

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

79129

ENERJİ SİSTEMLERİNDE MEYDANA GELEN
HARMONİKLERİN ANALİZİ HARMONİK
STANDARTLARI VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

Elk.Müh. Süleyman Süha TOK
F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doç. Dr. Nurettin UMURKAN



Tez Danışmanı: Yrd.Doç. Dr. Ferit ATTAR



Yrd.Doç. Dr. Tuncay UZUN



İSTANBUL, 1998

İÇİNDEKİLER

ÖZET

ABSTRACT

1. GİRİŞ.....	1
1.1. GENEL GİRİŞ VE TANITIM.....	1
1.2. HARMONİKLERLE İLGİLİ LİTERATÜR İNCELEMESİ	2
2. ŞEBEKE HARMONİKLERİNİN İNCELENMESİ.....	4
2.1. HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL TANIMI	4
2.2. HARMONİK KAYNAKLARI.....	5
2.2.1. Çeviriciler	5
2.2.2. Transformatörler	5
2.2.2.1. Bir Fazlı Transformatörlerde Harmonikler	6
2.2.2.2. Üç Fazlı Transformatörlerde Harmonikler	7
2.2.2.2.1. Yıldız-Yıldız Bağlama	7
2.2.2.2.2. Üçgen-Yıldız Bağlama	8
2.2.3. Ark Fırınları	8
2.2.4. Diğer Harmonik Kaynakları	9
3. HARMONİKLERİN ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİNLİKLERİ.....	11
3.1. HARMONİK AKIMLAR	11
3.2. AKIM VE GERİLİM HARMONİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİ	11
3.3. TOPLAM HARMONİK DİSTORSİYON	12
3.4. HARMONİKLERİN YOL AÇTIĞI REZONANS OLAYLARI.....	13
3.5. HARMONİKLERİN DÖNER MAKİNALAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ....	15
3.6. HARMONİKLERİN DURAN (SABİT) ŞEBEKE ELEMANLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	16
3.6.1. İletim Sistemi Üzerindeki Etkiler	16
3.6.2. Transformatörler Üzerindeki Etkiler	17
3.6.3. Kapasite Grupları Üzerindeki Etkiler	17
3.7. GÜÇ ELEKTRONİĞİ ELEMANLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLER.....	20
3.8. KORUYUCU SİSTEMLER ÜZERİNDEKİ ETKİLER.....	20
3.9. KÜÇÜK GÜÇLÜ ELEKTRİK TÜKETİCİLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLER..	21
3.10. ENERJİ ÖLÇÜ ALETLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLER.....	22
3.11. İLETİŞİM SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLER.....	22
4. HARMONİK STANDARTLARI	23
5. HARMONİK ÖLÇÜM VE TEST TEKNİKLERİ	30
5.1. GİRİŞ.....	30
5.2. TANIMLAR.....	30
5.3. ENSTRÜMANTASYONDA GENEL SINIFLANDIRMA.....	31
5.3.1. Ölçülen Sinyal Karakteristikleri	32
5.4. TÜM TİPLERDEKİ ENSTRÜMASYONDA GENEL OLARAK İSTENENLER	32
5.4.1.1. Gerilim Giriş Devresi	33

5.4.1.2. Akım Giriş Devresi	34
5.5. ENSTRÜMANLARDA DOĞRULUK SINIFLARI	34
5.6. GERİLİM VE AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN DOĞRULUKLARI ..	37
5.7. FREKANS-DOMENLİ ENSTRÜMANTASYON İÇİN İSTENENLER.....	39
5.7.1. Giriş	39
5.7.2. Yavaş Değişen Harmonikler	40
5.7.3. Değişen Harmonikler	41
5.7.4. Hızlı Değişen Harmonikler	41
5.7.5. Çıkış Karakteristikleri	41
5.8. ZAMAN-DOMENLİ ENSTRÜMANTASYON İÇİN İSTENENLER.....	41
5.8.1. Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) Enstrümantasyonu - Genel Konseptler	41
5.8.2. Yavaş Değişen Harmonikler	44
5.8.3. Değişen ve Hızlı Değişen Harmonikler	45
5.9. DİJİTAL FİLTRELER	46
5.10. OPERASYON MODU VE ÇIKIŞ DEĞERLERİ	46
5.11. HESAPLAMA YÖNTEMLERİ	47
5.12. ÇIKIŞ SİNYALİNİN SÜZÜLMESİ	47
5.12.1. Frekans-Domenli Enstrümanlarda Alçak Geçiren Filtre	47
5.12.2. Zaman-Domenli Enstrümanlarda Filtreleme	47
5.13. GELECEKTEKİ METODLAR	48
5.14. BESLEME SİSTEMLERİNDE GERİLİM HARMONİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ.....	48
5.14.1. Ölçme Cihazları Tipleri	48
5.15. FFT-ENSTRÜMANTASYONU İÇİN TEMEL ŞARTLAR VE PENCERE GENİŞLİĞİ	48
5.16. İSTATİSTİKSEL ÇALIŞMA İÇİN ÖLÇÜLEN DEĞERLERİN ZAMAN ARALIKLARI	49
5.16.1. Çok Kısa Zaman Aralığı	50
5.16.2. Kısa Zaman Aralığı	50
5.16.3. Uzun Zaman Aralığı	51
5.16.4. Gün Aralığı	51
5.16.5. Hafta veya Daha Uzun Aralık	52
5.17. ÖLÇMENİN ÖZEL HALLERİ	52
5.17.1. Faz Açısı Ölçümü	53
5.18. DİSTORSİYON ÖLÇÜMLERİ	54
5.18.1. Distorsiyon Faktörleri	54
5.19. SİMETRİK BİLEŞENLERİN ÖLÇÜMÜ	56
5.20. ARAHARMONİKLERİN ÖLÇÜLMESİ	57
5.21. ÇEVRE ETKİSİ VE BAĞIŞIKLIK TESTLERİ	58
6. SAYISAL UYGULAMA.....	59
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Bu çalışmada, ilk olarak, harmoniklerle ilgili genel matematiksel bağıntılar ve kavramlar verilmiştir. Güç sisteminde harmonik üreten kaynaklar, harmoniklerin olumsuz etkileri genel olarak incelenmiştir. Harmonik standartlar, harmonik ve araharmonik ölçümleri ve enstrümantasyonu, ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Güç sistemlerinde dalga şeklinin bozulmasının en önemli nedeni, akım gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Giriş gücünü sinüs biçimli bir elektrik sisteminden alan bu yüklerin akımları harmonikler içerir. Harmonikler elemanların ısınmasına, yalıtımın zorlanmasına neden olurlar, özellikle harmonik rezonansları sonucunda önemli problemler ortaya çıkabilir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, güç sistemlerinde harmonik, araharmonik test ve ölçüm teknikleri açıklanmıştır. Frekans-domenli enstrümantasyon ve zaman-domenli enstrümantasyon anlatılmıştır.

Sonuçların karşılaştırmasını kolayca yapmak bakımından, ölçülen harmoniklerin istatistiksel incelemesi için tavsiyeler verilmiştir. Zaman aralıkları, harmonik ölçümlerinin istatistiksel çalışmasında 1 s den daha az, bir hafta ya da daha fazla olabilmektedir.

Frekans-domenli enstrümantasyon gelecekte istatistiksel analizler için pek fazla kullanılmayacaktır. Zaman-domenli enstrümantasyonu, örneğin FFT-enstrümanları daha yaygın bir şekilde kullanılacaktır.

ABSTRACT

In this study, first, general mathematical expressions and concepts for harmonics are given. Source of harmonics in power system and their undesired effects are considered in general. Harmonic standards, harmonics and interharmonics measurements and instrumentation are discussed in detail.

In a power system, the main reason of a waveform distortion is the presence of nonlinear loads connected thereto. These nonlinear loads are supplied by a sinusoidal source. However, the current that draw contains harmonics. Harmonics induce overheating and the degradation of the insulation; especially, resonants of harmonics may cause highly important problems in the system.

In 5th chapter of study, harmonics and interharmonics testing and measurement techniques are explained. Frequency-domain and time-domain instrumentation are both considered.

Recommendations are also given for the statistical analysis of measured harmonics in order to make comparison of results easier. It should be recognized that the time ranges involved in the statistical handling of harmonic measurements extend from less than 1 s to one week or more.

Frequency-domain instrumentation is not likely to be used extensively in the future for statistical analysis. However, time-domain instrumentation, for example FFT-instruments, will most likely be used.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Giriş ve Tanıtım

Elektrik enerjisi günümüzün vazgeçilmez bir enerji türüdür. Yüzyılımızın başlarında ilk kullanılmaya başlandığı yıllarda elektrik enerjisi çok sınırlı bir alana yönelikti. Bu yüzden, günümüzde karşılaşılan birçok problemi de gözlenmiyordu.

İdeal bir güç sisteminde enerji, tek ve sabit bir frekansta ve belirli gerilim seviyelerinde sağlanır. Bununla beraber, pratikte bu şartların hiçbiri sağlanamaz. Özellikle 1970'li yıllardan itibaren elektrik enerjisi sektöründe çok yaygın olarak "yariletken elemanlar"ın kullanıldığı görülmektedir. Bu elemanların doğasından kaynaklanan en önemli bozucu etki, akım ve gerilim dalga biçimlerinin periyodik olmakla birlikte sinüsoidal değişimden uzaklaşmalarıdır (nonsinüsoidal dalgalar). Bu tür dalgalar, bilindiği gibi, J. Fourier tarafından tanımlanmış seriye açıldığında genlik, frekans ve faz açısı olarak birbirinden farklı sinüsoidal dalgaların matematiksel toplamı olarak ifade edilebilmektedir. Sinüsoidal değişimi simgeleyen "temel" dalga dışındaki dalgalar, "Harmonik" adını almaktadır.

Güç sisteminde hesaplamalar yapılırken, şebekede üretilen gerilimin sinüs biçimli olduğu kabul edilir. Doğrusal olmayan bir yüke sinüs biçiminde bir gerilim uygulandığında, yükün akımı sinüs biçimli olarak değişmez ve harmonik bileşenler içerir. Harmonik içeren akımlar, devrelerini şebekedeki diğer elemanlar üzerinden tamamlayarak harmonik gerilimleri oluştururlar.

Harmoniklerin sistem üzerinde pek çok olumsuz etkilerinden söz edilebilir. Bu olumsuz etkilerin sağlıklı olarak belirlenmesi, giderilmesi, modelleme, simülasyon, ölçme ve test teknikleri vb. çalışmaları yansıtan Uluslararası Konferansların düzenlenmesi, harmoniklerle ilgili standartların oluşturulması ve güncelleştirilmesi çalışmalarının yoğunluğunun önemini göstermektedir.

Bu çalışmada, harmonik oluşturan yüklerin enerji sistemi üzerindeki etkileri incelenmiş, harmonik standartları anlatılmış, harmonik ölçüm ve test teknikleri üzerinde ayrıntılı olarak durulmuştur.

1.2. Harmonikler ile İlgili Literatür İncelemesi

Sinüsoidal değişim göstermeyen işaretlerin (Non-Sinüsoidal akım ve gerilim dalga biçimleri) elektrik tesis elemanları üzerindeki etkilerinin araştırılması yüzyılımızın başlarına kadar uzanır. Buradaki araştırmalar, harmoniklere yol açan kaynaklar, harmonik analizine yönelik matematiksel tanıtım ve çözümleme teknikleri, harmoniklerin olumsuz etkileri, harmoniklerin yok edilmesi, harmonik sınırları ve harmonik standartları vb. konular üzerine yoğunlaştırılmıştır.

Alternatif akımın ortaya çıktığı ilk yıllardan itibaren doğrultucular, transformatörler, doyma olayı ve generatörler incelenirken, bunların aynı zamanda birer harmonik kaynağı olduğu vurgulanmıştır. I. Dünya savaşı yıllarında Steinmetz'in yaptığı çalışmalar (Steinmetz, 1916; Steinmetz, 1917) transformatörlerdeki doyma ve histerizis olaylarından kaynaklanan dalga bozulmalarını tanımlamaktaydı. Buradaki dalga biçiminin kare ya da üçgen dalga olması ile sinüsoidal dalga olması çeşitli yönlerden karşılaştırılmış olup, enerji sistemleri için en uygun dalga biçiminin sinüsoidal dalga olduğu gösterilmiştir.

Sonraki yıllarda yapılan çalışmalar, çoğunlukla transformatör bağlantılarından kaynaklanan harmonikler üzerine yoğunlaştırılmıştır. (Clinker, 1914; Curtis, 1914; Fortescue, 1914)

II.Dünya Savaşının bitiminden sonra, doğrultucularla ilgili analizler, daha karmaşık ve geniş bir yapı içinde ele alındı. Örneğin: Civa buharlı doğrultucuların ateşleme açısı, komütasyon açısı vb. parametrelerine bağlı olarak akım harmonikleri ve rezonans koşulları incelendi. (Christensen et al., 1944; Schmidt, 1953)

Günümüzde kullanılan yarıiletken elemanların oluşturduğu ve hem doğrultma hem de evirme işleminde yararlanılan çeviricilerin yaygın kullanım alanları arasında, doğru

akımla enerji iletimi (HVDC) başta olmak üzere VAR kompanzasyonu vb. sayılabilir. HVDC'ye yönelik ilk çalışma Kimbark'a aittir (Kimbark, 1971) ; bunu diğer çalışmalar izlemiştir.

Diğer taraftan, non-lineer empedans etkisi gösteren ark fırınları, döküm tesisleri vb. başlıca harmonik üreticileri olarak incelenmiştir. (Sundberg, 1976; Dugan, 1980)

Harmoniklerin etkinliğini araştırmaya yönelik çalışmalar, başlangıçta haberleşme devrelerindeki bozulmaları incelemekteydi. Sonraki yıllarda harmoniklerin enerji sistemleri üzerindeki etkileri de dikkate alınmaya başlandı. (IEEE Standarts Board, 1976; Linders, 1979)

Ayrıca, harmoniklerin oluşturduğu harmonik görünen güç, eşdeğer güç katsayısı gibi tanımları veren ve Devreler Teorisi bakış açısı içinde çözümleme teknikleri sunan araştırmalar da mevcuttur. (IEEE, 1979; Shephard and Zand, 1979)

Günümüzde, harmonik sınırlarının, harmonik standartlarının oluşturulması, güç sistemlerinde -özellikle zaman-domenli enstrümanlarla- harmonik ölçüm ve test tekniklerinin belirlenmesi üzerinde durulan önemli konulardan biridir. Bu konuda daha önce yürürlüğe girmiş olan bazı standartlar yeni gelişmeler ve zorunluluklar nedeniyle revizyona alınmıştır. (IEC 555-2, 1982; IEC 1000-4-7, 1991)

2. ŞEBEKE HARMONİKLERİNİN İNCELENMESİ

2.1. Harmoniklerin Matematiksel Tanımı

Zamana göre tam sinüsoidal olmayan ancak periyodik değişim özelliği gösteren dalga biçimleri içinde “harmonikler” saklıdır. Tüm periyodik fonksiyonlar Fourier Serisi adı verilen bir seriye açıldıklarında, birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve cosinüslerinden oluşan bir seri halinde yazılabilirler. Bir $f(x)$ fonksiyonu için

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nx + b_n \cdot \sin nx) \quad (2.1)$$

yazılabilir.

Burada;

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \cos nx \cdot dx \quad (n= 0,1,2,3,\dots) \quad (2.2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \sin nx \cdot dx \quad (n= 0,1,2,3,\dots) \quad (2.3)$$

şeklinde T, periyodu göstermektedir. (2.1) ifadesinden

$$c_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \quad (n \neq 1) \quad (2.4)$$

harmoniklerin “genlik” değerini ve

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (n \neq 1) \quad (2.5)$$

harmoniklerin frekansını verecektir.

