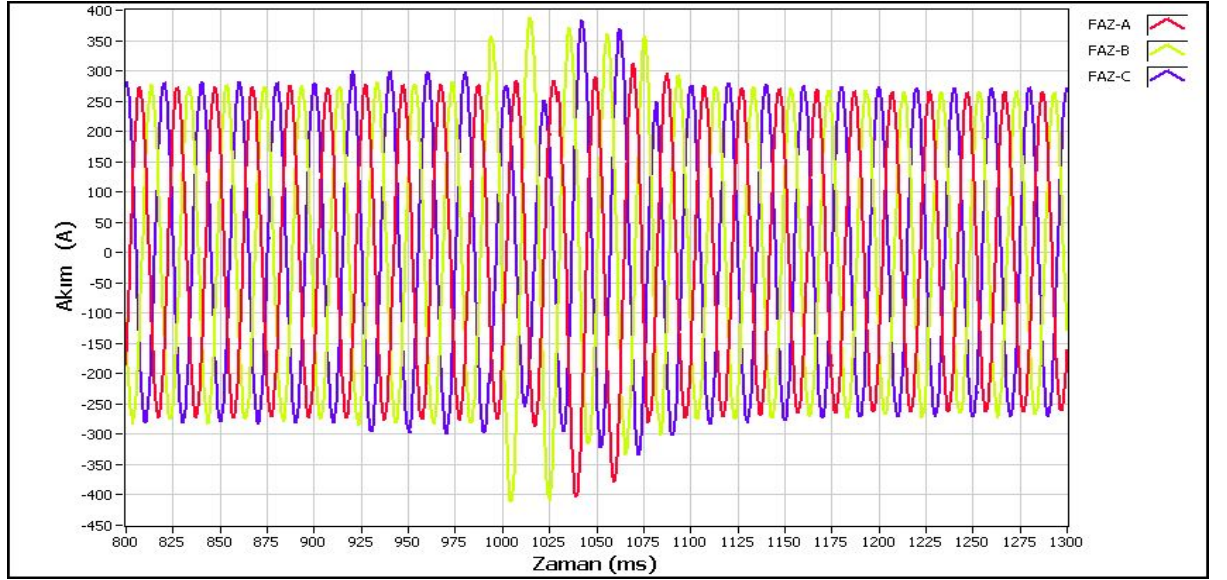
Şekil 1.23 TEİAŞ Hınıs TM, 154/34,5 kV Trafo B primeri , Gerilim Çukuru (Voltage Sag) başlangıç tarihi: 28.02.2008 saat: 11:49:00 olay süresi: 100 ms



Şekil 1.24 Şekil 1.23'deki gerilim çukuru olayı süresince faz akımlarının değişimi

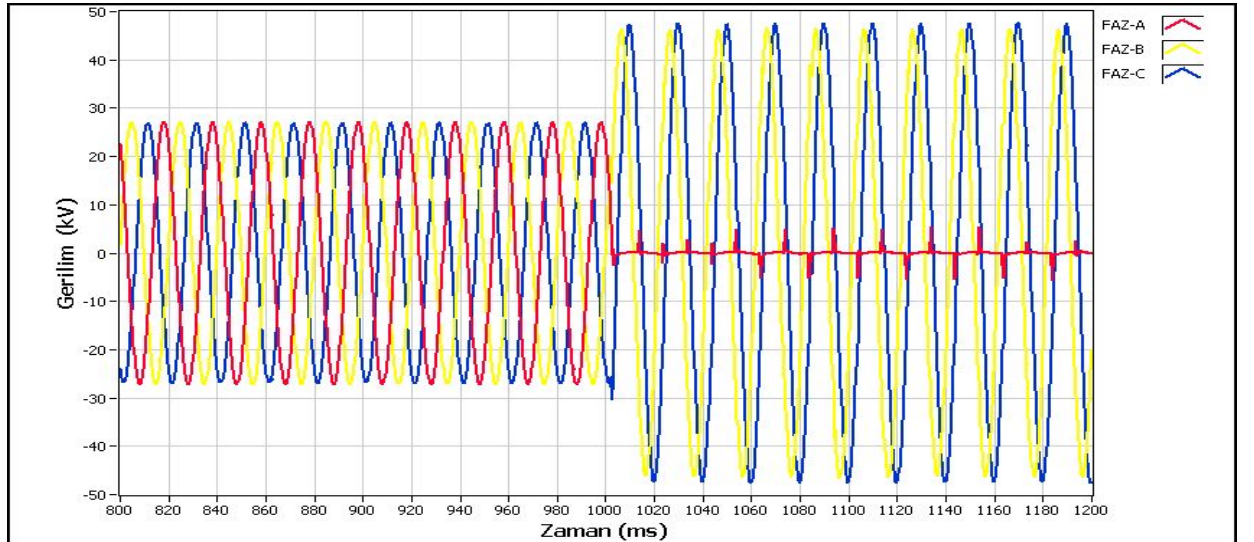


Şekil 1.25 TEİAŞ Erzurum-3 TM, 380/154 kV Ototransformatör-4 380 kV giriş tarafı Gerilim Çukuru (Voltage Sag) başlangıç tarihi: 28.02.2008 saat: 11:49:37 olay süresi:90 ms

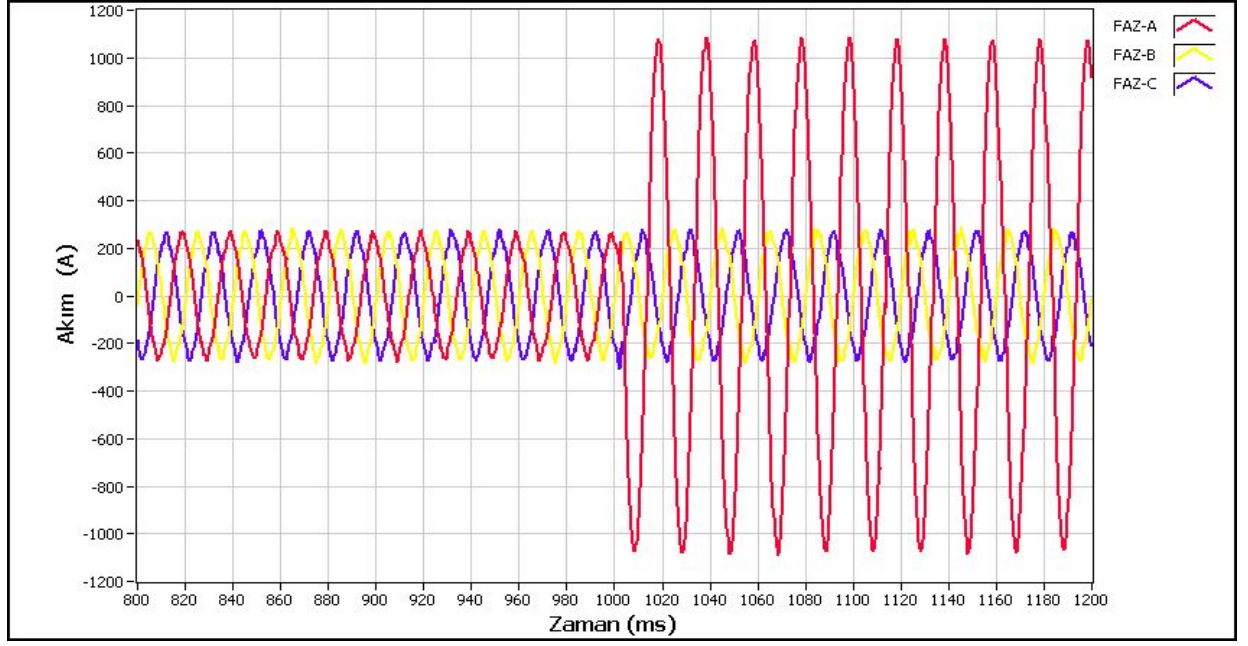


Şekil 1.26 Şekil 1.25’deki gerilim çukuru olayı süresince faz akımlarının değişimi

Şekil 1.25’de TEİAŞ Erzurum-3 transformatör merkezi, 380/154 kV Ototransformatör-4, 380 kV giriş tarafında meydana gelen gerilim çukuru olayı ve Şekil 1.26’da gerilim çukuru olduğu andaki faz akımlarının dalga şekli gösterilmiştir. B-fazı ve C-fazı geriliminin genliğinin ani olarak azaldığı anda B-fazı ve C-fazı akımının genliğinin anormal olarak artması gerilim çukuru olayında transformatörün yüklerindeki ani artışın etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.27 TEİAŞ Davutpaşa TM 154/34,5 kV Trafo-C Sekonderi , Gerilim Çukuru (Voltage Sag) ve Gerilim Tepesi (Voltage Swell) başlangıç tarihi: 01.02.2007 saat: 01:27:25 olay süresi: 1220 ms



Şekil 1.28 Şekil 1.27’deki gerilim çukuru olayı süresince faz akımlarının değişimi

Şekil 1.27’de TEİAŞ Davutpaşa transformatör merkezinde 154/34,5 kv gerilimli Trafo-C’nin 34,5 kv gerilimli sekonder tarafında meydana gelen gerilim çukuru ve gerilim tepesi olayı ve Şekil 1.28’de gerilim çukuru olduğu andaki faz akımlarının dalga şekli gösterilmiştir. Buradaki gerilim çukuru olayı daha önce gösterilen gerilim çukuru olaylarından farklıdır. Olay meydana geldiği anda A-fazı akımı çok yüksek değerler almış, muhtemelen transformatörün 34.5 kV gerilimli sekonder tarafından beslenen fiderlerden birinin A-fazında faz-toprak kısa devresi meydana gelmiştir. Olay sebebiyle A-fazı gerilimi çok düşmüş ve bir gerilim çukuru oluşmuştur. Aynı anda faz-toprak kısa devresi sebebiyle B ve C fazı gerilimleri faz-nötr gerilimi seviyesinden faz-faz gerilimi seviyesine yükselmişler böylece sistemde A-fazında gerilim çukuru olduğu anda B ve C fazlarında gerilim tepesi oluşmuştur.

2. HARMONİKLER

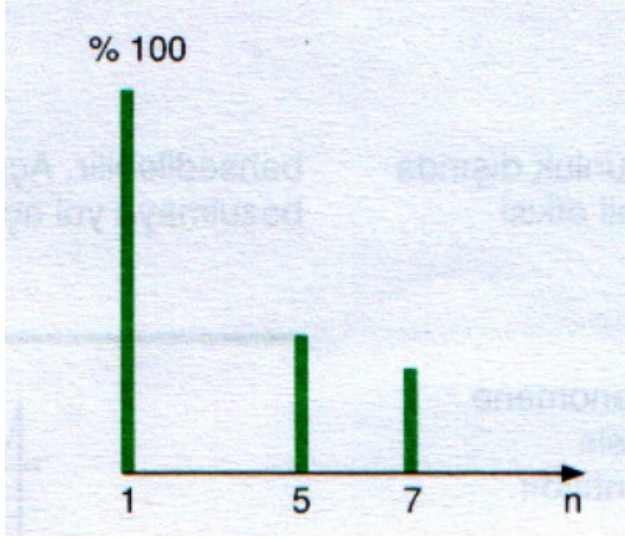
2.1 Harmoniklerin Tanımı

Harmonik; frekansı, temel frekansın tam katı olan ve sinüs biçiminde değişen dalgadır. Genel olarak bilindiği gibi, sinüs şeklinde olmayan herhangi periyodik bir fonksiyon, fourier serisine göre, sonsuz sayıda harmoniklerin toplamına eşittir. Bozulmuş periyodik bir dalga şeklinin harmoniği Fourier serisi ile açıklanabilir.

Elektrik şebekesinde üretilen gerilimin sinüsoidal olduğu kabul edilmektedir. Buna karşılık iletim ve dağıtım hattı ile yükler, gerilimin dalga şeklinin saf sinüs şeklinden sapmasına yol açabilir. Gerilim dalga şeklindeki bozulmanın en önemli nedeni, uç gerilimi ve akımı arasındaki bağıntısı lineer olmayan yüklerdir. Bu tür nonlinear yükler, 50 Hz. temel frekanslı aktif ve reaktif güç tüketen, harmonik frekanslı akımlar üreten tüketiciler olarak kabul edilirler. Bu tüketicilerin ürettiği harmonik frekanslı akımlar devrelerini şebeke ve civar tüketiciler üzerinden kapatarak harmonik frekanslı gerilimler meydana getirirler. Bu gerilimler ise başlangıçta saf sinüs kabul edilen gerilimin dalga şeklini bozarlar. Bu bozulma, diğer bir deyişle şebekenin değişik noktalarındaki gerilim harmoniklerinin değeri; yükün meydana getirdiği harmonik akımının değerine civar tüketicilerin ve şebekenin parametrelerine doğrudan doğruya bağlıdır.

Güç şebekesindeki harmoniklerin meydana getirdiği sorunlar uzun yıllardır bilinmektedir. Bu sorunlar senkron ve asenkron makinalardaki ısınma ve salınımlar, telefon hatlarındaki karışmalar ve güç kondansatörlerinin arızalanması olarak biliniyordu. Günümüzde ise, gelişen güç elektroniği teknolojisi, harmoniklerin artmasına yol açmıştır. Sanayide kullanılan ve harmonik üreten yeni aygıtlara ek olarak elektrik makinalarının ve cihazlarının tasarım ilkelerindeki değişiklikler de şebekedeki harmoniklerin artmasına yol açmıştır.

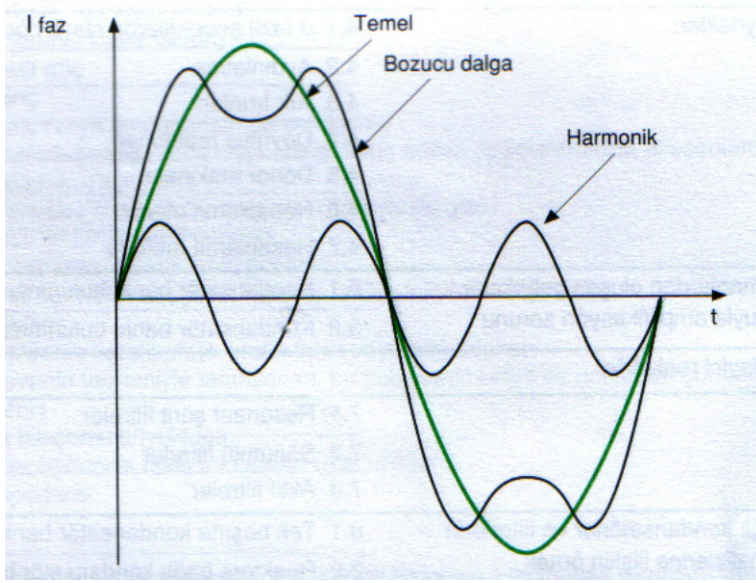
Elektrikli aýgıtlara en büyük zararı, değeri 5 kHz den küçük olan harmoniklerin verdiği kabul edilmektedir. Geçmişte, şebekede harmonik meydana getiren etkenler ve bunların meydana getirdiği harmoniklerin mertebeleri küçüktü. Bugün ise, güç elektroniğinde meydana gelen gelişmeler, harmoniklerin şebekede ve tüketicilerde meydana getirdikleri zararların artık kabul edilemez boyutlara vardığını göstermektedir.



Şekil 2.1 Harmonik Spektrumu

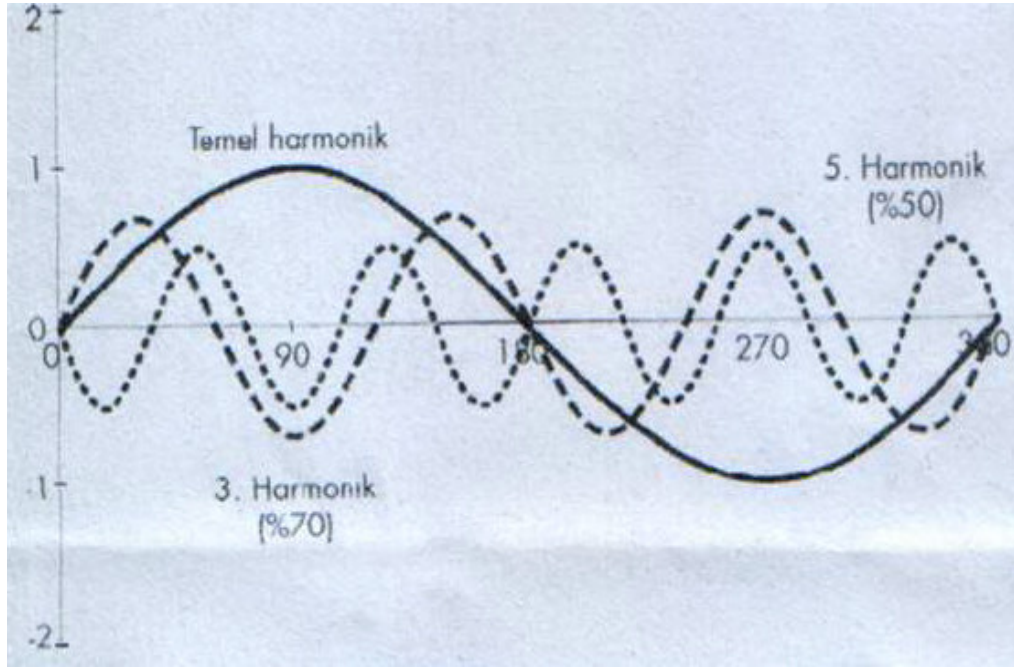
2.2 Harmonik Kaynakları

Elektrik güç sistemlerinde gerilimin ve akımın dalga şeklinden sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, harmonik kaynağı olarak nitelendirilen ve akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Arızasız bir işletmede harmonikler çeşitli nedenlerle ortaya çıkarlar. Bunların başında manyetik ve elektrik devrelerindeki doğrusalsızlık gelir.



Şekil 2.2 Bozucu Bir Dalga Biçimi

Manyetik devreler de doyma, elektrik devrelerinde ark ve güç elektroniğinde sinüs eğrisinin kesilmesi, doğrusal olmayan olaylardır. Örneğin generatörler, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren cihazlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirler. Ark fırınları ve kaynak makinaları gibi, normal işletmeleri gereği bir arkın oluşması sonucunda da harmonikler üretirler. Güç elektroniği kontrollü sistemler sinüsoidal akım dalgasını keserlerken yine harmonikler oluşurlar. Kısaca karakteristiği doğrusal olmayan tüketiciler 50 Hz frekansın tamsayı katı frekanslı akımlar üretirler. Bunlar devrelerini yakınlarında bulunan tüketiciler üzerinden kapatılırlar ve harmonik frekanslı gerilimlerin meydana gelmesine neden olurlar. Böylece başlangıçta saf sinüsoidal olan gerilim dalga şekilleri bozulur. Normal çalışma koşullarının dışında yüksek gerilim hatlarındaki korona olayları, iki fazlı kısa devreler ve arklı kısa devreler de harmoniklerin meydana gelmesine neden olur.



Şekil 2.3 Temel Bileşen ve 3. ile 5. Harmonik Bileşenleri

Lineersizlik yüksek mertebeli, mesela karesel terimlerin meydana gelmesine sebep olur; bu da kendisini çeşitli şekillerde hissettirir:

- Karesel bir terim, bir doğru akım bileşeninin meydana gelmesine yol açar.
- Akımın ve gerilimin temel harmoniklerinin tepe değerleri birbirleri ile orantılı olmazlar.
- Her temel harmoniğin tepe değeri üzerine başka harmonikler tesir ederler.
- Tam sayılı harmonikler meydana gelirler

Bu açıklamadan anlaşılacağı üzere, işletme araçlarının elektriksel büyüklüklerinin hesaplanması esnasında karakteristiklerin lineer olmaması ayrıca göz önünde bulundurulmalıdır. Harmonik üretimi bakımından çok değişik imkânlarla karşılaşılır. En belirgin sınır haller şunlardır:

- Harmoniksiz gerilim ile işletme: İşletme araçlarının karakteristikleri lineer değilse harmonikli akım meydana gelir. Bu akımın, iç empedansı çok büyük olan bir akım kaynağında üretildiği kabul olunur.
- Harmoniksiz akım ile işletme: İşletme araçlarının karakteristiğinin lineer olmaması sebebi ile harmonikli bir gerilim meydana gelir. Bu gerilimin, iç empedansı ihmal edilebilecek kadar küçük olan bir gerilim kaynağından üretildiği kabul edilir.
- Bazı hallerde akım harmonikli ise, bunun tesiri ile gerilim de harmonik kazanır. Aksi olarak, gerilim harmonikli ise, bu, akımın da harmonikli olmasını gerektirir.

Bunların en önemlisi ve pratikte en çok karşılaşılan durum, birinci hale tekabül eder; yani şebekeden tesise uygulanan faz arası gerilim sinüs şeklinde olduğu halde özellikle akım ve bu arada faz gerilimi harmonikli olurlar. Başlıca harmonik kaynakları şunlardır

- Elektrik makinalarındaki diş ve olukların meydana getirdiği harmonikler,
- Çıkık kutuplu senkron makinalarda hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler,
- Senkron makinalarda ani yük değişimlerinin meydana getirdiği manyetik akı dalga şeklindeki bozulmalar,
- Senkron makinaların hava aralığı döner alanın harmonikleri,
- Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları,
- Şebekedeki nonlineer yükler. Doğrultucular, eviriciler, kaynak makinaları, ark fırınları, gerilim regülâtörleri, frekans çeviriciler vs.

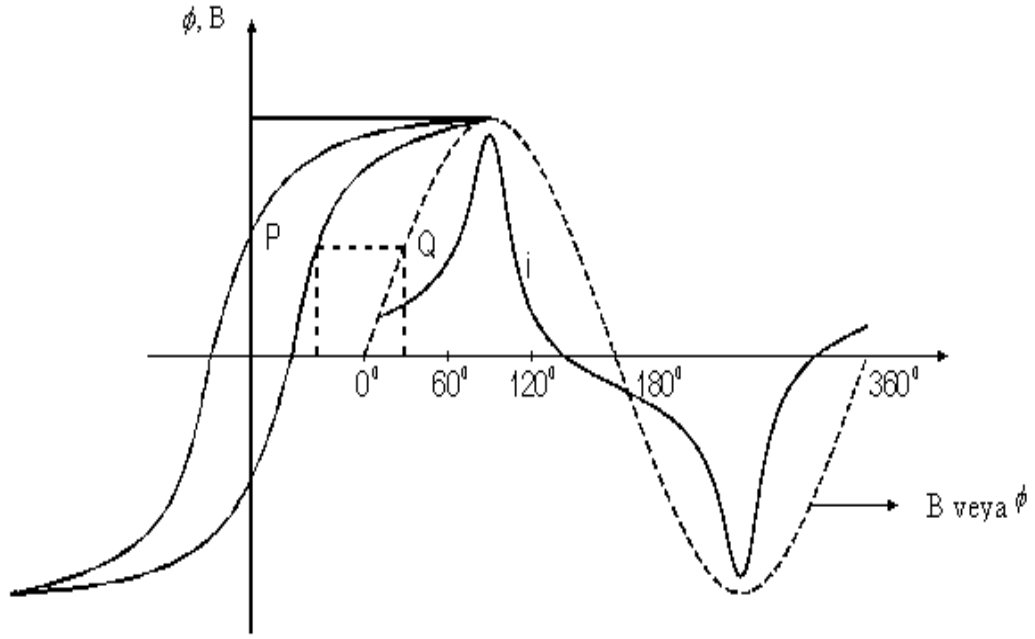
- Enerji tasarrufu amacı ile kullanılan aygıtlar ve uygulanan yöntemler,
- Motor hız kontrol düzenleri, özellikle elektrikli demiryolu tesisatı,
- Doğru akım ile enerji nakli,
- Yeni enerji kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi üreten tesislerin
- Statik VAr kompanzatörleri,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Direkt frekans çeviricisi ile beslenen momenti büyük hızı küçük motorlar
- Endüstriyel ısıtma amacı ile fırıncılarca "integral cyle" kontrol tekniğinin kullanılması,
- Olasılıkla elektrikli taşıtların yaygınlaşması ve bunların akü şarj devrelerine etkileri.

2.2.1 Transformatörler

Transformatörün mıknatıslanma eğrisinin lineer olmaması, demir çekirdeğin doymaya girmesi nedeniyle mıknatıslanma akımı nonsinusoidal bir akım olur ve harmonik bileşenleri içerir. Enerji sistemine bağlanan en önemli elemanlardan biri olan transformatörler harmonikler neden olurlar. Transformatörlerin mıknatıslanma özelliğinden kaynaklanan harmonik bileşenler transformatörün bağlantı grubuna, yıldız noktasının topraklanıp topraklanmamasına göre değişmektedir.

Transformatörlerin yük durumuna görede harmonik genliklerinin değişmesi söz konusu olmaktadır. Sürekli enerji kaynağına bağlı bulunan bu elemanlar harmonik kaynağı olarak sistemde harmonik akımı dolaştırarak harmonik bozulmaya yol açarlar.

Üç fazlı transformatörler şebekeden sinüs şeklinde bir gerilim ile beslendiklerinde, şebekeden bir mıknatıslanma akımı çekerler. Demir çekirdeğin manyetik karakteristiği lineer olmadığından, bu mıknatıslanma akımı artık sinüsoidal değildir. Şekil 2,4’de sinüsoidal şebeke gerilimi, mıknatıslanma karakteristiği ve mıknatıslanma akımı gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Transformator mıknatıslanması (Histerezis dahil)
a) Mıknatıslanma eğrisi b) Akı ve mıknatıslanma akımı dalga şekilleri

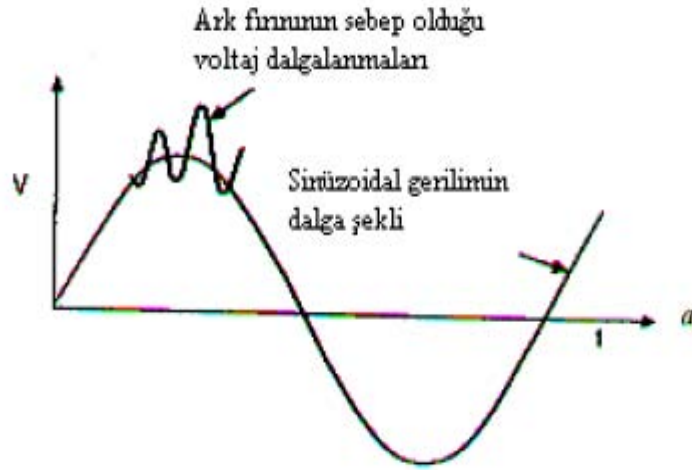
Doyma arttıkça harmoniklerin modülleri de büyür. Harmonik akımları transformatorün primer reaktansı, hattın reaktansı ve generatörün kaçak reaktansı üzerinden geçtiğinden, bunlar üzerinde harmonikli gerilim düşümleri meydana gelir. Bu yüzden generatörde üretilen kutup tekerleği gerilimi sinüs şeklinde olduğu halde, generatör uçlarındaki endüvi geriliminin ve şebeke geriliminin şekli bozulur. Başlangıçta tranformatörün sinüsoidal bir gerilimle beslendiği yolunda yapılan kabul artık gerçekleşemez. Mıknatıslanma akımı ayrıca bundan da etkilenir.

Mıknatıslanma akımının harmoniklerin tepe değerleri, temel mıknatıslanma akımının tepe değerinden bir hayli küçüktür. Esasen transformatorlerin mıknatıslanma akımları da, nominal akımların %1 - %10'u kadardır. Buna rağmen seri bağlı generatör, hat ve transformator reaktansları frekansla orantılı olarak arttıklarından, düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları reaktif gerilim düşümleri büyük değerler alırlar.

Bugün soğuk haddelenmiş sac kullanarak transformatörlerin ve reaktans bobinlerinin mıknatıslama akımlarında yüksek harmonikler çok azaltıldıklarından yüksek harmonik üreticisi olarak transformatörler daha az önem taşımaktadırlar.

2.2.2 Ark Fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biri olarak önemli bir yer tutar. Bunlar yüksek gerilim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Ark fırınları elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması yüzünden harmonik üretirler.



Şekil 2.5 İdeal gerilim dalga şekline etki eden voltaj dalgalanması

Ark olayının başlamasının ardından ark gerilimi azalırken sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırılan ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterirler. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarında rastgele değişmesine sebep olduğu için ark fırının modellenmesi oldukça zordur. Ayrıca ark olayında akım ve gerilim, ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir.

Ark fırınlarıyla ilgili genel bir harmonik spektrumu vermek mümkün değildir. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalardan farklı sonuçlar elde edilmiştir. Ark fırınları çift harmonikleride üretmektedir. Genellikle üçüncü harmoniğin genliği yüksektir ve filtre edilmesi gerekmektedir. Ark, akım ile gerilim arasında lineer bir bağıntının bulunmadığı fiziksel bir olaydır. Ark fırınlarının şebekeden çektikleri akımların harmoniklerini, ne efektif değer bakımından ve ne de mertebe bakımından hesap yolu ile tayin etmeye imkân yoktur. Zira arkın meydana gelişi, o anda tesir eden birçok iç ve dış fiziki faktörlere bağlıdır.

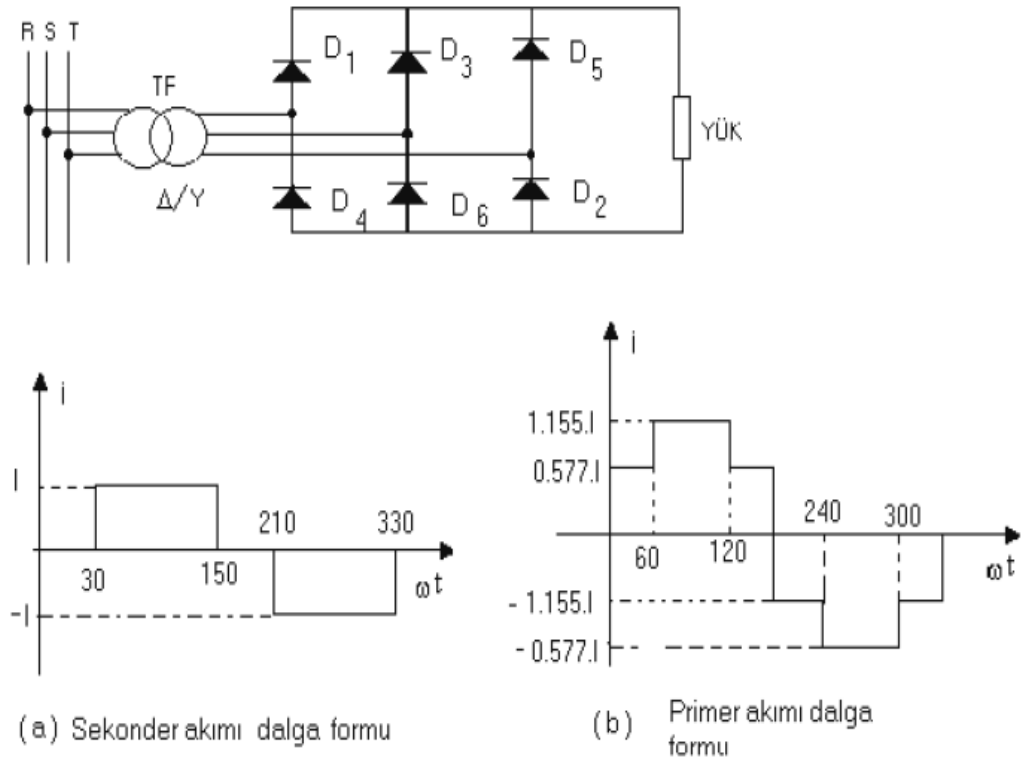
Ark akımında her mertebeden harmonik bulunabileceği gibi, bunların değerlerinin zamana bağlı olarak sabit kalmaları beklenemez. Harmonikler ark fırınının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak da değişirler. Onun için bir işletmedeki akım harmonikleri hakkında bilgi edinmek maksadı ile çekilen akım, osilogramla kaydedilebilir ve analizörle harmonikleri tesbit edilebilir. Belirli bir ark ocağı tesisi için aşağıdaki harmonik değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bir ark ocağı için harmonik akım değerleri

Harmonik Mertebesi	Genlik (%I _n /I ₁)	
	Ortalama	En Büyük
h		
2	4....9	30
3	6....10	20
4	2....6	15
5	2....10	12
6	2....3	10
7	3....6	8
9	2....5	7

2.2.3 Doğrultucular

Doğrultucular alternatif gerilimi doğru gerilime çeviren cihazlardır. Kullanılan elemanların kontrol edilebilirliğine göre kontrollü ve kontrolsüz olmak üzere ikiye ayrılırlar. Enerji sistemlerindeki önemli başlıca harmonik kaynaklarından biri, tek fazlı ve üç fazlı doğrultuculardır. Üç fazlı ideal doğrultucuların tekfazlı doğrultuculara karşı avantajı üç fazlı doğrultucuların 3 ve katı olan harmonikleri üretmemesidir. Üç fazlı doğrultucular, doğrultucu transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen a.c akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanımlanır. Dengeli durumda 3. harmonik ve diğer üçün katı mertebesindeki harmonikleri üretmez. Genellikle en yüksek genlikli harmonikler olan 3. 5. ve 7. harmonik akımlarını üretmez. Darbe sayısı arttıkça düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir.



Şekil 2.6 Doğrultucunu oluşturduğu harmonik dalga şekilleri

2.2.4 Gaz desarljlı aydınlatma elemanları ve elektronik balastlar

Bir t p içersindeki gazın desarlj prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları nonlinear akım -gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler. Bu tip lambalar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Bina ve evre aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan fluoerant lamba tesislerinde tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda sistemi etkiler. Özellikle   nc  harmonik ve bu harmoniğin katları mertebesindeki harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin inmasına sebep olurlar.

Çizelge 2.2 Manyetik balastlı fluoerant lamba harmonik spektrumu

Harmonikler (n)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
(%) $\frac{I_n}{I_1}$	100	19.9	7.4	3.2	2.4	1.8	0.8	0.4	0.1	0.2	0.1

Fluoerant lambalara bağlanan endüktif balastların da bir manyetik devreleri olması nedeniyle bu yardımcı elemanlarda harmonik üretirler. Son yıllarda manyetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlmalı güç kaynağı prensibiyle çalışan elektronik balastlarda harmonik üretmekle birlikte balast içerisine monte edilen filtre ile elektronik balastların ürettiği harmonik bileşenleri gidermek mümkündür. Çizelge 2.2’de magnetik balastlı bir fluerosan lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir.

2.2.5 Generatörler

En doğal harmonik üreticisi generatörlerdir. Fakat oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi konularda uygun konstrüktif önlemler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinüsoidal olması sağlanır. Onun için generatörler önemli bir harmonik üreticisi sayılmazlar. Donen makineler makine ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak harmonik üretirler En tabii harmonik üreticileri generetörlerdir. Alan şekline ve manyetik devrenin doymaya ulaşmasına ya da magnetik direncin değişimine bağlı olarak harmonik üretirler.

Bu nedenlerden dolayı generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Generatör dört iletkenli bir şebekeye bağlı ise, bu koşulda nötr hattı, zigzag bağlı bir bobinle oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Stator sargı adımlarının uygun seçildikten sonra kırışlenme yolu ile alan eğrisindeki 3.harmonik ile 5. ve 7. harmonikler gerilim eğrisinde tamamen ortadan kaldırılabirler. Burada dikkate değer en düşük harmonik 2. harmoniktir .

2.2.6 Güç Elektroniği Sistemleri

Enerji tesislerinde güç elektroniği gittikçe önem kazanmakta, doğrultucular ile tristörler geniş uygulama alanı bulmaktadır. Fakat inverterler, motor sürücüler, v.b gibi güç elektroniği devreleri de transformatörler kadar ve hatta daha çok harmonik ürettiklerinden, şebekede büyük sorunlara yol açmaktadırlar.

Doğrultucularda harmonik üretilmesi, akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. Sinüs şeklinde bir alternatif akım gerilimine bağlı olan bir doğrultucu, şebekeden temel harmonik akımı ile birlikte, diğer harmonik derecelerindeki akımları da çeker.

Doğrultucularda darbe sayısı ne kadar yüksek olursa, harmonik mertebeleri de o kadar yüksek ve harmonik akımlarının değerleri de o kadar küçük olur. Böylece bunların zararlı tesirleri de o nisbette azalır.

2.3 Harmoniklerin Etkileri

2.3.1 Giriş

Lineer olmayan bir yüke sıfır kaynak empedanslı gerilim uygulandığında, oluşan akımın dalga şekli gerilimin dalga şeklinden farklı olacaktır. Bu bozulmuş akım; trafo, iletkenler ve devre kesiciler gibi yalnızca yolunun üzerinde bulunan elemanları etkiler. Ancak sıfır kaynak empedansı ideal bir durumdur. Gerçekte, bozulmuş akım kaynak empedansı üzerinde bir gerilim düşümü meydana getirir bu da kaynak empedansından sonraki bütün yüklere bozulmuş bir gerilim uygulanmasına neden olur.

Akım ve gerilim harmoniklerinin güç sistemi içindeki etkilerini dört ana grup altında toplamak mümkündür;

- Paralel ve seri rezonans dolayısıyla harmonik seviyelerinin yükselmesi.
- Elektrik üretim, iletim ve tüketiminde verimin azalması.
- Elektrik tesislerinde yalıtımı zayıflattığı için tesis elemanlarının ömürlerinin azalması.
- Tesislerde arızalar meydana gelmesi.