Fonksiyonun tek dalga veya çift dalga simetrisine sahip olması, seri açılımını daha da basite indirir. Tek dalga simetrisine sahip bir fonksiyon için Fourier serisi sadece sinüslü terimleri, çift dalga simetrisine sahip bir fonksiyon ise sadece cosinüslü terimleri içerir. (Arrillaga et al., 1985)

2.2. Harmonik Kaynakları

2.2.1. Çeviriciler

Sanayiden enerji iletimine kadar her alanda yaygın olarak kullanılan çeviriciler, alternatif akımı doğru akıma dönüştüren (Doğrultucular = Redresörler) veya doğru akımı alternatif akıma dönüştüren (Eviriciler = İnverterler) elemanlar olarak tanımlanır. Bu elemanların tasarımı, çalışma özellikleri vb. kavramlar bu çalışmaların içeriğinin dışında kalmakla birlikte, bir çeviricideki harmonik mertebesinin

$$n = k \cdot p \pm 1 \quad (2.6)$$

olduğu yazılabilir. Burada n harmonik mertebesini, p çeviricinin darbe sayısını ve k pozitif bir sayıyı göstermektedir. (Sundberg, 1976)

2.2.2. Transformatörler

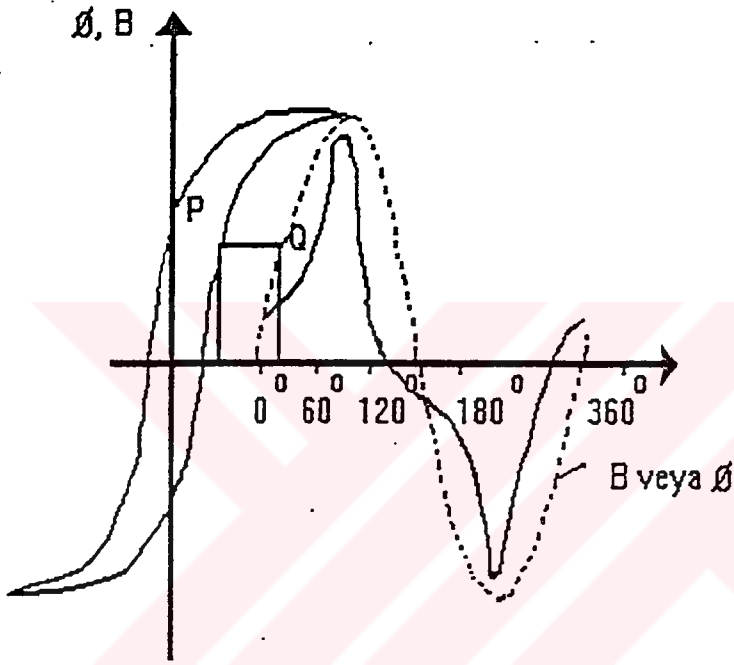
Bilindiği gibi, bir transformatörün sekonder uçları açık iken primerine sinüsoidal bir gerilim uygulanırsa transformatör sargılarından “boşta çalışma akımı” geçer. Bu akımın gerçel bileşeni demir kayıplarını karşılar ve ihmal edilebilecek düzeydedir. Sanal bileşeni ise mıknatıslanmayı sağlar.

Transformatörün primerine sinüsoidal gerilim uygulanmasına karşın, ferromagnetik nüvenin mıknatıslanma karakteristiği doyma nedeniyle lineer olmadığından, mıknatıslanma akımı da tam sinüsoidal olmayacaktır. Mıknatıslanma akımı temel ve yüksek harmoniklere ayrıştırılırsa, tek sayılı harmoniklerin olduğu gözlenir. En etkin harmonik ise, 3. harmoniktir. Mıknatıslanma akımının zamana bağlı değişimi ölçme yoluyla belirlenebileceği gibi, grafik yoldan da belirlenebilir. (Kürchler, 1966; Boduroğlu, 1982)

Mıknatıslanma akımının 3. harmoniğinin etkinliği, sargı biçimine ve yıldız noktasının durumuna çok yakından bağlıdır. Örneğin; sıcak haddelenmiş transformatör saçıında, maksimum 1.4T'lık endüksiyon için I_m mıknatıslanma akımı:

$$\frac{I_{\mu 3}}{I_{\mu 1}} = 0.5 \quad ; \quad \frac{I_{\mu 5}}{I_{\mu 1}} = 0.28$$

şeklinde harmonik oranlarına yol açmaktadır (Reiser, 1968). Bir transformatörde mıknatıslanma eğrisinin ve mıknatıslanma akımının zamana göre değişimi Şekil 2.1. de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Transformatör mıknatıslanma eğrisinin ve mıknatıslanma akımının değişimleri.

2.2.2.1. Bir Fazlı Transformatörlerde Harmonikler

Şebeke gerilimi belli bir değer üzerine çıktığında, transformatörler doyma bölgesine girerler. Örneğin, transformatör düşük yükte çalışırsa, şebekedeki gerilim düşümü azalacağından transformatör gerilimi yükselir. Bu durumda, bir fazlı transformatörlerin mıknatıslama akımında tek mertebeli tüm harmonikler bulunur. Etkin olan 3. harmoniktir. Bu nedenle, üçlü harmonikler transformatörlerde önemli bir özelliğe sahiptir. (Bayram, 1985)

Harmonik akımlarının genlikleri, temel bileşen genliğine göre oldukça küçük olmasına rağmen frekansları yüksektir. Bu yüzden, harmonik akımlarının primer ve hat empedansında oluşturduğu gerilim düşümleri, özellikle düşük yüklerde büyük değerler alırlar. Bu gerilim düşümleri nedeniyle, transformatöre uygulanan gerilimde harmonik bileşenler içermeye başlar. Dalga şekli bozulan giriş geriliminin tekrar mıknatıslama akımına etki etmesi sonucu, harmonik akım seviyeleri daha da artar. Böylece etkisi giderek artan bir geri beslemeli harmonik olayı meydana gelir. (Meliopoulos, 1986)

2.2.2.2. Üç Fazlı Transformatörlerde Harmonikler

Üç fazlı transformatörlerde mıknatıslama akımı, transformatörün bağlama şekline ve magnetik devresine bağlı olarak değişir.

2.2.2.2.1. Yıldız-Yıldız Bağlama

Magnetik devreleri birbirinden bağımsız olan transformatörde (üç adet bir fazlı veya üç fazlı mantel tipi), bir fazlı transformatörde görülen tek mertebeli harmoniklerin tümü görülür. Faz akımlarının n. harmonikleri arasındaki faz farkı :

$$\varphi_n = n. \varphi_n = n.2\pi/3 = n.120^\circ \quad (2.7)$$

Bu bağıntıdan da görüleceği gibi, üçlü harmonikler her üç fazda da aynı fazda olduklarından, nötr hattında birbirlerine eklenirler. Buna karşılık, diğer harmoniklerin toplamı, aralarında 120° faz farkı olduğundan sıfır olacaktır.

Magnetik devresi bağımlı olan transformatörde (çekirdek tipi) ise, üç fazın magnetik olarak simetrik olmaması nedeniyle, fazlardaki mıknatıslama akımlarının büyüklüğü eşit değildir. Orta fazın demir yolu diğer iki fazın demir yolundan daha kısa olduğundan, mıknatıslama akımı daha küçüktür.

Primer nötr hattı yoksa, üçlü harmonikler nötr noktasına yığılırlar. Dolayısıyla, sargılarda üçlü harmonikler dışında diğer tek mertebeli tüm harmonikler dolaşır.

Böylece endüklenen e.m.k.'ler sinüs biçiminden ayrılırlar. Yıldız noktasına yığılan bu akımların oluşturduğu akılar da her üç fazda aynı yöndedir. Bu akılar devrelerini kapamak için yol arayarak, hava veya yağ içinde kendilerine yol seçerler; imkan bulurlarsa kazana atlarlar ve kazanda e.m.k.'ler endükleyerek kazanın ısınmasına neden olurlar. Ayrıca, bu üçlü harmonikler, her üç fazda aynı gerilim düşümleri meydana getirerek yıldız noktasının kaymasına neden olurlar.

Üçlü harmoniklerin kötü etkilerinden kurtulmak için tersiyer sargı kullanılır. Görmüş olduğu görevinden dolayı buna dengeleyici sargı da denir. Tersiyer sargı, transformatörün anma gücünün 1/3 mertebesinde olan üçüncü bir sargıdır ve üçgen şeklinde bağlanır. Tersiyer sargı üzerinden mıknatıslama akımının üçlü harmoniklerinin dolaşması ile alan ve faz sargıları bu harmoniklerden kurtulmuş olur.

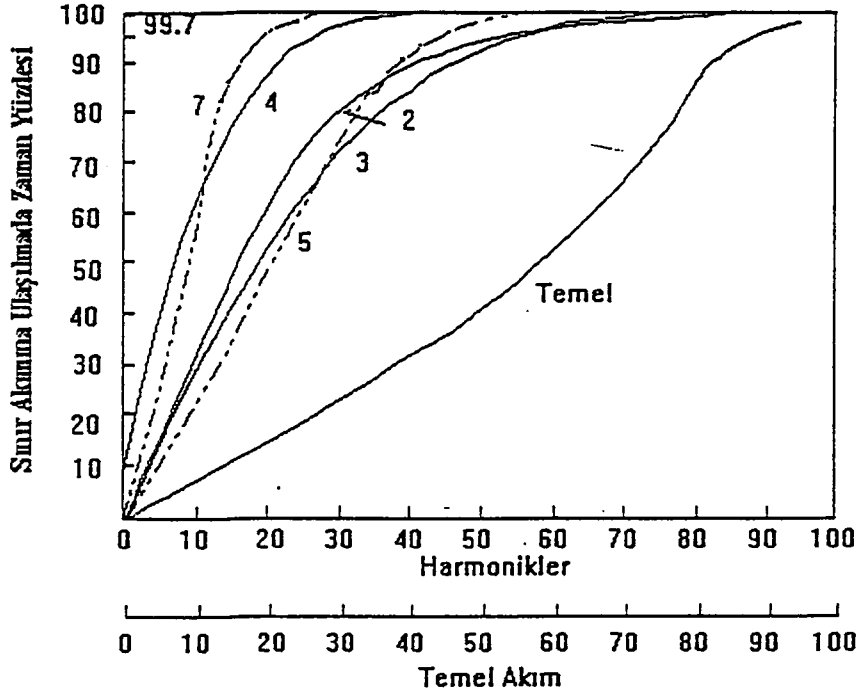
2.2.2.2.2. Üçgen-Yıldız Bağlama

Primer sargısı üçgen bağlı olan transformatörün mıknatıslama akımının aynı fazda olan üçlü harmonik bileşenleri üçgen sargıda dolaşırlar. Üçlü harmonik bileşenler primer şebekeye geçemediklerinden, şebeke hatlarında diğer tek mertebeli harmonikler (5.,7.,11.,...) görülür.

Primer sargının üçgen olması halinde, bacaklardaki simetrisizliğin neden olduğu mıknatıslama akımlarındaki eşitsizliğin de bir sakıncası kalmaz. Çünkü orta bacağın mıknatıslama akımı diğer iki dış bacağın mıknatıslama akımlarından küçük olmasına rağmen, şebekeden çekilen her üç koldaki akımlar birbirine eşittir. (Boduroğlu, 1988)

2.2.3. Ark Fırınları

Kaliteli çelik üretiminde kullanılan ark fırınları, yüzlerce MVA kapasitesinde tesis edilebilmektedir (Sundberg, 1976). Bir ark fırınında ergitme ve tasfiye gibi çeşitli aşamalardan söz edilebilir. Arkın boyuna bağlı olarak, frekans oldukça geniş bir aralıkta değişir ve harmonikler oluşur. (Şekil 2.2.)



Şekil 2.2. Bir ark fırınında öngörülen harmonik genlikleri. (Arrillaga et al., 1976)

Ark fırınlarında ortalama harmonik seviyeleri ise Tablo 2.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Ark fırınlarında harmonik seviyeleri

Harmonik Mertebesi	Temel bileşenin [%] si olarak harmonik seviyeleri		
	(Lemonine, 1978)	(John and Kouferle, 1974)	(Coates and Brewer, 1974)
2	3.2	4.1	4.5
3	4.0	4.5	4.7
4	1.1	1.8	2.8
5	3.2	2.1	4.5

2.2.4. Diğer Harmonik Kaynakları

Diğer taraftan, teorik açıdan bakıldığında, döner makinelerin de birer harmonik üreticisi oldukları söylenebilir. Şebeke bakımından en önemli döner makina türü de, senkron generatördür. Bununla birlikte, günümüzdeki ileri tasarım teknikleri (oluk ve kutup

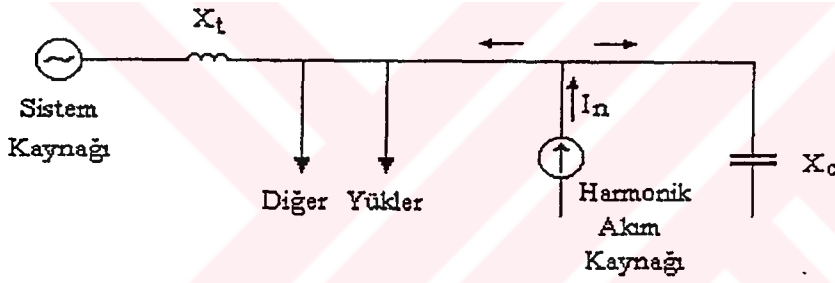
geometrisi, sargı yapısı vb.) sonucu, artık generatörler birer harmonik kaynağı olmaktan çıkmıştır.



3. HARMONİKLERİN ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİNLİKLERİ

3.1. Harmonik Akımlar

Harmonik akımları, harmonik kaynağından en düşük empedansa doğru akma eğilimindedirler. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sisten kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarının paralel eşdeğerlerinin toplamıdır. Genel olarak sistem kaynak empedansı, paralel bağlı yüklerin toplam empedansından çok daha düşüktür. Harmonik akımları çok büyük miktarı sistem kaynağına doğru akmak üzere, empedans oranına göre bölünecektir. Daha yüksek mertebeli harmonik akımları ise, yüksek frekanslarda düşük bir empedans gösteren kondansatörlere doğru akacaktır. Şekil 3.1. de harmonik akımlarının akış yönü görülmektedir. (IEEE Ind. Ap. Soc., 1992)



Şekil 3.1. Harmonik akımların normal akışı.

3.2. Akım ve Gerilim Harmonikleri Arasındaki İlişki

Güç sisteminde gerilim, harmonik bileşenler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenir. Harmonik içeren bir akım ise sadece harmonik akım üreten bir yüke etki edebilir. Gerilimdeki harmoniklerin nedeni, sistem empedansında akan harmonikli bir akımdır. Bu nedenle, gerilim harmoniklerini önlemenin yolu, harmonik akımlarının akışını kontrol ederek gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmaktır.

Sistemin herhangi bir yerinde oluşan harmonik akımlarının her zaman sorunlara neden olacağı söylenemez. Güç sistemi herhangi bir sorun oluşturmadan önemli miktarda

harmonik akım taşıyabilir. Bir sorunun ortaya çıkması için harmonikli akımın yüksek bir empedans yolunda veya iletişim devrelerinde akması gerekir.

Harmonik içeren bir akım, yüksek bir empedans rezonans devresinde akarsa, gerilim de harmonik bileşenler içermeye başlar. Bu, dolaylı bir etkidir. Akım harmoniklerinin doğrudan etkisi, akım yolundaki elemanlarda ek ısınma ve kayıplara yol açmasıdır.

Önceden de belirtildiği gibi, lineer olmayan bir elemanın akım-gerilim karakteristiği doğrusal değildir. Bu eleman tam sinüs biçimli bir gerilim kaynağına bağlandığında elemanın akımı, tam sinüs biçimli bir akım kaynağına bağlandığında ise elemanın gerilimi harmonik bileşenler içerecektir. Yani, doğrusal olmayan bir elemanın akım veya geriliminden herhangi birisi veya her ikisi birden harmonik bileşenler içerebilir; fakat her ikisi birden tam sinüs biçimli olamaz.

Sistem kaaynağının empedansı yük empedansına göre genelde çok daha düşük olduğundan, sistemdeki gerilim harmonik seviyeleri bazen izin verilebilir seviyeleri aşmasına rağmen genelde düşüktür. Sistemdeki akım dalga şekli yaklaşık olarak sabittir ve doğrusal olmayan yükler sabit harmonik akım kaynakları olarak düşünülebilirler.