Bu grupların altmaddeleri başlıca şu gibi problemlerdir.

- Ek kayıpların oluşması ve gerilim düşümünün artması
- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin bozılması
- Kondansatörlerin aşırı akıma maruz kalarak zarar görmeleri
- Asenkron ve senkron makinelerde aşırı ısınma ve gürültülü çalışma
- Ölçme, koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı olarak çalışmaları
- Rezonans olayları sebebiyle güç sistem elemanlarının aşırı akım veya aşırı gerilime maruz kalmaları

2.3.2 Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi

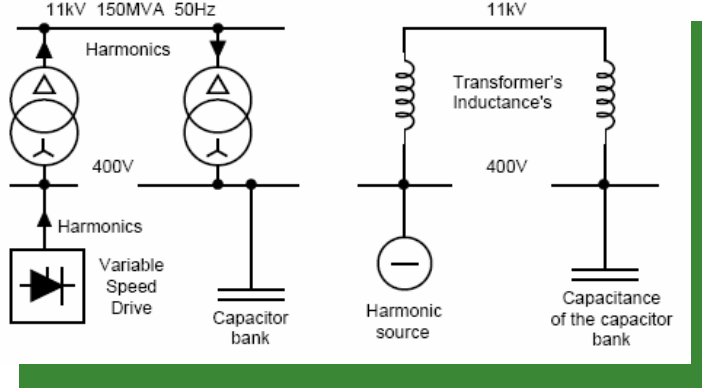
Bir iletkenin içinden geçen akımın frekans sebebiyle iletken yüzeyinde homojen olarak dağılmaması, frekans arttıkça akımın iletkenin dış yüzeyine yakın kısımlarından geçme eğiliminin artması sonucu iletken direncinin değişmesi “deri etkisi” olarak tanımlanır. Harmonik bileşenlerin mertebesi arttıkça frekans değeri de aynı oranda artmaktadır. Frekans yükseldikçe akım iletkenin dış yüzeyine yakın bölgelerden akma eğilimi gösterir. Harmoniklerin frekansının artmasıyla oluşan deri etkisi (skin-effect) sonucu iletkenin etkin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin doğru akımdaki direncinden daha büyük olan alternatif akımdaki direnci harmoniklerle daha da artış göstermektedir.

İletkenin sinüsoidal akımdaki temel bileşen omik direnç değerine (R_1) nonsinüsoidal akım akışı halinde harmoniklerden dolayı oluşan (R_H) direnci ilave olmaktadır. Böylelikle, harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri $R = R_1 + R_H$ olur.

Analizlerin çoğunda harmonik bileşenlerden ilave olan direnç (R_H) ihmal edilmekle birlikte, akademik ve daha detaylı analizlerde bunun etkisi de dahil edilmektedir. Deri etkisi nedeniyle iletken direncinin artışı, deneysel çalışmalara ve pratik uygulamalara dayanan çeşitli amprik formüllerle hesaplanır. Bunlardan biri şu denklemdir.

$$x = 1,585 \cdot 10^{-4} \zeta \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (2.1)$$

Burada R o doğru akım direncidir.



Şekil 2.7 Harmonikler nedeniyle enerji sisteminde seri rezonansın oluşumu ve buna ait eşdeğer devre

2.3.3 Harmoniklerin Kayıplara Etkisi

Elektrik güç sistem elemanlarında ısı şeklinde oluşan güç kayıpları , yük akımına bağlı kayıplar ve gerilime bağlı kayıplar olmak üzere iki kısma ayrılır. Akıma bağlı kayıplara örnek olarak hat iletkenleri üzerinde oluşan ısı kayıpları, elektrik makinalarının sargı dirençleri sebebiyle oluşan ısı kayıpları, gerilime bağlı kayıplar için elektrik makinelerinde oluşan demir kayıpları , kondansatörlerde oluşan dielektrik kayıpları örnek gösterilebilir. Akım harmoniklerinin sebep olduğu termik zorlanmaları belirlemek için kayıpların değişiminin incelenmesi gerekir. Bakır kayıpları, demir kayıpları ve dielektrik kayıpları olarak değişen kayıpların teçhizat ve şebeke üzerinde sebep olduğu termik zorlanma bu kayıpların biri veya birden fazlası ile belirlenir.

2.3.4 Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri

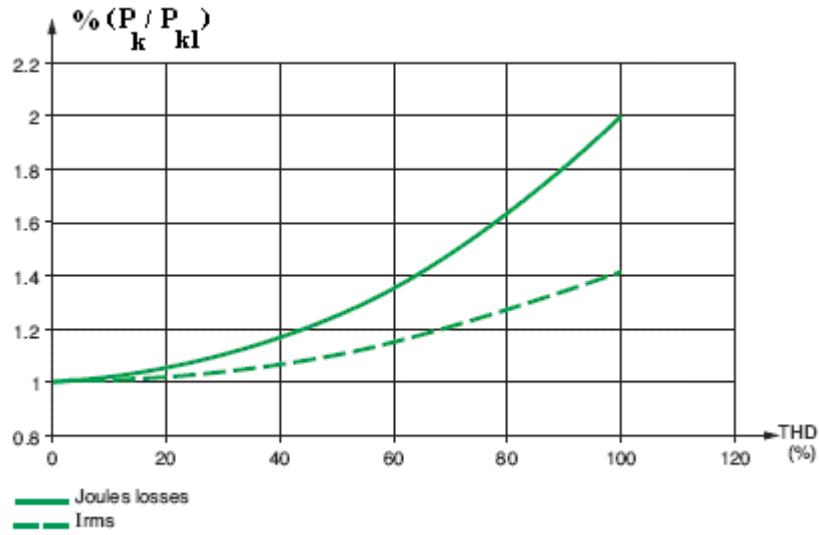
Güç sistemlerindeki en önemli eleman olan transformatörler, demir çekirdeği bulunan bobinden oluştuğu için harmoniklere yol açmaktadır. Demir çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer olmadığından, transformatör doyuma gitmekte ve harmonikler üretmektedir. Transformatörlerde akım harmonik bileşenleri ile gerilim harmonik bileşenlerinin etkileri temel olarak şu şekilde görülmektedir.

- Akım harmonikleri, kaçak akı kayıplarında ve bakır kayıplarında artışlara neden olmaktadır.
- Gerilim harmonikleri , demir kayıplarında artışlara ve yalıtım zorlanmalarına neden olmaktadır.
- Ayrıca harmonik bileşenler transformatör endüktansı ile transformatörlere bağlı bir yükün veya devre elemanının arasında rezonans meydana getirebilmektedir.

Transformatorler, sinüsoidal gerilimle çalışma altında lineer miknatislama karakteristiği bölgesinde sinüzoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatorlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir. Miknatislama akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır. Çünkü sistem yükü az olup, gerilim yükselerek aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyarımayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olur . Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3 ve 3'ün kati harmonikler arasında 360 derecenin tam katları kadar faz farkı olduğundan hepsi aynı fazdadır.

Harmonik akımları transformatorün primer reaktansı, hattın reaktansı ve generatorün kaçak reaktansı üzerinden geçerek harmonik gerilim düşümü meydana getirir; generatörde sinus şeklinde emk üretildiği halde çıkış uçlarındaki gerilim şekli bozulabilir. Bununla beraber miknatislama akımlarının şebekeye geçip geçmemesi transformatorün bağlantı grubu, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması ve transformatordeki manyetik devrenin geometrik yapısına bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 2.8'de transformatör kayıplarının akım THD değerine göre değişimleri gösterilmiştir. Bu şekilde P_{k1} sadece temel frekanstaki kaybı, P_k ise harmonikli durumdaki kaybı göstermektedir. Görüldüğü gibi akımın THD değeri % 100'e ulaştığında trafo kayıpları iki katına çıkmaktadır.



Şekil 2.8 Transformatörde kayıpların akımın THD değerine göre değişimi
(P_{k1} temel frekanstaki kayıp gücü, P_k ise harmonikli durumdaki toplam kayıp)

Aynı zamanda harmonik üreticisi de olan transformatörler harmoniklerden iki şekilde etkilenir; birincisi, harmonik akımları, bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarını artırır. İkincisi ise harmonik gerilimleri histerisiz ve girdap akımlarını artırarak kayıpları büyütür ve yalıtımı zorlar. Bu kayıp artışları transformatörde ek ısınma olarak görülür. Bu da donanımın ömrünü kısaltmaktadır. Harmonikler, sistem kapasitesi ile transformatör endüktansının belirlediği frekansta salınımına neden olabilir. Ayrıca demir çekirdeğin titreşimlerinden ve transformatör sıcaklığının değişimlerinden kaynaklanan mekanik zorlanmalar da söz konusudur

Harmonik gerilim ve akımlarının neden olduğu transformatör demir kayıpları frekans değeriyle direkt ilişkilidir. Harmonik bileşenlerin mertebesi arttıkça frekans değeri büyüdüğünden yüksek mertebeli harmonik bileşenler, düşük mertebeli harmonik bileşenlerden daha etkili olmaktadır. Harmonikler sebebiyle transformatör üzerinde oluşan tüm bu olumsuz etkiler transformatörün aşırı ısınmasına, yüklenebileceği güç değerinin nominal gücünün altına inmesine neden olmaktadır. Daha öncede açıklandığı gibi bu nedenle transformatörler için K-faktörü tanımlanmış, K-faktörlü transformatörlerin kullanılması önerilmiştir.

2.3.5 Harmoniklerin Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkileri

Harmonik bileşenlerin özellikle yüksek mertebeli harmonik akım ve gerilimleri sonucu sistemi rezonansa sokması durumunda ölçü aletlerini olumsuz olarak etkilemektedir. Sayaç gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel akım bileşenlerini ölçer. Bununla birlikte, harmonik bozulmaların neden olduğu faz dengesizliği, sayaçların hatalı işletimine neden olabilir. Çalışmalar bu hataların, sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde olabileceğini göstermiştir.

Endüksiyon diskli elektrik sayaçları en yaygın şekilde kullanılan enerji ölçü aletleridir. Bu aletler akım ve gerilimin frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından ötürü hatalı olarak çalışmaktadır. Akım ve gerilimin her ikisinde dalga şeklinin değişmiş olduğu bir testte bu sayaçlar % 20 lere varan hatalara sebep olmuşlardır. Bu konuda yapılmış diğer bir deneysel çalışmada yük akımının THDi değeri % 44 iken endüksiyon diskli sayacın bağıl hatası % 10 ,THDi değeri % 161 iken aynı sayacın bağıl hatası % 35 değerine kadar çıkmıştır.Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve amperetreler harmoniklerin varolması durumunda hatalı sonuçlar vermektedir.Bu nedenle harmonik içeren sistemlerde doğru efektif değer ölçen ölçü aletleri tercih edilmelidir

2.3.6 Harmoniklerin Akım ve Gerilim Ölçen Aletlere Etkileri

Elektrik sayaçları ve aşırı akım röleleri gibi induksiyon disk aygıtları sadece temel bileşene göre çalışırlar. İndüksiyon diskte indüklenen moment, akımın ve indüklenen akımın çarpımına eşittir. Gerek akı gerekse akımın özelliklerinden dolayı rezonans nedeniyle oluşan yüksek frekans değerlerinde bunların değerleri dengesiz bir biçimde azalır. Bu da elektrik sayacının temel frekanstan daha büyük frekans değerlerinde hatalı ölçüm yapmasına neden olur. Çalışmalar bu hataların, sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde hatalar olabileceğini göstermiştir. Ayrıca harmonik bozulmaları sonucu oluşan faz dengesizlikleride bu elemanların sağlıklı çalışmalarına engel olur. Harmonik bozulma

seviyesinin % 20 den fazla olduğu durumlarda bu ölçme hataları belirgin olarak fark edilir.

Modern efektif değeri (rms) ölçen voltmetre ve ampermetrelerin dalga şeklindeki bozulmalara karşı göreceli olarak bağışıklıkları vardır. Diğer bir deyişle harmonik bozulmalarından önemli ölçüde etkilenmezler. Bu aletlerde giriş gerilimi veya akımı elektronik bir devre yardımıyla işlenir. Test sonuçları göstermektedir ki modern ampermetre ve voltmetrelerin sinüs biçiminde olmayan akım ve gerilimlerinden kaynaklanan hataları % 0.2 den daha az olmaktadır.

Etkin değeri ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve ampermetreler, şebekede harmonik bulunması durumunda hatalı sonuçlar verirler. Örneğin 45 derecelik bir ateşleme açısıyla kıyılmış bir sinüs işaretinin etkin değerini, böyle bir alet % 13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer bu alet bir ampermetre ise , aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesine neden olacaktır.

.

Endüksiyon diskli elektrik sayaçları en yaygın kullanılan enerji ölçerleridir. Bu aletler, frekans karakteristiklerinden ve lineer olmayan davranışlardan dolayı hata üretirler. Akım ve gerilimin herikisinin de değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlarda % 20 lere varan hatalar meydana gelmiştir.

Sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerin yoğun olarak bulunduğu ortamlarda endüksiyon diskli elektrik sayaçlarının kullanımından kaçınmak gerekmektedir. Çünkü hatalı ölçümler yapmak dışında 400–1000 Hz aralığındaki mekanik rezonanstan kaynaklanan arızalarda olasıdır.

2.3.7 Harmoniklerin Güç Ölçü Aletlerine Etkileri

Ölçü aletleri saf sinüsoidal akıma göre kalibre edilirler. Bu aletlere uygulanan distorsiyonlu işaretlerde hata yapma ihtimalleri yüksektir. Enerji ölçen sayaçlarda kullanılan ölçü aleti Ferraris motorudur. Bu motor elektromagnetik dizayn üzerine kurulmuştur. Rotorda (gerek hızlanma gerekse yavaşlama için) oluşan moment rotora yollanan akı ile temin edilir.

Yataklamalardan kaynaklanan sürtünme hatalarını önlemek için ayrıca bir (ikincil) akı üretimi söz konusudur. Her iki amaca dönük (moment için) akı üreten elemanlar genlik ve frekansa nazaran lineer olmayan özelliktedirler.

Harmonikli gerilim uygulanan bir sistemde, dc bileşen sebebiyle yükün çektiği güç P_{da} , 50 Hz frekanslı temel bileşen sebebiyle çektiği güç P_F , tüm harmonik bileşenler sebebiyle çektiği toplam harmonik gücü P_H ve P_T yükün çektiği toplam güç ($P_T = P_{da} + P_F + P_H$) olmak üzere harmoniklerin güç ölçü aletleri üzerindeki etkisi konusunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir: Bu sistemde 50 Hz frekanslı temel bileşene göre çalışmak üzere dizayn edilen ölçü aleti P_{da} gücünü ölçmeyecektir fakat bu gücün etkisine karşı duyarlıdır. Bu alet frekans ölçümünden kaynaklanan hatadan dolayı P_F değerini tam olarak P_H değerini ise yanlış olarak ölçecektir.

Doğru akım gücü olan P_{da} hata miktarı P_{da}/P_T oranına bağlıdır. Hatanın işareti ise güç akışının yönüne bağlıdır. Benzer olarak harmonik gücünün ölçülmesinde $K^* = P_H/P_T$ ile orantılı bir hata ortaya çıkar. K değeri ölçü aletinin frekans cevap karakteristiğine, hatanın işareti ise güç akış yönüne bağlı olarak değişir.

Doğru akım gücü, harmonik akım ve gerilimleri tek başlarına moment üretmezler. Fakat bunlar ana frekansın ürettiği güç kapasitesini azaltıcı etki yaparlar. Doğru akım çalışma akışını bozar, değiştirir, magnetik elemanların geçirgenlik artışını değiştirir. Harmonik akımlarının ürettiği akılar ikinci bir moment oluşturarak ölçümde hatalara neden olur.

Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler mükemmel bir performans göstermektedir. Test sonuçlarından, bu aletlerde, sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hataların % 0.1 den az olduğu anlaşılmaktadır. Ölçüm hatalarını azaltmak için bu wattmetreler tercih edilebilir.

2.3.8 Harmoniklerin Röleler Üzerinde Etkileri

Dalga şeklinin bozulması koruyucu rölelerin performansını etkilemektedir. Her röle harmoniklerin varlığı karşısında farklı davranmaktadır. Aynı tip rölenin farklı modelleri aynı bozulmaya farklı davrandığı gibi aynı tip ve modeldeki röleler bile değişik cevaplar verebilmektedir. Harmonikler, rölelerin, arıza koşullarında çalışmamasına ve sistemin olağan çalışma koşullarında gereksiz yere açmasına neden olabilmektedirler. Bir rölenin performansını onu test etmeden tahmin etmek güçtür

Harmonikler rölelerin çalışma karakteristiklerini bozma veya tahrip etme özelliğine sahiptir. Dijital röleler ve yazılımları, örneklenmiş data bilgisine ve sıfır geçişlerine çok duyarlıdır. Bu yüzden harmonik etkileri röleleri, hata yapmaya meyilli bir duruma sokarlar. Harmonik gerilim seviyesinin %20'den az olduğu durumlarda (yapılan testlerden) çoğunlukla olumsuz sonuç alınmamıştır. Fakat gelecekte güçlü çeviricilerin varlığı dolayısıyla bu durumun değişmesi kuvvetle muhtemel görülmektedir

Rölelerin koruma fonksiyonları çoğunlukla ana harmonik akım (veya gerilim) değeri gözetilerek veya hata oluştuğunda diğer harmoniklerin filtre edildiği kabulü ile sonuç olarak ana harmonik dışındaki harmoniklerin ihmal edildiği bir sisteme göre gerçekleştirilir. Bu kabul özellikle aşırı akım korumasında kullanılan elektromagnetik röleler için geçerlidir. Elektromekanik röleler ise yapıları gereği yüksek dereceden harmoniklere karşı daha az duyarlıdır.

Eğer hata (kısa devre) bir direnç üzerinden olmayıp metalik kısa devre ise akım ve gerilim ana harmonikleri önem kazanır. Akım transformatörlerinde meydana gelen doyma dolayısıyla akım trafosu sekonder akımında (rölenin beslediği akım) bozulma meydana gelir.

Yukarıda bahsedilen dizayn problemlerinden sistem gereksinimlerini karşılayan doğru cihaz seçimi yapılarak kaçınmak mümkündür. Özellikle dijital koruma sistemlerine sahip mesafe koruma esaslı sistemlerde, akım ve gerilim dalga şekillerinin filtre edilmesi oldukça önemlidir.

Normal sistem koşullarında koruyucu cihazların duyarsızlığı, bizlere, hata koşulları dışında güç sistemindeki harmoniklerin herhangi bir probleme sebep olmadığını ifade eder gibidir. Güç transformatörlerinde, pratikte, transformatörün devreye girmesi sırasında, mıknatıslanma devresinden kaynaklanan mıknatıslanma akımının ilk anlardaki değeri, yüksek harmonik bileşenlere sahiptir. Bu bileşen değerleri ortaya çıktığında, transformatörü koruyan sistemler devreye girerek (hatalı bir durum olmadığını belirleyerek) devre kesicisini açmasını engeller.

Güç sistemlerinin korunmasında, koruma sisteminin temel elemanı ya da beyni olarak kabul edilen koruma röleleri üzerinde nonsinusoidal büyüklüklerin etkileri, literatürde teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu konu ile ilgili yayınlanmış bazı çalışmalar vardır. Fakat bu yönde bütün koruma aletleri için kesin bir biçimde sonuçlar verebilecek yeterince çalışma yoktur. Bütün bunların yanında literatürde bulunan bilimsel çalışmalardan elde edilen sonuçlar çok kısa olarak şöyle özetlenebilir.

Akım ve gerilimlerin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenebilmektedir. Akım ve gerilim dalga şekillerinin bozulması rölelerin performansını etkilemektedir. Herbir röle harmoniklerin sistemde bulunması karşısında farklı davranış biçimi göstermektedir. Aynı tip rölelerin farklı modelleri bile aynı bozulmaya farklı tepki verdiği gibi bu durum aynı modellerde bile söz konusu olabilmektedir. Harmonikler, rölelerin arıza koşullarında çalışmamasına ya da sistemin normal çalışma koşullarında gereksiz yere açma kumandası vermesine neden olabilir.

Harmoniklerin ters zamanlı aşırı akım röleleri üzerine etkileri ile ilgili yapılan bir deneysel çalışmada induksiyon diskli ve statik aşırı akım röleleri incelenmiş, harmonik kaynağı olan nonlineer yük olarak triyak kontrollü omik yüklü bir devre kullanılmış, röleye uygulanan akım değeri ve akımın toplam harmonik bozulma değeri değiştirilerek rölenin çalışma akımı ve cevap süreleri ölçülmüştür. Ölçümler neticesinde akımın dalga şekli bozuldukça induksiyon diskli aşırı akım rölesinin cevap süresinin arttığı görülmektedir. Röle zamanında kesiciye açma kumandası vermediği için korunan tesis elemanları risk altında kalmaktadır. Ayrıca sinusoidal akım için 1 A e ayarlanan ve sinusoidal akımda mükemmel çalışan rölelerin THD oranının yüksek olması durumunda 1.9 A değerinde çalışmaya başladığı tespit edilmiştir. Bu durum

koruma rölelerinin aşırı harmonik bozulmanın olduğu sistemleri korumada yetersiz kalabileceklerini göstermiştir

Elektromanyetik rölenin aksine aynı akım-zaman karakteristiğine sahip statik aşırı akım rölesinde ise THDi değeri arttıkça rölenin cevap süresi kısalmakta, çalışma akım süresi düşmektedir. Sinusoidal akım için mükemmel çalışan bu röle ise harmonik bozulmanın yüksek olması durumunda daha düşük akım değerinde çalışmaya başladığı için sinusoidal akımdaki cevap süresinden daha kısa sürede kesiciye açma kumandası vereceği için yanlış kesici açmalarına neden olacak, selektivitenin sağlanmasında problemler oluşacaktır.

Harmonikler sebebiyle oluşan etki, rölenin tipi, çalışma prensibi, yapısı, nonlinear yükün harmonik spektrumu gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu nedenle koruma rölelerinin harmoniklere etkileri üzerine, birkaç deneyin sonucuna bakılarak bir genelleme yapılması mümkün değildir. Her koruma rölesini ayrı ayrı incelemek gerekmektedir.

2.3.9 Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri

Kapasitif reaktanslar, frekansla ters orantılı olarak azalırlar. Bu yüzden temel harmonikteki değeri X_C olan kapasitif reaktans, harmonik mertebesi h olan bir akımda kapasitif reaktansın h 'a bölünmesiyle hesaplanır. Yani akımın frekansı büyüdükçe kapasitif reaktans küçülmektedir.

Bu akım harmonikli gerilimin efektif değerine eşit sinüsoidal bir gerilim altında kondansatörün çektiği akımdan büyüktür. Onun için kondansatör tesislerinde besleme iletkeninin kesitinin, sigortaların ve anahtarların seçiminde, harmonikli akımın sinüsoidal nominal akımdan daha büyük olduğu daima göz önünde bulundurulmalıdır.

Harmonik içeren VC ve I_C efektif değerleri uygun ölçü cihazları ile ölçülebildikleri halde kondansatörün QC *gücü*, akım ile gerilimin efektif değerlerinin çarpımı ile hesaplanamaz ve ayrıca normal wattmetre ile ölçülemez.

TS 804'e göre kondansatörler, sinüs şeklinde gerilim altında ve nominal frekansla sürekli olarak nominal efektif akım değerinin 1.3 katı ile yüklenebilirler. Aynı şekilde gerilim için de $1.1 \cdot U_n$ gibi bir sınır değeri konmuştur. Şu halde sinüsoidal olmayan bir gerilim altında, yukarıda söz konusu olan akım ve gerilim şartları ile kondansatörün sürekli olarak $1.35 \cdot Q_n$ ile çalıştırılmasına müsaade edilmektedir.

Yukarıdaki sınırlamalara ilave olarak, alçak gerilimlerde güç faktörünü düzeltmek amacıyla kullanılan kompanzasyon tesislerinin kurulmasında bazı öneriler tavsiye edilir.

- a) Eğer harmonik üreten yük transformatör gücünün % 10'undan daha küçük ise kondansatörlerin şebekeye doğrudan bağlanması ilave bir distorsiyon ve seri rezonans tehlikesi oluşturmaz.
- b) Harmonik üreten yük transformatör nominal gücünün % 30'undan daha küçük ve kondansatörlerin toplam gücü transformatör gücünün % 20'sinden daha küçük ise, bu durumda da kondansatörler şebekeye doğrudan bağlanabilir.
- c) Harmonik üreten yük transformatörün nominal gücünün % 30'undan daha büyük ise, bu durumda kondansatörler kesinlikle filtre şeklinde bağlanması gerekir.

2.3.10 Elektrik Tesislerinde Harmonik Etkisi

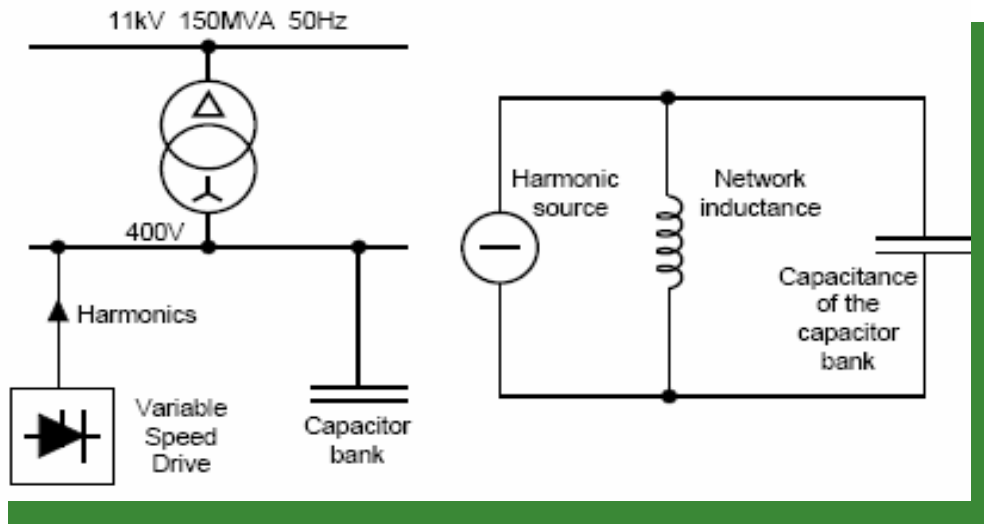
Harmonik akımlarının elektrik devreleri üzerinde iki önemli etkisi vardır. Harmonik akımları toplam akımın etkin değerini artırdığı için iletim ortamında güç kayıpları meydana gelecektir.

Harmonik akımları yüzünden enerji nakil hatlarına ilave olarak makineler ve transformatörler de ısınırlar. Ayrıca generatörlerin amortisman sargıları, bir fazlı veya iki fazlı kısa devrelerde meydana gelen harmonikleri azaltacak ve ortadan

kaldıracak şekilde etki ederken, kendileri de çok ısınırlar ve generatörlerde ilave kayıplar meydana gelmesine yol açarlar.

Harmonik akımının bir başka etkisi de devre empedansları üzerinde harmonik gerilim düşümleri oluşturmalarıdır. Yani büyük empedanslı sistemler, düşük empedanslı sistemlere göre daha büyük gerilim bozucu etkilerine sebep olmaktadır.

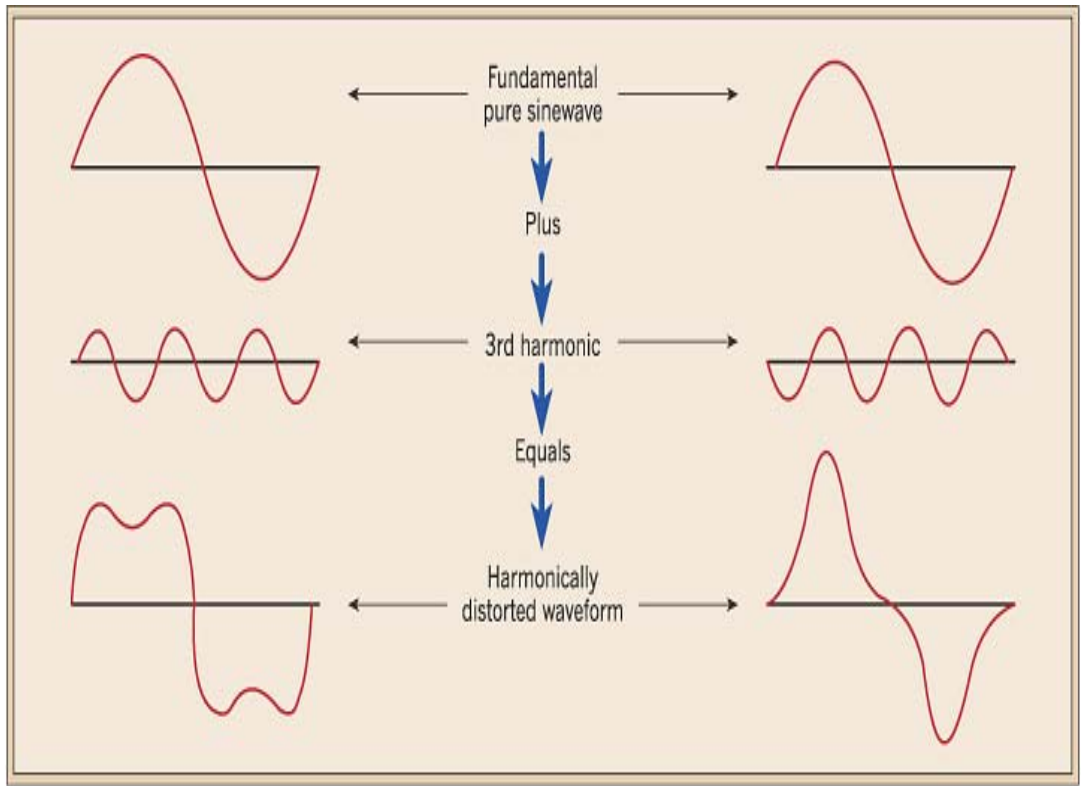
Harmonik akımlarının frekansları, normal şebeke frekansı 50 Hz'in katlarına eşit olduğundan, bu akımlar karşısında generatör, transformatör ve hat reaktansları üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri de harmonik frekansları ile orantılı olarak artar ve sonuç olarak gerilimin dalga şekli bozulur.



Şekil 2.9 Elektrik tesislerinde paralel rezonans oluşumu ve eşdeğer devresi

Mesela ark ocakları gibi olayların hızlı değiştiği yerlerde, harmonik akımlarının yol açtıkları gerilim düşümleri de zamana bağlı olarak hızlı değiştiğinden, şebeke geriliminde 2-15 Hz mertebesinde titreşimler baş gösterir (flicker olayı). Bu olay yakında bulunan tesislerdeki cihazlara ve aydınlatma cihazı kullanan tüketicilere olumsuz şekilde etki yapar.

Hata noktasından bakıldığında yüksek empedanslı, dolayısıyla düşük hata akımlı sistemlerde (ki bunlar zayıf sistemler olarak adlandırılır) harmonik akımlarının oluşturacağı gerilim düzensizlikleri, düşük empedanslı yüksek akımlı sistemlere (ki bu sistemler kuvvetli sistemler olarak adlandırılır) oranla daha çok olacaktır.



Şekil 2.10 Harmonikli gerilimin oluşumu(Temel bileşen ve üçüncü harmonik bileşeni)

Kablo ile yapılan iletim sistemlerinde ise harmonik gerilimleri, tepe değerlerine bağlı olarak, kabloda dielektrik zorlamayı artırıcı etki yaparlar. Bu yüzden kablounun ömrü azalır. Hata sayısı arttıkça onarım masrafları da artar. Sinüs şeklinde gerilim eğrisine

eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu şeklinde sivri, çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri, mesela gerilim rezonansı gibi hallerde, makine ve transformatör sargılarının izolasyonu ve kondansatörlerin dielektrik maddesi için büyük bir tehlike teşkil eder ve hatta izolasyonda delinmeye yol açabilirler. Buna karşılık mesnet, askı ve geçiş izolatörleri için bu gibi aşırı gerilimler hemen hemen hiçbir tehlike yaratmazlar. Normal frekanslı gerilim üzerine bindirilmiş olan harmonik gerilimlerinin kısa süreli, iğne şeklinde ani yükselen uçları izolatörlerde olduğu gibi yarı iletkenlerin de delinmesine sebep olurlar.

Transformatörlerde ise harmonik gerilimleri histerezis ve girdap akımlarını artırarak kayıpları büyütür ve yalıtımı zorlar. Harmonik akımları bakır kayıplarını da artırır. Bu durum özellikle çevirici transformatörlerinde önem kazanır. Zira harmonikleri süzmek için kullanılan filtreler alternatif akım tarafına bağlanır, dolayısıyla harmonik generatörleri olarak kabul edebileceğimiz doğrultucu devrelerin ürettiği harmonikler, filtreye girmeden önce çevirici transformatörünün üzerinden akarlar. Bu yüzden transformatörün gücü artırılmalıdır (bu ise transformatörün maliyetinin artırır). Ayrıca çevirici transformatörü tankı üzerinde ısınmış noktalar meydana gelir.

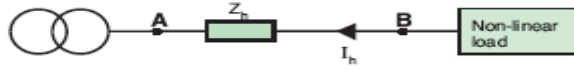
Güç transformatörlerinde 3'ün katı harmonikler (sıfır bileşen devreye ilişkin) üçgen sargı içinde dolaşırlar. Eğer transformatör dizaynında bu etki düşünülmemiş ise bu etki önemsenmeli ve tedbir alınmalıdır.

Eğer transformatör asimetrik bir yük ile yüklenirse, yük akımının doğru akım bileşeni içermesi durumunda transformatörün magnetik devresi doymaya gidecektir ve uyarma akımının tüm harmonik bileşen seviyeleri artacaktır. Kapasiteler üzerindeki gerilimin değişime uğraması (bozulması) kapasite üzerinde ekstra güç kaybının artmasına neden olur.

2.3.11 İletkenler Üzerinde Harmonik Etkisi

Harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların dolayısıyla da ısınmanın artmasına neden olur. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birincisinde, literatürde "Skin Effect" ve "Proximity Effect" olarak adlandırılan etkiler, akımın iletken içinde yeniden dağılımına neden olur.

Akım iletkenin dışına doğru yoğunlaştığında, iletkeninin etkin direnci büyür. "Skin Effect" budur ve frekansla birlikte artar. "Proximity Effect" ise iletkenin içindeki akım dağılımının, komşu iletkenlerde akan akımın yarattığı magnetik alanlar tarafından etkilenmesi olayıdır. İkinci mekanizma ise, tek fazlı yükleri besleyen üç fazlı-dört telli sistemlerin nötr iletkenlerinde anormal ölçülerde büyük akımlara sebep olmaktadır.



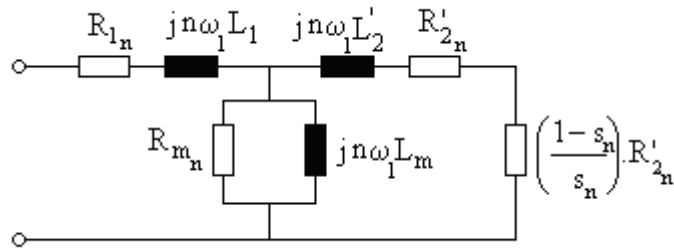
Şekil 2.11 h. harmonik frekansı için enerji sisteminin eşdeğer empedansı Z_h

Bazı doğrusal olmayan (nonlinear) elemanlar büyük değerinde 3 ve 3'ün katları harmonik bileşenleri içerir. Temel frekanstaki dengeli üç fazlı akımlar nötr iletkeninde akım meydana getirmezken, üç fazlı sistemlerde üçüncü mertebeden (3.,9.,15.,...) harmoniklerin (Harmonik mertebesi "n" için fazlar arasında $n \cdot 120^\circ$ 'lik faz farkı olduğundan 3 ve 3'ün katı harmoniklerin her biri 360° 'lik faz farkına yani birbirlerine eklenmesine neden olurlar) oluşturdukları akımların aritmetiksel toplamı kadar akım nötr iletkeninden geçmektedir. Bu nedenle nötr iletkeninden geçen akım faz akımının 1,7 katına kadar çıkabilmektedir.

Nötr iletkenleri faz iletkenleri ile aynı boyutlarda olduğundan bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu soruna, en çok üç fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem nötr iletkenini, faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğünde boyutlandırılmasıdır.

2.3.12 Harmoniklerin Dönen Makinelere Etkileri

Şekil 2.12’de asenkron makinenin n . harmonik frekansı için eşdeğer devresi gösterilmiştir. Bu devrede asenkron makinenin tüm parametreleri sargı akımlarının frekanslarına bağlıdır. Bir alternatif akım makinesinin statorundaki harmonik akımlar, örneğin, pozitif harmonik kaymaları S_n asenkron motorun çalışmasına yol açar. Negatif yarım dalga harmonikleri zıt etkiye yol açmadığı sürece, bu motor çalışmada, bütün pozitif yarım dalga harmonikleri mil dönmesine yardımcı olacak şekilde mil momentini arttıracaktır.