Sonuç olarak, doğrusal olmayan yüklerin etkisi, özellikle sistem empedansına olmak üzere sistem karakteristiklerine bağlıdır.(Gonzales, 1987)

3.3. Toplam Harmonik Distorsiyon

Harmonik etkilerin incelenmesinde, “ *Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)*” ölçüt olarak alınır. THD, gerilim ve akım için aşağıdaki gibi tanımlanır:

Gerilim için,

$$THD_V = \left[\sum_{n=2}^n U_n^2 / U_1^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

Akım için,

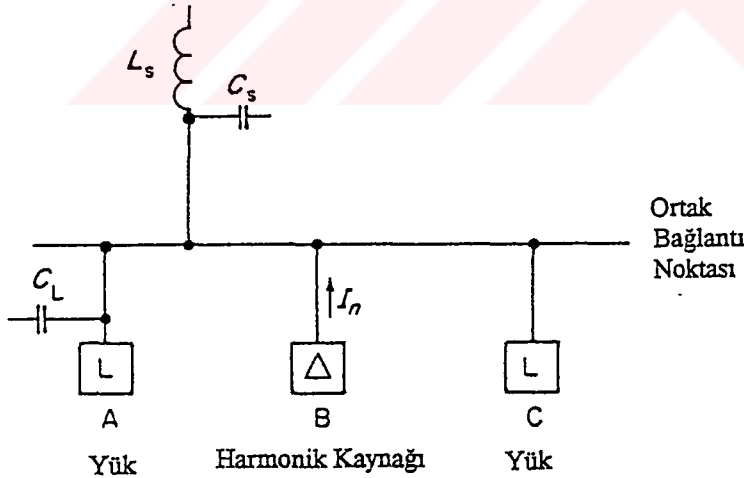
$$THD_I = \left[\sum_{n=2}^n I_n^2 / I_1^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

THD_I , harmonik akımlarının akım yolundaki elemanlar üzerindeki etkisinin bir göstergesidir. THD_V ise, paralel bağlı elemanlar üzerindeki etkinin bir göstergesidir. Gerilim harmoniklerinin büyüklüğü tüm yükleri etkilediğinden, güç sistemlerinde sınırlamalar genelde THD_V 'e göre yapılır. Önemli bir gerilim harmoniğine neden olmayan yüksek bir THD_I 'e izin verilebilir.

THD kavramı, ısınma ve kayıplar gibi etkileri içermektedir. Yalıtım zorlanmalarının hesabında ve parazit analizinde yararlı değildir. Yalıtım zorlanmaları gerilimin tepe değerine, parazit analizi ise harmonik frekansına bağlıdır. (Freund, 1988)

3.4. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları

Söz konusu rezonans olayları, Seri Rezonans ve Paralel Rezonans olmak üzere iki grup altında incelenebilir. Şekil 3.2. de bir paralel rezonans devresi gösterilmiştir.



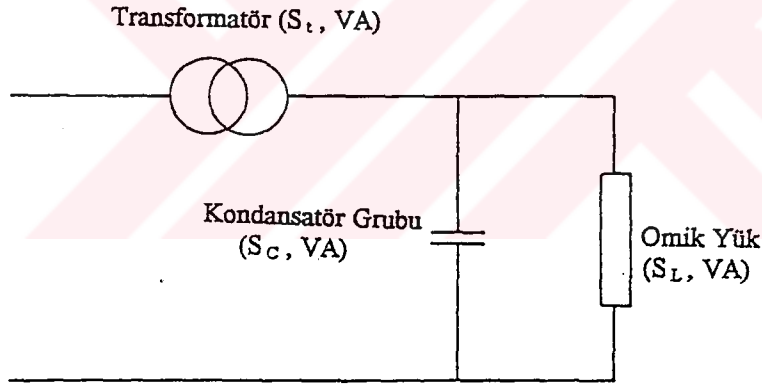
Şekil 3.2. Ortak bağlantı barasında paralel rezonans oluşumu.

Şebeke empedansının tamamen endüktif olduğu kabul edilirse, rezonans frekansı

$$f_p = f(S_s / S_c)^{1/2} \quad (3.3)$$

yazılabilir. Burada; f temel frekansı, f_p paralel rezonans frekansını, S_s şebekenin kısa devre gücünü [VAr] ve S_c kapasitenin nominal gücünü göstermektedir. Şekil 2.5.' de "B" tüketicisi bir harmonik kaynağı göstermektedir. Bu durumda rezonans koşulu, sistemin endüktansı (L_s) ve kapasitesi (C_s) ile yükün kapasitesinin değerlerine bağlı olacaktır. Hangi durumda rezonans koşulu oluşacağını belirleyebilmek için, baraya bağlı harmonikli yüklerin ve bara geriliminin harmonikleri ölçülmelidir. Genel olarak, baradan enerji sistemine akan akım küçük fakat harmonik gerilim değeri yüksek ise, rezonansın enerji sistemi tarafında oluşacağı söylenebilir. Eğer baraya bağlı yükler büyük harmonik akımlar çekiyor ve bu durum barada harmonik gerilimlerin oluşmasına neden oluyorsa, rezonansın sistemin endüktansı ve yük kondansatörü arasında oluşacağı söylenebilir (Arrillaga et al., 1976)

İkinci rezonans türü olan Seri Rezonans Şekil 3.3. de görülmektedir.



Şekil 3.3. Seri rezonans devresi.

Seri rezonans koşulu

$$f_s = f \left(\left[\frac{S_t}{S_c \cdot Z_t} \right] - \left[\frac{S_t^2}{S_c^2} \right] \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

şeklindedir. Burada f_s seri rezonans frekansını, S_t transformatörün nominal gücünü, Z_t transformatörün p.u empedansını ve S_1 omik yükün gücünü göstermektedir. Burada devrenin kalite faktörü (Q), akım akışını belirleyen en önemli kriterdir.

Rezonans olayları, özellikle güç katsayısının düzeltilmesinde kullanılan kondansatörler üzerinde etkili olur. Çeşitli ülkelerin standartları kondansatörlerin aşırı yüklenme akımlarına sınırlamalar getirmiştir. Örneğin aşırı yüklenme akımları İngiltere’de %15, Avustralya ve Avrupa’da %30 ve A.B.D’de %80 oranındadır (IEC Publication 70, 1967; AS 1013, 1971; BS 6650, 1971; ANSI/IEEE Standart 18, 1980). Ülkemizde ise TS 804’e göre, aşırı yüklenme %35’dir.

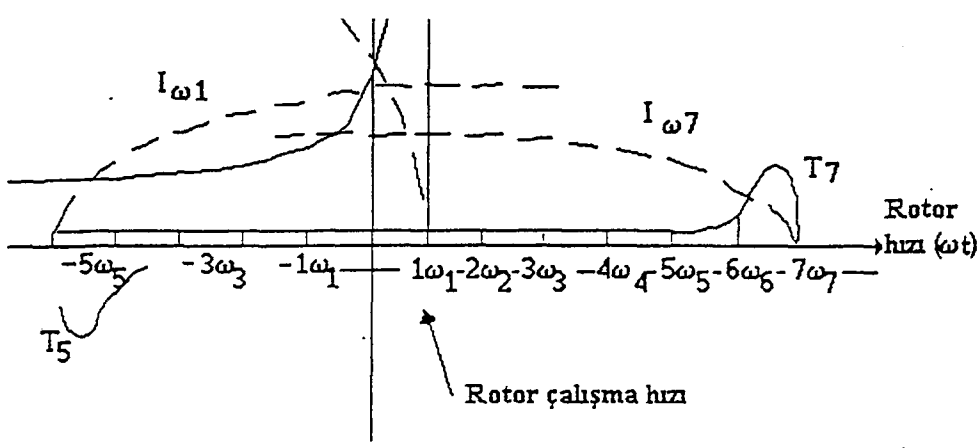
3.5. Harmoniklerin Döner Makinalar Üzerindeki Etkileri

Gerek gerilim gerekse akım harmonikleri döner makinalar üzerinde olumsuz etkiler yapar. Bu etkilerden birincisi, ek (harmonik) kayıplarıdır. Harmoniklerin varlığı, makinaların stator sargılarında, rotor devrelerinde ve nüve kısımlarında ek kayıplara yol açar. Bu konuda çeşitli teorik ve deneysel analizlerden söz edilebilir. Örneğin 16kW’lık bir endüksiyon motoru 60Hz temel frekanslı sinüsoidal gerilimle beslenirken oluşan toplam kayıp 1303 W iken, kare dalga bir gerilimle besleme yapıldığında toplam kayıpların 1600 W’a çıktığı gözlenmiştir (Klingsiran and Jordan, 1968). Benzer şekilde, evirici çıkışından beslenen endüksiyon motorlarında harmonik gerilimlerin yol açtığı kayıpların dağılımı da şu şekilde belirlenmiştir (Chalmers and Sarkar, 1968): stator sargılarında %14.2; rotor çubuklarında %41.2; uç bölgeler de %18.8. Harmoniklerin yol açtığı diğer bir olay da, harmonik momentlerdir. Bir I_n harmonik akımınca faz başına oluşturulan moment, yaklaşık olarak

$$M_n = [I_n^2/n] \cdot r_{2n}' \quad (3.5)$$

ve $V_n = I_n \cdot Z_n$ ile $Z_n \approx n \cdot X_1$ ilişkileri kullanılarak

$$M_n = (V_n^2 / n^3) \cdot (r_{2n}' / X_1^2) \quad (3.6)$$



Şekil 3.4. Rotor harmonik momentleri ve akımları.

3.6. Harmoniklerin Duran (Sabit) Şebeke Elemanları Üzerindeki Etkileri

3.6.1. İletim Sistemi Üzerindeki Etkiler

İletim sistemi (Hava hattı veya yeraltı kablosu) üzerindeki etkileri, iki bölüm altında incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi, harmonik akım bileşenlerinin oluşturduğu ek $I^2.R$ kayıplarıdır.

Bu kayıplar

$$\Sigma (I^2.R)_n = \Sigma_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n \quad (3.7)$$

şeklinde verilebilir. Deri etkisi ihmal edilirse, $R_n \rightarrow R$ (hattın omik direnci) yazılabilir.

Diğer taraftan, harmonik akımların hat boyunca oluşturduğu gerilim düşümleri de ayrı bir etkidir. n. akım harmoniğinin oluşturduğu gerilim düşümü:

$$(\Delta V)_n = I_n \cdot Z_n \quad (3.8)$$

olarak yazılabilir.

3.6.2. Transformatörler Üzerindeki Etkiler

Harmonikler transformatörlere iki şekilde etki eder. Akım harmonikleri bakır kayıplarında artışa, gerilim harmonikleri ise demir kayıplarında artışa neden olurlar. Her iki durumda da transformatörde ek ısınmalar oluşur.

Harmonik gerilim ve akımlarının oluşturduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Magnetik çekirdekdeki alternatif magnetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan, çekirdekdeki histerezis kayıpları artar. Ayrıca, zamanla değişen magnetik akı, iletkenleri kestikçe değişken magnetik alan çelik dilimlerinde girdap (eddy ve fuko) akımlarını oluşturur. Bu akımlar da ek kayıplara neden olurlar. Kısaca, frekans arttıkça transformatör kayıpları da artar. Bu yüzden, transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir.

IEEE, transformatörün yük akımındaki harmonikler için bir sınır belirlemiştir. Buna göre, THD_I sınırı %5'dir. THD_V sınırı ise yüksüz durumda %10, anma yükünde %5'tir. (Freund, 1988)

3.6.3. Kapasite Grupları Üzerindeki Etkiler

Gerilim bozulmasından en çok etkilenen eleman, güç faktörü düzeltiminde kullanılan kondansatör gruplarıdır. Kondansatörlerde en önemli problem, aşırı etkin akımlardır.

Diğer bir problem de tepe geriliminin oluşturduğu yalıtım zorlanmasıdır. (Freund, 1988)

Kapatif reaktans frekanslarla ters orantılı olarak azalacağından, temel bileşendeki değeri X_c olan kapasitif reaktans, harmonik mertebesi n olan bir akımda,

$$X_{cn} = X_c / n \quad (3.9)$$

değerini alır. Yani akımın frekansı büyüdükçe kapasitif reaktans küçülür. Bu nedenle, kondansatörler harmonik frekanslarında daha büyük akımlar çekerler ve aşırı yüklenirler.

n . harmonik için U_n harmonik gerilimi altında kondansatörün çektiği akım,

$$I_n = n \cdot \omega \cdot C \cdot U_n \quad (3.10)$$

ve gücü,

$$Q_n = I_n^2 / n \cdot \omega \cdot C \quad (3.11)$$

değerini alır. Burada, $\omega = \omega_1$ temel bileşen açısal frekansıdır. Kondansatör uçlarındaki gerilimin etkin değeri,

$$U_C = \left(\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

olur. Kondansatör akımının etkin değeri, aynı şekilde harmonik akımlarının karesel ortalamasına eşittir.

$$I_C = \left(\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

Görüldüğü gibi bu akım, harmonikli gerilimin etkin değerine eşit bir sinüs biçimli gerilim altında kondansatörün çektiği akımdan büyüktür. Kompanzasyon tesislerinin tasarımında bu durumların göz önüne alınması gereklidir.(Bayram, 1985)

Gerilimin bozulması durumunda kondansatörlerde oluşan ek kayıplar,

$$\text{Ek dielektrik kayıpları} = \sum_{n=2}^{\infty} C_n (\tan\delta)_n \omega_n V_n^2 \quad (3.14)$$

olarak ifade edilir; $\tan\delta=R/(1/\omega.C)$ kayıp faktörünü, $\omega_n = 2.\pi.f_n$ harmonik frekansı ve V_n n. harmoniğe ilişkin gerilimin etkin değerini göstermektedir.(Arrillaga et al.,1985)

Gerilim harmoniklerinden dolayı kondansatör gücü de artar. Şebeke işletmesinde sadece temel bileşene ait güç önem taşımaktadır. Buna karşılık, kondansatörün dielektrik kayıpları, yani ısı zorlanma bakımından toplam kondansatör gücü gereklidir. Dolayısıyla ısı zorlanma da artar. Temel bileşeni ve harmonikleri içeren toplam reaktif güç ifadesi,

$$Q = \sum_{n=2}^{\infty} Q_n \quad (3.15)$$

olarak verilir. Toplam reaktif güç ifadesi, reaktif değerın anma gücünü aşmamalıdır. TS 804'e göre sinüs biçimli gerilim altında anma etkin gerilimi için %110, anma etkin akımı için ise %130 olarak sınır değer konmuştur.(Bayram, 1985)

Kondansatör karakteristikleriyle ilgili standartlar, sinüs biçimli olmayan bir dalga uygulandığında, güvenilir bir işletme amacıyla aşılması gereken sınırları içerir. IEEE standartlarına göre, kondansatörler için gerilim, akım ve reaktif güç sınırlamaları şöyledir:

Anma etkin gerilimi : %110

Anma etkin akımı : %180

Anma reaktif gücü : %135

Tepe gerilimi : %120

Genelde, kondansatörler keskin bir rezonans koşulunda bulunmadıkça gerilim bozulması arızaya neden olacak kadar yüksek değildir. Endüstriyel güç sistemlerinde daha sık karşılaşılan harmonik problemlerinin ilk belirtilerinden biri kondansatör gruplarında oluşan arızadır.

Çoğunlukla tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucu oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörlerde ısınmayı ve gerilim zorlamalarını arttırarak ömürlerini kısaltırlar.(Freund, 1988)

3.7. Güç Elektroniği Elemanları Üzerindeki Etkiler

Güç elektroniği elemanları birçok durumda önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra, harmonik bozulmaya karşı çok duyarlıdırlar. Bu elemanların düzenli çalışmaları gerilim sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Sıfır geçiş noktaları birçok elektronik kontrol devresi için kritik noktalardır. Harmonik bozulmanın bu noktaları kaydırması sonucu oluşan komütasyon hataları, elemanın çalışmasını olumsuz yönde etkiler.(Freund, 1988)

Ayrıca, gerilim tepe değerine göre cevap vererek çalışan elemanlardan dolayı sorunlar çoğalabilir. Buna en güzel örnek diyottur. Eleman, dalga şeklinin etkin değerine tam olarak karşılık gelmeyen tepe değerine duyarlı olduğundan, harmoniklerin varlığında düzenli çalışmayabilir. Güç elektroniği cihazlarına ait diğer arızaları şöyle sıralayabiliriz (Joseph et al.,1990):

- a) Ölçme cihazlarında hatalar
- b) Röleler ve kesicilerde oluşan arızalar
- c) Sıfır gerilim geçişli ateşleme devrelerinin kararsız çalışması
- d) Motor kontrolleri ile ilgili parazitler

3.8. Koruyucu Sistemler Üzerindeki Etkiler

Bilindiği gibi, koruyucu sistemler çoğunlukla temel gerilim ve akımlara göre tasarlanırlar; olabilecek harmoniklerin de ya süzüldüğü ya da ihmal edilebilir düzeyde

olduğu kabul edilir. Elektromagnetik röle uygulamalarında (aşırı akım koruması gibi) yüksek harmoniklerin çok fazla etkinliğinin olmadığı söylenebilir (Arrillaga et al., 1976). Ancak özellikle mesafe korumalarında, harmonik akımları (özellikle 3. harmonik bileşeni) büyük ölçme ve değerlendirme hatalarına yol açabilmektedir. Dijital mesafe koruma sistemlerinde, akım ve gerilim dalgalarının mutlaka filtre edilmesi gerekmektedir. (McClaren and Redfern, 1975)

Harmonik akımları anahtar elemanında ısınmayı ve kayıpları arttırarak, anahtarın akım kesme yeteneğini etkileyebilir. Etkili harmonikler nedeniyle söndürüm bobinlerinin düzensiz çalışması sonucu devre kesicileri akımı kesemezler. Sönüm bobini düzensiz çalışırsa, arkın uzamasına ve kesicinin görevini yerine getirememesine neden olur. Aynı zamanda, harmonik akımları sigortaların minimum erime zamanlarını azaltarak, akım-zaman karakteristiklerinde değişmeye ve bu yüzden istenmeyen çalışma durumlarına neden olabilirler.