Şekil 2.12 Asenkron makinenin n . harmonik frekansı için eşdeğer devresi

Harmonik akım ve gerilimleri stator sargılarında ilave kayıplara sebep olurlar. Aynı etki rotor devresi ile stator ve rotoru oluşturan sac plakalar için de geçerlidir. Stator ve rotor sargı uçlarında, harmonik akımlarının oluşturduğu kaçak alanlar dolayısıyla ilave kayıplar meydana gelir. Rotor sargısı eğri yerleştirilen asenkron motorlarda rotor ve statordaki akı değişiklikleri ve yüksek frekans etkisi, önemli demir kayıplarına neden olur. Kayıp miktarı; sargı eğriliğine ve sac plakanın demir kayıp

karakteristiğine bağlıdır. Motorun beslediği şebeke geriliminin sinüsoidal şekilden ayrılma miktarı (distorsiyon) güç kaybında önemli etkiye sahiptir. Yapılan bir çalışmada 16 kW'lık bir motora 60 Hz'lik kaynak frekansında sinüsoidal gerilim (nominal güçte) uygulanmış ve toplam kayıp 1.303 W olarak hesaplanmıştır. Aynı motora gerilim olarak kare dalga verildiğinde kayıp 1.600 W değerine ulaşmıştır. Yapılan bir başka çalışmada ise evirici üzerinden beslenen alternatif akım motorunda harmoniklerin sebep olduğu kayıpların makinenin hangi bölgesinde ne oranda oluştuğu araştırılmıştır. Buna göre kayıpların %14'ü stator sargısında, %41,2'si rotor sargılarında, %18,8'i sargı uçlarında, %25,8'i diğer bölgelerde oluştuğu saptanmıştır. Bu çalışmada hangi harmonik etkisinin bu kayba neden olduğu ve başka bir makinede kayıpların nasıl olacağı belirtilmemekle beraber ana kaybın rotorda ortaya çıktığı kesindir.

Harmonik etkisi ile ortaya çıkan ilave güç kaybı alternatif akım makineleri için ciddi etkilere sahiptir. Makinenin ekstra harmonik akım etkilerine dayanması, ilave kayıpları karşılayabilme kapasitesine bağlıdır. Sincap kafesli asenkron motorun rotoru, rotoru sargılı olana oranla sıcaklığa dayanımı daha fazladır. Generatörde ters akım bileşeni %10 ile sınırlandırılmıştır. İndüksiyon motorlarında ise gerilimin ters bileşeni %2 ile sınırlıdır.

Bu değerlerin aşılmasını sağlayan harmoniklere müsaade edilmemiştir. Alternatif akım makine statorundaki harmonik akımları harmonik alan hızına bağlı olarak doğru alan yönünde makine milinde moment üretirler. Ters alan yönündeki harmonikler de ters moment üretirler. Harmonik etkileri ortalama moment üzerinde etkili olsalar da çoğu durumda ihmal edilirler. Ortalama moment üzerinde etkili olabilen harmonikler, önemli ölçüde moment pulzasyonlarını meydana getirirler.

3 GÜÇ KALİTESİNİN ÖLÇÜLMESİ

3.1 Giriş

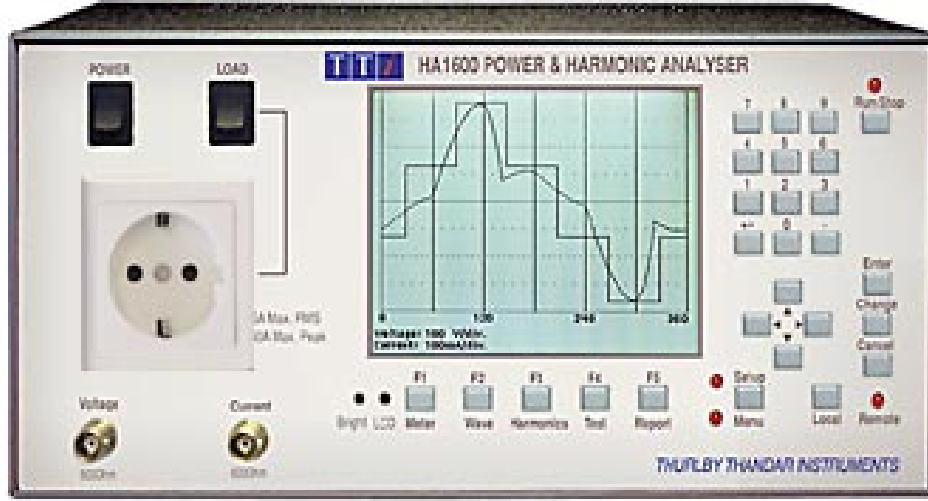
Güç kalitesi hakkında kapsamlı bilgi sahibi olmak elektrik güç sistemlerinin çalışması hakkında bilgi sağladığı gibi güç kalitesi problemlerinin çözümünde de önemli bir rol oynar. Güç kalitesi problemlerini çözebilmek için problemin olduğu bölgeden belirli zaman aralıklarında tutarlı ölçümler alınmalıdır. Alınan bu bilgilerin tutarlı ve faydalı olabilmesi için yapılacak uygulamaya en uygun ölçü cihazları seçilmelidir. Birçok güç kalitesi probleminin tanımlanamamasının nedeni o uygulama için uygun olan ölçü aletlerinin kullanılmamasıdır.

Bilgiler elde edildikten sonra sıra problemle ilgili olan ya da olmayan bilgilerin tespitine gelir. Bu işlemi yerine getirebilmek için güç sistemi ve problemten etkilenen cihazlar hakkında detaylı bilgi edinmek gerekmektedir. Faydalı olabileceği tahmin edilen bilgiler ilk sıraya alınarak problemin çözümü için analiz edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bazı güç kalitesi problemlerinin bir tek çözümünün olmadığı, istenilen sonuca birçok çözüm yönteminin kombinasyonu ile ulaşıldığı göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2 Güç Kalitesi Ölçüm Cihazları

3.2.1 Harmonik Analizörü

Harmonik analizörleri ve harmonik ölçerler harmonik distorsiyon bilgilerini ölçen ve kaydeden ölçüm cihazlarıdır. Tipik olarak harmonik analizörleri dalga şeklini gösteren bir ekran ve akım problarından oluşur. Bazı harmonik analizörleri elle taşınabilir bazıları masa başında kullanılır. Bazı analizörler ölçüm yapıldığı anda harmonik bozulmanın dalga şeklinin fotoğrafını çekme özelliğine sahiptir. Tahmin edilebileceği gibi bir analizörün özellikleri arttıkça maliyetide artmaktadır. Güç kalitesi probleminin niteliğine göre bazı durumlarda harmonik bozulmanın fotoğrafının alınması yeterli olabilmektedir. Bazı durumlarda ise bu yeterli olmayıp harmonik bozulmanın zamana bağlı karakteristiğinin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 3.1 Güç ve Harmonik Analizörü

Yararlı bir harmonik analizi yapabilmesi için bir harmonik analizöründe bulunması gereken özellikler şunlardır.

- Harmonik güç akışı karakteristiğini elde edebilecek şekilde gerilim ve akımları eşzamanlı olarak ölçebilme
- Bireysel harmonik bileşenlerinin büyüklüklerini ve faz açılarını ölçebilme
- Senkronizasyon ve örneklemenin, 51. harmoniğe kadar doğru ölçüm yapabilecek kadar hızlı olması
- Harmonik bozulma seviyelerinin doğasını karakterize edecek istatistikleri oluşturabilmesi

Gerilim harmoniklerinin ölçülmesi istenildiğinde bozulmanın olduğu yere bir ara kablo bağlanması gerekmektedir. Tipik gerilim ara kabloları 4–6 fit uzunluğundadır. Bu uzunluklar için kablonun endüktansı ve kapasitansı ihmal edilebilir. Akım harmonik bozulmasının ölçülmesi için bazı özel durumların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Çoğu akım probu demir çekirdek ihtiva eder. Demir çekirdekli akım problemlerinin yüksek frekanslarda hata oranını yükselttiği ve doymaya neden olduğu bilinmektedir. Harmonik bozulma testi için akım problemlerini

bağlamadan önce yüksek frekanslarda ölçüm doğruluğunu etkilemeyeceğinden emin olunmalıdır.

3.2.2 Geçici Bozulma Analizörleri

Geçici bozulma analizörleri kısa süreli güç sistemi bozulmalarını tespit eden ve bu bilgileri depolayan ileri seviyeli bir veri toplama cihazıdır. Tahmin edilebileceği üzere bu cihazın örnekleme oranı oldukça yüksektir. Geçici bozulma analizörleri saniyede 2–4 milyon örnekleme yapma özelliğine sahiptir. Yüksek örnekleme oranı geçici olayları faz açılarıyla ve büyüklükleriyle tanımlamak için gerekli olan yüksek doğruluğu sağlar. Bu parametrelerin tanımlanması geçici bozulma analizi yapabilmek için gereklidir.

Dalga şeklinin genliğinin bilinmesi, bozulmadan etkilenen cihazda oluşan zarar hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar. Frekansın bilinmesi ise bozulmayı giderebilmek için gereklidir. Bu bilgiler elde edildikten sonra cihazın hassasiyeti tespit edilmelidir. Güç kaynakları ve kapasitör devreleri içeren cihazlar özellikle yüksek frekanslı ani yükselen geçici bozulmalara duyarlıdır.

Yükselme zamanı yâda yüksek frekans bozulmaları ölçülmek istenildiğinde test noktasıyla ölçüm cihazını birleştiren kablonun uzunluğu mutlaka göz önüne alınmalıdır. Bütün ölçümler için ara kablonun boyu mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır. Genelde 6 ft ve daha kısa olan kablolar yüksek hızlı bozulmaların ölçülmesinde kayda değer sorunlar meydana getirmezler. Daha yüksek frekanslar için kablonun endüktansı ve kapasitansı önemli faktörler olarak karşımıza çıkarlar. Geçici bozulmaların ölçülmesinde daha uzun kabloların kullanılması daha yüksek değerlerde endüktans ve kapasitans oluşmasına neden olur. Harici kaynağın neden olduğu gürültüleri azaltabilmek için ara kablolar yüksek gerilim hattundan, motor ve trafolardan yeterince uzak tutulmalıdır. Kablolar mümkün olduğunca düz tutulmalıdır.

Bu ölçüm cihazlarını iki katogoriye ayırmak mümkündür.

1. Geleneksel analizörler
2. Grafik tabanlı analizörler

Geleneksel analizörler geçici bozulmalardaki genlik, süre, frekans gibi spesifik bilgileri ortaya koyar. Grafik tabanlı analizörler ise geleneksel analizörlerden gelen tanımlayıcı bilgiler doğrultusunda bozulmanın gerçek dalga şeklini oluşturup bünyesinde kaydederler. Genellikle geçici bir bozulmanın karakteristiğini, geleneksel analizörlerden gelen bilgiler yardımıyla oluşturmak oldukça zordur. Örneğin salınımlı bir bozulma, genliği ve zaman ile tanımlanamaz. Bu sebeple güç kalitesi problemlerinin detaylı analizinde grafik tabanlı analizörlerin kullanılması kaçınılmazdır. Fakat basit bir geleneksel analizör monitörü problem noktasındaki ön analizleri yapmada faydalı olabilir.



Şekil 3.2 Grafik tabanlı analizör

3.2.3 Osiloskoplar

Bir osiloskop ancak gerçek zamanlı bir testte kullanılması durumunda yararlı olur. Akım ve gerilimlerin dalga şekillerini incelemek şebekede gerçekleşen olaylar hakkında çok sayıda bilgi edinmemizi sağlar. Bu dalga şekillerinden akım ve gerilim değerleri tespit edilebilir, aşıkâr olan bozulmalar gözlemlenebilir ve sinyallerdeki büyük çaptaki değişimler algılanabilir. Çok çeşitli modellerde osiloskoplar vardır. Bunlar arasında veri depolayabilen dijital osiloskoplar dalga şekillerini kaydedip analiz edebildikleri için en çok tercih edilen modellerdir. Bu kategorideki osiloskopların genelde dalga şekli analiz özelliğide vardır. Buna ilave olarak dijital osiloskopları, dalga şekli bilgisini yazılım yardımıyla analiz etmek için bilgisayara bağlamak mümkündür.

Osiloskoplardaki teknolojik gelişmeler sayesinde bu cihazlar elle taşınabilir hale gelmişlerdir. Buna ilaveten dalga şekillerini göstermenin yanında bazı işaret işleme proseslerini de gerçekleştirebilmektedirler. Bu özellikler güç kalitesi çalışmaları açısından oldukça önem taşımaktadır. Özellikle kolaylıkla taşınabilir olmaları ve voltmetreler gibi kolayca kullanılabilmesi güç kalitesi çalışmalarına önemli katkı sağlamıştır. Bu cihazlar en çok fabrikaların kurulum aşamasındaki ön araştırmalarda kullanılmaktadırlar.

Osiloskoplar tekrarlanan yüksek frekanslı dalga şekillerini ya da güç sistemlerindeki yüksek frekanslı ilave gürültüleri ölçmede kullanılan cihazlardır. Osiloskoplar geçici bozulma analizörlerine kıyasla çok daha yüksek örnekleme oranına sahiptir. Bu yüksek oran cihaza tekrarlanan yüksek frekanslı gürültü ve dalga şekillerini büyük bir doğrulukla kaydetme imkanı sağlar. Dijital osiloskoplar dalga şeklini meydana getirip daha sonra kullanılmak üzere saklama özelliğine sahiptir. Bu tip osiloskoplar çok kanallı olma özelliğinden faydalanarak birden fazla elektrik parametreyi gösterebilme ve depolayabilme özelliğine sahiptir.



Şekil 3.3 Analog osiloskop

Osiloskopları uygun bir biçimde kullanabilmek için gerilim problemlerinin seçerken özen göstermek gerekmektedir. Osiloskoplarda kullanılan gerilim problemleri genel olarak pasif problemler ve aktif problemler olmak üzere iki gruba sınıflandırılabilir. Pasif problemler gerekli filtrelemeyi ve gerekli ölçüm faktörünü sağlamak için resistans, kapasitans gibi pasif elemanlardan oluşmuştur. Pasif problemler genel olarak AC 300 V gerilime kadar kullanılırlar. Yüksek gerilim pasif problemleri 1000 V a kadar kullanılabilirler. Çoğu pasif problemler gerilimi, toprağı referans kabul ederek ölçecek şekilde tasarlanmışlardır. Toprağı bağlantı yapmanın tehlikeli olacağı ölçümlerde izole edilmiş pasif problemler tercih edilir.

Aktif problemler, ölçümlere yüksek giriş empedansı sağlamak için alan etkili transistörler gibi aktif elemanlardan oluşur. Yüksek giriş empedansı, düşük seviyeli sinyalleri ölçerken karşılaşma ihtimali olan sinyal karışmalarını önlemede önemli bir rol oynar. Aktif problemler pasif problemlere kıyasla daha pahalıdır. Yüksek frekans akım problemleri osiloskop kullanımında karşılaşılan problemlerin giderilmesinde önemli bir etkidir. Akım problemleri kullanılarak gürültüler ve toprak kaçak akımları tespit edilebilir.

3.2.4 Gerçek RMS (True RMS) Ölçerler

Gerçek RMS terimi en çok güç kalitesi uygulamalarında kullanılmaktadır. Gerçek RMS terimi hakkında şu bilgileri verebiliriz. Akım ve gerilimlerin RMS değerleri temel bileşen değerlerinden oldukça farklı olabilmektedir. Güç kalitesi uygulamalarında akım ya da gerilimlerin tepe değerlerini veya ortalama değerlerini ölçen bir cihaz kullanarak dalga şeklinin istediğimiz RMS değerini elde edemeyiz. Harmonik bakımından zengin olan dalga şekillerinin tepe değerleri ve ortalama değerleri saf sinüs formundaki dalga şekillerinin değerlerinden oldukça farklı olacaktır. Bu nedenle sinyalin ortalama ve tepe değerini ölçerek RMS değerini türetmek hatalara sebebiyet verecektir.

Sinüsoidal olmayan akımları ölçerken analog ölçü aletleri hata verebilirler. Yine bu cihazlar yüksek frekanslı bileşenleri ölçerken gerçek değer altunda sonuçlar vermeye yatkındırlar. Ayrıca ölçüm devresinde akım ve gerilim trafolarının olması durumunda da analog ölçü aletleri hatalı ölçüm yapabilirler.

Gerçek RMS ölçerler dalga şeklinin ısınma etkisini türetilip gerçek RMS değerini elde ederek bu problemlerin üstesinden gelirler. Bu işlemten sonra RMS değeri akım ve gerilim sinyallerinin ısınma etkilerini temsil eder. En gerçek RMS ölçerler ölçülecek büyüklüğün dalga şekline ait bir işaret sağlayamazlar. Bunu elde etmek için ölçüm cihazının yüksek frekanslı sinyal örnekleme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Yeteri doğrulukta sonuçlar elde edebilmek için örnekleme oranı Nyquist kriterlerini sağlamalıdır. Bazı masaüstü RMS ölçerler örnekleme ve dalga şeklini görüntülemek için başka bilgisayara port vasıtasıyla gönderme özelliğine sahiptirler.

3.2.5 Multimetreler

Güç kalitesi ölçümlerinde ilk etapta yapılan testlerden sonra akım ve gerilim seviyelerinin hızlı bir biçimde kontrol edilmesi gerekebilir. Şebekenin aşırı yüklenmesi, aşırı gerilimler ve hatlar arasındaki dengesizlik gibi problemler bu şekilde tespit edilebilir. Bu ölçümlerin yapılabilmesi için basit bir multimetre yeterlidir. Multimetreler şu sinyalleri kontrol edebilir:

- Faz-toprak arası gerilimler
- Faz-nötr arası gerilimler
- Nötr-toprak arası gerilimler
- Faz-faz arası gerilimler
- Faz akımları
- Nötr akımları

Bir multimetreyi seçerken ve kullanırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktör cihazda kullanılan hesaplama yöntemidir. Yaygın olarak kullanılan multimetrelerin çoğu ölçülen sinyalin rms değerini gösterecek şekilde kalibre edilmişlerdir. Fakat rms değerini hesaplamak için birçok farklı metotlar vardır. Bu metotlar:

1. Tepe metodu

Ölçü aleti sinyalin sinüsoidal olduğunu kabul ederek sinyalin tepe değerini okur ve çıkan sonuçları rms değerini elde etmek için 1.41 e böler.

2. Ortalama metodu

Ölçü aleti doğrultulmuş sinyal için ortalama bir değer belirler. Sadece bir tek frekans içeren temiz bir sinüsoidal sinyal için bu ortalama değer rms değeriyle bir katsayının çarpımıdır.

3. Gerçek RMS

Bir sinyalin rms değeri rezistif bir yüke gerilim uygulanması durumunda ortaya çıkan ısıнын miktarıdır. Gerçek rms değerini tespit eden bir metotlardan birisi ortaya çıkan ısıyı ölçmek için termal dedektör kullanmaktır. Daha modern dijital ölçüm cihazları rms değerini bulmak için dijital hesaplar yaparlar.

Bu farklı metotların hepsi temiz sinüsoidal bir sinyal için aynı sonucu verirler. Fakat bozulmuş sinyaller için farklı sonuçlar gösterebilirler. Şebekelerde ekseriyetle birbirinden farklı bozulma dereceleri görüldüğü için bu bilgi çok önemlidir. Özellikle bu bozulmalara faz ve nötr akımlarında rastlanır.

3.2.6 Flikermetreler

Gerilim flikeri terimi besleme kaynağındaki küçük fakat çok ani değişimleri ifade etmek için kullanılır. Bu değişimlerin elektrik ampullerini insan gözüne kırpışma şeklinde görünecek biçimde etkilemesinden dolayı bu değişimler fliker(kırpışma) terimi ile isimlendirilmiştir. Ark fırınları bu problemin en önemli kaynaklarıdır. Ayrıca çalışma karakteristikleri rast gele değişen cihazlar da kırpışmalara neden olabilmektedirler.



Şekil 3.4 Güç Kalitesi analizörü ile fliker ölçümü

Flikerler ölçülmek istenildiğinde bozulma geriliminin rms değerinin ya da 60 Hz frekansına sahip gerilimin değerinin ölçülmesi gerekmektedir. 60 Hz frekanslı gerilimin değeri 60 Hz lik taşıyıcının demodüle edilmesiyle elde edilir. Ayrıca farklı frekanslar insan gözü tarafından farklı şekilde algılandığı için fliker sinyalindeki baskın frekansın hesaplanması önemlidir.

3.2.7 Gerilim Düşümünün (Sag) ve Yükselmesinin(Swell) Ölçülmesi

Bir elektrik devresindeki gerilim ani bir biçimde, geçici süreyle veya sürekli olarak aşırı yükselebilir ve düşebilir. Örneğin bir elektrik devresi güç dağıtım sisteminin besleme kaynağına yakın olması durumuna gerilim yüksek bir seviyede sürekli olarak kalabilir. Ya da devre güç sisteminin bitim noktasına yakınsa sürekli bir düşük gerilim gözlemlenebilir. Elektrik ve elektronik yüklerin hepsinin istenildiği şekilde çalışmalarını sağlamak için belirlenmiş alt ve üst gerilim limitleri vardır. Gerilim değeri bu limitleri geçerse elektrik ve elektronik bileşenlerin zarar görme ihtimali vardır. Bu da cihazlarda hafıza kaybı, veri kaybı, hatalı çalışma gibi sonuçlar doğurabilmektedir.

Gerilim düşümlerini ve yükselmelerini ölçmek için MIN MAX kayıt moduna sahip dijital multimetre(DMM) kullanılabilir. Gerilim belirli zaman aralıklarında ölçülmelidir. Bir DMM gerilim düşümü durumunu yakalayıp görüntüleyebilir. Fakat bu cihaz gerilim düşümünün oluşma zamanını ve ne kadar sürdüğünü tespit edemez. Bu sebeple karşılaşılan gerilim problemlerinde güç kalitesi ölçüm cihazını kullanmak daha isabetli olacaktır.

Ölçümlerin doğruluğunu sağlamak için gerilim, günün farklı kısımlarında ve üretimin farklı aşamalarında ölçülmeli ve kaydedilmelidir. Ayrıca ölçümler koruyucu bakım programı dahilinde yapılmalıdır. Eğer gerilim düşümü % 8 den fazla ise devreye bir gerilim düzenleyici ilave edilmelidir. Gerilim düzenleyicileri gerilimi regule ederek cihazı aşırı gerilim düşümlerine ve yükselmelerine karşı korumaktadır.

Gerilim yükselmeleri gerilim düşmeleri kadar yaygın değildir. Fakat çok yüksek seviyedeki bir gerilimin bir cihazın donanımını tahrip etmesi çok düşük seviyeli bir gerilime kıyasla çok daha kısa zamanda gerçekleşmesi sebebiyle gerilim yükselmeleri gerilim düşümlerinden çok daha zararlıdır. Çok kısa süreli bir gerilim yükselmesi bile cihazlarda kalıcı hasarlar meydana getirebilir. Gerilim düşümlerinde olduğu gibi gerilim yükselmeleri de DMM ile ölçülebilir. Ölçümlerden en iyi sonucu alabilmek için gerilim belirli zaman aralıklarıyla günün belirli bölümlerinde güç kalitesi ölçüm cihazı ile ölçülmelidir.

3.2.8 Geçici Gerilimlerin Ölçülmesi

Geçici olaylar açma kapama olayları, yıldırım olayları, elektrik arkları gibi etkenlerle depo edilmiş enerjinin aniden boşalmasıyla oluşurlar. Geçici gerilimler devredeki enerji depolayan indüktans ve kapasitanslar tarafından üretilir. Geçici gerilimin büyüklüğü ve süresi L ve C değerlerine bağlıdır. Geçici gerilimler daha büyük değerde olma, daha kısa süre sürme, düşük yükselme zamanına sahip olma gibi noktalarda gerilim düşümleri ve yükselmelerinden farklılık gösterirler.

Gerilim düşümleri ve yükselmelerinde olduğu gibi geçici gerilimleri belirli zaman aralıklarında görüntülemek için güç kalitesi ölçüm cihazı kullanılmalıdır. Geçici gerilimlerin büyüklüklerinin, sürelerinin ve oluşma zamanlarının tespiti için bir hayli zaman gerekmektedir. Şayet geçici bir olay problem olarak kabul edilmişse aşırı gerilim koruma cihazı kullanılmalıdır. Bu cihaz iletim hatlarındaki gerilim dalgalanmalarını sınırlama özelliğine sahiptir. Güç kalitesi problemlerinin çözümünde ilk basamak test yapılacak noktaların tespit edilmesidir. Şu anda kullanılan en üst düzeyde güç kalitesi cihazlarının bile kapasitesi onu kullanacak olan kişinin yeteneğiyle sınırlıdır.

Ölçüm cihazı en optimum noktaya yerleştirilmediğinde yanlış ölçümler alınabilir yada yetersiz bilgiler edinilebilir. Özellikle geçici olaylarda ölçüm aletinin cinsine ve test noktasının pozisyonuna bağlı olarak hatalar görülme olasılığı yüksektir. Güç kalitesi problemlerinin analiz edilmesinde takip edilecek en iyi yaklaşım ilk olarak kalite probleminden etkilenen cihazın güç kalitesini cihaza mümkün olduğu kadar yakın bir noktadan analiz etmektir.

4 GÜÇ KALİTE STANDARTLARI

Güç kalite parametrelerine yönelik, IEC, IEEE, EN gibi uluslar arası oluşumlar çeşitli standartlar geliştirmiştir. Bunu yanı sıra Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Japonya gibi ülkelerin geliştirdiği ulusal standartlar da mevcuttur. Türkiye’de kabul gören standartlar, genellikle uluslar arası standartların çevirisi niteliğindedir. Elektromanyetik bozulmalara sebep olan temel olaylar IEC tarafından tablolştırılmıştır. IEEE 1159–1995 numaralı standart yine aynı tabloyu kullanmaktadır.

4.1 Standartların Amacı ve Önemi

Enerji kaynaklarının kalitesiyle ilgili standartlar uzun yıllardan beri mevcuttur.

Hemen hemen bütün ülkeler sınırları içerisinde frekans ve gerilim değerlerinin hangi değerler arasında değişebileceğine ilişkin standartlara sahiptirler. Diğer standart çeşitleri genellikle harmonik akım ve gerilim bozulmaları, gerilim düşümleri ve yükselmeleri ve enerji kesinti süreleriyle ilgilidir. Güç kalitesi standartları, bunlara uyulması durumunda şirketlere uygun güç hassasiyeti ve yük dağıtım imkânı sağlayacaktır.

Güç kalitesi standartlarının geliştirilmesinde üç ana etken vardır.

4.1.1 Nominal çevrenin tespit edilmesi

Böyle bir standarta şöyle bir örnek verebiliriz. “Gerilim 50 Hz frekansında ve 230 V rms değerine sahip sinus dalgası olmalıdır. Pratikte gerilim ve frekans büyüklüklerini belirli bir değerde sabit tutmak teknik olarak mümkün olmadığı için böyle bir standart pratik değildir. Bu bağlamda halihazırdaki standartlar nominal gerilim gibi ifadelerle yer verirler. Yukarıda bahsi geçen standartı daha pratik bir dille ifade etmek gerekirse şöyle denebilir. “Nominal frekans 50 Hz ve nominal gerilim 230 V olmalıdır. Avrupa standartlarındada (EN) 50160 buna yakın ifadeler yer almaktadır.

Nominal gerilimi ve nominal frekansı tanımlamak gerçek çevre şartları hakkında bir fikir vermez. Bunu sağlamak için nominal değerlerden sapmaların bilinmesi ve ifade edilmesi gerekmektedir. Birçok ülke nominal değerlerden sapma limitlerini % 90 ila %110 arasında belirlemiştir.

4.1.2 Terminolojiyi tanımlamak

Bir standart kontrolörü bir cihaz ya da enerji kaynağı üzerinde zorunlu bir şart koşmasa bile o cihaza ya da enerji kaynağına ait bir standartın oluşturulmasını isteyebilir. Buna iyi bir örnek cihaz üreticileri arasındaki bilgi alışverişlerini düzenleyen 1346 nolu IEEE standardıdır. Bu standart herhangi bir tavsiyede bulunmaz. Bu grup standartlar çeşitli olayların tam tanımının yapılmasına yardım ederler. Bu tanımlar genellikle cihaz karakteristiklerinin nasıl ölçülmesi gerektiği, hangi cihazların dayanıklılık testlerinden geçmeleri gerektiği gibi konularla ilgilidir.

Bu standartların genel amacı güç kalitesi alanında hizmet veren üreticilerin haberleşmelerinin sağlanmasıdır. Bu grup standartlar örneğin iki ayrı güç kalitesi monitöründeki verilerin karşılaştırılabilmesine imkân tanır. Ayrıca cihazların dayanıklılık testlerinin aynı çevre koşullarında aynı şartlarda yapılmasına imkân tanır. Bu konuda şu örnekler verilebilir. “Kısa kesinti rms geriliminin üç dakika müddetince nominal gerilimin % 1 ine düşmesidir. Gerilim çökmesinin süresi gerilimin nominal değerinin % 10 una düştüğü zaman dilimi olarak tanımlanmıştır. Gerilim çökmesinin süresi saniyelerle ifade edilmelidir. Rms gerilim değeri her yarım dalgada bir tespit edilmelidir. IEEE 1159 ve EN 50160 standartlarının ikisi de bu tür tanımlamalara yer vermişlerdir.

4.1.3 Güç Kalitesi Problemlerinin sayısının sınırlandırılması

Güç Kalitesi Problemlerinin sayısının sınırlandırılması güç kalitesi alanında çalışanların başlıca gayeleridir. Bu çalışmaların nihaiyi noktasıdır da denilebilir. Güç kalitesi problemleri, cihazlardan kaynaklanan gerilim bozulmalarının sınırlandırılması, kaynağın performansının iyileştirilmesi ve cihazların gerilim bozulmalarına olan hassasiyetlerinin düşürülmesi gibi faktörlerle azaltılabilir.

Tüm güç kalitesi problemlerini azaltma metotları herhangi bir standartazisasyondan bağımsız olarak uygulanabilecek teknik çözümler sunmaktadırlar. Fakat standartazisasyonlar teknik çözümlerin uygulanmasında önemli etkenlerdir. Uygun standartazisasyonlar güç kalitesi bozulmaların kaynağı konusunda önemli katkılar sağlar.

Bu konuda şu örnekler verilebilir. “4 kVA yı aşan bir yükten çekilen akım % 1 in üzerinde harmonik bileşen içeremez.

Harmonik ölçümleri ortalama 1 sn süreyle yapılmalıdır. Ölçüm yapılan cihaz gerilimi % 85 ila %110 arasında değişebilir. Harmonik testleri için cihazın bütün terminalleri % 85 ila %110 arasında değişen bir gerilimle bir saat boyunca beslenmelidir. Eğer cihazın birden fazla yük seviyesi varsa her yük seviyesi için ayrı bir test uygulanmalıdır. Ya da en etkin olan yük seviyesinde ölçüm yapılmalıdır. Güç kalitesi konusunda IEC ve IEEE nin ikisinde yeterli miktarda standartları yoktur. IEC standartları genellikle EMC ile ilgilidir.

Bu standartlar bazı güç kalitesi standartlarını da kapsar. Bunlara verilebilecek en iyi örnek düşük güçte çalışan cihazlar için harmonik akımlarını sınırlandıran IEC-61000-2-3 nolu harmonik standartıdır. IEEE-519 ise tüketiciler tarafından çekilen harmonik akımlarını ve dağıtılan gerilim harmoniklerini sınırlandıran bir harmonik standartıdır.

4.2 Avrupa Gerilim karakteristik standartı

EN 50160 nolu Avrupa standartı elektriği çeşitli sorunlara yol açabilen bir ürün olarak görmektedir. Normal çalışma şartlarında gerilimin ana karakteristiğini tüketiciyi besleyen terminallerde orta ve düşük gerilim şebekeleri olarak tanımlar. Bazı gerilim bozulmaları için geniş bir skalada tipik değerlerini verir. Bazı bozulmalarda ise gerçek gerilim karakteristikleri tanımlanır.

4.2.1 Gerilim Değişimleri

EN 50160 standardı bazı gerilim değişimleri için limitleri belirler. Bu standarda göre ölçüm süreleri standartlarda belirtilen süreleri aşmamalıdır. Ölçümler ortalama büyüklükteki bir zaman periyoduyla yapılmalıdır. Bu periyot çoğu gerilim değişimi için 10 dakika civarındadır. Ayrıca çok kısa süreli değişimler standartlarda göz önüne alınmamaktadır.

Çizelge 4.1 Kısa Süreli Değişimlerin Karakterize Edilmesi

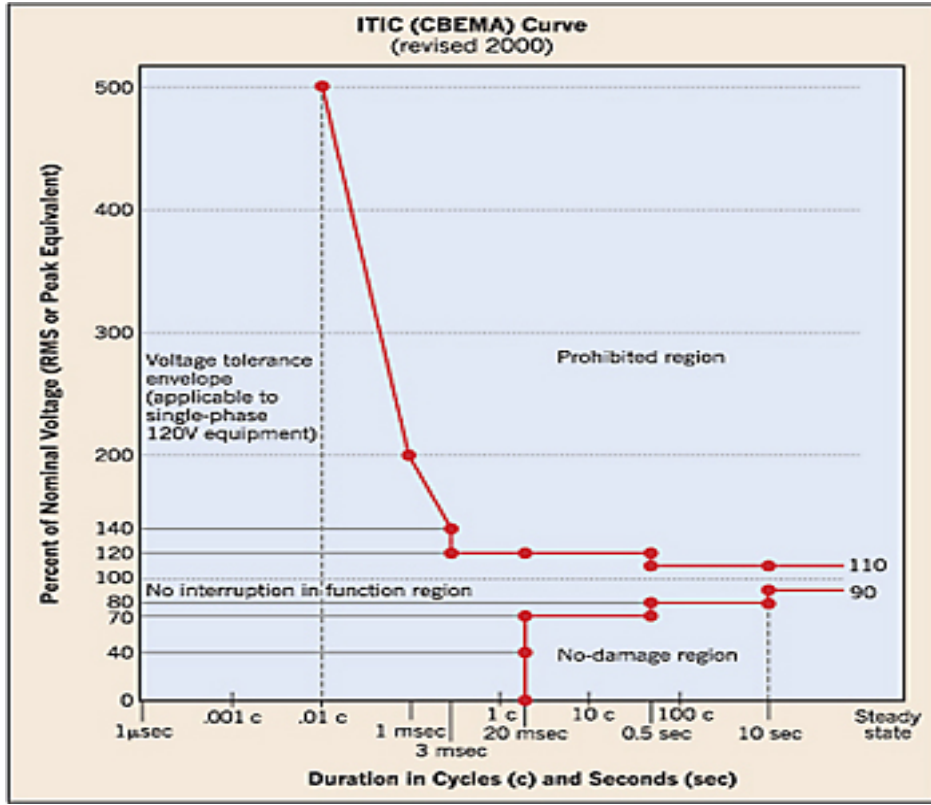
Kategoriler	Tipik Spektral İçerik	Tipik Etkinlik Süresi	Tipik Gerilim Genliği
2.0 Kısa Süreli Değişimler			
2.1 Ani Değişim (Instantaneous)			
2.1.1 Kısa Süreli Gerilim Düşmesi		0,5-30 çevrim	0,1-0,9 pu
2.1.2 Kısa Süreli Gerilim Yükselmesi		0,5-30 çevrim	1,1-1,8 pu
2.2 Anlık Değişim (Momentary)			
2.2.1 Kesinti		0,5 çevrim-3 s	<0,1 pu
2.2.2 Kısa Süreli Gerilim Düşmesi		30 çevrim-3 s	0,1-0,9 pu
2.2.3 Kısa Süreli Gerilim Yükselmesi		30 çevrim-3 s	1,1-1,4 pu
2.3 Geçici Değişim (Temporary)			
2.3.1 Kesinti		3 s-1 dak	<0,1 pu
2.3.2 Kısa Süreli Gerilim Düşmesi		3 s-1 dak	0,1-0,9 pu
2.3.3 Kısa Süreli Gerilim Yükselmesi		3 s-1 dak	1,1-1,2 pu

Çizelge 4.2 Uzun Süreli Değişimlerin Karakterize Edilmesi

Kategoriler	Tipik Spektral İçerik	Tipik Etkinlik Süresi	Tipik Gerilim Genliği
3.0 Uzun Süreli Değişimler			
3.1 Kesinti		>1 dak	0,0 pu
3.2 Düşük Gerilim		>1 dak	0,8-0,9 pu
3.3 Aşırı Gerilim		>1 dak	1,1-1,2 pu

Şekil 4.1’de ITIC eğrisi gösterilmiştir. Bu eğri, Information Technology Industry Council tarafından, her türlü gerilim değişimi karşısındaki teçhizat toleranslarını belirlemek üzere tasarlanmıştır. Kalın çizgilerle gösterilen doğrular, teçhizata zarar vermeden kabul edilebilecek en yüksek ve en düşük gerilim değerlerini, nominal giriş geriliminin yüzde oranı olarak zaman değişimine göre göstermektedir. Nominal gerilimi gösteren yatay doğrunun üst tarafı gerilim yükselmelerine, alt tarafı ise gerilim azalmalarına aittir ve zaman eksenini logaritmiktir.

Örneğin, bir veri işleme cihazı, nominal gerilimin beş katına 100 μ s dayanabilmeli, fakat nominal gerilimin sadece %20 fazlasına ise 10 ms dayanabilmektedir. Düşük gerilim tarafında ise, komple güç kaybına 20 ms (bir periyot) dayanabilmeli, 100 ms içinde de gerilimin nominal değerinin %70’ine yükselmelidir. Bu eğri IT cihazı kullanıcıları ile elektrik tedarikçileri arasındaki elektrik enerjisi kalite problemlerinin çözümüne yardımcı olmak üzere geliştirilmiştir.



Şekil 4.1 ITIC Eğrisi

Gerilim standartları ile ilgili başlıca parametreler şunlardır:

Gerilim büyüklüğü

Ortalama 10 dakikalık periyotlarla bir hafta boyunca ölçülen gerilim nominal gerilim değeri olan 230 V un $\pm 10\%$ sınırlarında olmalıdır.

Harmonik bozulma 25. harmoniğe kadar harmonik gerilim bileşenleri standartlarda belirtilen değerleri aşmamalıdır. Toplam harmonik bozulma bir haftada yapılan ölçümlerin 8% ini aşmamalıdır. Bu limitler CIGRE çalışma gurubunun harmonik bozulma çalışmaları sonucunda tespit edilmiştir. Fakat standartlar bu çalışma gurubunu referans olarak göstermez. Bu grup çalışmaları neticesinde harmonik gerilim bozulmalarını iki sınıfa ayırmıştır.

Düşük değerli: Bu değer genellikle bozulma oluşturma olasılığı düşük olan geniş dağıtım şebekesi yüklerinde gözlemlenir.

Yüksek değer: Bu değer bozulma oluşturma olasılığı yüksek olan ve nadir rastlanan şebekelerde gözlemlenir.

Gerilim dengesizliği: Gerilimin negatif ve pozitif bileşenlerinin oranı bir hafta boyunca % 2 yi aşmamalıdır.

Çizelge 4.3 Gerilim Dengesizliğinin Karakterize Edilmesi

Kategoriler	Tipik Spektral İçerik	Tipik Etkinlik Süresi	Tipik Gerilim Genliği
4.0 Gerilim Dengesizliği		Kararlı hal	%0,5-2

Frekans

10 dakika aralıklarla yapılan ölçümlerin ortalamasının % 95 i 49.5 – 50.5 Hz sınırlarını aşmamalıdır.

Çizelge 4.4 Güç Frekansı Değişimlerinin Karakterize Edilmesi

Kategoriler	Tipik Spektral İçerik	Tipik Etkinlik Süresi	Tipik Gerilim Genliği
7.0 Güç Frekansı Değişimleri		<10 s	

4.2.2 Geçici olaylar

EN 50160 standartında geçici olay gerilim karakteristikleri mevcut değildir. Çoğu geçici olayın sadece tanımı yapılmıştır. Fakat bazı geçici olay frekansları belirtilmiştir.

Sonuç olarak bütün kusurlarına rağmen EN 50160 oldukça faydalı bir standarttır. Şu günün şartlarında ulaşılabilecek en üst düzeyde bir dokümandır.

EN 50160 standardında ilk defa elektromanyetik çevre koşulları resmi bir dokümanda oldukça detaylı bir şekilde bu standartta yer almıştır. Limitlerin sadece sınırlı sayıdaki olaylar için belirlenmesi ve standartların sadece normal çalışma koşullarında uygulanabilmesine ve herhangi bir garanti verilmemesine rağmen en azından önemli bir ilk adım atılmıştır. Bu standartlar vasıtasıyla şu gelişmelerin kaydedildiği söylenebilir:

- Avrupa enerji sektöründeki şirketlerin çoğu EN 50160 ı göz önünde bulundurarak şirketlerinin gerilim kalitelerini standartlaştırdılar. Bazı şirketlerin gerilim değerlerini EN 50160 standardına göre değerlendirmesi bazı sorunlara yol açmaktadır. Gerilim karakteristiği kavramını anlamada yerel gerilim kalitesinin standartlarda belirtilen limitlerden daha iyi olması şaşırtıcı değildir Şirketlerin bu sonuçları, gerilim kalitelerinin yeterli olduğunu ispatlamada kullanmaları doğru değildir.
- Bazı şirketler kendilerinin gerilim karakteristik dokümanlarıyla yetinmektedirler. Bu dokümanlar elbette ki standartlardan daha iyidir.
- Diğer güç kalitesi parametreleri hakkında bilgi edinmek için avrupanın her yerinde ölçümler yapılmaktadır. Gerilim çökmeleri, kesintiler ve geçici gerilimler için hâlihazırdaki dokümanlarda sınırlar belirlenmemiştir. Önceden bahsedildiği üzere gerilim çökmelerinin ve diğer olayların gerilim karakteristiklerinin tanımlanması oldukça zor bir iştir. Bunun bir alternatifi müşteriye rastlanan olay sayısını bildirmektir.

Çizelge 4.5 Geçici Olayların Karakterize Edilmesi

Kategoriler	Tipik Spektral İçerik	Tipik Etkinlik Süresi	Tipik Gerilim Genliği
1.0 Geçici Olaylar			
1.1 Darbe Biçimindeki Geçici Olaylar			

1.1.1 Nanosaniye	5 ns yükselme	<50 ns	
1.1.2 Mikrosaniye	1 μs yükselme	50 ns-1 ms	
1.1.3 Milisaniye	0,1 ms yükselme	>1 ms	
1.2 Salınım Biçimindeki Geçici Olaylar			
1.2.1 Alçak Frekans	<5 kHz	0,3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Orta Frekans	5-500 kHz	20 μs	0-8 pu
1.2.3 Yüksek Frekans	0,5-5 MHz	5 μs	0-4 pu

4.3 IEEE ve IEC Standartlarına Göre Harmonik Sınır Değerleri

Genellikle yaygın olarak kullanılan, periyodik bir dalganın ideal bir sinüs dalgasından sapmasının ölçümü, toplam harmonik distorsiyonu (THD) veya bozunum faktörü olarak adlandırılır. Bir sistemde THD hesaplanması sonucunda tesisten tesise değişmekle beraber kabaca bir genellemeye gidilecek olursa THD değerleri için aşağıdakileri söylemek mümkündür.

- $THD_v < \%2,5$ ve $THD_i < \%10$ ise tesiste harmoniklerden ötürü enerji kirliliği yoktur.
- $THD_v \approx \%2,5 -3$ ve $THD_i \geq \%10$ ise tesiste harmonik filtrasyon uygulanması teknik olarak uygundur. Ancak ekonomik şartlar için uygun olmayabilir.
- $THD_v \geq \%3$ ise paralel rezonans riski vardır ve tesis şartlarına uygun bir harmonik filtrasyon sistemi uygulaması hem teknik hem de ekonomik açıdan en uygun çözümdür.

Elektrik-Elektronik Mühendisleri Enstitüsü Ulusal Elektroteknik Komisyonu(NEC) da uygun harmonik sınır hesaplandığı zaman harmonikler de zaman değişiminin kıyaslanması onaylanmıştır. IEEE sınırları IEEE 519–1992 ve IEEE 519A olmak üzere iki dokümanda verilmiştir. Bu iki doküman güç sistemlerindeki harmoniklerin belli bir sınırdan olması

gerektiğini iki farklı metotla önermiştir. Bunlardan biri harmonik akımlar için harmonik akım sınır değerleri diğeri ise harmonik gerilimler için harmonik gerilim sınırlardır.

Çizelge 4.6 IEC Sınıflandırması

İletilen Alçak Frekans Olayı	Harmonikler ve İç (Ara) Harmonikler
	Sinyal Sistemleri (Güç Hattı Taşıyıcıları)
	Gerilim Dalgalanmaları
	Kısa Süreli Gerilim Düşmesi ve Kesintiler
	Gerilim Dengesizliği
	Güç Frekansı Değişimleri
	Endüklenmiş Alçak Frekans Gerilimler
	AC Şebekelerdeki DC Bileşen
Yayılan Alçak Frekans Olayı	Manyetik Alanlar
	Elektrik Alanlar
İletilen Yüksek Frekans Olayı	Endüklenmiş Sürekli Dalga Akım ve Gerilimler
	Yönsüz Geçici Olaylar
	Salınımlı Geçici Olaylar
Yayılan Yüksek Frekans Olayı	Manyetik Alanlar
	Elektrik Alanlar
	Elektromanyetik Alanlar
	Sürekli Dalgalar
	Geçici Olaylar
Elektrostatik Deşarj Olayı	-
Nükleer Elektromanyetik Darbe	-

IEEE 519–1992 numaralı standart ile IEC 1000-3-2 numaralı standartlar, elektrik şirketleri için bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlineer yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları belirtmektedir. IEC 61000–2-2 konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir.

Çizelge 4.7 Konutlarda Alçak Gerilim Şebekerinde Gerilim Harmonik Distorsiyon Limitleri, IEC 61000-2-2

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün Katı Harmonikler	
n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥ 21	0,2
17	2	10	0,5	*Not: k=0,2+12,5/n	
19	1,5	≥ 12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥ 29	k*				

Avrupa Standartları'nda da alçak gerilim ve orta gerilim için gerilim harmoniklerinin sınır değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.8 Konutlarda Alçak ve Orta Gerilimde Harmonik Distorsiyon, EN 50160 .
Gerilim Harmonik Sınırları

Alçak Gerilim ve Orta Gerilim Şebekesi (<35 kV)					
Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün Katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6.....24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Çizelge 4.9 IEE 519-1992 gerilim distorsiyon oranları

Harmonik ölçümü Alınan Noktadaki Gerilim (V _n)	Her Bir Harmonik İçin Gerilim Bozulması (%)	Gerilim için Toplan Harmonik Bozulması THBV _N (%)
V _n ≤ 69kV	3.0	5.0
69kV < V ≤ 161kV	1.5	2.5
V _n > 161kV	1.0	1.5

Yukarıdaki tabloda IEE 519–1992 gerilim distorsiyon oranları verilmiştir. Akım sınırlarına yakın büyük sistem kullanıcıları için izin verilebilir. Yüksek gerilim seviyelerinde potansiyel problemleri minimize etme çabaları hızla artmıştır

Çizelge 4.10 Akım Harmonik Sınırları

$V_n < 69\text{kV}$						
I_{sc}/I_1	$h < 11$	$11 \leq h$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THB
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	3.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$						
$< 20^*$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1-25	0.7	10.0
$V_n > 161\text{ kV}$						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≤ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Akım harmonik bozunma sınır değerleri, şebekeye ortak bağlantı noktasına bağlı doğrusal olmayan yükler için ve 2.3-69kV gerilim aralığında belirlenmiştir. I_{sc} ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımıdır. I_L temel frekanstaki maksimum yük akımıdır.

THD toplam harmonik distorsiyonudur. Çift harmonikler için sınır değerler yukarıda verilen değerlerin %25'i kadardır. Tablodaki tüketiciler için önerilen harmonik akım sınırları gösterilmiştir. Tabloda çeşitli satır ve sütunlar harmonik sayısı, kısa devre yük oranı ve gerilim seviyelerine bağlı olarak elde edilmiştir. Toplam istenen bozunum tüm harmoniklerin efektif değerinde tanımlanmıştır.

IEC' de aynı mantıkla benzer sınır tabloları yapılmıştır. Sınır harmonik akım değerleri verilmiş bu yüzden gerilim bozunum problemleri oluşturulmamıştır. IEEE harmonik sınırlar 3 faz ortak bağlantı noktasındaki uygulamalar için dizayn edildiğinde, IEC tek faz için ve 3 faz için daha büyük ölçüde ve uygun limit değerler sağlar.

Uluslararası IEEE519-1992' ye göre kabul edilen harmonik bozulma sınır değerleri gerilim için %3 akım için %5 olarak belirlenmiştir. Bu limit değerlerin üzerinde bulunan harmonik oranlarda, elektrik sistemleri için tehlikeli ve büyük maddi zararlar oluşturabilecek problemler meydana gelmektedir.

Ülkemizde Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), çeşitli yönetmeliklerde harmonik akım ve gerilimlere sınırlamalar getirmiştir. Çizelge 4.11 ve 4.12 “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi” yönetmeliğinden, çizelge 4.13 ve 4.14 “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”nden, çizelge 4.15 ise, “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliliği ve Kalitesi Yönetmeliği”nden alınmıştır.

Çizelge 4.11 EPDK Yönetmeliğine göre Gerilim Harmonikleri için Sınır Değerler

Tek Harmonikler				Çift Harmonikler	
3'un Katları Olmayanlar		3'un Katları Olanlar			
Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)
5	% 6	3	% 5	2	% 2
7	% 5	9	% 1,5	4	% 1
11	% 3,5	15	% 0,5	6.....24	% 0,5
13	% 3	21	% 0,5		
17	% 2				
19	% 1,5				
23	% 1,5				
25	% 1,5				

Çizelge 4.12 EPDK Yönetmeliğine göre Akım Harmonikleri için Maksimum Yük Akımına (IL) göre Sınır Değerler

Tek Harmonikler						
I_{SC}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TTB
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerin %25'i ile sınırlandırılmıştır.						

Çizelge 4.13 EPDK Yönetmeliğine göre 380 kV İletim 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/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 2					

Çizelge 4.14 EPDK Yönetmeliğine göre 20 - 154 kV Arası İletim Sisteminde Kabul Edilebilir Harmonik Gerilim Seviyele

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	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/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 3					

Çizelge 4.15 EPDK Yönetmeliğine göre Kabul Edilebilir Harmonik Akım Seviyeleri

KABUL EDİLEBİLİR AKIM HARMONİK LİMİTLERİ

Harmonik Sırası		OG 1<Un<34,5					YG 34,5<Un<154					ÇYG Un>154				
Grup	No	Ik/Il					Ik/Il					Ik/Il				
		<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

O	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
N	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
İ	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
K	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
L	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
E	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
R	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
	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.																
Toplam Akım Distorsiyonu	5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5	
Bu değerler 3 saniyelik ortalamalardır.																

Ik: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum sistem kısa devre akımı

Il: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum yük akımının en büyük bileşeni

4.4 Fliker Değerlendirme Yöntemleri

Fliker sorununda en önemli noktalardan biri de değerlendirmedir. Bunun nedeni flikerin doğal yapısından ötürü kesin bir matematik tanımının bulunmayışı ve değerlendirme yönteminin bir tür tanımlama sayılabilesidir. Fliker değerlendirme yöntemi ile ortaya çıkan sonuç fliker düzeyinin kabul edilebilir olup olmadığının ortaya koyar ve bunun sonucunda flikere karşı alınacak önlemlerinde temel noktası olur.

Fliker değerlendirmesi için çeşitli ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Ancak günümüzde Türkiye'de ve Avrupa ülkelerinde IEC standartları kullanılmakta olup Kuzey Amerika'da hala fliker eğrileri metoduna dayanan IEEE Standardı geçerlidir.

4.4.1 IEEE Fliker Standardı

Kırpışmanın yaratacağı görsel rahatsızlığı ortadan kaldırmak üzere standartlar oluşturulmuştur. IEEE 1453–2004 numaralı standartta, gerilim seviyelerine göre kırpışma planlama seviyeleri ve uyarlık seviyeleri tanımlanmıştır.

Çizelge 4.16 Orta Gerilim, Yüksek ve Ekstra Yüksek Gerilim Seviyelerinde Pst, Plt Planlama Seviyeleri

	Planlama Seviyeleri	
	Orta Gerilim	Yüksek Gerilim- Ekstra Yüksek Gerilim
Pst	0,9	0,8
Plt	0,7	0,6

Çizelge 4.17 Alçak Gerilim ve Orta Gerilim Seviyelerinde Pst, Plt Uyarlık Seviyeleri

	Uyarlık Seviyeleri
Pst	1,0
Plt	0,8

Tablolarda Pst ve Plt kısaltmalı tanımlamalar gözükmektedir. Bu tanımlamalar IEC “flickermeter” standardında getirilmiştir. Pst, 10 dakikalık bir aralıkta elde edilen kısa dönem kırpışma algı ölçüsüdür. Plt ise, iki saatlik bir aralıkta elde edilen uzun dönem kırpışma algı ölçüsüdür. Bir Plt, 12 adet birbirini takip eden Pst değerinden formül yardımıyla elde edilir.

EPDK, Pst ve Plt için IEEE tarafından belirlenmiş değerleri kullanmaktadır (Bakınız Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkındaki Yönetmelik). Ayrıca, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’nde aşağıdaki tabloya da yer verilmektedir.

Çizelge 4.18 İzin Verilen Azami Flicker (Kırpışma) Şiddeti

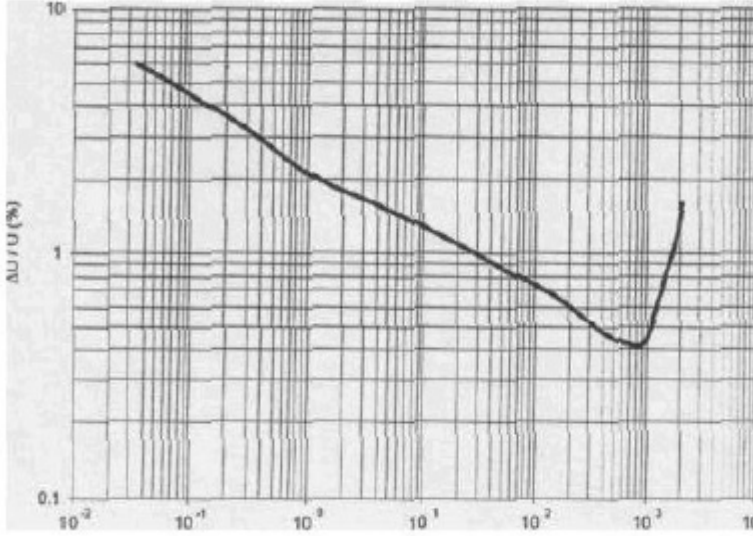
Gerilim Seviyesi (V)	Fliker Şiddeti			
	A_{st}	P_{st}	A_{lt}	P_{lt}
$V > 154 \text{ kV}$	0,61	0,85	0,25	0,63
$34.5 \text{ kV} < V < 154 \text{ kV}$	0,91	0,97	0,37	0,72
$1 \text{ kV} < V < 34.5 \text{ kV}$	1,52	1,15	0,61	0,85
$V < 1 \text{ kV}$	1,52	1,15	0,61	0,85

IEEE fliker sınırlarının önerilen uygulama dokümanları (recommended practice documents)olarak yayınlamıştır. Bunların en önemlileri IEEE 519–1992 ve IEEE I41-1995 dir. Her ne kadar aynı olmalarına çalışılmışsa da aralarında bazı farklar bulunmaktadır. Her iki dokümanda önerilen uygulama Şekil de gösterilmiştir.

IEEE fliker eğrisindeki $\Delta V / V$ ifadesine bağlı gerilim değişimi denir.

Burada ΔV sistem geriliminin ölçüm anındaki efektif değeri ile kalıcı durum geriliminin efektif değeri arasındaki farkı, V bir süre boyunca yapılan ölçüm sonucunda elde edilen geriliminin efektif değerini ifade eder. Ölçüm sonucu elde edilen fliker frekansı ve bağlı gerilim değişiminin kombinasyonu sonucu elde edilen değerlerin eğrinin altında kalması rahatsız etmeyici durum olarak kabul edilir.

IEEE fliker eğrisini oluşturan araştırmalar 50 yıllık bir geçmişe dayanmaktadır. Araştırmalar akkor telli lambalarda farklı fliker değerleri ve süreleri ile yapılmıştır. Çeşitli güçlerde lambalar kullanılmış ancak 60 W gücündeki lamba ağırlığı oluşturmıştır.



Şekil 4.2 IEEE fliker eğrisi

Araştırmalar sırasında yapılan deneylerde deneye katılanlardan çeşitli fliker düzeyleri için ne hissettiklerini belirtmeleri istenmiştir. Katılımcılar hislerini görememe, görme fakat rahatsız olmama veya rahatsız olma şeklinde belirtmişlerdir. Deneye katılanlar görme ve rahatsız olma konusunda her zaman aynı karara varamadıkları için deneylerin istatistiksel bir doğası olmuştur.

Araştırmacılar görünebilirlik ve rahatsızlık eğrilerini kabul edilebilir seviyeye çekmişlerdir. Rahatsızlık sınırının az bir miktar aşağısındaki fliker seviyesi çok az sayıda kişi için hafif bir rahatsızlık oluşturabilir. Fliker seviyesini rahatsızlık sınırının üstüne çıkarmak iki sonuç doğurur.

1. Oransal olarak daha fazla kişi rahatsız olur.

2. Daha düşük seviyede rahatsız olanlar bu seviyede daha çok rahatsız olurlar.

Unutulmaması gereken önemli nokta araştırmaların çoğunun 60 W gücünde ve 120 V Gerilim de çalışan lambalar için yapıldığıdır. Daha düşük güçteki akkor telli lambalar daha küçük bir zaman sabitine sahiptirler. Bundan dolayı 1 Hz frekansındaki fliker de daha fazla rahatsızlık uyandırır. Daha yüksek güçteki akkor telli lambalar daha büyük zaman sabitine sahiptirler ve meydana getirdikleri rahatsızlık daha azdır. Yeni aydınlatma aygıtlarının fliker cevapları da farklı olmaktadır.

Üzerinde durulması gereken önemli bir nokta da laboratuvar deneyleri sırasında ani gerilim değişimlerinin kullanıldığıdır. 60 Hz frekansındaki sinüsoidal dalga dikdörtgen dalga ile modüle edilmiştir. Daha yavaş gerilim değişimleri daha az fliker rahatsızlığı üretirler. Bir diğer önemli nokta aynı anda bir genlik ve frekans kullanılmıştır. Oysa birçok pratik uygulamada birden farklı kaynaktan üretilen çok sayıda farklı genlik ve frekanslardan oluşan fliker düzeyleri söz konusudur. Daha da önemlisi gerilim modülasyonu dikdörtgen ve periyodik değildir.

4.4.2 IEC Fliker Standartları

IEC fliker olgusu ile ilişkili olarak dört standart belirlemiştir. Bunlar IEC 61000–4-15 IEC 1000-3-3, IEC 1000-3-5 ve IEC 1000-3-7 dirler. IEC 61000–4-15 flikermetre standardı olup bir flikermetre yapmak için gerekli bilgiler verir. Bu standart Kısa Süreli Fliker Şiddet Faktörü (Pst) ve Uzun Süreli Fliker Şiddet Faktörü (Plt) olmak üzere İki temel değişken tanımlar. IEC 1000–3-3 Alçak gerilim sistemlerindeki akımı 16 A den küçük olan yükler için fliker sınırlarının nasıl belirleneceğinin ve yüklerin bu sınırlara uygun olup olmadığının nasıl belirleneceğini açıklar. Burada Pst ve Plt değerleri temel değişkenler olarak kullanılır.

IEC 1000–3-5 Alçak gerilim sistemlerindeki akımı 16 A den büyük olan yükler için fliker sınırlarının nasıl belirleneceğini ve yüklerin bu sınırlara uygun olup olmadığının nasıl belirleneceğini açıklar. Burada Pst ve Plt değerleri temel değişkenler olarak kullanılır. IEC 1000-3-7 Orta ve yüksek gerilim sistemlerindeki emisyon seviyelerinin nasıl belirleneceğini ve yüklerin bu sınırlara uygun olup olmadığının nasıl belirleneceğini açıklar. Burada da Pst ve Plt değerleri temel değerlerdir.

Yukarıdaki standartlar Pst ve Plt üzerine kurulu bir metodoloji tanımlar. Bu metodolojiye göre öncelikle flikermetre tanımlanır. Bu flikermetrenin çıkışından Pst ve bundan Plt elde edilir. Pst ve Plt değerlerine yine IEC standartları tarafından tanımlanan yöntemler ile uygun olup olmadıkları belirlenir.

4.5 IEC Elektromanyetik Uyumluluk Sınırları

Aşağıdaki tablolar, cihazların elektromanyetik uyumluluk ve elektrostatik deşarj dayanım sınırlarını göstermektedir. Tablo 4.20’de ABD’de uygulanan elektrik ve magnetik alan sınır değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.19 Cihazların Dayanmak Zorunda Olduğu Elektrostatik Deşarj Gerilimleri, IEC 61000-4-2

Şiddet düzeyi	Deney gerilimleri (kV), $\pm 10\%$	
	Havadan boşalma	Kontak boşalması
1	2	2
2	4	4
3	8	6
4	15	8

Çizelge 4.20 ABD Eyaletlerindeki İletim hatlarındaki elektrik alan ve manyetik alan sınır değerleri

Elektrik Alan			Magnetik Alan	
Eyaletler	Hat Güzergahı Üzerinde	Hat Güzergahı Sınırında	Hat Güzergahı Üzerinde	Hat Güzergahı Sınırında
Florida	8 kV/m ^a 10 kV/m ^b	2 kV/m	-	150 mG ^a 200 mG ^b 250 mG ^c
Minnesota	8 kV/m	-	-	-
Montana	7 kV/m	1 kV/m ^e	-	-
New Jersey	-	3 kV/m	-	-
New York	11,8 kV/m 11,0 kV/m ^f	1,6 kV/m	-	200 mG

	7,0 kV/m ^d			
Oregon	9 kV/m	-	-	-

Çizelge 4.20' de a,b,c,d,e,f harfleri aşağıdaki koşullar için kullanılmıştır:

- a: 69-230 kV hatlar için
- b: 500 kV hatlar için
- c: 500 kV hatlar için mevcut hat güzergahında
- d: maksimum değer otoban geçişlerinde
- e: arazi sahibi tarafından vazgeçilebilir
- f: maksimum değer yol geçişi için.

Aşağıdaki tablolarda International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) ve American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) tarafından belirlenen elektrik ve manyetik alan sınır değerleri verilmiştir.

Tablo 4.21 ICNIRP, (1998)' e göre elektrik alan ve manyetik alan sınır değerleri

	Elektrik Alan(60Hz)	Magnetik Alan(60Hz)
Mesleki(Elektrik Tesisleri)	8,3 kV/m	4,2 G (4200 mG)
Genel Halk	4,2 kV/m	0,833 G (833 mG)

Tablo 4.22 ACGIH, (2001)'e göre elektrik alan ve manyetik alan sınır değerleri
(60Hz)

Maruziyet	ElektrikAlan(60Hz)	Magnetik Alan(60Hz)
Mesleki maruziyet için aşılamaz değer	25 kV/m	10 G (10000 mG)
Koruyucu elbise kullanımı zorunlu değer	15 kV/m	-
Kalp pili ile çalışanlar için aşılamaz değer	1 kV/m	1G (1000 mG)

5 GÜÇ KALİTESİ İLE İLGİLİ ÖLÇÜMLER, ÖLÇÜMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

5.1 Giriş

Bu bölümde güç kalitesi ile ilgili olarak yapılan ölçümlerde ölçülmesi gereken büyüklüklere, ölçüm sonuçlarının güç kalitesi ile ilgili standartlara göre değerlendirilmesine, güç kalitesi ölçüm verilerinden yararlanarak ölçüm yapılan transformatör merkezinin MATLAB Simulink paket programı ile simülasyonuna yer verilmiştir.

Bu bölümde örnek olarak incelenen ve ilgili standartlara göre değerlendirilen güç kalitesi ölçümleri için bu tez çalışmasının da desteklendiği kısa adı Güç Kalitesi Milli Projesi olan TÜBİTAK 105G129 no'lu “Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Akışını İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi Araştırma ve Teknoloji Geliştirme Projesi” kapsamında Proje Mobil Ölçüm Ekibi tarafından 25.05.2007 – 01.06.2007 tarihleri arasında TEİAŞ Ototransit Transformatör Merkezi'nde bir hafta (7 gün) süreyle yapılan kesintisiz ölçümlerle ilgili olarak bu ekip tarafından hazırlanan “Ototransit TM Mobil Ölçüm Raporu”ndan yararlanılmıştır. Güç kalitesi ölçümleri yapılırken ölçüm noktalarında IEEE 519-1992, IEC 61000-4-7, 61000-4-15 ve 61000-4-30 standartlarında belirtilen zaman periyotlarına ve güç kalitesi parametrelerinin tanımlamalarına uygun olarak hafta içi / hafta sonu, gündüz / gece ve puant zamanlarına ilişkin veri alınmış ve ölçüm sonuçları bu standartlara uygun olarak değerlendirilmiştir.

5.2. Güç Kalitesi Ölçümlerinin Yapıldığı Sistemin Tanıtımı

Şekil 1'de güç kalitesi ölçümlerinin yapıldığı Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)'a ait Ototransit transformatör merkezinin tek hat şeması gösterilmiştir. Şema da görüldüğü gibi bu merkezde iki adet 80 MVA gücünde 154/34,5 kV gerilimli güç transformatörü bulunmaktadır. İşletme durumunda bağlı olarak transformatörler paralel olarak veya ayrıık olarak çalıştırılabilmektedir. Güç transformatörlerinde radyatör soğutma fanı çalıştırılmadığı zaman (ONAN soğutma tipi) transformatör nominal gücü 80 MVA, radyatör soğutma fanı kullanılarak cebri soğutma yapıldığı zaman (ONAF soğutma tipi) transformatör nominal gücü 100 MVA olmaktadır. Şekil 2'de ölçüm yapılan transformatör

merkezinin TEİAŞ iletim sistemi içindeki yeri gösterilmiştir. Çizelge 5.1’de güç transformatörlerinin teknik özellikleri verilmiştir. MATLAB simulink ile yapılan simülasyonda bu özellikler kullanılmaktadır.

Çizelge 5.1. Ölçüm yapılan transformatör merkezindeki güç transformatörlerinin teknik özellikleri

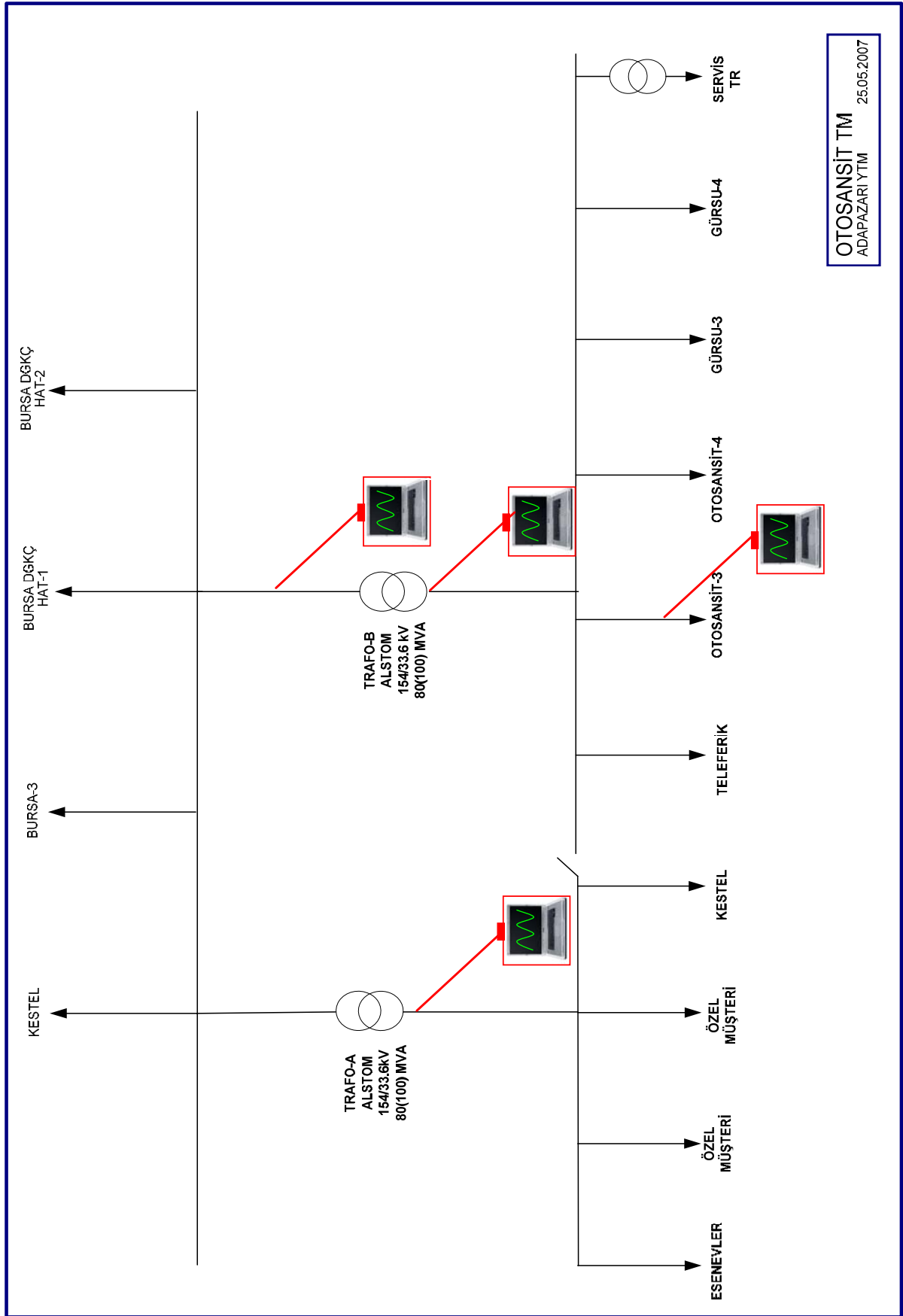
	Marka	Seri No	Gücü (MVA)	%Uk	Bağlantı Grubu	Soğutma Tipi	Dönüştürme Oranı
Trafo-A	GEC ALSTHOM	314500-01	80 (100)	12.1	YNyn0	ONAN/ ONAF	154/33.6 kV
Trafo-B	GEC ALSTHOM	314490-01	80 (100)	12.1	YNyn0	ONAN/ ONAF	154/33.6 kV

Şekil 5.1’deki tek hat şemasında da gösterildiği gibi transformatör merkezinde dört noktada ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüm noktaları ,

- 154/33.6 kV Trafo-B primer tarafı
- 154/33.6 kV Trafo-B sekonder tarafı
- 154/33.6 kV Trafo-A sekonder tarafı
- Trafo B ‘ ye bağlı Otosansit-3 fideri

olup tümü geniş yer tuttuğundan aşağıda Trafo-A’nın sekonder tarafındaki güç kalitesi ölçümlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında Ototransit-3 fideri dışındaki diğer üç ölçüm noktası verilerinden yararlanılmıştır.

Güç kalitesi ölçümlerinde akım değerleri tesise ait akım transformatörlerinin sekonder uçlarından, gerilim değerleri gerilim transformatörlerinin sekonder uçlarından ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları verilirken ölçü transformatörlerinin dönüştürme oranları dikkate alınarak primer taraftaki akım ve gerilim değerleri elde edilmiştir. Ölçümlerde proje mobil ölçüm ekibi tarafından hazırlanan ölçme donanımı ile her bir elektriksel büyüklük saniyede 3200 örnek alınarak, 3200 Sample/s hızında işlenmiş ve proje kapsamında ilgili altproje ekibince hazırlanan Labview tabanlı gerçek zamanlı ölçüm ve analiz yazılımı ile analiz edilmiştir.



Şekil 5.1. Ölçümlerin yapıldığı Otosansit Trafo Merkezinin tek hat şeması

Ölçümlerde kullanılan bilgisayarlar arasında tam anlamıyla bir senkronizasyon söz konusu olmadığından, farklı ölçüm noktaları arasındaki karşılaştırma ve değerlendirmelerde bu durumun göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Yararlanılan mobil ölçüm raporunda sonuçları verilen ölçümlerde tranformatör merkezine ait konvansiyonel akım ve gerilim transformatörleri kullanıldığı için ölçüm sonuçlarının doğruluğu söz konusu akım ve gerilim transformatörlerinin frekans tepkime karakteristiklerinin doğruluğu ile sınırlıdır.

5.3 Güç Kalitesi Ölçümleri

Bu kısımda Ototransit transformatör merkezinde yapılan ölçümlerden Trafo-A'nın sekonder tarafında yapılan güç kalitesi ölçüm sonuçları ve sonuçların değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

5.3.1 Gerilim Ölçümleri

Güç kalitesi ile ilgili olarak yapılan gerilim ölçümleri,

- Gerilimde meydana gelen olaylar,
- Gerilim harmonikleri,
- Gerilim kırışması (Fliker),
- Gerilimdeki frekans değişimleri,

olmak üzere dört başlık altında incelenmiştir.