Tepe gerilimine, akım veya gerilim sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik bozulmadan olumsuz yönde etkilenirler. Harmoniklerin, rölelerin çalışmalarına etkilerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Freund, 1988):

- Röleler daha büyük tepe değerleriyle yavaş çalışmak yerine, küçük tepe değerleriyle daha hızlı çalışma eğilimi gösterirler.
- Statik rölelerin çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler oluşur.
- Farklı yapım aşırı akım ve gerilim rölelerinin çalışma karakteristikleri farklılıklar gösterir.
- Dengeli empedans röleleri bozulmaya bağlı olarak ayaraltı ve ayarüstü çalışma gösterebilir.
- Fark röleleri bazı zamanlar yüksek hızda çalışmayabilir.
- Üçüncü harmonik akımı, toprak rölelerinin hata yapmasına neden olabilir.

3.9. Küçük Güçlü Elektrik Tüketicileri Üzerindeki Etkiler

Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir (Arrillaga et al., 1976):

- Gerilim harmonikleri, TV cihazlarının görüntü kalitesini bozabilir.

- Floresant ve civa buharlı lambalarla yapılan aydınlatmada, balastın yanısıra kondansatörler kullanılır. Rezonans olması halinde, aşırı ısınma ve arızalar oluşabilir.
- Bilgisayarlar, elektrikli cihazlar içinde harmoniklere en duyarlı cihazlardır. Çeşitli üretici firmalarca (IBM gibi) harmonik limitleri belirlenmiştir. Örneğin, gerilimin tepe değerinin 1.41 ± 0.1 aralığında kalması koşulu bulunmaktadır.
- Tristör kontrollü hız kontrol cihazlarında harmoniklerin bir takım olumsuz etkileri bulunmaktadır. Örneğin tristörlerin tetiklenmesinde kapı devrelerinde gecikmeler, hatalar vb. sayılabilir.
- Kontrol ve kumanda sistemlerinde harmoniklerden kaynaklanan istenmeyen etkiler oluşabilir.

3.10. Enerji Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkiler

Ölçü aletleri, başlangıçta tam sinüsoidal işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesiyle orantılı dönme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına yol açacaktır. (Baggott, 1974; Emanuel et al., 1981)

Elektrik saatleri gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel bileşen akımı görürler. Diskte oluşan moment, akının ve diskte oluşan Eddy akımının çarpımına eşittir. Her ikisi de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalır. Bunun sonucu olarak ölçme aleti yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapar. Harmonik bozulmanın neden olduğu faz dengesizlikleri de aletlerin hatalı ölçmelerine neden olur. Harmonik içeriğine, ölçmenin ve yükün tipine bağlı olarak hem pozitif hem de negatif hatalar oluşabilir. Genelde, önemli hataların farkedilmesi için bozulma seviyesinin %20'den büyük olması gerekir. (Freund, 1988)

3.11. İletişim Sistemleri Üzerindeki Etkiler

Elektrik güç sistemleri ve iletişim devreleri arasındaki magnetik/elektrostatik bağlantı, iletişim parazitlerine neden olabilir. Güç devresindeki akım akışı, yakınındaki iletişim devresi iletkenlerinde akım/gerilim endükleyecek bir magnetik/elektrostatik alan oluşturabilir. Parazitlerin miktarı endüklenen akım/gerilim genliğine, frekansa ve

magnetik/elektrostatik bağlantının verimine bağlıdır. Diğer iletişim parazitlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Joseph et al., 1990):

1. Endüklenen hat gürültüsü
2. Güç hat taşıyıcı sistemleri sebebiyle oluşan parazitler
3. Röle arızaları

Bu konuyla ilgili olarak Telefon Girişim Faktörü (*Telephone Interference Factor*) TIF tanımlanmıştır. TIF, bir dalga şeklinin (genliğinin değil) göstergesi olan boyutsuz bir büyüklüktür ve aşağıdaki ifade ile verilir:

$$TIF = \frac{[\sum(I_f W_f)^2]^{1/2}}{X_t} \quad (3.16)$$

veya eşdeğer olarak,

$$TIF = (\sum[(X_f W_f)/X_t]^2)^{1/2} \quad (3.17)$$

Burada:

X_t = Toplam etkin gerilim veya akım

X_f = f frekansındaki tek frekans etkin akım veya gerilimi

W_f = f frekansındaki tek frekans TIF ağırlığı

Mevcut C mesaj ağırlığı ve 1 kHz'e normalize edilmiş bağlantıyı yansıtan TIF ağırlık fonksiyonu W_f , aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$W_f = 5P_f f \quad (3.18)$$

Burada:

P_f = f frekansındaki C mesaj ağırlığı

f = Dikkate alınan frekans

Pratikte, telefon girişimi çoğu kez akım ve TIF'nün bir çarpımı olarak, yani I.T çarpımı olarak ifade edilir. Burada, I amper olarak etkin akım ve T ise TIF'dür. Buna karşılık, telefon girişimi, bazen gerilim (etkin kV olarak) ve TIF'nün bir çarpımı olarak da ifade edilir.

4. HARMONİK STANDARTLARI

Harmonik kaynaklarının geçen son on yılda önemli derecede artması sonucu, çeşitli ülkeler harmoniklere bazı sınırlamalar getirmeyi uygun bulmuştur. Bu konuda dikkate alınan en önemli ölçüt, “Toplam Harmonik Distorsiyonu” (THD) dur.

Dünyadaki harmonik standartları, bazı ülkelere göre şöylece uygulanmaktadır.

- **Fransa** : Bu ülkede EDF’ nin kayıtlarına göre, bağlantı noktasındaki tek harmoniklerin %1.0 çift harmoniklerin ise %0.6 değerini aşmaması öngörülmüştür (Electricite de France, 1981). Bu oranlar temel bileşen cinsinden verilmektedir.
- **Almanya** : Bu ülkede DIN 57160 (VDE 0160/11.81) normuna göre, toplam harmonik gerilimi temel bileşenin %10’ unu aşmamalıdır. Ayrıca 15. harmoniğe kadar izin verilen gerilim harmoniği yüzdesi 5 iken 100. harmoniğe kadar ise %1’lik gerilim harmoniğine izin verilebilmektedir. (DIN 57160, VDE 0160/11.81, 1981)
- **İsveç** : Bu ülkedeki ilgili kuruluş SEF’ in toplam harmonik distorsiyonu (THD) ile ilgili sayısal verileri Tablo 4.1’de şöylece özetlenebilir. (SEF Thyristor Committee Report, 1974)

Tablo 4.1. İsveç SEF kuruluşunca izin verilen THD

İşletme Gerilimi	THD (%)
400/250v	4.0
3.3 kV, ..., 24kV	3.0
3.4 84 kV’a kadar	1.0

- **Amerika Birleşik Devletleri** : Bu ülkede IEEE’ nin THD ile ilgili sınırlamaları genel enerji sistemleri için bir tablo şeklinde şöylece verilebilir. (IEEE, 1981)

Tablo 4.2. IEEE' nin Amerika Birleik Devletleri için belirlediği Toplam Harmonik Distorsiyonu sınırları

İşletme Gerilimi	THD (%)
2.4 kV,...,69 kV	5.0
115 kV ve üzeri	3.0

- **Avustralya** : Avustralya Standartı AS 2279, gerilim kademesini dikkate alarak değerlendirme yapmıştır (Australian Standarts Authority, 1979). Örneğin, tek ve çift harmonik sınırlamaları şu şekilde belirtilmiştir:

Tablo 4.3. AS 2279 Standartına göre harmonik sınırlamaları

İşletme Gerilimi	THD (%)	Tek (%) Harmonik	Çift (%) Harmonik
33 kV kadar	5	4	2
22 kV,.33 kV,.66 Kv	3	2	1
110 kV ve üzeri	1.5	1.5	0.5

- **Yeni Zelanda** : Bu ülkenin 1981 yılında yayımlanan ilgili yönetmeliği, akım ve gerilim harmoniklerinin sınırlarını 66 kV ve üzerindeki gerilim kademeleri için vermektedir. Örneğin, harmonik mertebesine göre gerilim harmoniklerinin sınırları Tablo 4.4' te verilmiştir. (New Zeland Ministry, 1981).
- **Finlandiya** : Benzer yaklaşımla hareket eden Fin Yönetmeliğinin sınır değerleri de aşağıda Tablo 4.5 de verilmiştir. (Finnish Association of Electricity Supply Undertakings, 1978)
- **İngiltere** : İngiltere'de ilgili yönetmelik G5/3 (Electricity Council, 1976) dönüştürücü boyutlarının değerlendirilmesine üç aşamalı bir yaklaşım getirmiştir. Bu aşamalar şu şekilde özetlenebilir :

Tablo 4.4. Yeni Zelanda için harmonik sınırları

Harmonik Mertebesi (n)	V_n / Nominal Faz Gerilimi
3	2.3
5	1.4
7	1.0
9	0.8
11	0.7
13	0.6
15	0.5
17-21	0.4
23-49	0.3
2	1.2
4	0.6
6	0.6
8 ve 10	0.3
12-50	0.2

Tablo 4.5. Fin Yönetmeliğine göre harmonik sınırları

İşletme Gerilimi	Gerilim İçin THD (%)	Akım İçin THD (%)
1 kV	5	-
3 kV, ..., 20 kV	4	10
30 kV, ..., 44 kV	3	7
110 kV ve üzeri	1.5	5

1. Bu aşamada harmonik seviyeleri kapsamlı olarak göz önüne alınmaz. Harmonik üreten kaynak sadece boyutları açısından değerlendirilir. Aşağıda verilen Tablo 4.6'da aşama kapsamına giren, teorik olarak tek harmonikleri üreten 5 kVA' yı veya

415/480 Voltta 7.5 kVA' yı aşmayan tek fazlı harmonik kaynakları bulunmaktadır.
(Arrillaga et al, 1985)

Tablo 4.6. İngiltere'de 1. aşama için kabul edilen harmonik değerleri

Ortak bağlantı noktasında kaynak gerilimi (kV)	Üç Fazlı Dönüştürücüler		
	üç faz (kVA)	altı faz (kVA)	12-faz (kVA)
0.415	8	12	-
6.6 ve 11	85	130	250

2. Bu aşamada sistem büyüklüğü yerine sistem üzerindeki harmonik akım ve gerilimleri ile harmonik gerilim distorsiyonu seviyesi kriter olarak alınmıştır. Distorsiyona neden olan yükün bağlanmasına izin verilmesi için, ek yükün akım seviyesini aşmaması gerekmektedir. Burada bağlantı öncesi mevcut gerilim distorsiyonu izin verileninkinden %75 daha azdır. İkinci aşama içinde bulunan tipik dönüştürücüler Tablo 4.7' de ve gerilim distorsiyon sınırları Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.7. İngiltere'de 2. aşama için kabul edilen harmonik sınırları

Kaynak Gerilimi (kV)	Harmonik mertebesi ve harmonik akımı (A)															
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0.415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6
6.6 ve 11	1	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2
33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1

Tablo 4.8. Sistemin herhangi bir noktasındaki gerilim distorsiyon sınırları

Kaynak Gerilimi (kV)	Toplam Harmonik Distorsiyonu (%)	Harmonik Distorsiyonu (%)	
		Tek	Çift
0.415	5	4	2
6.6 ve 11	4	3	1.75
33	3	2	1
132	1.5	1	0.5

3. Bu aşamada ise birinci ve ikinci aşama sınırlarına girmeyen, gerilim distorsiyonunun %75 seviyesinin üzerinde olduğu durumlardaki bozucu yükler sınıflandırılmıştır. Bu yüklerin şebekeye bağlanmasında bu konuda öngörülen bir hesap yöntemi kullanılır. Tabo 4.9'da harmonik akım sınırlarına göre dönüştürücü yerleştirilmesindeki maksimum yük sınırları verilmektedir.

Tablo 4.9. İngiltere’de 3. Aşamada dönüştürücü yerleştirilmesindeki maksimum yük sınırları

Kaynak Gerilimi (kV)	Dönüştürücü Tipi	Kabul edilebilir kVA sınırları		
		3-faz	6-faz	12-faz
0.415	Kontrolsüz	-	150	300
	Yarı kontrollü	-	65	-
	Kontrollü	-	100	150
6.6 ve 11	Kontrolsüz	400	1000	3000
	Yarı kontrollü	-	500	-
	Kontrollü	-	800	1500
33	Kontrolsüz	1200	3000	7600
	Yarı kontrollü	-	1200	-
	Kontrollü	-	2400	3800
132	Kontrolsüz	1800	5200	15000
	Yarı kontrollü	-	2200	-
	Kontrollü	-	4700	7500

5. HARMONİK ÖLÇÜM VE TEST TEKNİKLERİ

5.1. Giriş

Güç sistemleri ve sisteme bağlı olan enstrümanlar için harmonik ve araharmoniklerin ölçümü ve devrelerinden bahsedilecektir.

DC ile 2500 Hz aralığındaki frekanslarda akım veya gerilim unsurlarını ölçmek için tasarlanmış enstrümanlar üzerinde durulmuştur.

5.2. Tanımlar

$$f(\omega t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (5.1)$$

$$\underline{c}_n = b_n + ja_n = c_n e^{j\varphi_n}; \varphi_n = \arctan(a_n / b_n) \quad (5.2)$$

$$b_n = (1/\pi) \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega_1 t) d(\omega t) \quad (5.3)$$

$$a_n = (1/\pi) \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega_1 t) d(\omega t) \quad (5.4)$$

$$c_0 = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \quad (5.5)$$

Burada:

ω_1 = Temel açısal hız ($\omega_1 = 2\pi f_1$)

$\underline{c}_n = f_n = nf_1$ frekansında kompleks genlik

c_0 = DC bileşen

- **Zaman Domeninde Enstrümantasyon:** Sinyallerin zaman örnekleme ve örnekleme verileri nümerik olarak kullanarak analiz yapılmasını sağlayan enstrümantasyondur. Doğrusal olmayan ve zamanla değişen yükleri zaman domenindeki analiz teknikleriyle modellemek gerekir. FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü-*Fast Fourier Transform*) tekniği harmonik analiz için en çok kullanılan hesaplama algoritmasıdır.
- **Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) :** Bu teknik, çok sayıda fonksiyonların değerlendirilmesini olanak sağlayan spektrum analizini gerçekleştiren çok hızlı bir yöntemdir. Çok kanallı analog-dijital dönüşüm ve mikro veya mini bilgisayarlar gerçek-zaman veri toplama kullanılırlar. Dalga biçimleri analog veya dijital teknikler kullanarak uygun bant genişliği ile kaydedildiği zaman, harmonik bileşenlerin FFT hesabı, mühendislik birimlerine dönüştürme, istatistiklerin hesabı ve sonuçların çizilmesi ve yazıcıdan alınması için uygun imkanlar kullanarak laboratuvarlarda gerçekleştirilebilir. (IEEE Ind. Ap. Soc., 1992)

5.3. Enstrümantasyonda Genel Sınıflandırma

Gereken ölçümün (akım veya gerilim vb.) tipine göre ve devrenin doğruluk sınıfına bağlı olarak, ölçülmüş olan U_m veya I_m sinyalinin karakteristiğine göre, devrenin kurulması sınıflandırılabilir.