5.3.1.1 Gerilimde Meydana Gelen Olaylar

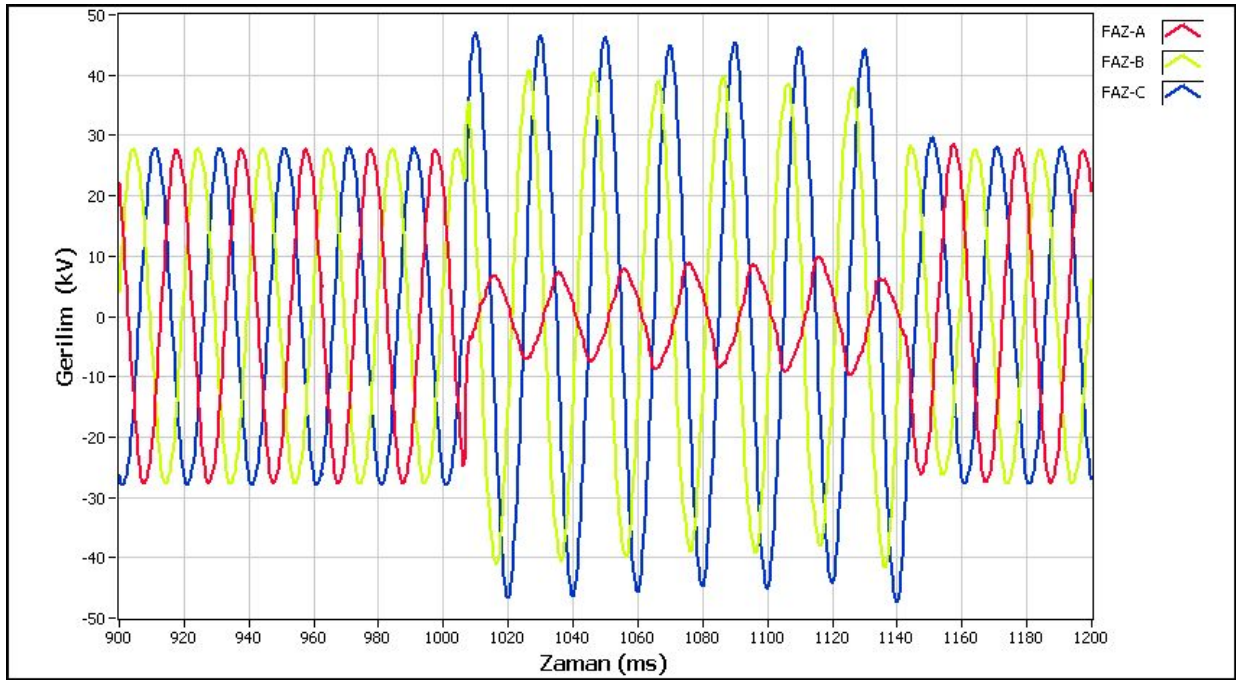
Ototransit Transformatör Merkezinde 154/33,6 kV gerilimli Trafo-A'nın sekonder tarafında 25.05.2007 – 01.06.2007 tarihleri arasında bir hafta süreyle kesintisiz gerçek zamanlı olarak ölçülen ve analizi yine gerçek zamanlı olarak yapılan ölçümler boyunca aşağıda liste olarak verilen olaylar meydana gelmiştir. Gerilimde meydana gelen; anlık gerilim çukurları (Voltage-Sag), anlık gerilim tepeleri (Voltage-Swell) ve anlık gerilim dengesizlikleri (Voltage-Unbalance), olayın meydana geldiği andan bir saniye önceki veriler ve olayın bitiminden 1 saniye sonraki veriler ile birlikte kaydedilmiş ve aşağıda Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Gerilimde Meydana Gelen Olayların Listesi

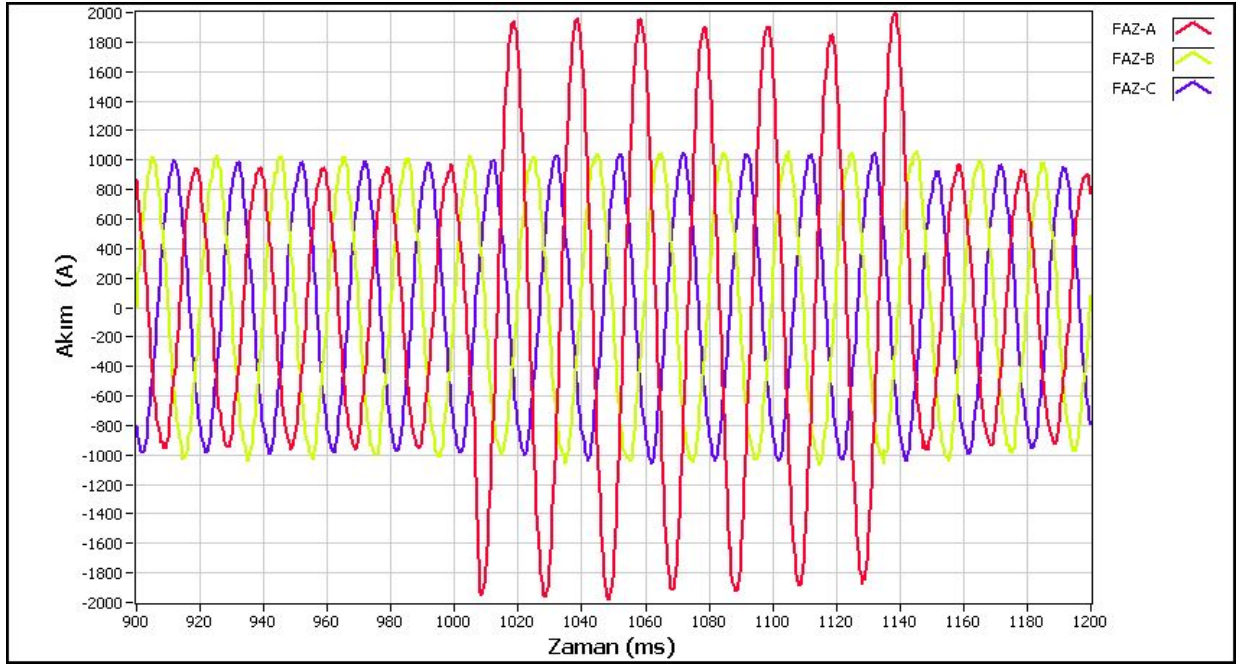
	Olayın Tipi	Tarihi	Başlangıç Anı	Bitiş Anı
1.	Gerilim Çukuru	25.05.2007	11:16:54	11:16:54
2.	Gerilim Tepesi	25.05.2007	11:16:55	11:16:55
3.	Gerilim Tepesi	26.05.2007	02:53:41	02:53:41
4.	Gerilim Çukuru	26.05.2007	22:14:22	22:14:23
5.	Gerilim Tepesi	26.05.2007	22:14:22	22:14:23
6.	Gerilim Tepesi	26.05.2007	22:14:23	22:14:23
7.	Gerilim Dengesizliği	26.05.2007	22:14:23	22:14:23
8.	Gerilim Çukuru	26.05.2007	22:27:26	22:27:26

9.	Gerilim Çukuru	26.05.2007	22:30:07	22:30:08
10.	Gerilim Tepesi	26.05.2007	22:30:08	22:30:08
11.	Gerilim Çukuru	26.05.2007	22:42:47	22:42:48
12.	Gerilim Tepesi	26.05.2007	22:42:47	22:42:48
13.	Gerilim Çukuru	26.05.2007	22:51:37	22:51:37
14.	Gerilim Çukuru	26.05.2007	22:52:05	22:52:06
15.	Gerilim Tepesi	26.05.2007	22:52:05	22:52:06
16.	Gerilim Çukuru	27.05.2007	16:38:13	16:38:14

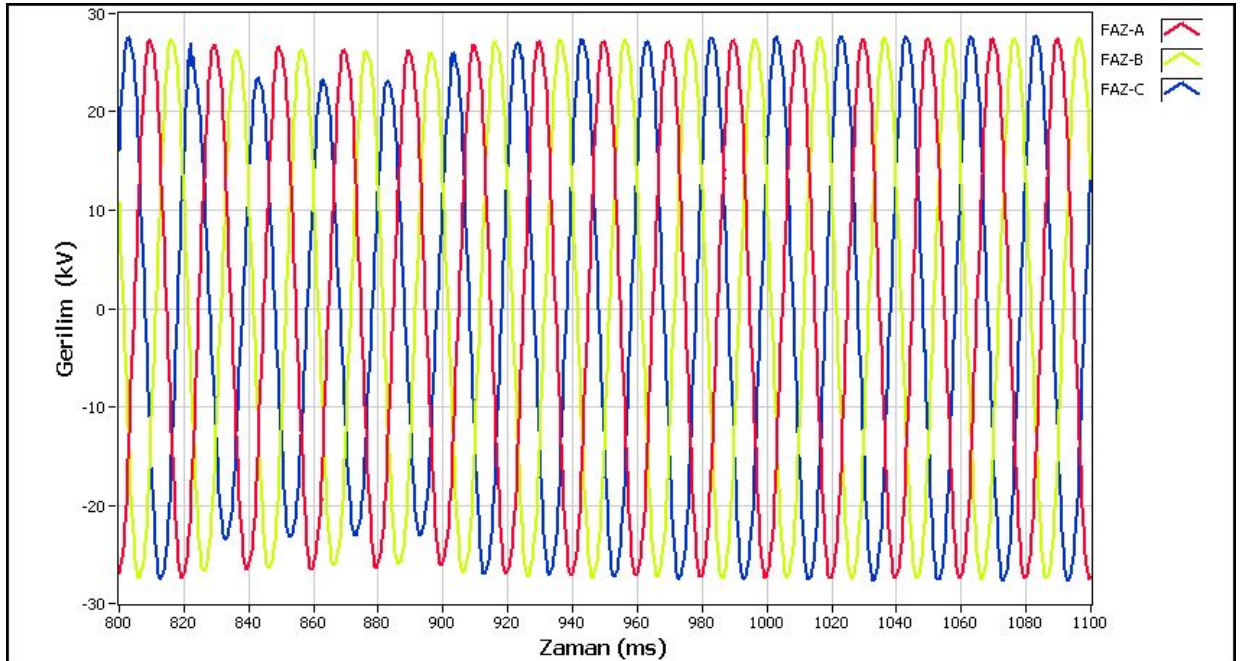
Yukarıdaki listede görüldüğü gibi IEEE 61000-4-30 standardında belirtilen tanımlar referans alındığında, 8 adet gerilim çukuru, 1 adet gerilim dengesizliği ve 7 adet gerilim tepesi olmak üzere ölçüm süresince toplam 16 adet olay meydana gelmiştir. Aşağıda gerilimde meydana gelen olaylara örnek olarak Şekil 5.3 – Şekil 5.5’de gerilim çukuru gerilim tepesi ve gerilim dengesizliği gösterilmiştir. (Gerilim çukuru, gerilim tepesi ve gerilim dengesizliği olaylarında akım-gerilim değişimleri ile ilgili değerlendirmeler Bölüm 1.9’da yapıldığı için burada tekrar değerlendirme yapılmamıştır.)



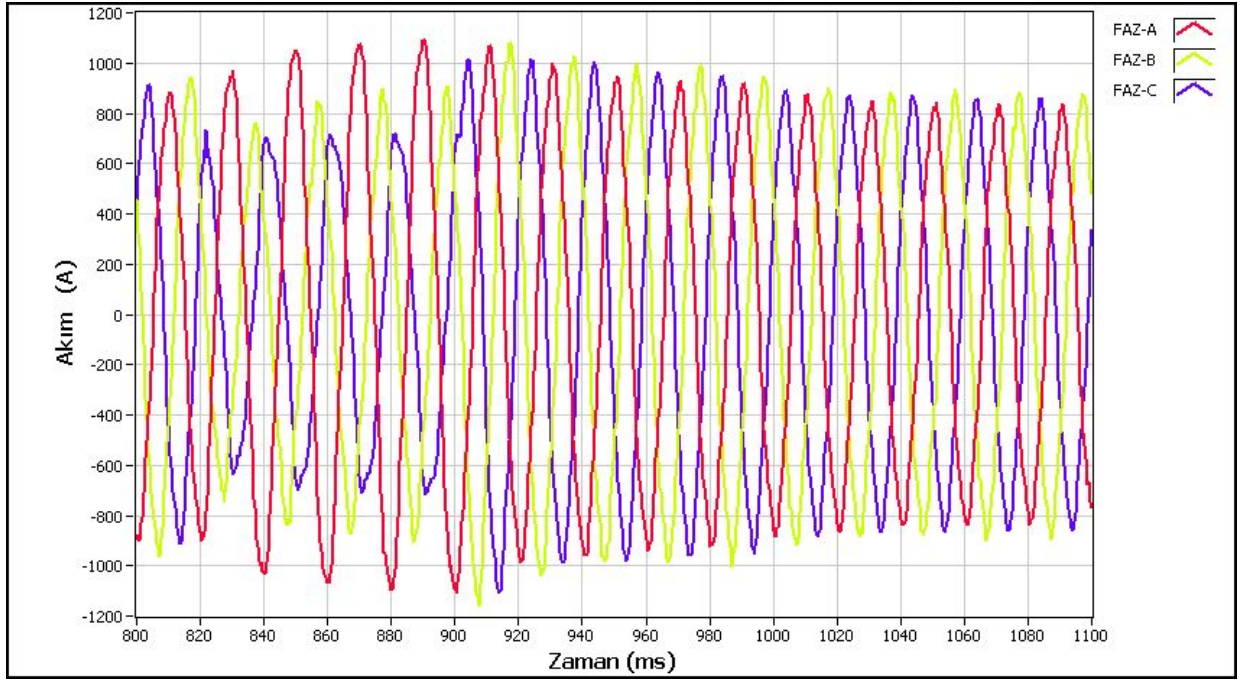
Şekil 5.3. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A Sekonderi , Gerilim Çukuru (Voltage Sag) ve Gerilim Tepesi (Voltage Swell)
başlangıç tarihi: 29.05.2007 saat: 13:30:13 Olay süresi: 150 ms



Şekil 5.4. Şekil 5.3'deki gerilim çukuru olayında faz akımlarının değişimi

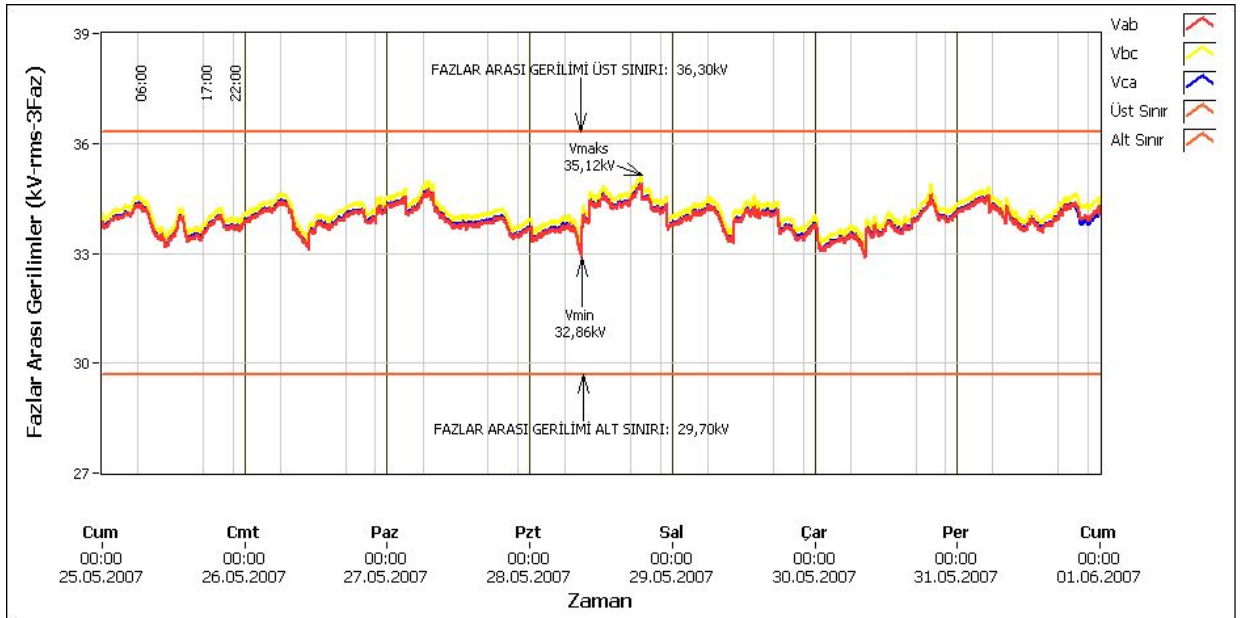


Şekil 5.5. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A Sekonderi , Gerilim Dengesizliği (Voltage Unbalance) başlangıç tarihi: 29.05.2007 saat: 01:21:55 Olay süresi: 200 ms



Şekil 5.6. Şekil 5.5'deki gerilim dengesizliği olayında faz akımlarının değişimi

5.3.1.2 Gerilim Harmonikleri ile İlgili Ölçümler



Şekil 5.7. 154/33,6 kV Trafo A Sekonderi , 7 GÜNLÜK, Fazlar Arası Gerilim Gerçek RMS Değişimi (5 dakikalık ortamlar şeklinde)

Trafo A Sekonder tarafında, Şekil 5.7'deki haftalık gerilim gerçek RMS değişimini gösteren grafikte de görülebileceği gibi, işletme gerilim değeri 33.6 kV için Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliliği ve Kalitesi Yönetmeliği'nde belirtilen alt (29,7 kV) ve üst (36.3 kV) sınır değerlerinin arasında kalmış, haftalık ölçüm süresi içinde ise gerilimin en düşük değeri 32,86 kV, en yüksek değeri de 35,12 kV olmuştur.

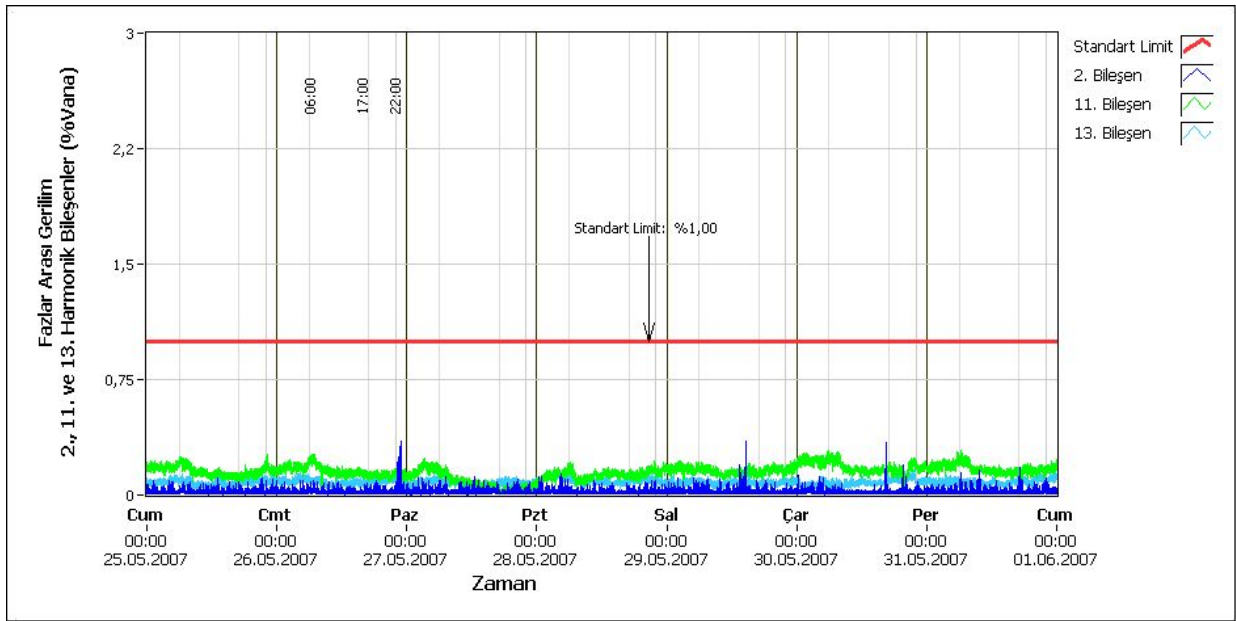
Çizelge 5.3. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	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/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 3					

Ölçüm yapılan transformatör merkezinde nominal sekonder gerilimi 33,6 kV olduğu için gerilim harmonikleri ile ilgili yapılacak tüm değerlendirmeler Çizelge 2'de gösterilen Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'nde belirtilen 20 – 154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim limitlerine göre yapılmıştır. (Bu yönetmelikte belirtilen gerilim harmonik limitleri diğer uluslar arası standartlar ile uyumludur.)

Güç kalitesi ölçümlerinin gerilim harmonikleri ile ilgili değerlendirilmesinin yapılmasından önce harmonik bileşenleri ile ilgili aşağıdaki tespitlerin verilmesi yararlı olacaktır. Genellikle harmonik mertebesi yükseldikçe harmonik bileşenlerin genlikleri azalmaktadır. Alternatif akım sisteminde akım ve gerilim dalga şeklinin genellikle DC bileşen içermemesi, tek dalga simetrisine sahip olması sebebiyle sistemde akım ve gerilimin çift harmonik bileşenlerinin genliği ihmal edilecek kadar küçük olur. Bu nedenle enerji sistemlerinde ortaya çıkan harmonik sorunları genellikle 5., 7., 11. gibi tek harmoniklerden kaynaklanır. Ark fırınları, kaynak makinaları gibi yükler çift harmonikler de oluştururlar. İletim sisteminde 154 kV veya 380 kV gerilimli doğrudan bağlı aboneler durumlarındaki demir çelik tesislerindeki ark fırınları sebebiyle çift harmonikler de ortaya çıkar ancak bu çift harmonik bileşenlerin genlikleri genellikle tek harmonik bileşenlerin genliklerinden

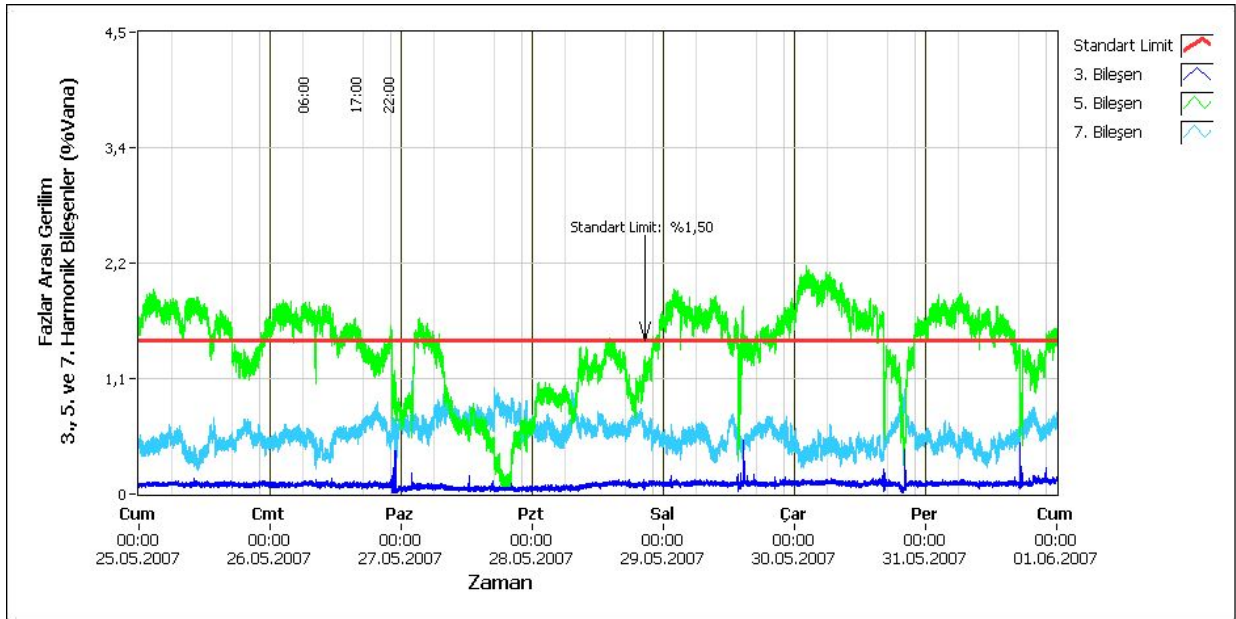
düşüktür. Bilindiği gibi, üç fazlı dengeli sistemlerde doğrultucu, inverter vb. üç fazlı sistem elemanlarının akımlarının üç ve üçün katı mertebesindeki (3., 6., 9., 12., 15. ...) harmonik bileşenleri içermez. Alçak gerilim şebekesinde yüksek 3. harmonik bileşenli akım çeken tek fazlı yükler (bilgisayar, floresan lamba, kompakt floresan lamba vb.) mevcuttur. Ancak bu yüklerin bağlı olduğu alçak gerilim (A.G.) şebekesine ait dağıtım transformatörlerinin orta gerilim (O.G.) tarafındaki primer sargılarının genellikle üçgen bağlı olması sebebiyle dengeli sistemlerde A.G. tarafındaki 3. harmonik akımlarının O.G. tarafına geçmesi önlenir. Bu nedenle O.G. şebekesinde ve iletim sisteminde akım ve gerilimde genellikle 3. harmonik ve diğer üçün katı mertebesindeki harmonik bileşenlerinin genliklerinin çok düşük olması beklenir. Özetle, güç kalitesi ölçümlerinde akım ve gerilimde bulunması beklenen en yüksek genlikli harmonik bileşenleri sırasıyla, 5., 7. , 11., ... harmonik bileşenleridir. Aşağıda verilen ölçüm sonuçları harmonikler konusunda bilinen bu gerçekleri doğrulamaktadır.



Şekil 5.8. TEİAŞ Ototransit TM, 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 2., 11. ve 13. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

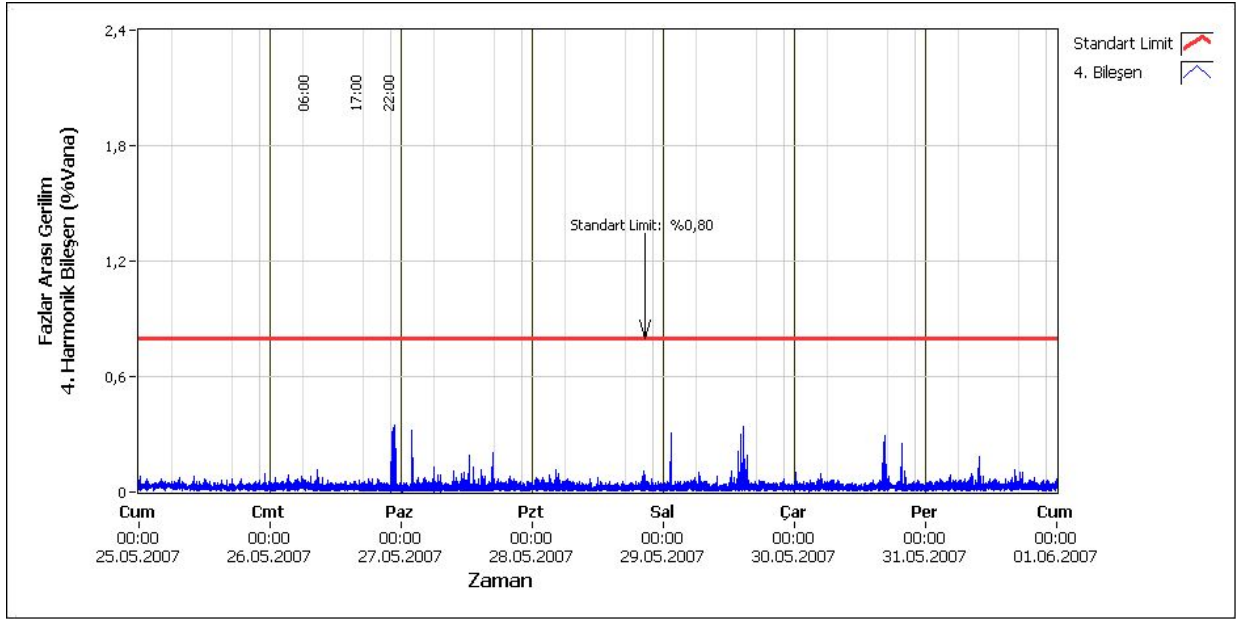
Şekil 5.8’de fazlar arası gerilimin 2., 11. ve 13. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine (V_{ana}) oranlarının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde 2., 11. ve 13. gerilim harmonik bileşenleri için izin verilen limit her üç harmonik bileşeni için eşit olup %1’dir. Bu nedenle bu harmonik bileşenleri aynı şekil

üzerinde gösterilmiştir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde 2., 11. ve 13. gerilim harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının izin verilen %1 limit değerinin çok altında oldukları görülmektedir.



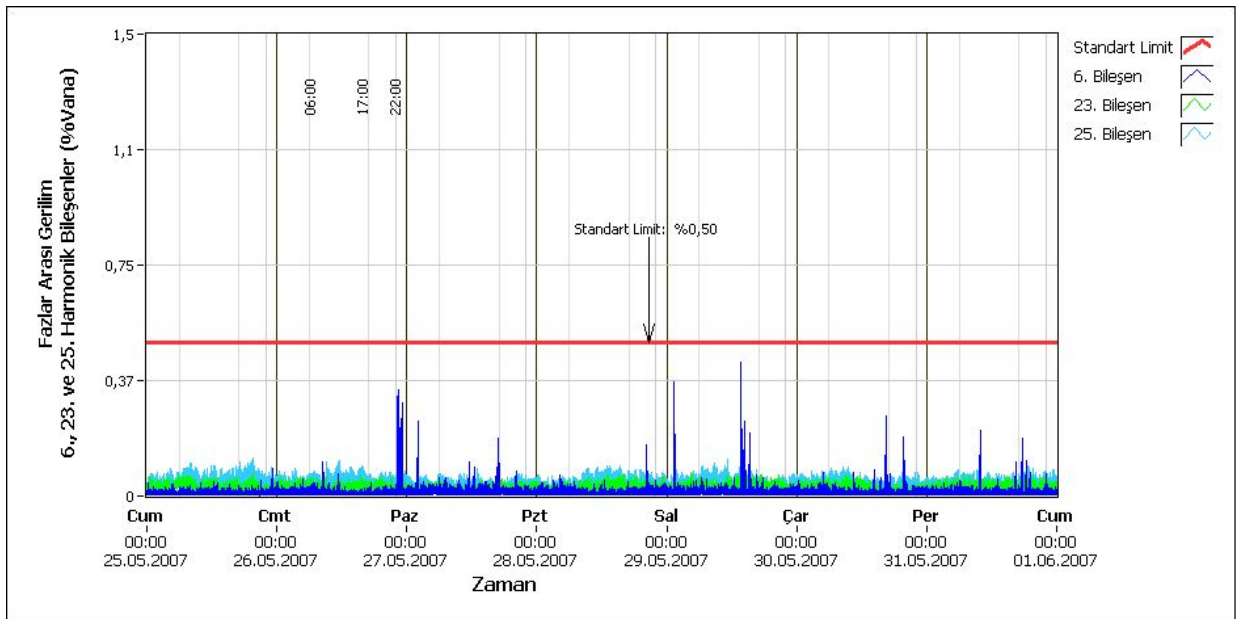
Şekil 5.9. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 3., 5. ve 7. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Şekil 5.9'da fazlar arası gerilimin 3., 5. ve 7. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde gerilimin 3., 5. ve 7. harmonik bileşenleri için izin verilen limit eşit olup %1,5 değerindedir. Bu nedenle bu harmonik bileşenleri aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde gerilimin 3. ve 7. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının izin verilen %1,5 limitini aşmadıkları ancak 5. harmonik bileşeninin ölçüm süresinin çoğunda %1,5 limitini aştığı görülmektedir. Bu transformatör merkezinde 5. harmonik bileşeni için önlem alınması gerekmektedir. Transformatörün sekonderinden beslenen yüklerin harmonik spektrumları incelenmeli akıma ait 5. harmonik bileşeni izin verilen limiti aşan abonelere harmonik filtresi tesis etmeleri önerilmelidir.



Şekil 5.10 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 4. harmonik bileşeni (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Şekil 5.10’da fazlar arası gerilimin 4. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde gerilimin 4. harmonik bileşeni için izin verilen limit %0,8’dir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde gerilimin 4. harmonik bileşeninin temel bileşen gerilimine oranının izin verilen % 0,8 limit değerinin çok altında oldukları görülmektedir.

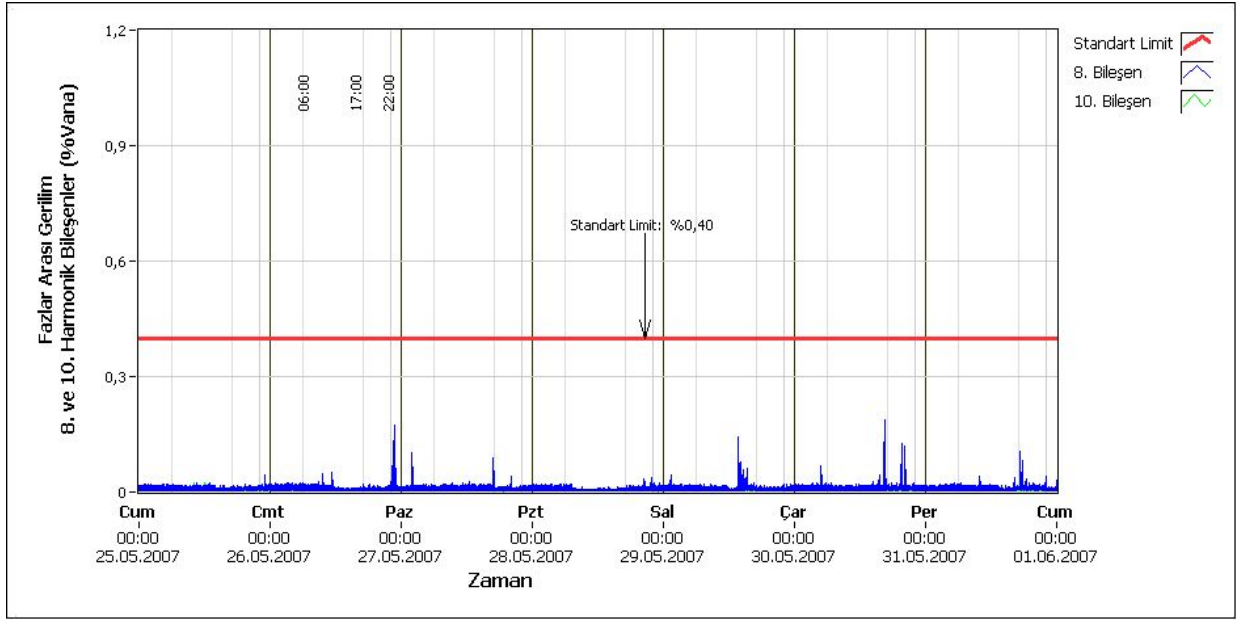


Şekil 5.11 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 6., 23. ve 25. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

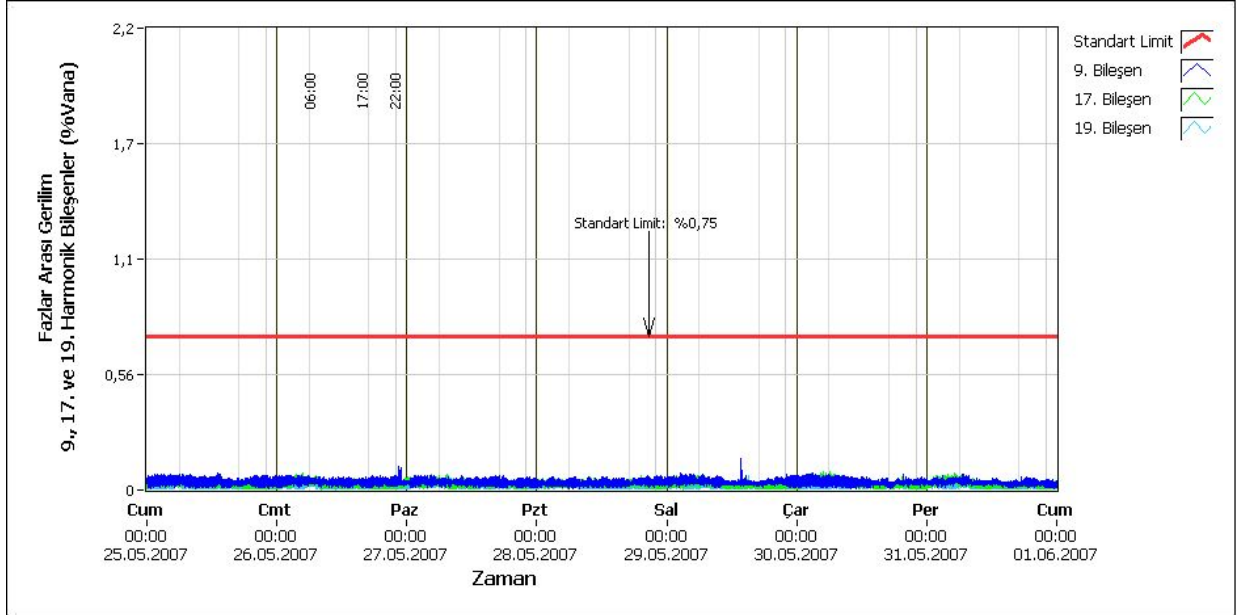
Şekil 5.11’de fazlar arası gerilimin 6., 23. ve 25. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde 6., 23. ve 25. gerilim harmonik bileşenleri için izin verilen limit her üç harmonik bileşeni için eşit olup % 0,5’dir. Bu nedenle bu harmonik bileşenleri aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde gerilimin 6., 23. ve 25. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının izin verilen %0,5 limit değerinin çok altında oldukları görülmektedir.

Ölçüm sonuçları incelendiğinde; gerilim harmonikleri ile ilgili tüm şekillerde ve akım değişiminin gösterildiği Şekil 5...’de görüldüğü gibi, 26.05.2007 cumartesi saat 22.00, 29.05.2007 salı saat 15.00, 30.05.2007 çarşamba saat 17.00 vb birkaç defa yük akımının aniden çok düşerek kısa süre sonra yükselmesi başka bir ifade ile bazı büyük yüklerin kısa süreli olarak devreden çıkıp tekrar devreye girmeleri sebebiyle meydana gelen geçici olaylar ve dalga formu bozulmalarından dolayı bu anlarda gerilime ait tüm çift harmonik bileşenlerin (2., 4.,6,...) genliklerinin anormal yükseldiği ancak izin verilen limiti aşmadığı tespit edilmektedir.

Şekil 5.12’de fazlar arası gerilimin 8. ve 10. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde 8. ve 10. gerilim harmonik bileşenleri için izin verilen limit her iki harmonik bileşeni için eşit olup % 0,4 değerindedir. Bu nedenle bu harmonik bileşenleri aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde gerilimin 8. ve 10. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının izin verilen %0,4 limit değerinin çok altında oldukları görülmektedir.

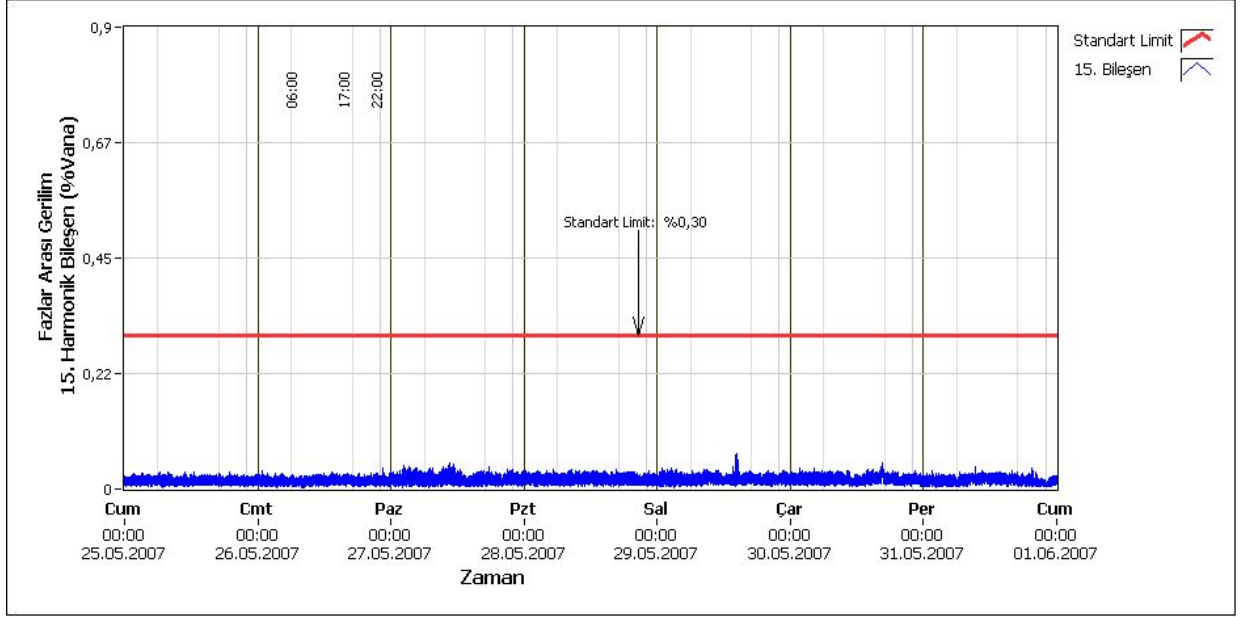


Şekil 5.12. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 8. ve 10. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

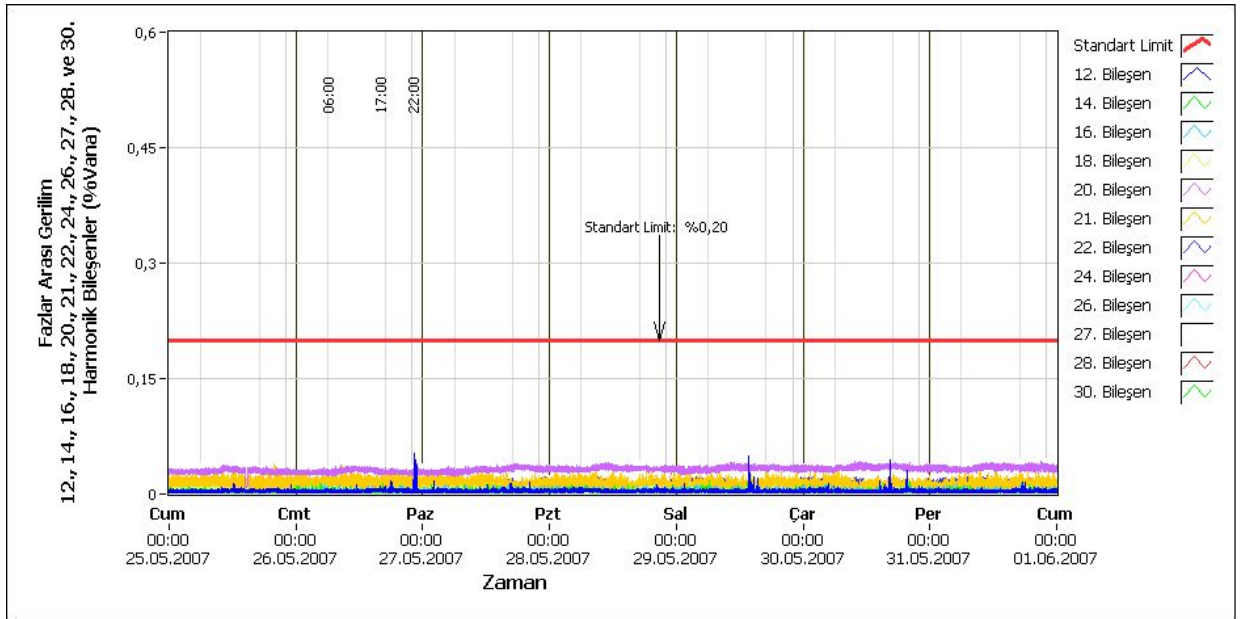


Şekil 5.13. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 9., 17. ve 19. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Şekil 5.13’de fazlar arası gerilimin 9., 17. ve 19. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde 9., 17. ve 19. gerilim harmonik bileşenleri için izin verilen limit her üç harmonik bileşeni için eşit olup % 0,4 değerindedir. Bu nedenle bu harmonik bileşenleri aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde gerilimin 9., 17. ve 19. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranlarının izin verilen % 0,75 limit değerinin çok altında oldukları görülmektedir.

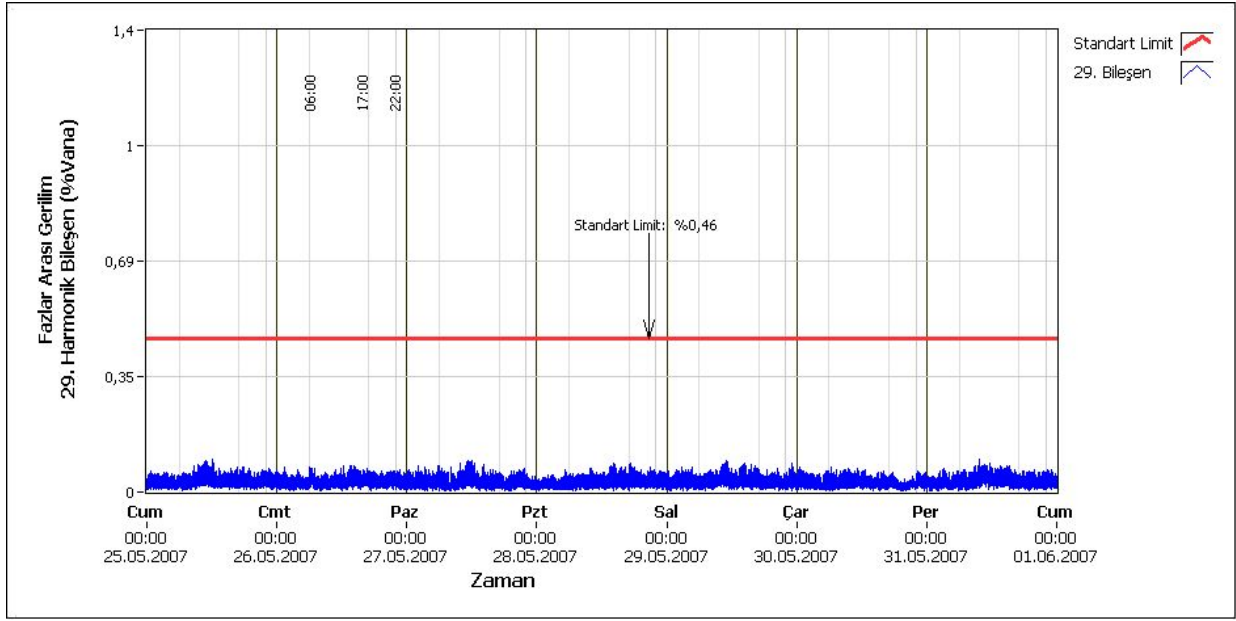


Şekil 5.14. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 15. harmonik bileşeni (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

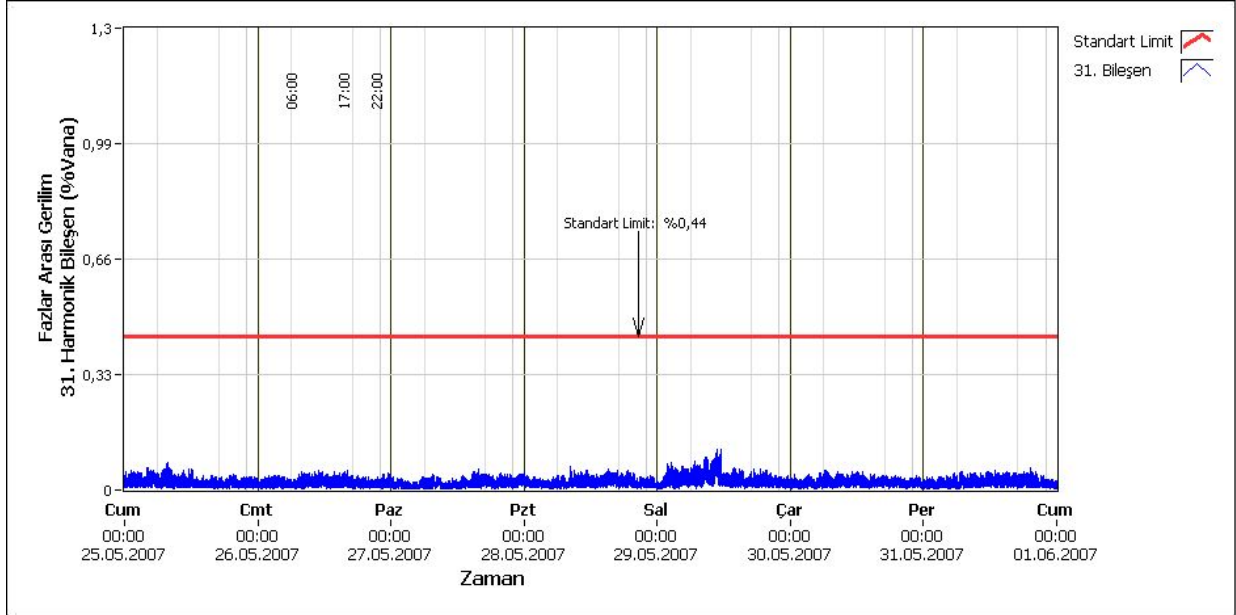


Şekil 5.15. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 12., 14., 16., 18., 20., 21., 22., 24., 26., 27., 28. ve 30. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Şekil 5.14’de fazlar arası gerilimin 15. harmonik bileşenlerinin temel bileşen gerilimine oranının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde gerilimin 15. harmonik bileşeni için izin verilen limit %0,3 değerindedir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde gerilimin 4. harmonik bileşeninin temel bileşen gerilimine oranının izin verilen % 0,3 limit değerinin çok altında oldukları görülmektedir.



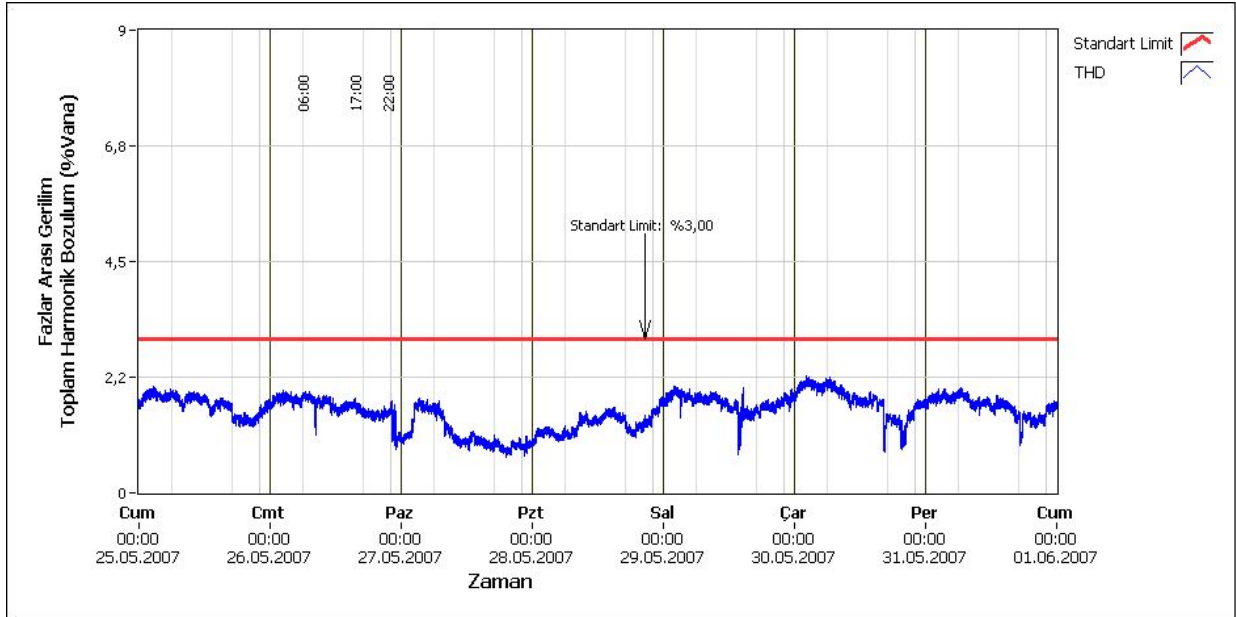
Şekil 5.16. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 29. harmonik bileşeni (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



Şekil 5.17. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim 31. harmonik bileşeni (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Şekil 5.16’da fazlar arası gerilimin 29. harmonik bileşeninin ve Şekil 5.17’de fazlar arası gerilimin 31. harmonik bileşeninin temel bileşen gerilimine oranının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimleri gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde gerilimin 29. harmonik bileşeni için izin verilen limit %0,46 (Çizelge 5.2’ye göre $0,2+0,3.(25/h) = 0,2+0,3.(25/29) = \%0,46$) ve 31. harmonik bileşeni için izin verilen limit %0,44 (Çizelge 5.2’ye göre $0,2+0,3.(25/h) = 0,2+0,3.(31/29) = \%0,44$) değerindedir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları

incelendiğinde gerilimin 29. harmonik bileşeninin ve 31. harmonik bileşeninin temel bileşen gerilimine oranının izin verilen limit değerinin çok altında oldukları görülmektedir.

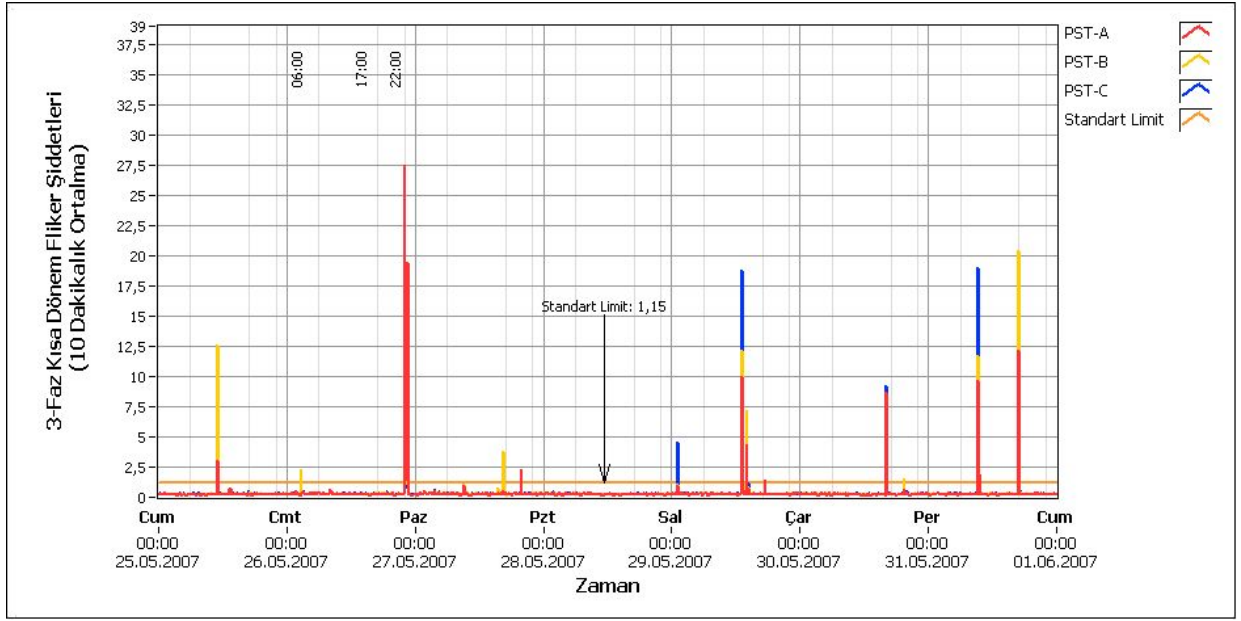


Şekil 5.18. TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, fazlar arası gerilim Toplam Harmonik Distorsiyonu (THDv) (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

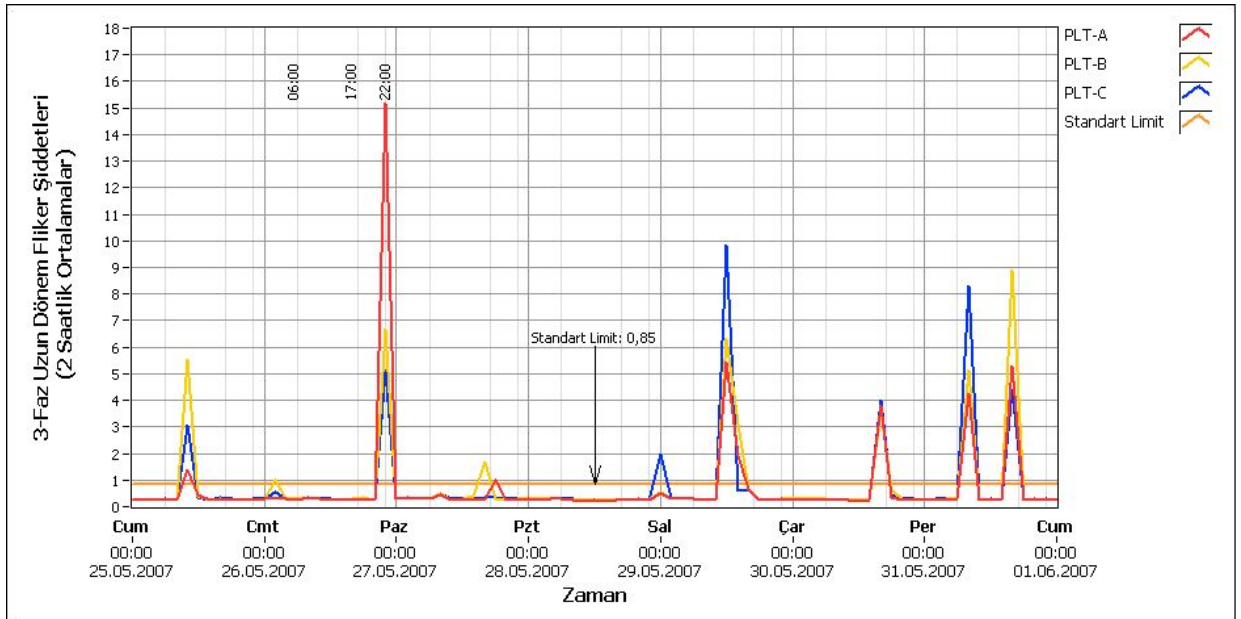
Şekil 5.18’de fazlar arası gerilimin Toplam Harmonik Distorsiyonu’nun (THDv) (%) olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre 20 – 154 kV arası iletim sisteminde gerilimin Toplam Harmonik Distorsiyonu için izin verilen limit % 3 değerindedir. Şekilde verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde gerilimin THD değerinin izin verilen % 3 limit değerini aşmadığı görülmektedir.

5.3.1.3. Gerilim kırışması (Fliker) Ölçümleri

Kırışmanın yaratacağı görsel rahatsızlığı ortadan kaldırmak üzere standartlar oluşturulmuştur. Fliker ölçümleri ile ilgili olarak aşağıda verilen şekillerde Pst ve Plt kısaltmalı tanımlamalar verilmiştir. Bu tanımlamalar IEC “flickermeter” standardında yapılmıştır. Pst, 10 dakikalık bir aralıkta elde edilen kısa dönem kırışma algı ölçüsüdür. Plt ise, iki saatlik bir aralıkta elde edilen uzun dönem kırışma algı ölçüsüdür. Bir Plt, 12 adet birbirini takip eden Pst değerinden elde edilir.



Şekil 5.19 Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, P_{st} (Kısa Dönem Fliker) Değişimi (10 dakikalık ortalamalar şeklinde)



Şekil 5.20 Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, P_{lt} (Uzun Dönem Fliker) Değişimi (2 saatlik ortalamalar şeklinde)

EPDK, P_{st} ve P_{lt} için IEEE tarafından belirlenmiş değerleri kullanmaktadır. Yukarıdaki grafiklerden de görülebileceği üzere P_{st} ve P_{lt} değerleri ölçüm süresi boyunca çok kısa zaman dilimlerinde IEEE standartlarındaki ve aşağıdaki tabloda verilen 'Elektrik Piyasası

Şebeke Yönetmeliği’ndeki ve IEEE standartındaki sınır değerlerini (P_{st} için 1.15 , P_{lt} için 0.85) geçmektedir.

Çizelge 5.4 ‘Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’nde İzin Verilen Azami Fliker (Kırpışma) Şiddeti

Gerilim Seviyesi	Fliker Şiddeti	
	P_{st}	P_{lt}
$V > 154 \text{ kV}$	0,85	0,63
$34.5 \text{ kV} < V < 154 \text{ kV}$	0,97	0,72
$1 \text{ kV} < V < 34.5 \text{ kV}$	1,15	0,85
$V < 1 \text{ kV}$	1,15	0,85

Sınır değerlerini aştığı zaman dilimlerini ölçüm süresiyle karşılaştırarak ölçüm süresinin yüzde kaçında sınır değerlerinin aşıldığını gösteren değerler de buna uygun olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

Çizelge 5.5 Fliker ölçüm sonuçlarına göre kısa dönem fliker şiddetinin (P_{st}) standartta izin verilen 1,15 değerini geçme yüzdesi

	10 dakikalık P_{st} değerlerinin standartları geçme yüzdesi
Faz-a	1.4881
Faz-b	1,68651
Faz-c	1.4881

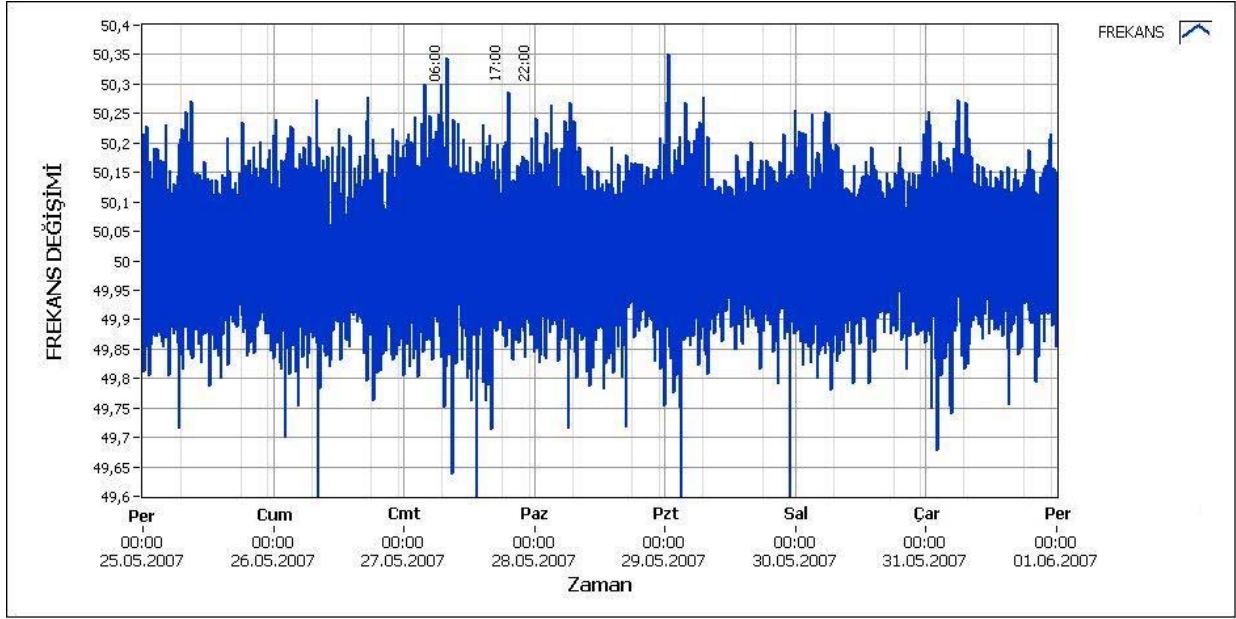
Çizelge 5.6 Fliker ölçüm sonuçlarına göre uzun dönem fliker şiddetinin (P_{lt}) standartta izin verilen 0,85 değerini geçme yüzdesi

	2 saatlik P_{lt} değerlerinin standartları geçme yüzdesi
Faz-a	9,52381
Faz-b	10,7143
Faz-c	8,3333

Bu değerler IEC 61000-4-30 “Fliker (Gerilim Kırpışması)” bölümündeki ifadelere göre analiz edilirse, ölçümlerde elde edilen 3 faz fliker şiddeti değerleri P_{st} için ölçüm süresinin %1’inde sınır değerlerini geçme tolerans şartlarını sağlamadığı, P_{lt} değerleri için ise %5 tolerans şartını sağlamadığı görülmektedir.

5.3.1.4 Gerilimdeki Frekans Değişimi

Güç kalitesi için önemli parametrelerden biri de frekanstır. Ölçüm yapılan sistemde 154 kV bağlantı noktasında yedi günlük ölçüm süresince frekans ölçülmüş ve frekans değişimi Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21 Ototransit TM 154 kV barasındaki , 7 günlük Frekans Değişimi, (1 saniyelik veriler şeklinde)

Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği’nde frekans ile ilgili olarak Madde-9’a göre, sistemin nominal frekansı TEİAŞ tarafından 50 Hertz (Hz) etrafında 49.8 - 50.2 Hz aralığında kontrol edilir, işletme sınırı 10 dakikadan daha uzun süre geçilemez. Şekil 5.21’de gösterilen frekans değişimleri incelendiğinde genel olarak frekans değerlerinin ortalaması 50 Hz olacak biçimde başarılı bir şekilde 49.8 - 50.2 Hz aralığında kaldığı kısa süreli olarak zaman zaman izin verilen sınırların dışında çıktığı gözlenmektedir.

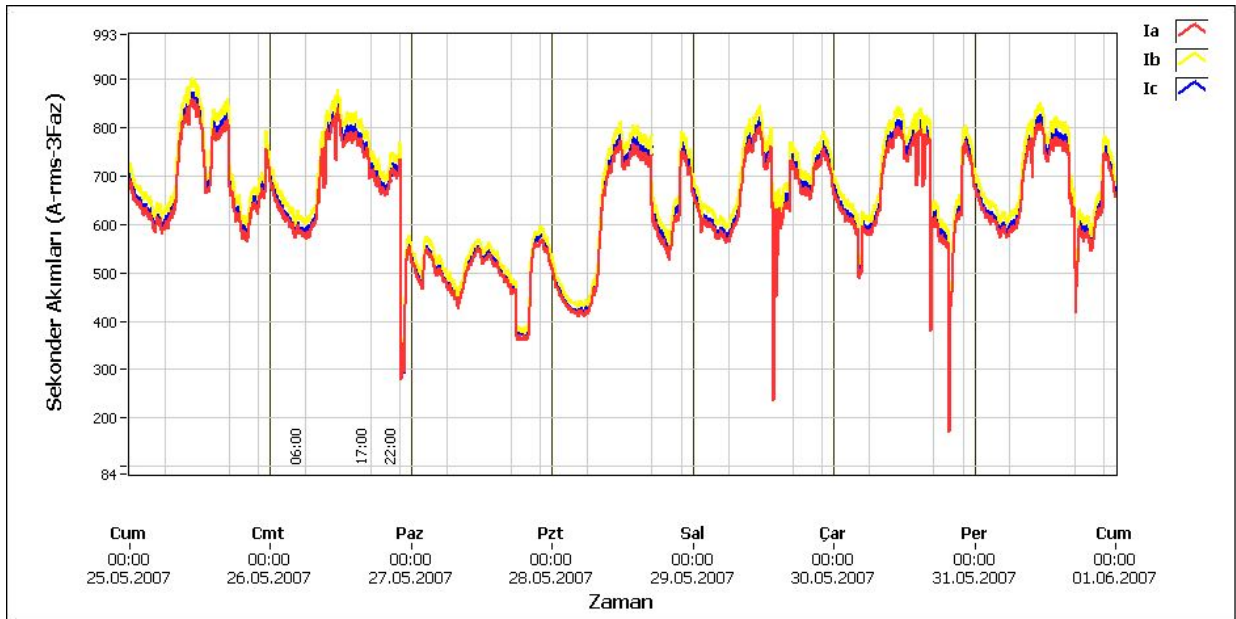
5.3.2. Akım Ölçümleri

5.3.2.1. Akım Harmonikleri ile İlgili Ölçümler

Şekil 5.22’de 154/33,6 kV gerilimli 100 MVA nominal gücündeki Transformatör-A’nın sekonder tarafına ait faz akımlarının temel bileşen 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Transformatörün 33,6 kV nominal gerilim altında nominal akımı,

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{100.10^6}{\sqrt{3}.33,6.10^3} = 1718 \text{ A}$$

olup ölçüm yapılan yedi günlük süre içerisinde transformatörden çekilen yük akımının nominal akımın altında olduğu, transformatörün yaklaşık %50 yüklü olduğu görülmektedir.



Şekil 5.22 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının temel bileşeni (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Aşağıda akım harmonikleri ile ilgili ölçüm sonuçları verilmiştir. Akım harmonikleri ilgili değerlendirmeler Elektrik Piyasası Denetleme Kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” ne göre yapılmıştır. Bu yönetmelik ekinde bulunan ve aşağıda Çizelge 5.7’de verilen Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği’nde kabul edilebilir akım harmonik limitleri gözönüne alınarak akım harmonikleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. IEEE 519-1992 standartında da aynı akım harmonik limitleri belirlenmiştir. Çizelge 5.7’de I_k , ortak kuplaj

noktasındaki maksimum sistem kısa devre akımı ve I_L , ortak kuplaj noktasındaki maksimum yük akımının en büyük bileşeni olmak üzere I_k/I_L oranına bağlı olarak akım harmonik limitleri değişmektedir. I_k/I_L oranı büyüdükçe sistemde izin verilen akım harmonik limitleri yükselmektedir. Bu sınırlandırmaya göre, aynı gerilim seviyesinde, aynı harmonik akım bileşenine sahip iki yükten kısa devre gücü büyük olan bağlantı noktasına bağlı yükün daha fazla harmonikli akım çekmesine izin verilmektedir.

Çizelge 5.7 Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği'nde kabul edilebilir akım harmonik limitleri

Harmonik Sırası		OG $1 < U_n \leq 34.5$					YG $34.5 < U_n \leq 154$					ÇYG $U_n > 154$				
Grup	No	I_k/I_L					I_k/I_L					I_k/I_L				
		<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 L E R	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
	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.																
Toplam Talep Bozulumu		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5
Bu değerler 3 saniyelik ortalamalardır.																
I_k : Ortak kuplaj noktasındaki maksimum sistem kısa devre akımı I_L : Ortak kuplaj noktasındaki maksimum yük akımının en büyük bileşeni																

Şekil 5.22'den bir haftalık ölçüm süresince çekilen en yüksek akım değeri $I_L = 895$ A olarak ölçülmüştür. Akım harmonikleri ile ilgili limitleri belirlemek için 33.6 kV gerilimli Trafo-A'nın sekonder barasının kısa devre akımının (I_k) belirlenmesi gerekmektedir.

Ototransit TM'nin 154 kV barasının kısa devre gücü 4534 MVA'dır. Transformatörün nominal gerilimi 33,6 kV, nominal gücü 100 MVA ve bağıl kısa devre gerilimi $u_k = \%12,1$ olduğuna göre per-unit (p.u.) değer hesabı için baz güç $S_B = 100$ MVA alınarak,

154 kV barasında sistemin kısa devre gücü, $s_k = S_K / S_B = 4534 / 100 = 45,34$ p.u. ,

154 kV barasında sistemin kısa devre empedansı, $x_s = 1 / s_k = 1 / 45,34 = 0,022$ p.u.,

Transformatörün bağıl kısa devre gerilimi u_k , kısa devre empedansına (x_{Tr}) eşit olduğu için ($u_k = x_{Tr}$)

33,6 kV barasının kısa devre empedansı, $x_k = x_s + x_{Tr} = 0,022 + 0,121 = 0,143$ p.u.

33,6 kV barasının kısa devre akımı, $i_k = 1 / x_k = 1 / 0,143 = 6,993$ p.u.

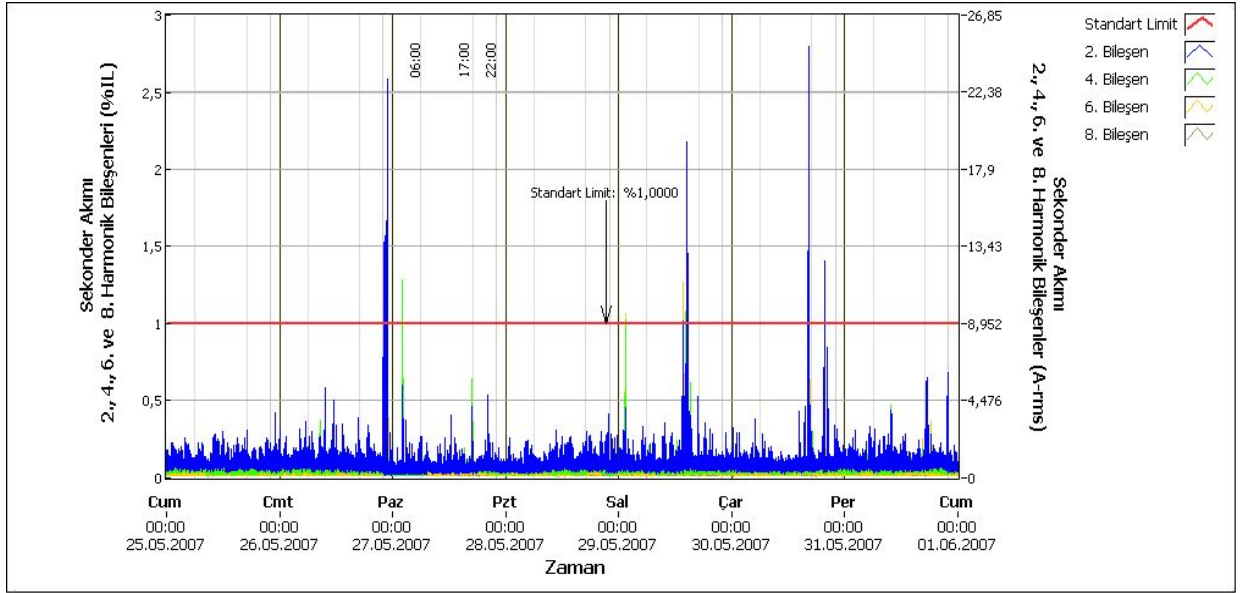
33,6 kV barasının baz akımı, $I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} = \frac{100.10^6}{\sqrt{3}.33,6.10^3} = 1718$ A olduğuna göre,

33,6 kV barasının gerçek kısa devre akımı, $I_k = i_k . I_B = 6,993.1718 = 11498$ A

$I_k / I_L = 11498 / 895 = 12,85 < 20$ olarak bulunur.

Ölçüm yapılan noktada nominal gerilim 33,6 kV olduğu için Çizelge 5.7'de akım harmonikleri için O.G. $1 < U_n \leq 34,5$ kV sütunu seçilir. (I_k / I_L) < 20 olması sebebiyle akım harmonik limitleri için birinci sütun seçilir (gri ile renklendirilmiştir).