5.3.1. Ölçülen Sinyal Karakteristikleri

- a) Yavaşça değişen harmonikler
- b) Değişken harmonikler
- c) Hızlı değişen harmonikler
- d) Araharmikler ve diğer suni bileşenler

İlk üç kategori arasında kesin bir ayrım yapmak zordur. İstenen EMC'a (Elektromagnetik Uygunluk-*Elektromagnetic Compatibility*) ulaşmak için en uygun yöntem aşağıdaki örneklerle gösterilecektir.

- a) Sürekli bir analizin (ölçümler arasında zaman boşluğu olmaksızın) gerekli olmadığı kabul edilen uygulamalar:
 - 1) Sabit harmonik akımların ölçümü (TV alıcıları, aydınlatma dimmerleri vb. tarafından üretilen),
 - 2) Bir besleme sisteminde, harmoniklerin ani etkilerinin önemli kabul edilmediği, uzun vadeli harmonik ölçümleri.
- b) Sürekli bir gerçek-zaman analizinin gerekli olduğu durumlar. Elektronik faz kontrol ve regülasyon uygulamaları, motor dönüş yönünün ve hızının değişmesi gibi sebeplerden oluşan değişken harmonik akımlarının ölçümü, bu tip ölçümlerdir.
- c) Sürekli bir gerçek-zaman ölçümünün kesinlikle gerekli olduğu durumlar. Zararlı olabilen, çok hızlı değişen harmonikler ya da çok kısa harmonik sıçramaların (1 s veya daha kısa süreli oluşabilen değişimler) analizi için bu tip enstrümantasyon gerekli olabilecektir. Örneğin, şebekede telekontrol-alıcı uygulamalarında.

5.4. Tüm Tiplerdeki Enstrümantasyonda Genel Olarak İstenenler

Aşağıda, frekans domeninde ya da zaman domeninde çalışan tüm tiplerdeki enstrümantasyon için gerekli tanımlar verilmiştir. Sabit durum, düzensiz veya çok hızlı değişen harmonikler ve araharmikler için bu tanımlar geçerlidir.

5.4.1. Giriş Devreleri İçin İstenenler

5.4.1.1. Gerilim Giriş Devresi

Ölçüm devresinin girişi, analizi yapılan besleme geriliminin frekansına ve nominal gerilime adapte edilmiş olmalıdır. Devre karakteristikleri korunmalı ve nominal gerilimde doğruluk 1,2 katından fazla değişmemelidir. Ölçümlerin sağlıklı olabilmesi için tepe faktörünün (*crest factor*) en az 1,5 olduğu dikkate alınmalıdır. Endüstriyel bölgelerdeki yüksek distorsiyonlu yükler için tepe faktörünün en az 2 olması gerektiğinden bu bölgeler ayrı değerlendirilmelidir. Aşırı yük göstergesi her durumda gereklidir.

Giriş devresine 1 s süre için a.c. giriş geriliminin dört katı ya da 1 kV_{rms} gerilim uygulanmalı ve devrede hiçbir hasara yol açmadığı görülmelidir.

Hemen hemen tüm besleme sistemlerinde giriş devreleri için tavsiye edilebilecek nominal gerilimler:

$$U_N = 115, 230, 400 \text{ V dur.}$$

115 V bazı ülke kurumlarında aynı zamanda şebeke gerilimi olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca, 100 V, $100/\sqrt{3}$ V, $110/\sqrt{3}$ V gibi gerilimler de kullanılabilir.

Yüksek hassasiyete sahip (0,1; 1; 10 V) giriş devreleri transdüser uygulamaları için kullanışlıdır. Tepe faktörünün en az 2 olması gerekebilir.

Giriş devresi güç kaybı 3 VA'ı aşmamalıdır.

Eğer yüksek hassasiyete sahip giriş devresi (< 50 V) sağlanırsa, giriş devresi direnci ev az 10 kΩ/V olmalıdır.

5.4.1.2. Akım Giriş Devresi

Giriş devresi, analizi yapılan akıma uygun olmalıdır. Harmonik akımlarının doğrudan ölçümü sağlanmalıdır. Omik paralel devrelerle (ya da akım transformatörleri ve omik paralel devrelerin kombinasyonu) kurulan yüksek empedanslı düşük gerilimli bir giriş de sağlanmalıdır. 0,1 V ile 1 V arası gerilim giriş devreleri için uygundur.

Doğrudan akım ölçümleri için tavsiye edilen nominal akım değerleri:

$$I_N = 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 16 \text{ A dir.}$$

Akım giriş devresi güç kaybı B sınıfı devreler için 3 VA'yı aşmamalıdır. A sınıfı devreler için giriş gerilim düşümü 0,15 V'u aşmamalıdır.

Tüm ölçüm giriş devreleri $1,2I_N$ akımına sürekli olarak dayanabilmelidir ve 1 s süreyle $10I_N$ uygulandığında bu akım hasara yol açmamalıdır. Aşırı yük gösterimi gereklidir ve tepe faktörünün 3 olması uygundur.

Ölçülen harmoniğe nispetle temel frekansın yüksek olmasının ya da efektif değere bağlı olan akım tepe değerinin (tepe faktörü) aşırı yük oluşturarak hasara yol açmamasına ve devrenin giriş kısmında zararlı hata sinyalleri oluşturmamasına dikkat edilmelidir. Ölçülen akımda bulunan d.c. bileşenler, giriş akım transformatörlerinde büyük hatalar oluşturabilirler. Üreticiler enstrümantasyon spesifikasyonlarında, izin verilen maksimum d.c. bileşeni belirtmelidirler.

5.5. Enstrümanlarda Doğruluk Sınıfları

Akım veya gerilim harmoniklerinin ölçüm devrelerinde iki tip (A ve B) doğruluk sınıfı vardır. IEC 555-2¹'ye göre emisyon testleri için yüksek sınıf olan A gereklidir. Tek frekanslı ve sürekli sinyaller için izin verilen maksimum hata değerleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

¹ Revizyondadır.

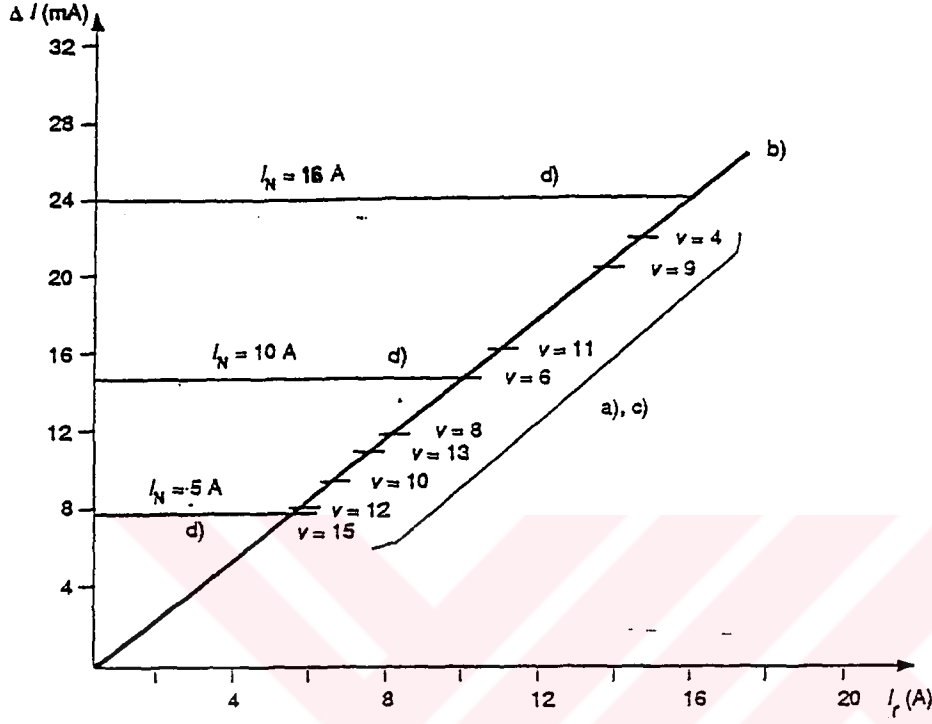
Tablo 5.1. Maksimum Ölçüm Hataları

SINIF	ÖLÇÜM	KOŞULLAR	İZİN VERİLEN MAX. HATA
A	Gerilim	$U_m \geq 1\% U_N$ $U_m < 1\% U_N$	5% U_m 0,05% U_N
	Akım	$I_m \geq 3\% I_N$ $I_m < 3\% I_N$	5% I_m 0,15% I_N
B	Gerilim	$U_m \geq 3\% U_N$ $U_m < 3\% U_N$	5% U_m 0,15% U_N
	Akım	$I_m \geq 10\% I_N$ $I_m < 10\% I_N$	5% I_m 0,5% I_N

U_m, I_m : ölçülen değerler

U_N, I_N : enstrümanın nominal giriş değerleri

5 A'den daha büyük akımların ve 15. dereceden daha yüksek harmoniklerin maksimum doğrulukta tespit edilmesi gerekiyorsa, test edilen cihazın akımına (I_r) uyan (b.k.z. Şekil 5.1.) akım transdüserleri veya harici paralel devreler kullanılması tavsiye edilmektedir.



Şekil 5.1. Kabul edilebilir hata ve test cihazlarının akımı (I_r) üzerine tavsiye edilen doğruluk.

Kabul edilebilir hata: Maksimum değer:

- a) limitin %5 i veya
- b) I_r akımının %0,15 i

Ölçüm doğruluğu: Maksimum değer:

- c) ölçülen değerinin %5 i
- d) sınır değerinin %0,15 i.

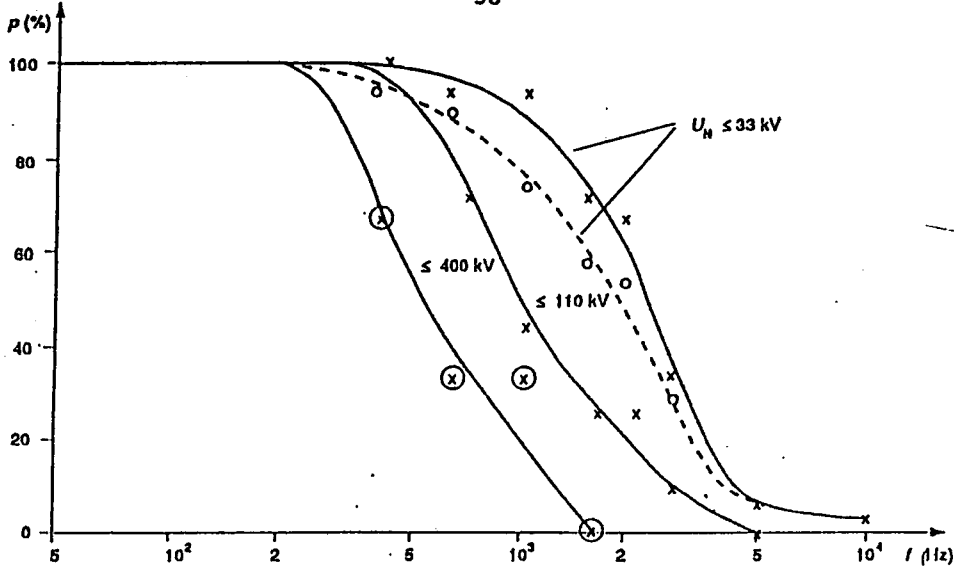
5.6. Gerilim ve Akım Transformatörlerinin Doğrulukları

Gerilim transformatörlerinin ve akım transformatörlerinin doğrulukları ölçüm enstrümanlarının doğruluk değerlerine uygun olmalıdır; bağıl hata (ölçülen değere bağlı olan) %5'i aşmamalıdır.

Akım veya gerilim bağıl harmonik değerlerin ölçümünde (temel frekansa bağlı olarak) frekansın akım transformatörünün veya gerilim transformatörünün transfer oranına bağlı olması önemlidir. Bu yüzden, nominal değerden (temel frekansta) harmonik değere transfer sapması %5'i aşmamalıdır.

Eğer faz açılarının ölçümü gerekiyorsa, akım transformatörünün veya gerilim transformatörünün ayrı ayrı hata değeri 5° yi geçmemelidir.

Yaklaşık 40 adet gerilim transformatörü (6 kV - 400 kV arasındaki gerilimlerde) üzerinde yapılan transfer oranı ölçümlerinin sonuçları Şekil 5.2. de verilmiştir. Verilen bir frekansta transfer oranında maksimum sapmanın %5 ya da 5° olduğunu, gerilim transformatörlerinin kümülatif olasılık fonksiyonu (p) oranını göstermektedir.



Şekil 5.2. Endüktif gerilim transformatörlerinin p oranı, f frekansında transfer oranında nominal değerden maksimum sapma %5 veya 5° altındadır.

Ölçülen gerilim transformatörü sayısı: 41

———— maksimum hata %5

----- maksimum hata 5°

Tüm ölçümler için çıkarılan neticeleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- A.G. akım ve gerilim transformatörleri harmonik frekanslarda gayet elverişli çalışırlar;
- İstenilen %5 doğruluk, O.G. gerilim transformatörleri için genellikle 1 kHz'e kadar uygun görülmektedir;
- Ek olarak istenen 5° doğruluk, O.G. gerilim transformatörlerinde 700 Hz'e kadar uygundur;
- O.G. akım transformatörleri için sadece birkaç ölçüm mevcuttur. Tümü harmonik frekanslarda ölçüm için oldukça uygundur. Faz açısı ölçümü gerektiği takdirde frekans aralığı 1,5 kHz civarına kadar azaltılır;
- Y.G. gerilim transformatörleri genellikle 0,5 kHz'e kadar uygundur.

- Çok yüksek gerilim gerilim transformatörleri, 5. Harmoniğin yukarıdaki harmonik ölçümleri için uygun olmamaktadır. Eğer özel tasarlanmış ölçümler istenirse, hatalar en azından 1 kHz'e kadar kabul edilebilir seviyede olabilir;
- Yüksek ve çok yüksek gerilim akım transformatörleri için yalnız birkaç ölçüm mevcuttur. Frekansa bağlı hata çok büyük olabilmektedir. Buna rağmen, akım transformatörlerinin hatası bu gerilimlerde genellikle gerilim transformatörlerinden daha az olmaktadır.

Eğer çok kesin gerilim ölçümleri yapılmak zorundaysa, omik bölücüler ($U_N < 1$ kV) veya kapasitif bölücüler ($U_n \geq 1$ kV) kullanılması tavsiye edilir.

Birçok durumda, bir kapasitif gerilim transformatörü (bir kapasitif bölücü ve endüktif izolasyon transformatörü kombinasyonu) uygun olmaktadır: buna rağmen, yüksek dereceli harmoniklerde harmonik ölçümleri için her zaman uygun olmamaktadır.

Gerilim transformatörünü devreden ayırmak ve gerekirse bir kapasitör eklemek suretiyle, bir kapasitif bölücü elde edilebilir.

5.7. Frekans-Domenli Enstrümantasyon İçin İstenenler

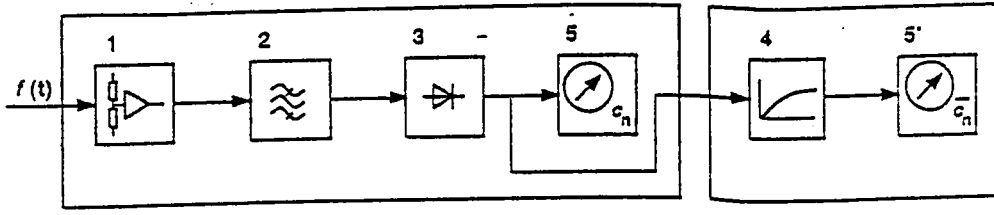
5.7.1. Giriş

Frekans domenli devre tipleri, seçici amplifikatörler, heterodin (gelen sinyali devamlı bir frekansa karıştıran), çeşitli pasif filtreler, vb. içerebilirler.

Şekil 5.3. de şematik bir diyagram verilmiştir.

Frekans-Domenli Enstrüman

Hesaplama



Şekil 5.3. Ölçüm ve hesaplama enstrümantasyon diyagramı.

Otomatik frekans tarayıcıları, emisyon testleri için tavsiye edilmemektedir. Sürekli hal değerinin doğru ölçülebilmesi için tarama çok yavaş olmalıdır.

5.7.2. Yavaş Değişen Harmonikler

Ölçülen n. harmonik frekansı f_n ($f_n = n f_i$; f_i : temel frekans) ile referans arasındaki minimum atenuasyon tanımlanmalı ve ölçülmelidir.