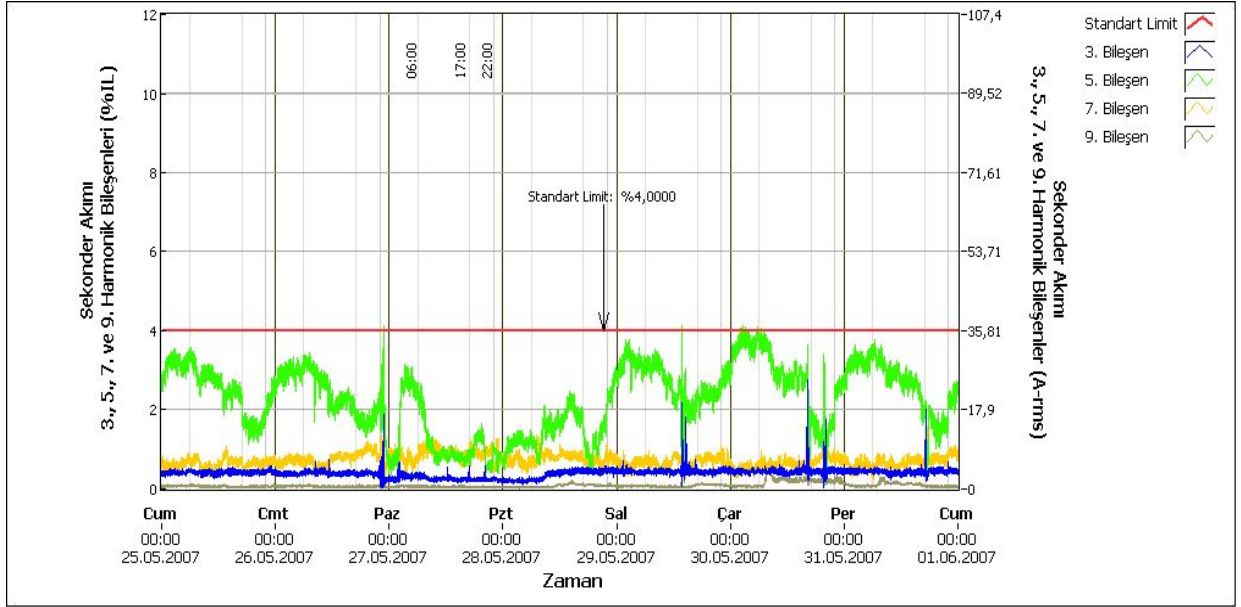
Aşağıdaki şekillerde akım harmonikleri ile ilgili ölçüm sonuçları ve bu sonuçların yukarıda belirlenen sütundaki limitlere göre değerlendirilmesi yapılmıştır.



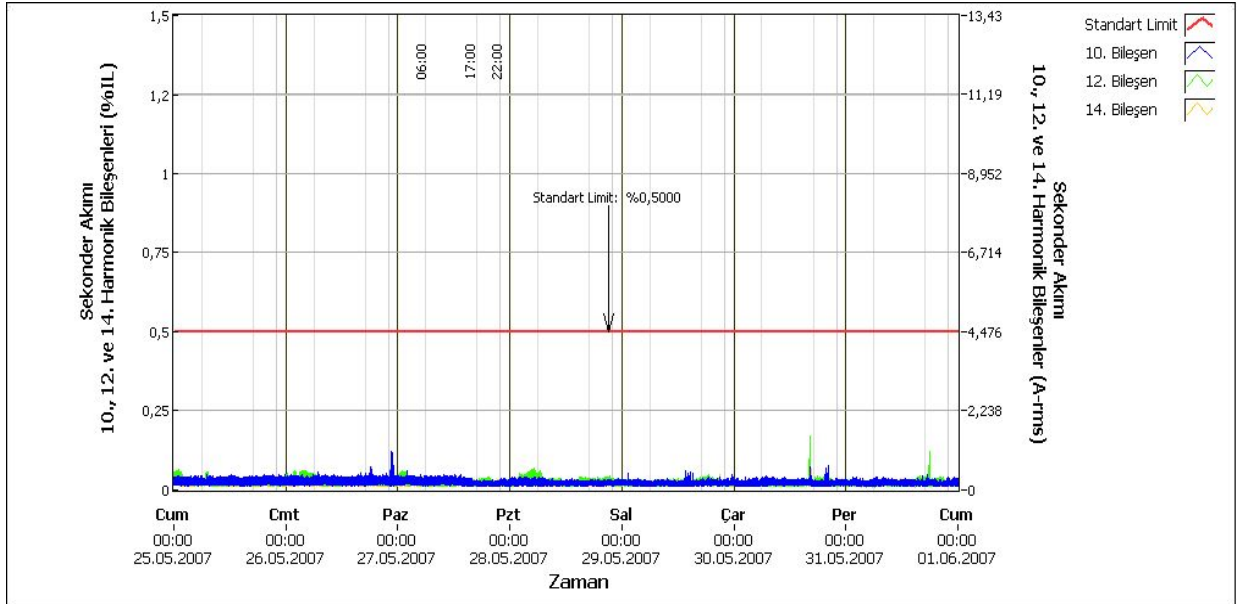
Şekil 5.23 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 2., 4., 6. ve 8. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Şekil 5.23’de transformatörün sekonder faz akımlarının 2., 4., 6. ve 8. bileşenlerinin temel bileşen akımına oranlarının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Şekilde sol eksen % olarak, sağ eksen Amper olarak harmonik bileşenlerin efektif değerlerini göstermektedir. Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği’nde kabul edilebilir akım harmonik limitleri her dört harmonik bileşeni için eşit olup % 1 değerindedir. Ölçüm süresince akımın 6. ve 8. harmonik bileşenleri izin verilen %1 limitini aşmamış, 2. ve 4. harmonik bileşenlerinin kısa süreli olarak limiti aştıkları görülmektedir. 2. ve 4. harmonik akım bileşenlerinin limiti aştığı anlar transformatörün büyük güçlü yüklerinin kısa süreli olarak devreden çıkıp tekrar devreye girdiği anlardır.

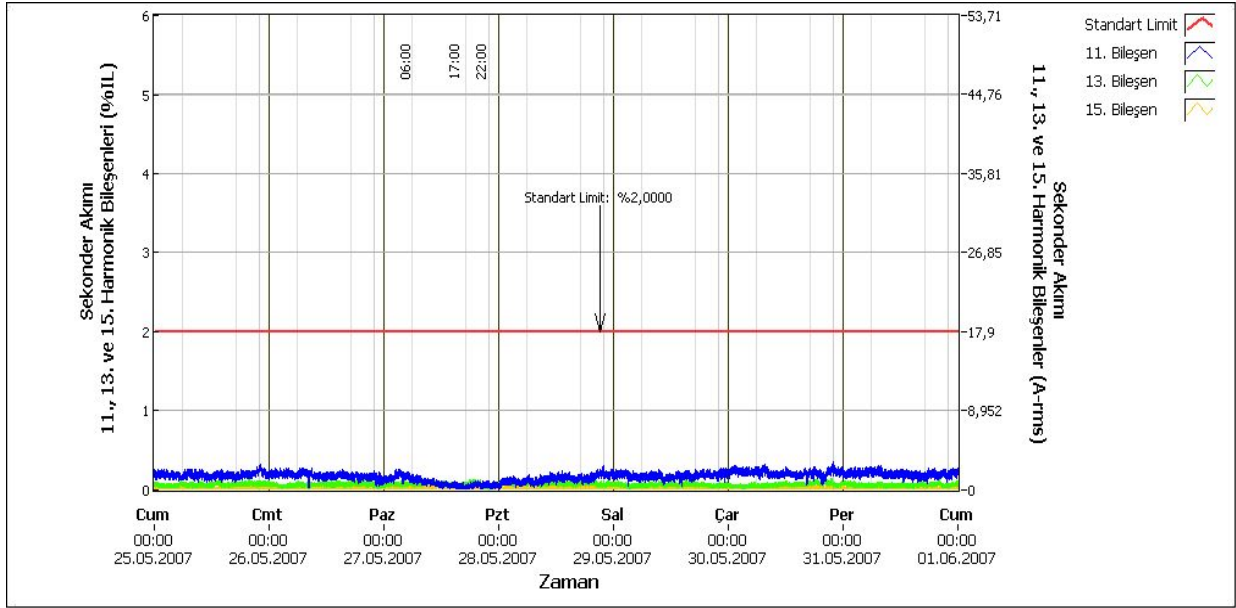
Şekil 5.24’de transformatörün sekonder faz akımlarının 3., 5., 7. ve 9. bileşenlerinin temel bileşen akımına oranlarının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği’nde kabul edilebilir akım harmonik limitleri her dört harmonik bileşeni için eşit olup % 4 değerindedir. Ölçüm süresince akımın 5. harmonik bileşeninin diğer harmonik bileşenlerine göre oldukça yüksek olduğu ve 5. harmonik bileşenin zaman zaman %4 limitinin üzerine çıktığı, 3., 7. ve 9. harmonik bileşenlerinin limiti aşmadıkları, genliklerinin düşük olduğu görülmektedir.



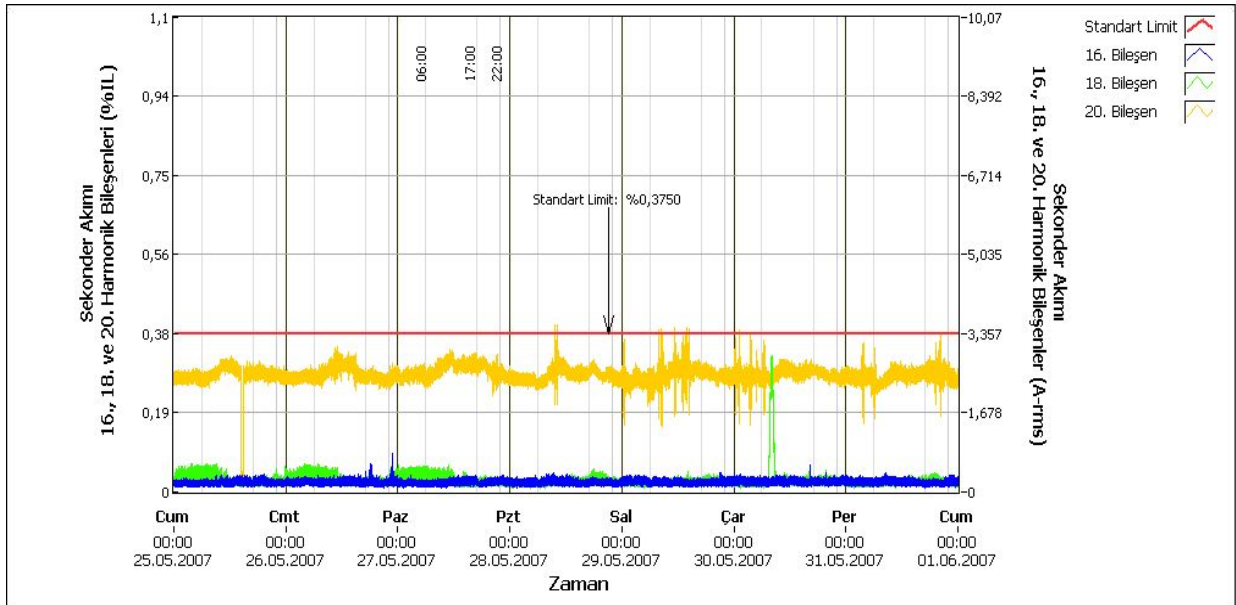
Şekil 5.24 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 3., 5., 7. ve 9. harmonik bileşeni (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



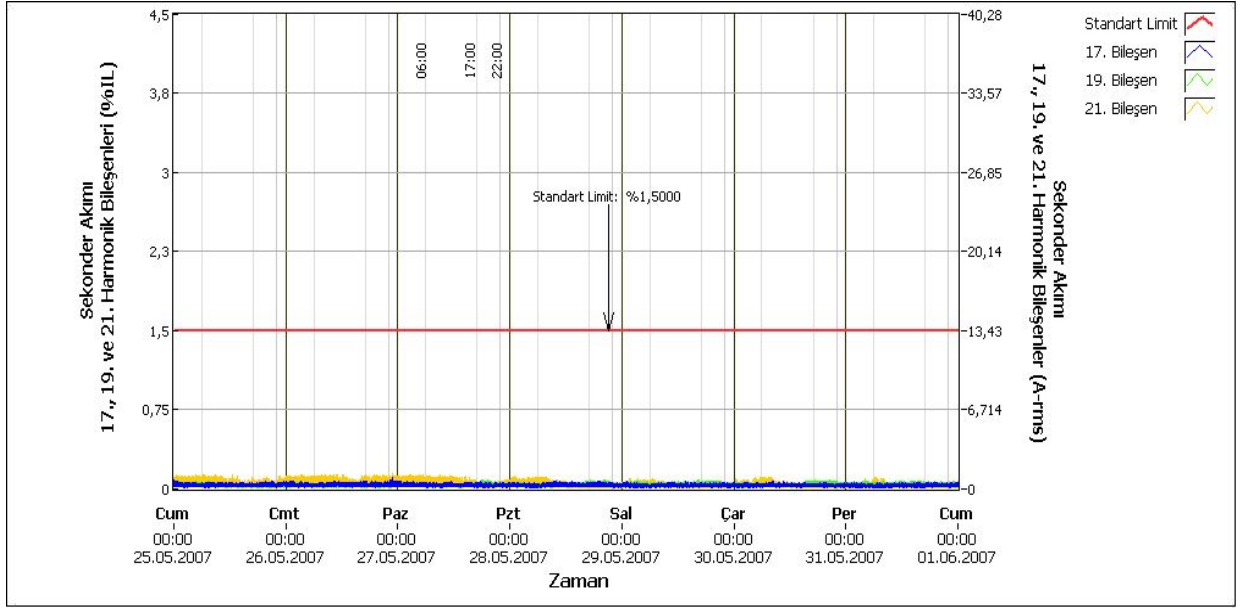
Şekil 5.25 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 10., 12. ve 14. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



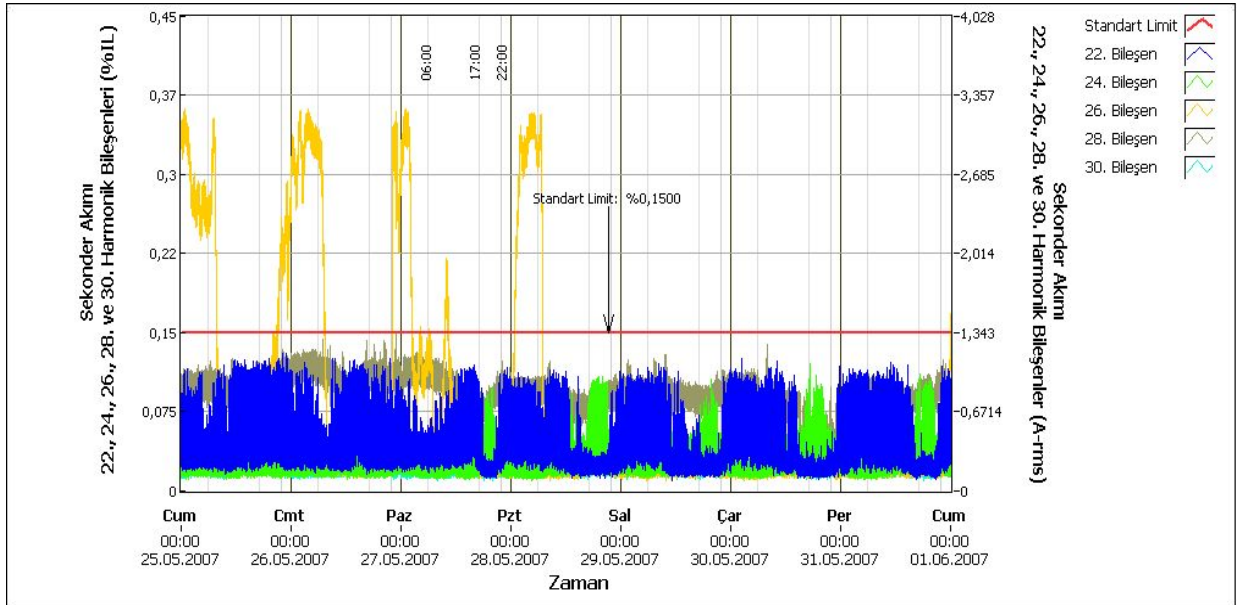
Şekil 5.26 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 11., 13. ve 15. harmonik bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



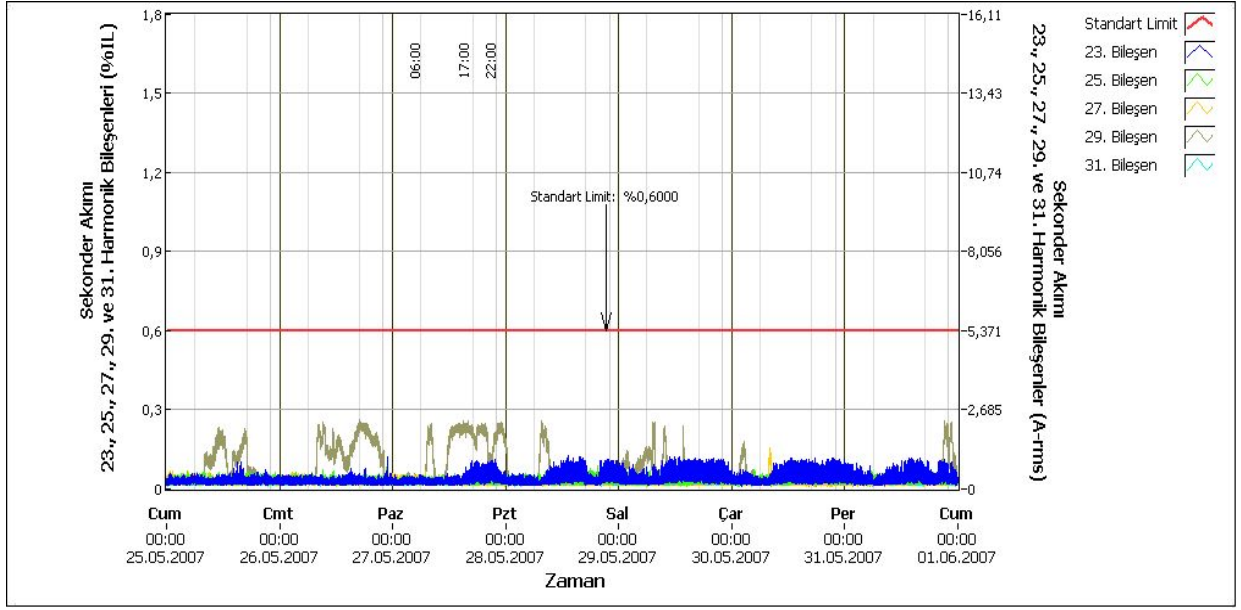
Şekil 5.27 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 16., 18. ve 20. Harmonik Bileşeni (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



Şekil 5.28 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 17., 19. ve 21. Harmonik Bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



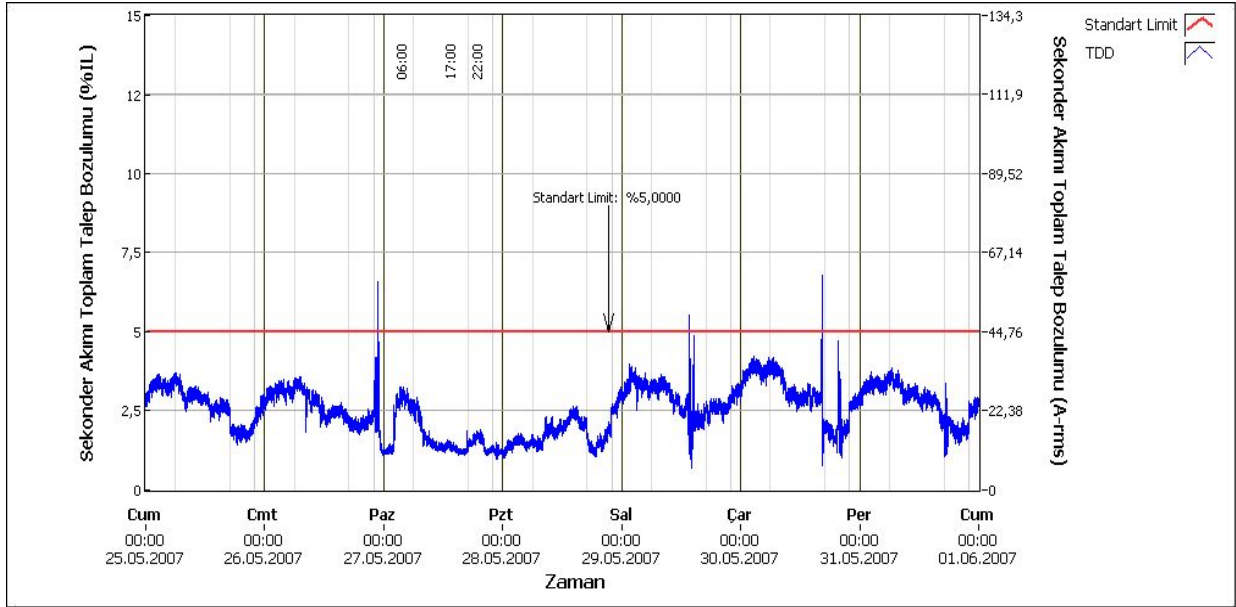
Şekil 5.29 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 22., 24., 26., 28. ve 30. Harmonik Bileşeni (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)



Şekil 5.30 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının 23., 25., 27., 29. ve 31. Harmonik Bileşenleri (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Şekil 5.25 - Şekil 5.30'da faz akımlarının 10. – 31. harmonik bileşenleri arasındaki bu iki bileşen de dahil tüm harmonik temel bileşen akımına oranlarının (% olarak) 3 saniyelik ortalamalarının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Bu harmonik akım bileşenlerinden sadece 20. harmonik bileşeninin anlık olarak 26. harmonik bileşeninin ise ölçüm süresinin çoğunda Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği'nde verilen limitleri aştığı görülmektedir. kabul edilebilir akım harmonik limitleri her dört harmonik bileşeni için eşit olup % 4 değerindedir. Ölçüm süresince akımın 5. harmonik bileşeninin diğer harmonik bileşenlerine göre oldukça yüksek olduğu ve 5. harmonik bileşenin zaman zaman %4 limitinin üzerine çıktığı, 3., 7. ve 9. harmonik bileşenlerinin limiti aşmadıkları, genliklerinin düşük olduğu görülmektedir.

Ölçüm yapılan transformatör merkezinde akım harmonikleri ile ilgili olarak genel bir değerlendirme yapılacak olursa; 5. harmonik ile birlikte 20. ve 26 .harmonik akımların da limiti aşmış olmalarına rağmen daha önce incelenen gerilim harmoniklerinde 5. harmonik bileşenin limiti aştığı dikkate alındığında genel olarak sistemde 5. harmonik bileşen için önlem alınmasının gerektiği tespit edilmektedir.

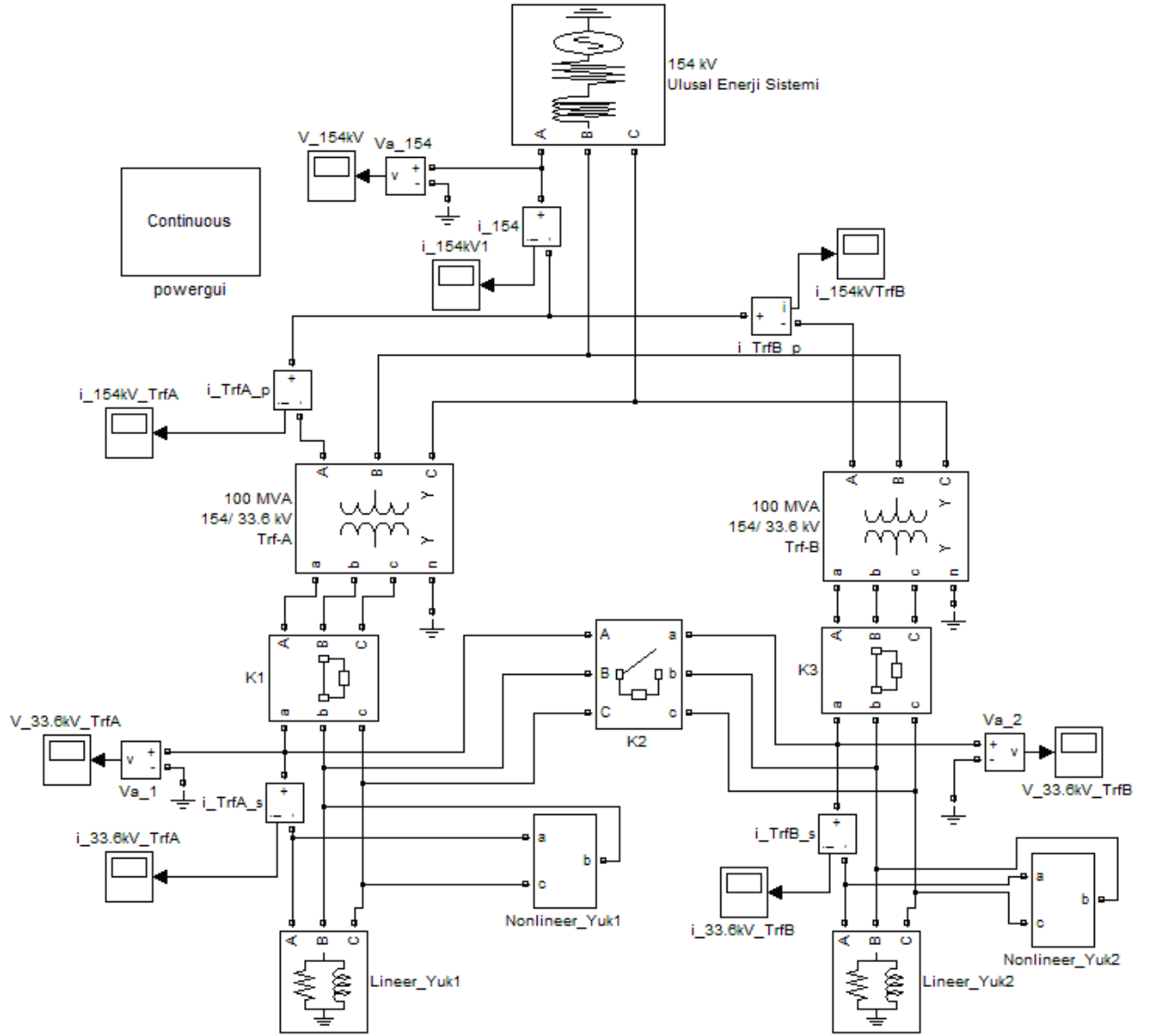


Şekil 5.31 TEİAŞ Ototransit TM 154/33,6 kV Trafo A sekonderi , 7 günlük, faz akımlarının Toplam Talep Distorsiyonu (TDD) (3 saniyelik ortalamalar şeklinde)

Şekil 5.30'da faz akımlarının toplam talep distorsiyonunun (TDD) 3 saniyelik ortalamasının zaman göre değişimi gösterilmiştir. Çizelge 5.7'de verilen Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği'nde kabul edilebilir akım harmonik limitlerine göre O.G. için $(I_k/I_L) < 20$ sütununda toplam talep bozulumu, $TDD < \%5$ olmalıdır. Ölçüm sonuçlarına göre toplam talep distorsiyonu (TDD) değerinin genel olarak limitin altında olduğu, anlık olarak limiti aştığı görülmektedir.

5.4. Simülasyon Çalışması

Tez çalışmasının bu kısmında, güç kalitesi ölçümlerinin yapıldığı, Şekil 5.1'de tek hat şeması verilen Otosansit Transformator Merkezi'nin MATLAB Simulink programı ile simülasyonu gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. İncelenen transformator merkezinin tüm fiderlerinde, tüm noktalarında ölçüm yapılmadığı için bu sistemin birebir eşdeğerinin simülasyonunun yapılması mümkün olmamaktadır. Ancak ölçüm sonuçlarında 154/33,6 kV nominal gerilimli Tr-A ve Tr-B transformatorlerinin sekonderlerinden çekilen toplam güç, temel bileşen gerilimi, akım harmonik değerleri ve gerilim harmonik verileri bulunmaktadır. Bu veriler yardımıyla her bir güç transformatorünün sekonder barasına bağlı tüm fiderlerden çekilen toplam güçler ve harmonik akımları dikkate alınarak transformatorlerin sekonderlerinde üç fazlı dengeli bir yükün olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 5.32 Ölçüm yapılan üç fazlı sisteme ait MATLAB Simulink simülasyon modeli (İşletme modu-1 için)

Ölçüm yapılan transformatör merkezindeki güç transformatörlerinin teknik özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çizelge 5.8’de ölçümlerden elde edilen Tr-A ve Tr-B güç transformatörlerine ait sekonder yük değerleri, Çizelge 5.9’da ise Tr-A ve Tr-B güç transformatörlerinin sekonder çıkışlarında ölçülen harmonik akım değerleri verilmiştir. Ölçüm yapılan sistemde 3.-31. harmonik bileşen arasındaki tüm harmonik bileşenler ölçülmüş ise de simülasyonda sadece en yüksek genlikli iki bileşen olan 5. ve 7. harmonik bileşenleri dikkate alınmıştır. Şekil 5.31’de ölçüm yapılan üç fazlı sisteme ait MATLAB Simulink simülasyon modeli gösterilmiştir. MATLAB Simulink ile yapılan modelleme üç fazlı olarak yapılmış, sistemin dengeli olduğu kabul edilmiş, modellemelerde transformatör

sekonder yükleri üç fazlı paralel R-L elemanlarından oluşan sabit güçlü P,Q yükü olarak, harmonik akımları frekansı harmonik frekansına eşit olan üç fazlı akım kaynakları ile temsil edilmiştir. Güç transformatörlerinin dönüştürme oranları 154/33,6 kV olmasına rağmen, ölçüm yapılan sistemde 154 kV primer geriliminin biraz düşük olması sebebiyle sekonder çıkışının 34,5 kV kademesine ayarlanmış olmasına modellemeye de dikkat edilmiştir.

Çizelge 5.8 Transformatörlerin ölçümlerden elde edilen sekonder yük değerleri

	Transformatör-A	Transformatör-B
S (MVA)	40,00	48,40
P (MW)	39,00	47,47
Q (MVar)	9,00 (end.)	9,68 (end.)

Çizelge 5.9 Transformatörlerin ölçümlerden elde edilen sekonder harmonik akımı değerleri

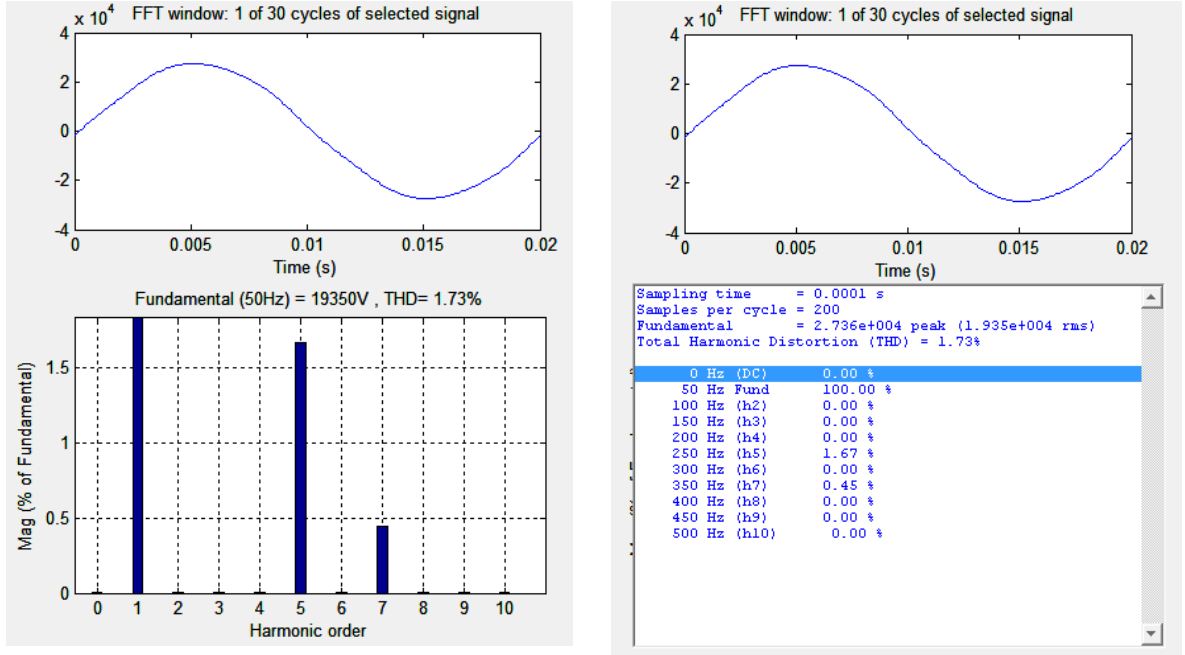
		Trf. – A Sekonder	Trf. – B Sekonder
Sekonder temel bileşen akımı	I₁ (A)	680	821
% olarak 5. harmonik akımı	I₅/I₁ (%)	3,84	5,04
% olarak 7. harmonik akımı	I₇/I₁ (%)	0,94	0,48
Yük akımının en büyük bileşeni	I_L (A)	895	1037
Akımın toplam talep distorsiyonu	TTD (%)	2,97	3,93

Ölçümün yapıldığı anda transformatörlerin sekonderleri birbirine bağlı değildir, transformatörler paralel olarak çalışmamaktadır. Ölçümün yapıldığı işletme koşullarında sistemin çalışmasını etkilememek için transformatörlerin paralel çalışmasını test etmek mümkün olmamıştır. Bu durum geliştirilen simülasyon modeli üzerinde incelenmiştir. Şekil 5.31’de gösterilen simülasyon modeli üzerindeki K2 kesici kapatıldığında transformatörler paralel çalışmaktadır. Transformatörlerin yükü aynı kabul edilmektedir. Simülasyonda iki farklı işletme modu dikkate alınmıştır. Bunlar,

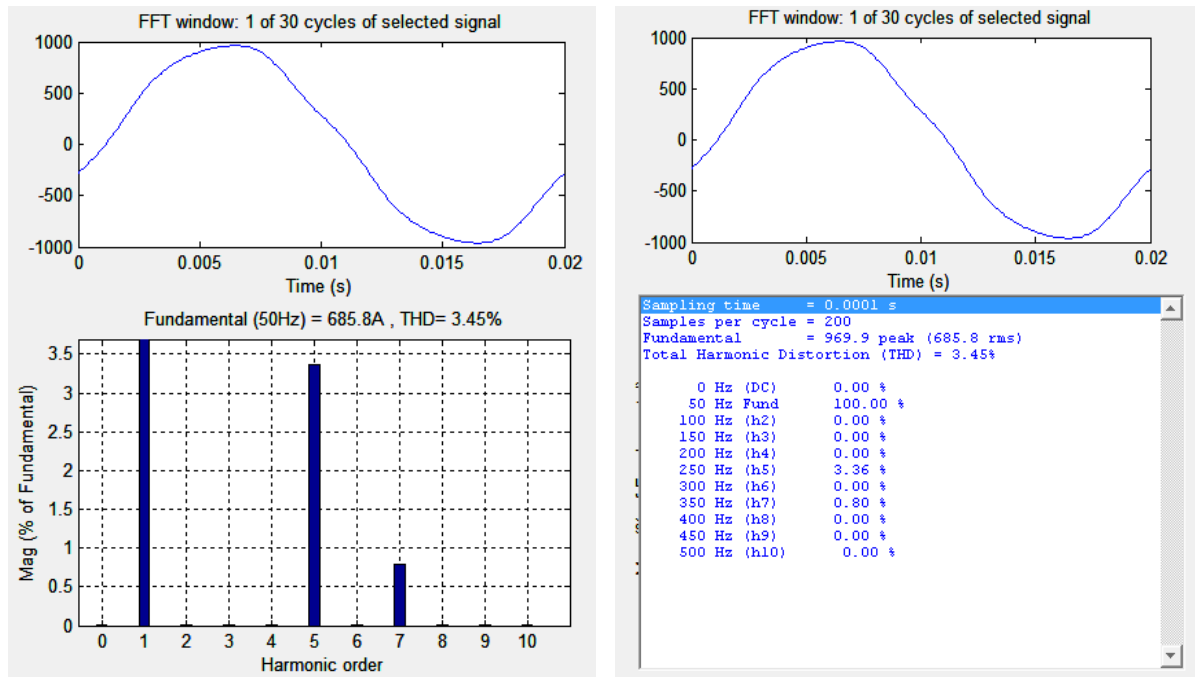
- **İşletme modu-1** : K2 kesicisi açık, Tr-A ve Tr-B’nin sekonder baraları birbirinden ayrı, transformatörler paralel çalışmıyor,
- **İşletme modu-2** : K2 kesicisi kapalı, Tr-A ve Tr-B’nin sekonder baraları birbirine bağlı, transformatörler paralel çalışıyor.