Tablo 5.2. deki atenuasyon değerleri akım ve gerilim ölçümleri için uygundur.

Tablo 5.2. Sağlanması Gereken Atenuasyon Değerleri

Frekans	f_n Değeri	Minimum Atenuasyon dB
Komşu Harmonik	$2f_i \leq f_n \leq 12f_i$	30
$f_n - f_i$ ve $f_n + f_i$	$12f_i < f_n \leq 20f_i$	20
	$20f_i < f_n \leq 50f_i$	15
Frekans $\leq 0,5f_n$	Tüm f_n değerleri	50
Temel (besleme) frekansı f_i	Tüm f_n değerleri	60*
		70**
* Tüm akım ölçümleri ve B sınıfı gerilim ölçümleri için		
** A sınıfı enstrümantasyon ile gerilim ölçümü için		

5.7.3. Değişen Harmonikler

Tablo 5.2. deki değerler bu harmoniklerin ölçümü için de geçerlidir.

Ek olarak, 3 Hz ile 10 Hz arasında -3 dB bant genişliği ilave edilir.

5.7.4. Hızlı Değişen Harmonikler

Frekans domenli devreler ile hızlı değişen harmoniklerin ölçülmesi tavsiye edilmemektedir.

5.7.5. Çıkış Karakteristikleri

Devrenin analog filtre kısmı çıkışı doğrultulmuş olmalıdır. Şekil 5.3. deki c_n ile aynı çıkış sağlanmalıdır.

5.8. Zaman-Domenli Enstrümantasyon İçin İstenenler

5.8.1. Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) Enstrümantasyonu - Genel Konseptler

Ayrık Fourier dönüşümü (DFT-*Discrete Fourier Transform*), temel Fourier serileri ile aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$a_n = 2M^{-1} \sum_{k=0}^{M-1} x_k \cos(n2\pi kM^{-1}) \quad (5.6)$$

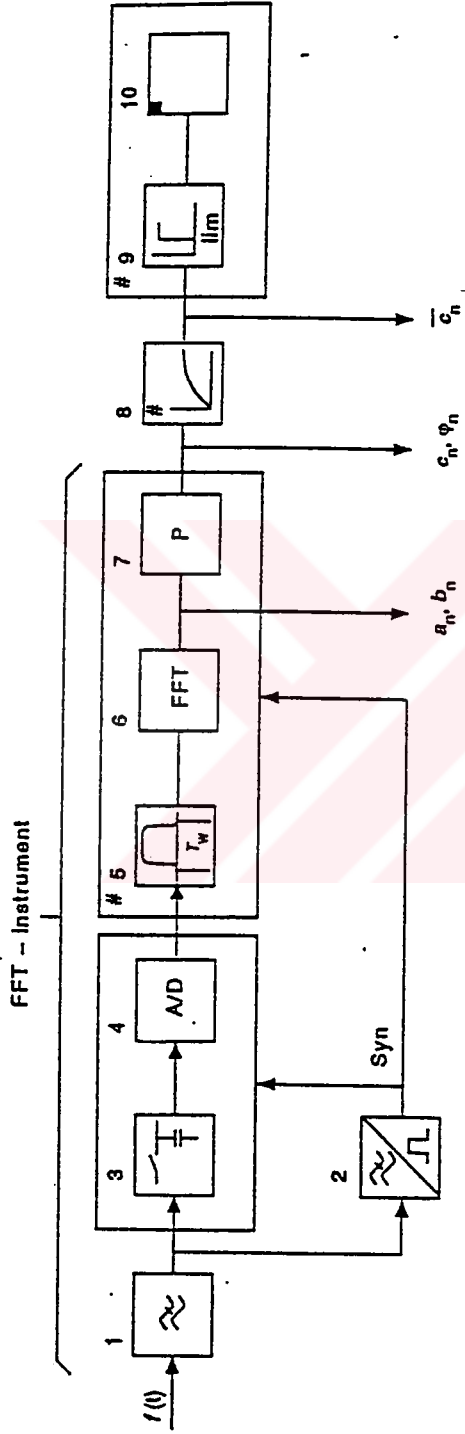
$$b_n = 2M^{-1} \sum_{k=0}^{M-1} x_k \sin(n2\pi kM^{-1}) \quad (5.7)$$

Ayrık Fourier dönüşümünde hızlı algoritmaların kullanılması sebebiyle Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) adı verilen devreler Şekil 5.4.'e göre aşağıdaki kısımlardan meydana gelir:

- anti-aliasing filtre,
- A/D çevirici (örnekleme ve saklama ünitesi),
- senkronizasyon ve gerekirse pencere-düzenleme ünitesi,
- a_n ve b_n Fourier katsayılarını sağlayan FFT işlemcisi,
- harmoniklerin faz gecikmesi φ_n ve harmoniklerin c_n değerlerini sağlayan aritmetik işlemci.

Analizinin yapılması gereken $f(t)$ sinyali, devrenin çalışma frekansından daha yüksek değerli frekansları yok etmek için alçak geçiren filtre ile süzülür. Çalışma sınırı genellikle $n = 1 \dots 50$ harmonikleri kapsar ve isteğe bağlı olarak d.c. bileşeni ($n = 0$) de içerir. Filtrelenen sinyal örneklenir, A/D çevrilir ve depolanır. FFT de $M = 2^i$ bir pencere zamanı T_w ("window width") örnekleme yapılır ($i = 7, 8, \dots$). Sistem geriliminde temel periyod T_1 'in N ile çarpımı T_w periyodunu verir:

$$T_w = NT_1 \quad (5.8)$$



Şekil 5.4. FFT-Hesaplama ve Sınıflandırma Enstrümantasyon Diyagramı

- 1 Anti-aliasing alçak geçiren filtre
- 2 Senkronizasyon
- 3 Örnekle ve sakla
- 4 Analog / dijital çevirici
- 5 "Pencere şekli" ünitesi

- 6 FFT-işlemcisi
- 7 Aritmetik işlemci
- 8 Harmonik hesaplama ünitesi
- 9 Programlanabilir sınıflandırma
- 10 Sayıcı ve saklama ünitesi

Örnekleme oranı:

$$f_s = 2^i / (NT_1) \quad (5.9)$$

FFT işlemcisinden önce, T_w peryodundaki örnekler özel bir simetrik fonksiyon (“pencere şekilli-*window shape*”) ile çarpılmak suretiyle genişletilebilir. Dikdörtgen bir pencere kullanılması tercih edilir; \sin^2 fonksiyonu da kullanılabilir.

Eğer dikdörtgen bir pencere kullanılırsa, örnekleme oranı ve buna bağlı olarak T_w pencere zamanı f_1 temel frekansa çok kesin bir şekilde senkronize edilmelidir. \sin^2 fonksiyonu bir pencere şekli kullanılıyorsa bu senkronizasyon gerekmeyebilir; fakat temel frekansa bağlı olan faz gecikmesinin kesin bir ölçümü yapılacak ise senkronizasyon gereklidir.

FFT-işlemcisi, f_k frekansının a_k ve b_k ortogonal Fourier katsayılarını sağlar.

$$f_k = kT_w^{-1} \quad k = 0, 1, 2, \dots, 2^{i-1} \quad (5.10)$$

f_1 temel frekansına bağlı n . harmonikte yeterli senkronizasyon:

$$n = k/N \quad (5.11)$$

ifadesi ile verilir.

Aritmetik işlemci, harmonik genliği $c_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2}$ ve isteğe bağlı olarak faz gecikmesi $\varphi_n = \arctan(a_n/b_n)$ 'ı hesaplar.

5.8.2. Yavaş Değişen Harmonikler

Yavaş değişen harmonikler sürekli olarak değil de belli zamanlarda ölçülürler. Böylece, pencere genişliği istenen seçicilikte sınırlanabilir. Frekans domeninde çalışan bir devre

ile karşılaştırdığımızda, bant genişliği B 3 dB'e eşittir. Bu durumda dikdörtgen pencere yaklaşık $B = 0,9/T_w$, \sin^2 fonksiyonu pencere $B = 1,4/T_w$ olur. Örneğin,

$B = 10 \text{ Hz} - 3 \text{ Hz}$ aralığı için:

$T_w = 0,1 \dots 0,3 \text{ s}$ (dikdörtgen pencere)

$T_w = 0,15 \dots 0,5 \text{ s}$ (\sin^2 fonksiyonu pencere) dir.

Dikdörtgen pencere olması durumunda örnekleme oranı:

$$f_s = 2^i f_{\text{syn}}/N \quad (5.12)$$

Temel frekans ($f_{\text{syn}} = f_1$) ile senkronize edilirse f_m frekansında ölçüm komşu $f_m + f_k$ frekansları tarafından bozulmaz; böylece f_k frekansında transfer fonksiyonunun kökleri bulunur. Fakat senkronizasyonda sapma olursa köklerin yeri değişir.

\sin^2 fonksiyonu pencere ile bu kadar kesin bir senkronizasyon gerekmebilir, çünkü komşu frekanslarla olan atenuasyon daha iyidir. Fakat \sin^2 fonksiyonu asıl sinyal $f(t)$ içine yeni spektral eklenmesine -diğer dezavantajları yayında- sebep olmaktadır. Bu yüzden, en az 50 dB atenuasyon sağlayan ek bir filtre ile bunlar durdurulmalıdır.

5.8.3. Değişen ve Hızlı Değişen Harmonikler

Değişen ve hızlı değişen harmonikler, özellikle emisyon testlerinde sürekli ölçülmelidir.

Dijital bir kayıt ve yeterli saklama kapasitesi gereklidir. Bununla birlikte, eğer gerçek zamanlı işlem kullanılıyorsa $f(t)$ sinyalinin incelenmesi boyunca gecikme olmamalıdır.

Değişen harmonikler dikdörtgen pencere kullanılarak ölçülebilir. -3 dB 3 Hz ile aynı seçicilik,

$T_w = 16.T_1$ ile sağlanır.

Sürekli hal kabul edilmesi için giriş değerlerindeki iki değişim arasındaki sürenin maksimum $2T_w$ olması gerekir.

Örneğin,

$f = 50$ Hz de $T_1 = 0,02$ s dir.

$T_w = 0,32$ s olur. Böylece $0,64$ s maksimum süredir. Bu cevap zamanı kabul edilebilir görülmektedir.

Çok hızlı değişen harmoniklerin (tetikleme açıları hızlı değişen güç konverterleri) ölçümlerini yapabilmek için temel peryoddan yaklaşık sekiz kat daha küçük bir pencere genişliği sağlanmalıdır ki seçicilik, cevap zamanı (2 basamak arasındaki maksimum süre $t_{resp} = 2T_w$) arasındaki uyum özellikle anahtarlama süresi boyunca elde edilsin. Ölçülen fonksiyonun hızlı değişmesi durumunda $T_w < 4T_1$ olması tavsiye edilmemektedir.

5.9. Dijital Filtreler

FFT de, Tablo 5.2. ye göre tanımlanan analog band geçiren filtreler yerine dijital filtreler kullanılabilir. Yüksek kalite faktörü gerektiğine dikkat edilmelidir. Analog filtrelerin özelliğine eş dijital filtreler için çeşitli yöntemler üzerinde çalışılmaktadır.

5.10. Operasyon Modu ve Çıkış Değerleri

Zaman-domenli devre aşağıdaki operasyon modlarını sağlar:

- basitlik (dışarıdan tetikleme sonucunda başlayan bir pencere; sonuçların depolanması);
- sürekli çalışma (örneğin 1/dk ile gecikmesiz gerçek-zaman çalışma arasında tekrarlama oranı seçilebilir; sonuçların depolanması için, örneğin 5000 pencere açılabilir);
- sürekli çalışma ve ayarlanan depolama (eğer bir veya daha fazla harmonik genlik önceden belirlenmiş limit değerleri aşarsa sadece bu sonuçların depolanması).

Devre en az aşağıdaki çıkışları sağlamalıdır:

- harmonik genlik c_n veya efektif değeri $c_n/\sqrt{2}$;

- isteğe bağlı olarak faz açısı φ_n ;
- a_n ve b_n katsayıları;
- nümerik display
- seçilebilir (a_n), (b_n), c_n , φ_n ;
- grafik display
- yazıcı, plotter
- bilgisayar, floppy-disk veya kaydedici vb. için paralel ve/veya seri giriş.

5.11. Hesaplama Yöntemleri

Güç sisteminde değişen harmonik akımlar veren cihazın emisyon testlerini yapmak için, ölçme işlemcisine hesaplama işlemcisi eklenir. Hesaplama işlemi temelde ölçme işleminden ayrıdır. Ölçülen c_n değerleri, referans değerleri ile veya sabit limitler ile karşılaştırılır (b.k.z. Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.).

5.12. Çıkış Sinyalinin Süzülmesi

Çıkış sinyali c_n bir filtre ile süzülür; böylece c_n değeri elde edilir.

5.12.1. Frekans-Domenli Enstrümanlarda Alçak Geçiren Filtre

Frekans-domenli enstrümanlarda, hesaplama ilk önce alçak geçiren bir filtre ile süzülme işlemiyle başlar. Böylece, ölçülen harmoniğin ani sıçramalarına karşı 1,5 s lik bir zaman sabiti, bu ilk basamak alçak geçiren filtre ile karşılanmış olur. Bu enstrümanlarda ölçüm ile hesaplama işlemi arasında kesin bir ayırım yapmak zordur.

5.12.2. Zaman-Domenli Enstrümanlarda Filtreleme

FFT-enstrümasyonunda, her zaman penceresi için elde edilen c_n değerleri ölçüm verileri olarak değerlendirilir. Başarılı pencere ölçümleri (c_n dijital formda) için yapılan bir gerçek-zaman yazılımı kullanmak, analog zaman sabiti olan 1,5 s'ye eşit bir

karakteristik sağlar. Dijital filtre, pencere genişliği tarafından sağlanan $1/T_w$ frekansından daha yüksek bir i çevrim sağlayabilir.

5.13. Gelecekteki Metodlar

Dijital zaman-domeni enstrümanları, oluşan frekansları ve sürelerini ayrıca bu olaylar arasındaki zamanda limitlerini açan değerlerin emisyon testlerini değerlendirmek için üstel dzgnleşen 1,5 s'den çok daha iyi yöntemler sağlarlar (b.k.z. Şekil 5.4.).

Hızlı değerşen harmoniklerin değerlendirilmesi için, ilerideki yöntem 5.8.3.'de tanımlanan enstrümana göre düzenlenecektir.

5.14. Besleme Sistemlerinde Gerilim Harmoniklerinin llmesi

5.14.1. lme Cihazları Tipleri

Frekans domeni enstrümantasyonu gelecekte istatiksels analizler için pek fazla kullanılmayacaktır. Ancak, önemli harmoniklerin (5. Veya 7. Harmonik) uzun süreli kaydı bu yöntemlerle yapılabilir.

En çok bilinen 1,5 s zaman sabitinin açıklaması 5.12.1.'de yapılmıştır. Günümüzde, hızlı değerşen harmonikler ölçülememektedir.

Zaman domeni enstrümantasyonu, rneğin FFT-enstrümanları için en uygun Şekilde kullanılacaktır. Bu nedenle, lme ve istatiksels çalışmanın sonuçları için, aşağıdaki tavsiyeler özellikle bu çeşit enstrümantasyona uygundur.

5.15. FFT-Enstrümantasyonu İçin Temel Şartlar ve Pencere Genişliği

Enstrümantasyonun çeşitli karakteristiklerini tekrar tanımlarsak:

- a) yavaş değerşen harmonikler
- b) değerşen (düzensiz) harmonikler
- c) hızlı değerşen harmonikler

Enstrümantasyonun a) tipinin kullanılması, sadece harmoniklerin termal (uzun-sürelî) etkilerinin bir gerilim harmonik incelenmesi olarak kabul edilmesiyle uygundur. b) tipinin kullanılması, harmoniklerin ani etkileri cihazın harmoniklere yavaş cevabıyla birlikte düşünüldüğünde uygundur ve c) tipi cihazın hızlı cevabındaki (örneğin elektronik kontroller veya dalga kontrol alıcıları vb.) ani etkilerin tahmini için kullanılmaktadır.

5.8.1.'de tanımlanan enstrümantasyonun gerekli karakteristikleri Tablo 5.3.'de özetlenmektedir.

Tablo 5.3. FFT-Enstrümantasyonu İçin Temel Şartlar

Harmonik Kategorisi	Tavsiye Edilen Pencere Genişliği	İlave Şartlar
Yavaşça Değişen	$T_w = 0,1 \text{ s} - 0,5 \text{ s}$	Pencereler arası boşluk olabilir
Değişken (Düzensiz) (IEC 555-2'ye göre)	$T_w = 0,32 \text{ s}$ (dikdörtgen) $T_w = 0,4 \text{ s} - 0,5 \text{ s}$ (\sin^2 fonk.)	Boşluk olmamalı
Hızlı Değişen	$T_w = 0,08 \text{ s} - 0,16 \text{ s}$ (dikdörtgen)	Boşluk olmamalı

5.16. İstatiksel Çalışma İçin Ölçülen Değerlerin Zaman Aralıkları

Zaman aralıkları, harmonik ölçümlerinin istatiksel çalışmasında 1 s'den daha az, bir hafta veya daha fazla olabilir. İlk önce ölçmeden başlanır (bir pencere aralığı T_w dir). Sonra, zamanların entegrasyonu kullanım ve gösrerim için esas bilgiyi birleştirmeyi kapsamaktadır; bu ise, veriler için gerekli olan hafızanın kapasitesinin ne kadar olacağı konusunda yardımcı olur.

“Gözlem zamanı” ve “efektif ölçme zamanı” arasındaki fark:

- harmoniklerdeki efektif süreye göre efektif ölçme süresi ölçülür (örneğin, kesişmeden ard arda gelen pencere zamanlarının toplamı gibi), eğer pencere zamanları arasında boşluklar varsa hesaplanamaz;

- gözlem zamanı, efektif ölçme zamanına göre gerçek zamanın sapması+bu gözlem zamanı esnasındaki boşlukların süresidir.

Veri değerlendirilmesi için, aşağıdaki zaman aralıklarının kullanılması tavsiye edilir:

çok kısa aralık	(T_{Vs}) : 3 s
kısa aralık	(T_{Sh}) : 10 dk.
uzun aralık	(T_L) : 1 sa.
bir gün aralığı	(T_D) : 24 sa.
bir hafta aralığı	(T_{Wk}) : 7 gün

5.16.1. Çok Kısa Zaman Aralığı

Bu T_{Vs} aralığı efektif ölçme zamanı olarak bilinir ve 3 s olarak seçilmesi tavsiye edilir. $T_{Vs} = 3$ s deki gözlem zamanı bu süreden daha uzun da olabilir, pencereler arasındaki boşluklara müsaade edilebilir (5.15. de a) durumu), fakat 10 s yi aşması istenmez. Zaman pencereleri gözlem zamanındaki süreye eşittir.

Harmoniklerin uzun süreli (termal) etkileri için r.m.s. değeri:

$$C_{nVs} = \left[\frac{\sum_{k=1}^M C_{n,k}^2}{M} \right]^{1/2} \quad (5.13)$$

FFT ile hesaplanan c_n değerleri için bütün M değerleri, seçilebilen özel harmonikler ($n = 50$ 'ye kadar) için T_{Vs} zaman aralığı üzerinde saptanacaktır. Ayrıca, toplam distorsiyon faktörü d ve 5.18. de tanımlanan diğer distorsiyon faktörleri hesaplanabilir. Bu değerler ileride kullanılmak üzere bilgisayarda saklanmalıdır.

5.16.2. Kısa Zaman Aralığı

Harmonik değerler ($n = 50$ 'ye kadar) her birisi için sırasıyla verilen gözlem zamanı yüzdesi p yi aşmamalıdır ($p = 1,10,50,95,99$ %). Bu değerler hesaplanmalı ve

bilgisayarda saklanmalıdırlar. Kısa zaman aralığı T_{Sh} gözlem zamanı olarak kabul edilir ve 10 dk. olarak seçilmesi önerilir. Bu gözlem zamanı süresince en az 100 c_n değeri hesaplanır. —

5.16.3. Uzun Zaman Aralığı

Uzun zaman aralığı T_L nin seçimi keyfidir. Eğer kullanılırsa gözlem zamanının 1 saat olarak seçilmesi tavsiye edilir.

5.16.4. Gün Aralığı

Bu aralık esasen besleme gerilimi harmoniklerinin incelenmesinde kullanılan istatistiksel bilgiyi göstermeyi amaçlamaktadır. Örneğin, %50, %95 ve %99 değerleri seçilen harmonik düzenlerin olasılığıdır; T_{Sh} periyodları olasılığı, bir gün esnasındaki zaman fonksiyonları olarak verilebilir.

Burada çok sayıdaki bilgiyi sıkıştırmak gerekirse, aşağıda tavsiye edilen işlemler uygulanır:

a) Eğer ani etkiler esas alınır, T_{Vs} aralığındaki (b.k.z. 5.16.1.) kayıtlı bütün değerlerin maksimum değeri gün aralığında saklanmalıdır.

Ayrıca, bütün bu T_{Vs} değerlerinin maksimum kümülatif olasılığı hesaplanmalıdır.

b) Uzun süreli (termal) etkiler göz önüne alındığında, T_{Vs} aralıklarında kaydedilen bütün r.m.s. değerlerinin maksimum değeri gün aralığında saklanmaktadır.

Üstelik, bütün bu T_{Vs} entegrasyonlu r.m.s. değerlerinin kümülatif olasılığı hesaplanmalıdır. Ayrıca bütün C_{nSh} değerlerinin ($T_{Sh} = 10$ dk.) maksimum C_{nmaxSh} değerinin tespiti faydalı olmaktadır.

Günlük olarak verilerin grafiksel bir sunumunu almak, toplam distorsiyon faktörünün veya özel seçilebilir harmoniklerin hesabının görülmesi ve incelenmesi bakımından yararlıdır.

5.16.5. Hafta veya Daha Uzun Aralık

Belirlenmiş yöntemler yoktur. Analiz günden güne toplanan bilgiyi kullanma esasına dayanmaktadır. Normal çalışma günleriyle hafta sonu günleri arasında çok büyük farklılık olduğuna dikkat edilmelidir.

Bir haftalık veya daha uzun zaman aralığında en az %95 ve %99 kümülatif değerleri kullanılmaktadır.

5.17. Ölçmenin Özel Halleri

Emisyon testleri sadece genliklerin ölçülmesini gerektirir; yani, harmonik akımlarının r.m.s. değerleridir. Bir besleme sistemindeki harmonik gerilimlerin araştırılması da yeterlidir. Harmonik güç akışı hakkındaki bilgi eksikliğinden dolayı, bozucuların orjini normalde saptanamaz. Harmonik kaynaklar ve cihazın sistem empedansını ve yüklerini içeren doğru bir eşdeğer devre oluşturmak için, hem genlikler hem de bütün harmonik düzenlerin faz gecikmelerini ölçmek gerekir. Ölçme cihazının harmonik empedansı, bozucu yüklerin öngörülen etkilerinin tahmin edilmesine yardımcı olmaz ise, sistemin harmonik seviyelerinde meydana gelecek değişiklikler önceden tahmin edilemez.

Üç fazlı elektrik cihazlarındaki simetriklik formunun sapması bir arızanın oluştuğunu göstermektedir. Simetriklik küçük arızalardan etkilenir ve artan bir şekilde bozular. Bir kapasitör bankasının bozuk bir parçası örnek olarak verilebilir. Bu yüzden, yapılacak denetimler bu arızaların bulunmasını sağlar.

Sanayideki ve küçük endüstrilerdeki frekans çeviricilerin daha fazla yaygınlaşmasından dolayı besleme sistemindeki araharmonik gerilimler ileride artabilir.

5.17.1. Faz Açısı Ölçümü

Genliğin ve faz gecikmesine göre aynı düzendeki harmonik akım ve gerilimlerin arasındaki faz açısının ölçülmesi için gerekenler:

- besleme sistemlerindeki harmoniklerin yük akışını değerlendirmek,
- harmonik kaynaklarını (bozucuları) saptamak,
- eğer elektriksel olarak aynı düğüme bağlanmışsalar, farklı bozucu yüklerden harmonik akımların toplama faktörlerini bulmak,
- sistemin eşdeğer devreleri, örneğin filtrelerin veya yeni bozucu yüklerin etkilerini önceden hesaplamak için kurulmaktadır.

Besleme sisteminden bir endüstriyel santraldaki fidere giden yüksek harmonik akımın nedeni b) hali için örnektir ve aşağıdaki iki nedenden oluşmaktadır:

- santraldaki yüksek harmonik akımlar üreten bir güç çeviricisi veya
- santraldaki ana sistemden harmonik akımları yutan bir filtre devresi veya kapasitör bataryasıdır.

Harmoniğin aktif güç akışının yönü orjindeki bozucuları bulmaya yarar: eğer aktif güç ana sisteme akıyorsa, tesis harmonik akıma neden olmaktadır, aksi halde bozucu ana sistemdir. Aktif gücün hesaplanması için, PCC (ortak bağlantı noktası-*point of common coupling*) deki harmonik gerilim ile fider akımı arasındaki faz açısı ölçülmelidir.

Faz değişimlerine neden olan üçgen-yıldız transformatörler varsa, faz açısı ölçümlerinde bu hususa dikkat etmek gerekir.

Senkronizasyon gerekmediği durumlarda, eğer doğrultucu kısmından önceki çıkış duyarlı ise ve iki ölçme kanalı da aynı ise analog filtreler kullanılabilir. Bu durum kontrol edilmelidir.

Dijital enstrümantasyon normalde bize faz açılarını sağlamaktadır. FFT enstrümanları ile faz gecikmesi, a_n ve b_n katsayılarından hesaplanabilir.

Temel frekansla ilgili mutlak faz açısının ölçümü, kesin bir senkronizasyon gerektirir (temel sistem geriliminin sıfırdan geçmesine göre). Frekans-domenli enstrümantasyon kullanılmaz.

Yukarıda bahsedilen a)...d) hallerine ek olarak mutlak faz açılarının ölçülmesinin avantajlarını sıralarsak:

- e) aynı sistemin farklı düğümlerinde veya farklı sistemlerin düğümlerindeki ölçmeler karşılaştırılabilir;
- f) farklı sistemlerin yeniden düzenlenmesi, bağlantıları ya da yerel yayılı bozucu yükler benzer faz açılarıyla süperpozisyon suretiyle harmonik seviyelerinin arttıracaktır veya zıt faz açılarından dolayı kompanzasyon ile seviyesini düşürecektir.
- g) özellikle kontrolsüz doğrultucu devrelerindeki bozucu yüklerin faz açıları, toplam bozucu etkinin bulunması için saptanmalıdır.

Mutlak harmonik faz açılarının maksimum ölçme hatası $+ 5^\circ$ veya $n.1^\circ$ yi geçmemelidir, hangisi büyükse, örneğin aktif harmonik gücün yönü hakkında doğru karar vermek için; genliğin A doğruluk sınıfına uygun olan bu değer normalde IEC 555-2'ye göre ölçümler için gereklidir, çünkü açılar ve genlikler aynı Fourier katsayılarından elde edilmektedir.

5.18. Distorsiyon Ölçümleri

Aşağıdaki distorsiyon faktörleri ve ağırlıklı fonksiyonları bu ölçümler için gereklidir.

5.18.1. Distorsiyon Faktörleri

Bir dağıtım sisteminde, gerilimin toplam kalitesini karakterize eden üç distorsiyon faktörü tanımlanır. Sistemdeki cihazların işletme termal gerilimini bulmak için, bu faktörler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

1) Normal distorsiyon faktörü

$$d = \left[\left(\sum_{n=2}^{40} U_n^2 \right) / U_1 \right]^{1/2} \quad (5.14)$$

Bu d faktörü, havai hatlarda, kablolarda ve transformatör sargılarındaki ek kayıplara ve ısınmaya bağlıdır. Gerilim ve akımın ikisine birden bağlı olabilir. Akımlar ve gerilimler için aynı denklemler verilmektedir:

$$d = \left[\left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right) / I_1 \right]^{1/2} \quad (5.15)$$

Uygulamada, 2. den 25.'ye kadar olan harmonikleri almak yeterlidir.

2) Endüktanslara göre ağırlıklı distorsiyon faktörü

$$D_{ind} = \left[\sum_{n=2}^{40} (U_n^2 / n^\alpha) / U_1 \right]^{1/2} \quad (5.16)$$

Burada, $\alpha = 1 \dots 2$

D_{ind} faktörü sadece gerilimler için kullanılır ve endüksiyon motorları, senkron generatörler gibi ek termal zorlanmaları için yaklaşık olarak hesaplanan değerdir. Uygulamada, 2. den 20.'ye kadar olan harmonikleri almak yeterlidir.

3) Kapasitörlere göre ağırlıklı distorsiyon faktörü

$$D_{cap} = \left[\sum_{n=2}^{40} (n \times U_n)^2 / U_1 \right]^{1/2} \quad (5.17)$$

D_{cap} faktörü sadece gerilimler için kullanılır ve seri endüktanssız sisteme direkt olarak bağlanan kapasitörlerin ek termal gerilmelerinin yaklaşık olarak ölçülen değeridir.

5.19. Simetrik Bileşenlerin Ölçümü

Üç fazlı gerilim ya da akım dengesiz bir sistemde, f_n frekansı (orjinal sistem) simetrik sistemde üç aynı frekansın toplamı olarak yazılabilir.

- pozitif-sequence sistem $U_{n,pos}$ ($I_{n,pos}$), faz sırası L_1, L_2, L_3 ;
- negatif-sequence sistem $U_{n,neg}$ ($I_{n,neg}$), faz sırası L_1, L_3, L_2 ;
- sıfır-sequence sistem $U_{n,0}$ ($I_{n,0}$).

Eğer orjinal sistemin gerilimleri veya akımları ayna dalga şekline sahipse, ya da ana periyodun $+ 1/3$ kayması şeklindeyse, tüm harmonik sistemlerde sadece “karakteristik” sistemler mevcuttur. $n = 3 \times m$ ($m = 1,2,3,\dots$) şeklindeki harmonikler sadece sıfır-sequence bir sistemin formundadır, $n = 3 \times m-2$ şeklindeki harmonikler sadece pozitif-sequence bir sistem, $n = 3 \times m-1$ şeklindeki harmonikler sadece negatif-sequence bir sistemdir.

Harmoniklerle simetrik bileşenlerin kullanılma nedenlerini sıralarsak:

1. Sıfır-sequence akımlar ve gerilimler bilinen transformatörlerle (üçgen-yıldız veya yıldız-zikzag) taşınamazlar.
2. Üçgen bağlı yükler (motorlar, kapasitör bankaları vb.) sıfır-sequence gerilimlerden etkilenmezler; örneğin, sadece 3. harmonik gerilimin non-karakteristik elemanları bu motorlardaki ek kayıplara neden olurlar.
3. Üç fazlı bir uygulamada simetrikliği bozan küçük arızalar (örneğin, yanmış bir sigorta veya kompanzasyon sistemindeki bir kondansatör), non-karakteristik akımlarına göre ölçmeyle kolayca bulunabilir.
4. Simetrik parçalar çok iyi bilinen modal matris analizinin kullanılmasıyla ölçülen üç faz değerinden hesaplanabilir, ya da doğrudan özel enstrümanlarla ölçülebilir.

Sistemde doğrusal olmayan bir yüklerin modellenmesi için durum değişkenleri analizi kullanılmalıdır. Gerilimin sinüs biçimli olmaması durumunda doğrusal olmayan yükün davranışı durum değişkenleri yöntemiyle bulunmaktadır². (Brown,1990)

5.20. Araharmoniklerin Ölçülmesi

Araharmonikler yavaş değişebilirler, fakat genellikle genlik ya da frekans bakımından değişirler.

- a) Çok az sabit frekans içeren yavaş değişen araharmonikler özel enstrümantasyon ile ölçülebilir. Eğer senkronize edilmiş veya herhangi bir frekansa ayarlanmışlarsa, zaman-domeni ya da frekans-domeni enstrümanlar kullanılabilir.

Araharmoniklerin en önemli etkilerinden birisi ses kontrol alıcılarının karışmasıdır. Yaklaşık 5 Hz -3 dB bir bant genişliği, genel ses kontrol alıcılarına göre $T_w = 0,16$ s bir pencere genişliği tavsiye edilir.

Sonuç olarak, f_m deki her bir frekans merkezinin çevresini kapsayan araharmonik ölçülebilir ve eğer ses kontrol frekansına uygunsa, bir araharmoniğin bozucu düzeyi doğrudan bulunabilir.

- b) Frekans-domeni enstrümanları normalde, değişken ya da hızlı değişen araharmonik frekanslarının ölçülmesine uygun değildirler; hızlı değişen frekansların ölçme cihazlarına senkronizasyonu zordur.