5.4.1. İşletme Modu-1 için Simülasyon Sonuçları

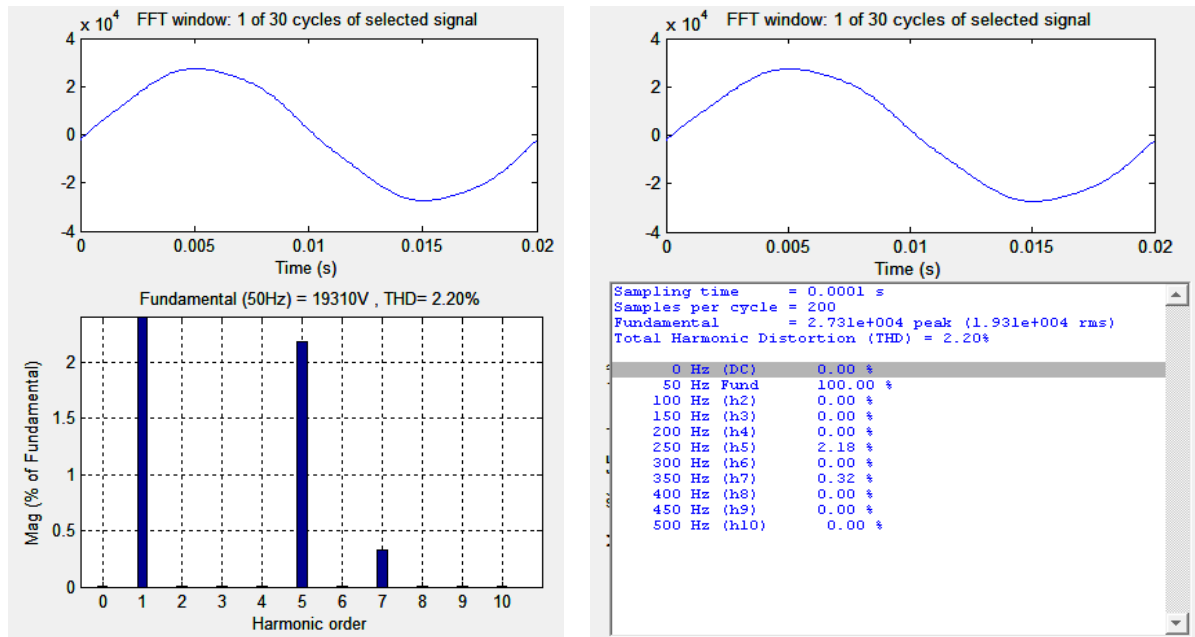
Transformatörlerin 154 kV barasından beslenen güç transformatörlerinin sekonder baralarının birbirinden ayrı olması durumunda yapılan simülasyondan elde edilen simülasyon sonuçları aşağıda Şekil 5.32- Şekil 5.34’de verilmiştir. Tez çalışması güç kalitesi ölçümleri ile ilgili olduğu için simülasyonda baralara ait harmonik sonuçları üzerinde durulmuştur.



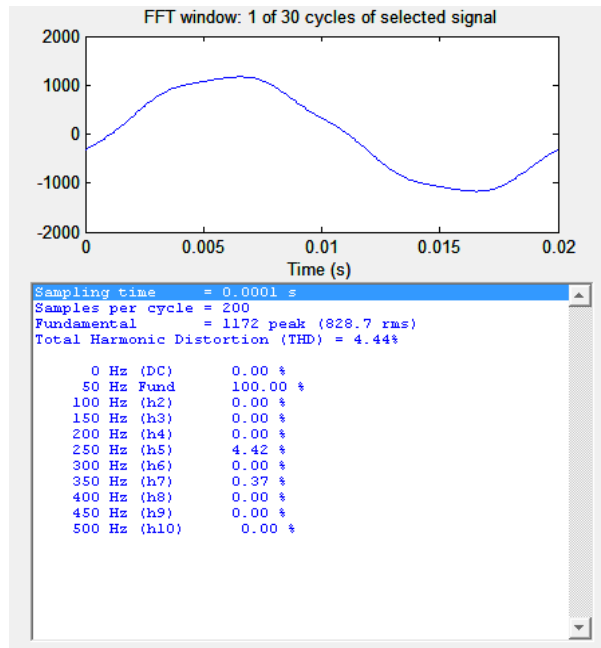
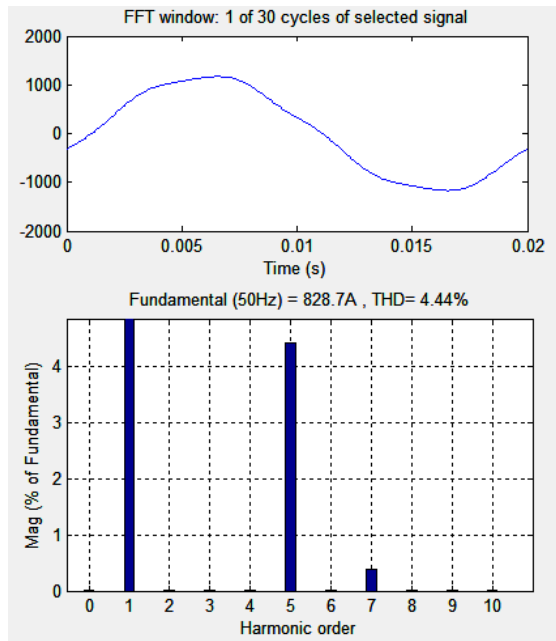
Şekil 5.33 İşletme Modu-1 için Tr-A sekonder barasına ait gerilim harmonik spektrumu



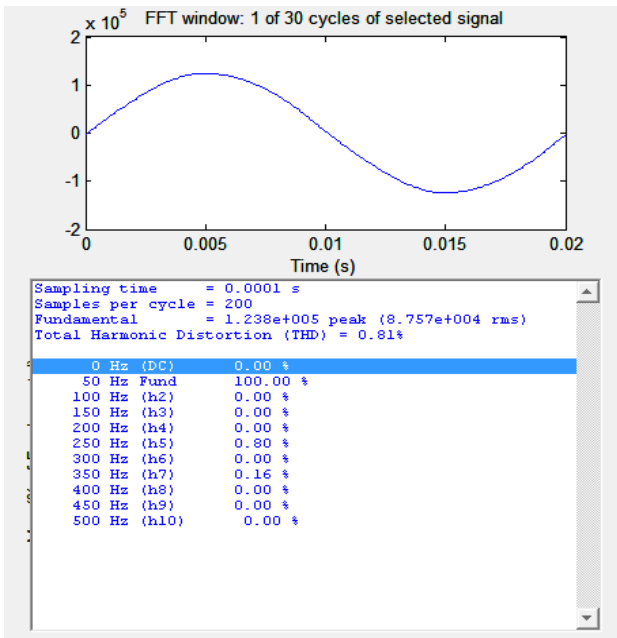
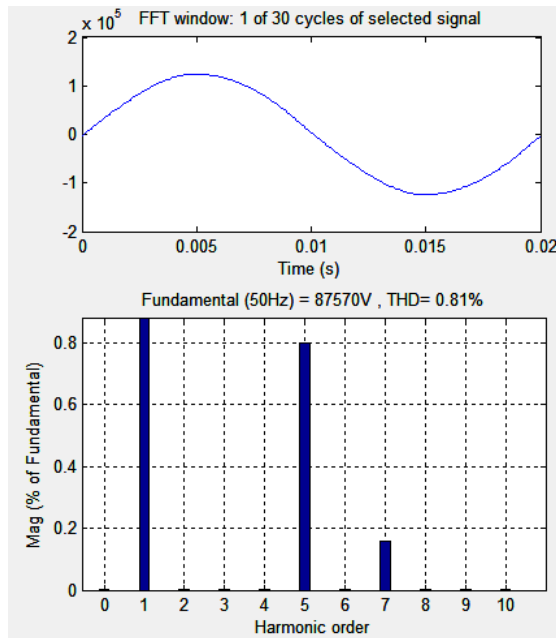
Şekil 5.34 İşletme Modu-1 için Tr-A sekonder barasına ait akım harmonik spektrumu



Şekil 5.35 İşletme Modu-1 için Tr-B sekonder barasına ait gerilim harmonik spektrumu



Şekil 5.36 İşletme Modu-1 için Tr-B sekonder barasına ait akım harmonik spektrumu



Şekil 5.37 İşletme Modu-1 için 154 kV barasına ait gerilim harmonik spektrumu

İşletme modu-1 için yapılan simülasyon çalışması mobil güç kalitesi ölçümlerinin gerçekleştirildiği işletme durumuna göre yapıldığı için ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları birbiriyle karşılaştırılabilir. Bu karşılaştırma Çizelge 5.10’da verilmiştir.

Çizelge 5.10 Ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

		Ölçülen	Simülasyon	Fark (%)
Tr.-A Sekonder Barası	V₁ (kV)	19,508	19,350	- 0,81
	U₁ (kV)	33,79	33,51	- 0,81
	V₅/V₁ (%)	1,69	1,67	- 1,18
	V₇/V₁ (%)	0,51	0,45	-13,33
	THD_v (%)	1,77	1,73	- 2,26
	I₁ (A)	680	686	0,88
Tr.-B Sekonder Barası	V₁ (kV)	19,649	19,310	- 1,72
	U₁ (kV)	34,03	33,44	- 1,72
	V₅/V₁ (%)	2,19	2,18	- 0,46
	V₇/V₁ (%)	0,27	0,32	18,52
	THD_v (%)	2,2	2,2	0
	I₁ (A)	821	829	0,97
154 kV Barası	V₁ (kV)	87,318	87,570	0,29
	U₁ (kV)	151,24	151,67	0,29
	V₅/V₁ (%)	0,90	0,80	- 11,11
	V₇/V₁ (%)	0,14	0,16	14,28
	THD_v (%)	0,96	0,81	-15,62

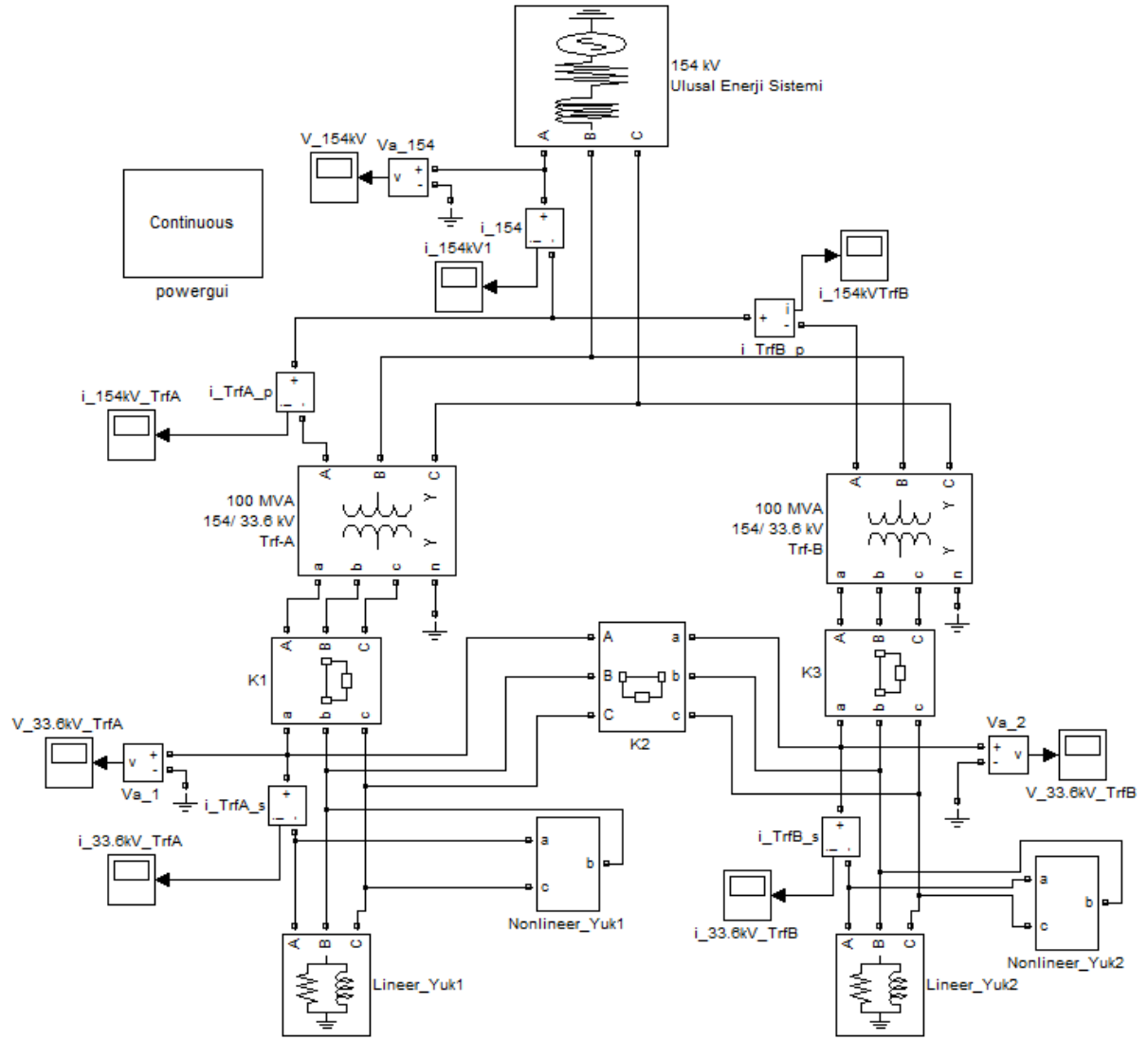
Harmonik bileşenlerle ilgili olarak ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları birbiriyle karşılaştırıldığında Tr-A ve Tr-B2nin sekonder baraları için özellikle 5. harmonik gerilimi ve gerilime ait toplam harmonik distorsiyonu THD_v değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ölçümlerde elde edilen, Tr-A ve Tr-B’nin sekonder taraflarına ait 5. harmonik akım ve gerilimlerinin genlikleri modellemeye yeterli olacak kadar yüksektir. 7. harmonik bileşenlerinin genliklerinin çok küçük olması sebebiyle ölçme hatası ve buna bağlı olarak simülasyon sonucu ile ölçüm sonucu arasındaki fark da büyümektedir.

154 kV barasında gerilim harmonikleri ile ilgili olarak elde edilen simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki fark oldukça fazladır. Farkın büyük olmasında, sistemin kısa devre gücünün ölçüm anında çok net bilinmemesi (ölçüm anında 154 kV sistemdeki büyük güçlü bazı tesislerin (elektrik santrali, transformatör merkezi vb.) devreden çıkmış olabileceği ve bu nedenle kısa devre gücünün değişmesi), akım ve gerilim sinyallerinin alındığı akım ve gerilim ölçü transformatörlerinin hatası, özellikle 154 kV barasındaki kapasitif gerilim transformatörlerinin hatası, ölçüm yapılan tüm noktalardaki güç kalitesi ölçü cihazlarının ve bu cihazlardan gelen verilerin kaydedildiği bilgisayarların zaman saatlerinin birbiriyle senkron olmaması sebebiyle ölçüm verilerinin birbiriyle tam eş zamanlı olmaması etkili olmaktadır. Ayrıca tüm ölçümlerde genel olarak gerçek sistem de az da olsa dengesizlik olmasına rağmen simülasyonda üç fazlı sistemin dengeli kabul edilmesi de bir miktar hataya sebep olmaktadır.

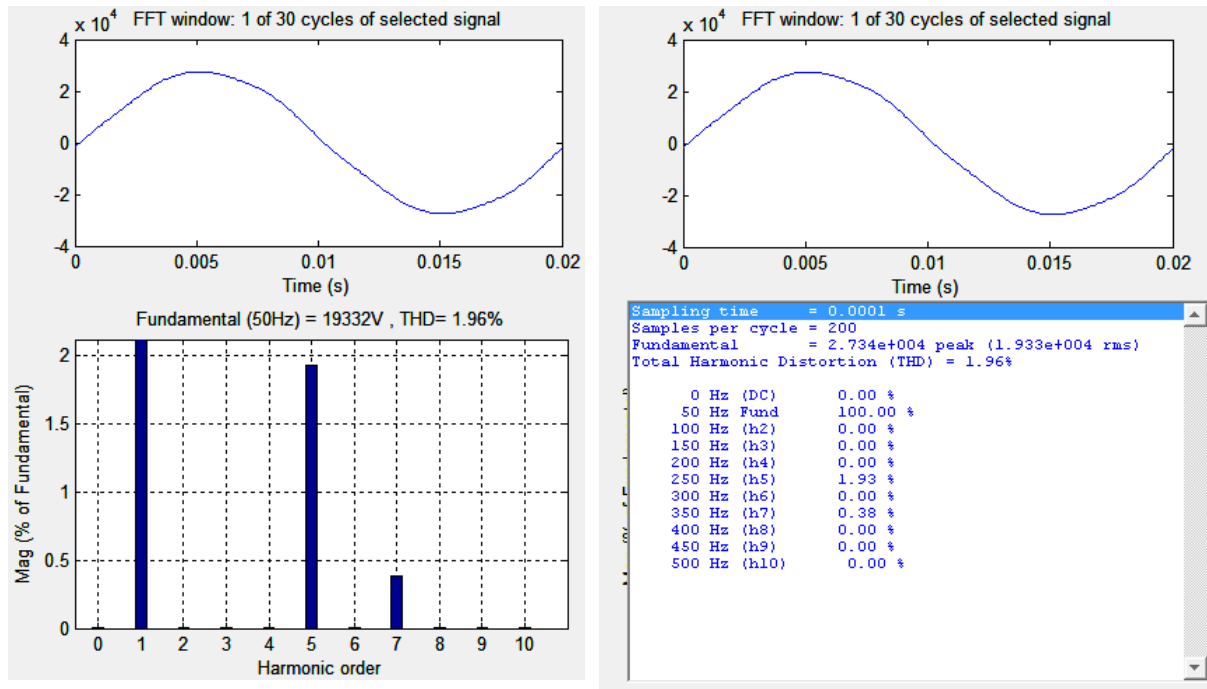
Ölçüm yapılan sistemde tüm harmonik bileşenler mevcuttur. Ancak bunlar arasında genliği en yüksek olan 5. harmonik bileşeni ve 5. harmonikten sonra ona göre genliği oldukça düşük olan 7. harmonik bileşenidir. Simülasyonda diğer harmonik bileşenlerin ihmal edilip sadece 5. ve 7. harmonik bileşenin göz önüne alınması THD değerinin simülasyonda ölçülenden az da olsa düşük olmasına neden olmaktadır.

5.4.2. İşletme Modu-2 için Simülasyon Sonuçları

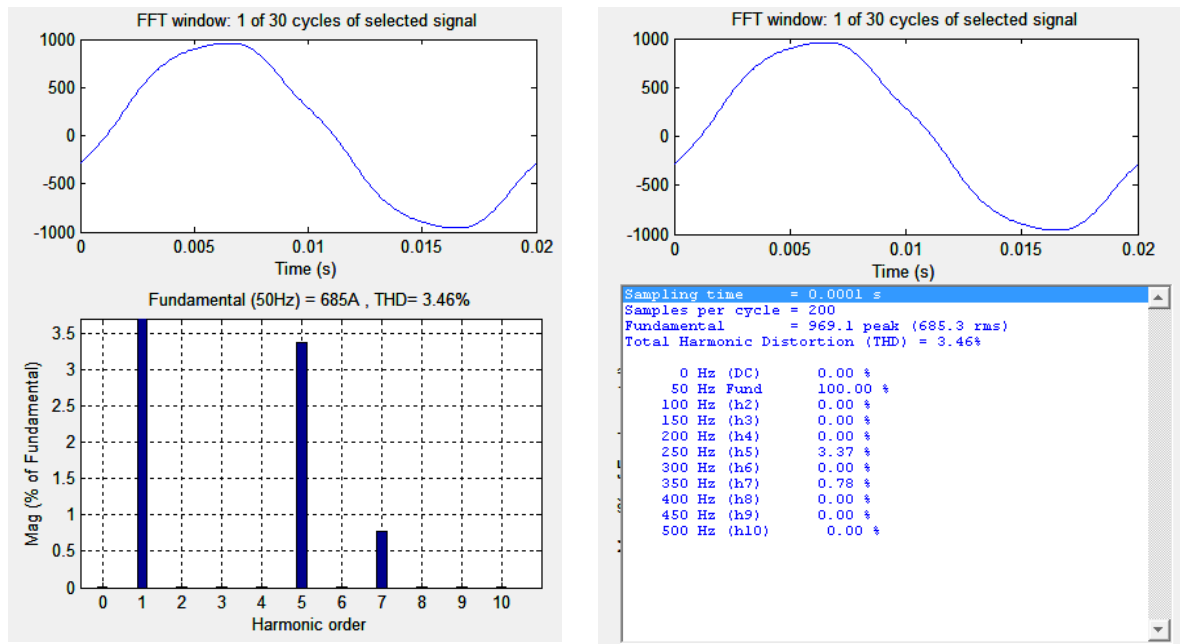
Transformatörlerin 154 kV barasından beslenen güç transformatörlerinin paralel çalışması durumunda yapılan simülasyondan elde edilen simülasyon sonuçları aşağıda Şekil 5.36 - Şekil 5.39'da verilmiştir.



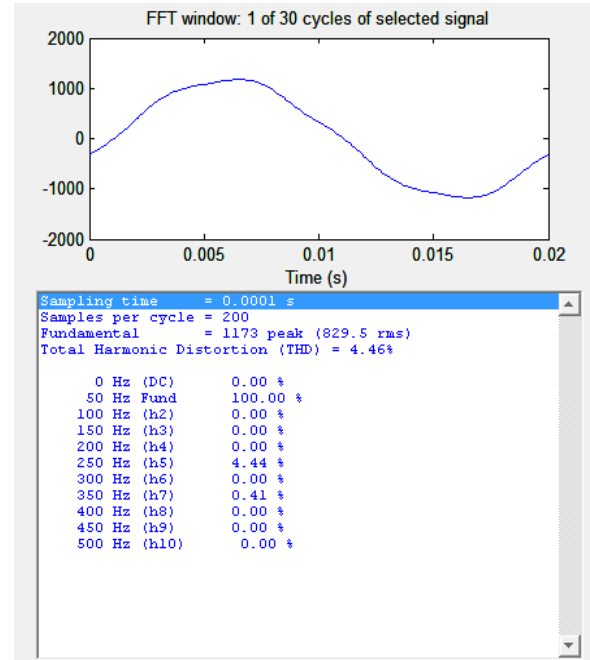
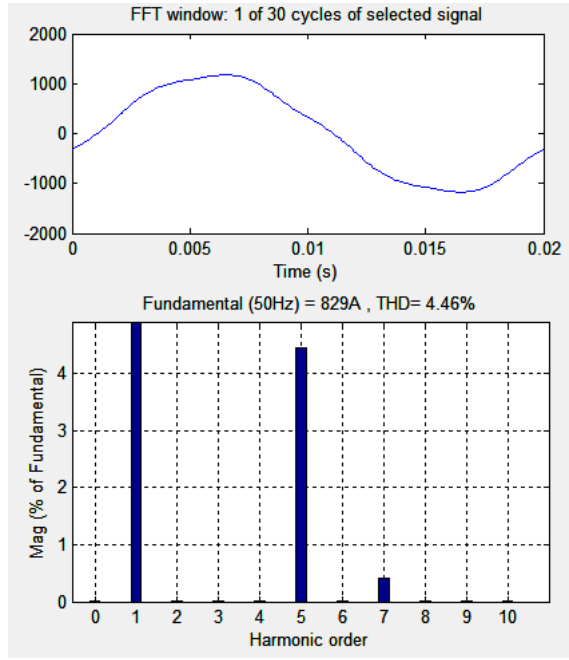
Şekil 5.38 Ölçüm yapılan üç fazlı sisteme ait MATLAB Simulink simülasyon modeli (İşletme modu-2 için)



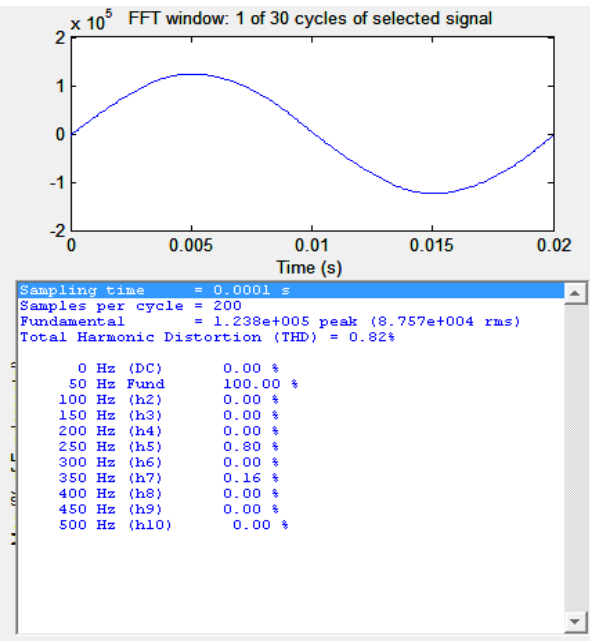
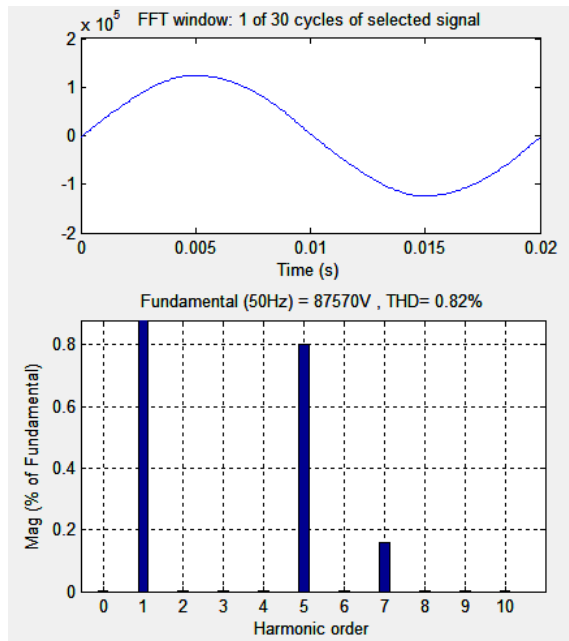
Şekil 5.39 İşletme Modu-2 için Tr-A ve Tr-B sekonder barasına ait gerilim harmonik spektrumu



Şekil 5.40 İşletme Modu-2 için Tr-A sekonder barasına ait akım harmonik spektrumu



Şekil 5.41 İşletme Modu-2 için Tr-B sekonder barasına ait akım harmonik spektrumu



Şekil 5.42 İşletme Modu-2 için 154 kV barasına ait gerilim harmonik spektrumu

Çizelge 5.11 İşletme Modu-1 ile İşletme Modu-2 simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

	İşletme Modu-1 (Transformatörler Paralel Çalışmıyor)		İşletme Modu-2 (Transformatörler Paralel Çalışıyor)	
	Tr. – A Sekonder	Tr. – B Sekonder	Tr. – A Sekonder	Tr. – B Sekonder
V₁ (V)	19508	19310	19332	19332
V₅/V₁ (%)	1,69	2,19	1,93	1,93
V₇/V₁ (%)	0,51	0,45	0,38	0,38
THD_v (%)	1,77	2,20	1,96	1,96
I₁ (A)	680	829	685	829
THD_i (%)	3,45	4,44	1,96	4,46

Çizelge 5.11’de İşletme Modu-1 ile İşletme Modu-2 simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Simülasyon sonuçlarında da görüldüğü gibi transformatörler birbirinden bağımsız çalışırken Tr-B’nin sekonderindeki yükün 5. harmonik gerilim distorsiyonu % 2,19 iken Tr-A’nın sekonderindeki yükün 5. harmonik gerilim distorsiyonu % 1,69 değerindedir. 5. harmonik bileşeni bakımından Tr-B barası daha kirlidir. Transformatörler paralel çalıştırıldıklarında, Tr-A’nın sekonderindeki yükün 5. harmonik gerilim distorsiyonu %1,69 değerinden % 1,93 değerine yükselmiş, Tr-B’nin sekonderindeki yükün 5. harmonik gerilim distorsiyonu %2,19 değerinden % 1,93 değerine inmiştir. Gerilimin 7. harmonik bileşeni için tam tersi değişim olmuştur. Yükü harmonikler bakımından daha temiz olan Tr-A’nın sekonder barasının gerilimine ait toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) %1,77 değerinden %1,96 değerine yükselmiş bu bara olumsuz etkilenmiştir. Transformatörler paralel çalıştırıldıklarında yükü harmonikler bakımından daha kirli olan Tr-B’nin sekonder barasının gerilimine ait toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) %2,2 değerinden %1,96 değerine düşmüş ve bu bara olumlu etkilenmiştir.

Bilindiği gibi güçlü harmonik kaynağı durumundaki ark fırınlarının bulunduğu demir çelik tesislerinde baralar, temiz bara ve kirli bara olarak ayrılmakta, harmonik distorsiyonu düşük hassas yükler temiz baraya, harmonik üreten akımının harmonik distorsiyonu yüksek olan yükler kirli baraya bağlanmakta ve her iki bara ayrı transformatörler üzerinden yüksek gerilim barasına bağlanmaktadır. Yukarıda verilen simülasyon sonuçları bu uygulamanın doğruluğunu ve gerekliliğini kanıtlamaktadır.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Güç kalitesinin, güç kalitesi ile ilgili standartların ve ölçümlerin incelendiği bu tez çalışmasında, gerçekleştirilen simülasyon sonuçları da göz önüne alındığında ortaya çıkan değerlendirme, sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir:

- Enerji sistemimizde güç kalitesi problemleri (gerilim kırpışması (flikler), gerilim çukuru (sag), gerilim tepesi (swell), harmonikler vb.) günden güne artmakta ve zararlarını hissettirmektedir.
- Harmoniklerin ölçü aletleri üzerine etkisi ve güç kalitesinin ölçümü ile ilgili bölümlerde detaylı olarak açıklandığı gibi enerji sisteminde harmonik bileşenlerin bulunması durumunda 50 Hz temel bileşen frekansına göre dizayn edilmiş ölçü aletleri ve özellikle elektromekanik ölçü aletleri önemli ölçme hataları yapmaktadır. Harmonik distorsiyonun (bozulmanın) sözkonusu olduğu tesislerde kullanılacak akım ve gerilim ölçü aletlerinin doğru ölçüm yapabilmesi için gerçek efektif değer (True RMS) ölçen ölçü aletleri olmasına dikkat edilmelidir.
- Bölüm 1.9'da ve 5. bölümde verilen güç kalitesi ölçümlerinde 154 kV'luk yüksek gerilim ve 33.6 kV, 34.5 kV'luk 'luk orta gerilim şebekemizde fliker değerlerinin, gerilim ve akıma ait harmonik bileşenlerin genliğinin standartlarda izin verilen sınır değerlerin zaman zaman üzerine çıktığı tespit edilmektedir. Referanslar kısmında verilen güç kalitesi mobil ölçüm raporlarında görülebileceği gibi ölçüm yapılan sistemlerde bir haftalık sürede çok sayıda güç kalitesi olayının meydana geldiği gözlenmiştir. Enerji sistemimizde demir çelik tesisleri, raylı ulaşım sistemleri gibi harmonik üreten yüklerin kurulu gücünün her geçen gün artması gelecekte de güç kalitesi problemlerinin özellikle harmonik problemlerinin daha önemli boyutlara ulaşacağını göstermektedir.
- 5. Bölümde detaylı olarak verildiği üzere, 154/33,6 IV gerilimli TEİAŞ Ototransit transformatör merkezinde TÜBİTAK 105G129 nolu Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında yapılan ölçümler incelendiğinde, ölçüm yapılan noktalarda gerilim ölçümlerinde, kısa ve uzun dönem fliker şiddetlerinin standartta izin verilen sınırı değerlerin üzerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca baralarda özellikle 5. harmonik geriliminin standartlarda izin verilen sınır değerlerin üzerine çıktığı tespit edilmektedir.

5. harmonik geriliminin yüksek olması büyük ölçüde bu baralardan beslenen yüklerin çektiği yüksek genlikli 5. harmonik akımlarından kaynaklanmaktadır. Baraların 5. harmonik gerilimlerinin standartta izin verilen seviyeye indirilebilmesi, bu baralardan beslenen yüklerin 5. harmonik akımlarının genliğinin düşürülmesi ile mümkün olabileceği için yüklerin harmonik ölçümü yapılmalı, 5. harmonik akımı yüksek olan yükler için harmonik filtreleri tesis edilmelidir.

- MATLAB Simulink ile yapılan simülasyon çalışmasında, harmonik bileşenlerle ilgili olarak ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları birbiriyle karşılaştırıldığında Tr-A ve Tr-B transformatörlerinin sekonder baraları için özellikle 5. harmonik gerilimi ve gerilime ait toplam harmonik distorsiyonu (THDv) değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. 154 kV barasında ise ölçüm yapıldığı andaki güncel bara kısa devre gücünün çok net olarak bilinmemesi, ölçü noktalarındaki güç kalitesi ölçüm cihazlarının zaman senkronizasyonlarının tam olarak sağlanamaması ve kapasitif gerilim ölçü transformatörlerinin ölçme hatası, vb. nedenlerle ölçüm sonucu bulunan harmonik gerilim değerleri ile simülasyon sonucu elde edilen harmonik gerilim değerleri arasındaki fark büyükmektedir.

KAYNAKLAR

- Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, (1996), Electrical Power System Quality, Mc Graw-Hill
- J. Arrilaga, N. R. Watson, S. Chen, (2001), Power System Quality Assessment, WILEY
- C. Sankaran, (2002), Power Quality, CRC Pres
- C. Kocatepe, N. Umurkan, F. Atar, R. Yumurtacı, M. Uzunoğlu, A. Karakaş, O. Arıkan, M. Baysal, (Ocak 2006), Enerji Kalitesi ve Harmonikler, EMO Yayın No. EG/2006/1
- C. Kocatepe, M. Uzunoğlu, R. Yumurtacı, A. Karakaş, O. Arıkan, (Kasım 2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi
- P. Ferracci, Teknik Kılavuz No. 199, Güç Kalitesi, Schneider Electric
- Muğdeşem Tanrıöven- Yrd.Doç.Dr.(Yıldız Teknik Üniversitesi), Rıza İnce- Elektrik Mühendisi(HB Teknik Proje ve Dan.Ltd.Şti.).'Elektrik Güç Sisteminin Kalitesini Bozan Faktörlerin İncelenmesi'.www.etmd.org.tr-Teknik Yazılar.
- C. Collombet, J.M. Lupin, J. Schonek, Teknik Kılavuz No. 152, Şebekelerde Harmonik Bozulmalar ve İyileştirilmesi, Schneider Electric
- Teknik Kılavuz No. 149, EMC: Elektromanyetik Uyumluluk, Endüstriyel Şebekelerin Elektromanyetik Uyumluluğu, Schneider Electric
- D. Chapman, (Mart 2001), Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu, 1.1 Enerji Kalitesi, Sarkuysan Müh. Mustafa Atasal .'Güç Kalitesi ve Fliker'.İstanbul Teknik Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. Ocak 2000.
- Ayşe Ergün .'Güç Sistemlerindeki Harmoniklerin İncelenmesi'.Kocaeli Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.Haziran 1997.
- Z. Hanzelka, A. Bien, (Nisan 2006), Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu, 5.1.4 Flicker, Sarkuysan
- D. Maule, (Nisan 2002), Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu, 5.3.2 Gerilim Bozulmaları/Gerilim Azalması ve Etkilerinin Zayıflatılması, Sarkuysan
- M. Diden, (April 2005), Power Quality Application Guide, 5.3.4 Considerations for Choosing the Appropriate Voltage Sag Mitigation Device, European Copper Institute
- H. Markiewicz, A. Klajn, (Temmuz 2004), Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu, 5.4.2 EN 50160 Standartı-Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Gerilim Özellikleri, Sarkuysan
- W. Langguth, (Mayıs 2006), Power Quality Application Guide, 6.1.2 Fundamentals of Electromagnetic Compatibility, European Copper Institute

Ö. Usta, R. Gönül, İ. Genç, Ö. Şahin, Güç Kalitesi Analizi ve İzlenmesi, Kaynak Elektrik Dergisi Sayı 176

Murat Kale .‘Paralel Aktif Güç Filitresi ile Harmonik Akım ve Reaktif GüçKompanzasyonu’ .Kocaeli Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.Ocak2004.

Elk.Müh. Serkan Kuruüzüm.’Güç Sistemlerindeki Harmonik Filtrelerin İncelenmesi’. Kocaeli Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.Mayıs 2002.

TÜBİTAK 105G129 Nolu Güç Kalitesi Milli Projesi, TEİAŞ Otosansit TM Mobil ölçüm Raporu, Doküman No: 7060501-00-RP-GK04-S02/13, 2007

TÜBİTAK 105G129 Nolu Güç Kalitesi Milli Projesi, TEİAŞ Erzurum-3 TM Mobil ölçüm Raporu, Doküman No: 7060501-00-RP-GK04-S15/02, 2008

TÜBİTAK 105G129 Nolu Güç Kalitesi Milli Projesi, TEİAŞ Hınıs TM Mobil ölçüm Raporu, Doküman No: 7060501-00-RP-GK04-S15/04, 2008

TÜBİTAK 105G129 Nolu Güç Kalitesi Milli Projesi, TEİAŞ Çolakoğlu TM Mobil ölçüm Raporu, Doküman No: 7060501-00-RP-GK04-S05/10, 2007

TÜBİTAK 105G129 Nolu Güç Kalitesi Milli Projesi, TEİAŞ Davutpaşa TM Mobil ölçüm Raporu, Doküman No: 7060501-00-RP-GK04-S07/05, 2007

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	20.11.1981	
Doğum yeri	Isparta	
Lise	1997-2000	Ataköy Cumhuriyet Lisesi
Lisans	2000-2005	Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı

Çalıştığı kurum

2007-Devam ediyor THY Teknik AŞ