Zaman-domeni enstrümanları kullanılabilir. Benzer şekilde araharmonik frekansla senkronizasyonu gerekli değildir, fakat bütün frekanslarda $f_m = m/T_w$ ölçüm sonucunu sağlarlar (T_w zaman penceresinin genişliğidir ve $m = 0,1,2,\dots$). Sonuçta, her f_m merkez frekansının çevresini kapsayan araharmonik akım doğrudan bulunabilir. Yukarıda bahsedilen 0,16 s pencere genişliği bütün 6,25 Hz frekans hatlarını sağlamaktadır. Bu

² Ayrıntılı bilgi, "Brown, P.J., Computerized Simulation and Measurement of Power System Harmonics, Ph.D. Thesis, 1990, İTÜ" kaynağında bulunmaktadır.

istenilen bant genişliğiyle hızlı değişen genliklerin veya frekansların takip edilmesi arasındaki bir ses sıkıştırmasıdır.

Ayrıca, sadece birkaç araharmonik hatlar önbaskınsa (6,25 Hz deki bir frekans penceresinin maksimumundaki bir araharmonik frekans), kompleks düzlemde :

$\Delta f = f_{int} - f_m$ farkıyla vektör dönüşümü olarak yorumlanabilir, f_{int} gerçek harmonik frekanstır ve f_m ölçülen merkez frekansdır.

Eğer araharmoniklerin bir istatistiksel değerlendirmesi gerekirse, 5.16. ya uyulması gerekir. Sabit harmonik frekansların yerine, araharmonik durumundaki frekans aralıkları dikkate alınır. Bu aralıkların genişliği ve merkezi çalışılan olaya göre seçilecektir (örneğin ses kontrol alıcıları veya fliker etkisi gibi).

5.21. Çevre Etkisi ve Bağışıklık Testleri

Üreticiler, cihazların çalışma şartlarını ve olabilecek genlik hatalarını aşağıdaki koşullara göre belirlerler:

- sıcaklık
- nem
- enstrüman besleme gerilimi
- enstrümanın toprak bağlantısı ve besleme gerilimi arasında parazit gerilim modu
- statik elektrik boşalması
- elektromanyetik alanların ışıması.

6. SAYISAL UYGULAMA

ESKO A.Ş. Trafo 3 Cer-Tark-Hallaç Bölümü 1250 kVA Dağıtım Transformatöründe yapılan ölçümlerde aşağıda verilen değerlere rastlanmıştır.

Trafo Etiket Değerleri:

Gerilim : 34.5/0.4 kV

Güç : 1250 kVA

ük % : 6.13

Bağlantı Grubu : DYN-11

Frekans : 50Hz

Ek olarak; $P_0 = 2230$ W, $P_k = 12500$ W, Verim: %98.85

19/09/97

18:51:20

Voltages (V):

$\Sigma L-V$	L1-V	L2-V	L3-V
391,8	225,6	226,4	226,7
	12-V	23-V	31-V
	391,4	392,4	391,7

Apperent Powers (VA):

$\Sigma L-VA$	L1-VA	L2-VA	L3-VA	
399,1k	111,1k	144,7k	143,4k	
	$\Sigma L-\Delta VA$	L1- ΔVA	L2- ΔVA	L3- ΔVA
	41,32k	25,22k	19,67k	18,31k

Currents (A):

$\Sigma L-A$	L1-A	L2-A	L3-A
588,1	492,9	639,0	632,5

$\Sigma L-VA$ L1-VA L2-VA L3-VA

1,056M 353,8k 364,7k 364,5k

Active Powers (W):

$\Sigma L-W$	L1-W	L2-W	L3-W	
392,9k	109,0k	142,8k	141,0k	
	$\Sigma L-\Delta W$	L1- ΔW	L2- ΔW	L3- ΔW
	30,79k	5,611k	19,09k	6,087k
	$\Sigma L-W$	L1-W	L2-W	L3-W
	901,3k	288,0k	309,9k	311,9k

Reactive Powers (Var):

$\Sigma L-VAr$	L1-VAr	L2-VAr	L3-VAr	
-72,28k	-22,01k	-24,02k	-26,24k	
	$\Sigma L-\Delta VAr$	L1- ΔVAr	L2- ΔVAr	L3- ΔVAr
	4,795k	-10,88k	4,769k	10,91k
	$\Sigma L-VAr$	L1-VAr	L2-VAr	L3-VAr
	690,2k	228,9k	-251,0k	290,3k

Power Factors

$\Sigma L-\text{Cos}\Phi$	L1- Cos Φ	L2- Cos Φ	L3- Cos Φ
0,984C	0,980C	0,986C	0,983C

$\Sigma L-\Delta\text{Cos}\Phi$	L1- $\Delta\text{Cos}\Phi$	L2- $\Delta\text{Cos}\Phi$	L3- $\Delta\text{Cos}\Phi$
0,983	0,450	0,967	0,482

Distortion Factors

L1-%	L2-%	L3-%
0,00	0,00	0,00

Total Energies (kWh kVArh):

$\Sigma L-\text{Wh}$	321,124	$\Sigma L-\text{VArh}$	151,19
L1-Wh	118,396	L1-VArh	52,15
L2-Wh	112,096	L2-VArh	58,84
L3-Wh	103,783	L3-VArh	56,41

19/09/97 18:52:09 Harmonics

L1-I = 492,6A Thd = 17,7%

N	Hz	A	%	Φ
1	50	485,2	100	0
3	150	0	0	0
5	250	22,16	4,5	-61
7	350	83,74	17,2	35
9	450	0	0	0
11	550	0	0	0
13	650	0	0	0

19/09/97 18:52:23 Harmonics

L2-I = 639,3A Thd = 14,8%

N	Hz	A	%	Φ
1	50	631,8	100	0
3	150	0	0	0
5	250	29,73	4,7	-43
7	350	89,20	14,1	59
9	450	0	0	0
11	550	0	0	0
13	650	0	0	0

19/09/97 18:52:32 Harmonics

L3-I = 648,4A Thd = 17,0%

N	Hz	A	%	Φ
1	50	638,5	100	0
3	150	0	0	0
5	250	24,75	3,8	-26
7	350	106,4	16,6	77
9	450	0	0	0
11	550	0	0	0
13	650	0	0	0

19/09/97 18:53:08 Harmonics

L1-V = 225,2V Thd = 2.6%

N	Hz	V	%	Φ
1	50	225,2	100	0
3	150	0	0	0
5	250	2,205	0,9	-144
7	350	5,67	2.5	-30
9	450	0	0	0
11	550	0	0	0
13	650	0	0	0

19/09/97 18:53:21 Harmonics

IN = 54,38A Thd = 35,0%

N	Hz	A	%	Φ
1	50	49,44	100	0
3	150	17,30	35,0	30
5	250	0	0	0
7	350	0	0	0
9	450	0	0	0
11	550	0	0	0
13	650	0	0	0

Kompanzasyon Devre Dışı**Voltages (V):**

$\Sigma L-V$	L1-V	L2-V	L3-V
382,7	219,9	221	222

Apperent Powers (VA):

$\Sigma L-VA$	L1-VA	L2-VA	L3-VA
573,6k	162,3k	204,7k	206,9k

$\Sigma L-\Delta VA$	L1- ΔVA	L2- ΔVA	L3- ΔVA
41,32k	25,22k	19,67k	18,31k

$\Sigma L-^{\prime}VA$	L1- $^{\prime}VA$	L2- $^{\prime}VA$	L3- $^{\prime}VA$
1,056M	353,8k	364,7k	364,5k

Reactive Powers (Var):

$\Sigma L-VAr$	L1-VAr	L2-VAr	L3-VAr
396,4k	111,1k	139,8k	145,4k

$\Sigma L-\Delta VAr$	L1- ΔVAr	L2- ΔVAr	L3- ΔVAr
4,795k	-10,88k	4,769k	10,91k

$\Sigma L-^{\prime}VAr$	L1- $^{\prime}VAr$	L2- $^{\prime}VAr$	L3- $^{\prime}VAr$
690,2k	228,9k	-251,0k	290,3k

Power Factors

$\Sigma L-Cos\Phi$	L1- Cos Φ	L2- Cos Φ	L3- Cos Φ
0,723L	0,728L	0,730L	0,711L

$\Sigma L-\Delta Cos\Phi$	L1- $\Delta Cos\Phi$	L2- $\Delta Cos\Phi$	L3- $\Delta Cos\Phi$
0,983	0,450	0,967	0,482

Distortion Factors

L1-%	L2-%	L3-%
0,00	0,00	0,00

Total Energies (kWh kVArh):

Σ L-Wh	324,756	Σ L-VArh	151,74
L1-Wh	119,409	L1-VArh	52,30
L2-Wh	113,415	L2-VArh	59,03
L3-Wh	105,084	L3-VArh	56,62

19/09/97 18:56:06 Harmonics

L1-V = 219,2V Thd = 0.7%

N	Hz	V	%	Φ
1	50	219,2	100	0
3	150	0	0	0
5	250	0	0	0
7	350	1,575	0.7	22
9	450	0	0	0
11	550	0	0	0
13	650	0	0	0

19/09/97 18:56:31 Harmonics

L1-I = 743,8A Thd = 0,0%

N	Hz	A	%	Φ
1	50	743,8	100	0
3	150	0	0	0
5	250	0	0	0
7	350	0	0	0
9	450	0	0	0
11	550	0	0	0
13	650	0	0	0

19/09/97 18:53:21 Harmonics

IN = 37,08A Thd = 50,0%

N	Hz	A	%	Φ
1	50	34,6	100	0
3	150	17,30	50,0	40
5	250	0	0	0
7	350	0	0	0
9	450	0	0	0
11	550	0	0	0
13	650	0	0	0

Transformatörden alınan ölçümler neticesinde:

Sistem Görünür Gücü (kVA)	:399,1 kVA
Güç Faktörü	:0,984
Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)	:Akım Bazlı %17,7-%35
Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)	:Gerilim Bazlı %2.6
Standartlar Dahilinde Olması Gereken THD	:Akım Bazlı Max %6
Standartlar Dahilinde Olması Gereken THD	:Gerilim Bazlı Max %3

Alınan ölçüm sonuçlarından da görüldüğü gibi standartlar dahilinde olması gereken değer in akım olarak bozulma 6 (altı) katına, gerilim olarak bozulma ise bir katına ulaşmıştır. Sistemde toplam harmonik distorsiyonu oluşturan yüksek frekanslı akım ve gerilim değerleri zaman içerisinde değişiklik göstermekle birlikte, anlık yük dağılımına göre 7. harmonik, bazı durumlarda ise 3. harmonik baskın duruma geçmektedir. Belli bir anda 3. harmonik baskın durumda iken, 20 saniye sonra 7. harmonik baskın duruma geçmiştir. Toplam harmonik distorsiyon %17 ile %35 arasında değişmektedir. Sistemde bulunan kondansatörlerin de bu oluşuma etkisi kaydedilmiştir. Sistemde oluşturacağı diğer etkilerin yanında en önemli problem rezonansa girme ihtimalinin yüksek olmasıdır. Bu noktaya hem kompanzasyon görevini, hem de harmonik spektrumundaki dağılımı kontrol altına alacak düşük frekanslı bir filtre şarttır.

Sistemde başı boş olarak, sistemin empedansı doğrultusunda dolanan harmoniklerin, kontrol altına alınması yaşanması muhtemel rezonans olayı kayıplarının azaltılması ve sistemin sağlığı açısından gereklidir. Bu sayede gereksiz duruşlar önleneceği, kesicilerin rezonans etkisiyle açmasının önüne geçilmesi ve motorlarda, kablolarda meydana gelen ısınmanın veya sesin önüne geçilmesi öngörülmektedir. Sayaçta oluşan hatalar da yok olacak, sistem hem sağlığına kavuşacak, hem de zamanla kendini ödeyen bir duruma gelecektir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik güç sisteminde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin 50 Hz frekansında salınan ve sinüs eğrisi şeklinde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak, doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonikler nedeniyle akım ve gerilim gibi büyüklükler sinüs biçiminde olmaktan çıkarlar ve dalga biçimleri oldukça karmaşık hale gelir. Bu ise, şebekede bazı problemleri beraberinde getirir.

Bu çalışmada, elektrik güç sistemi ve sistemden beslenen tüm yükler için önemli olan harmonikler konusu incelenmiştir. Harmoniklerin, giderilmesi, süzülmesi konuları üzerinde ayrıntıya inilmemiş, daha çok harmonik standartları, harmonik ölçüm ve test teknikleri üzerinde önemle durulmuştur.

Birinci bölümde genel bir tanıtım ve literatür taraması yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde harmoniklerin matematiksel olarak analizine değinilmiş, harmonik üreten kaynaklar açıklanmıştır.

Transformatörlerin harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin doğrusal olmayışına dayanmaktadır. Anma gerilimlerinin üzerinde bir gerilimle beslendiklerinde çekirdek doyması sonucu, mıknatıslanma akımı harmonik bileşenler içerir. Besleme gerilimi mıknatıslama akımına tekrar etki ederek harmonik seviyelerini daha da büyütür. Harmonik bileşenler yüksek bir empedans gördüklerinde besleme gerilimi de harmonik bileşenler içerir.

Transformatörlerde üçlü harmonikler önemli bir özelliğe sahiptirler. Güç sistemlerinde önemli sorunlara yol açan üçlü harmonikleri önlemek için transformatörlerde üçgen bağlama yapılmalıdır.

Ark fırını ve statik VAR kompanzatörleri içeren tesislerde, bunların bağlı oldukları baraya uygun bir filtre yerleştirilmesiyle etkin harmonikler giderilebilir.

Üçüncü bölümde güç sistemlerinde harmoniklerin şebeke elemanlarına olumsuz etkileri açıklanmıştır.

Harmonikler sistem elemanlarının çalışmalarını olumsuz yönde etkileyerek ek kayıpların oluşmasına yol açmakta, bu yüzden işletim açısından ek bir maliyet getirmektedir.

Doğrusal olmayan yüklerin etkisi, özellikle sistem empedansına olmak üzere sistem karakteristiklerine bağlıdır. Harmonik akımları, harmonik kaynağından en düşük empedansa doğru akma eğilimindedir. Gerilim harmonikler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenir. Harmonik içeren bir akım ise sadece harmonikli akım üreten bir yüke etki edebilir. Bu sebeble, harmonik akımlarının akışını kontrol ederek gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmak gerekir.

Harmonikler rezonans oluşma olasılığını arttırmaktadır. Harmonik rezonansları sonucu oluşan aşırı yüksek harmonik akım ve gerilimleri önemli sorunlara neden olabilmektedir. Kondansatör büyüklükleri ve yerleri değiştirilerek sistemdeki rezonans koşulları ortadan kaldırılabılır. Kompanzasyon tesisi kurulurken aşırı kompanzasyondan kaçınılmalı sistemde hiçbir zaman gereğinden fazla kondansatör bulunmamasına dikkat edilmelidir. Rezonansları önlemek için paralel filtre düzenleri kullanılabilir.

Dördüncü bölümde harmonik standartları ve çeşitli ülkelerin bu konuda yürürlükte bulunan yönetmelikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bu konuda dikkate alınan en önemli ölçüt, çalışmada tanımı da yapılan “Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)” dur.

Harmonik standartlarının oluşturulması konusunda birçok ülkenin yıllardır çalışma yapması, konunun önemli olmasına işaretle dikkat çekicidir. Özellikle günümüzde, bu standartların güncelleştirilmesi bakımından mevcut yönetmelikler tekrar gözden geçirilerek revizyona alınmaktadır. IEC (Uluslararası Elektroteknik Birliği) standartları kataloğunda harmoniklerle ilgili birçok standartın inceleme altında olduğu yayınlanan bazı standartların birkaç yıl içinde uyulması zorunlu hale geleceği işaret edilmektedir.

Bu sebeble, özellikle şebeke elemanları üreten üreticilerin ve bunları kullanıp işleyen özel sektör ve kamu sektörünün konuya önemle eğilmesi artık kaçınılmaz bir zorunluluktur. Ülkemizde, harmonik standartları konusundaki veri eksikliğinin giderilmesi çalışmalarına hız verilmelidir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, güç sistemi ve ona bağlı elemanlar için harmonik ölçüm ve test teknikleri ve bunun için gerekli olan enstrümantasyon ayrıntılarıyla incelenmiştir.

Ölçülmüş olan sinyaller:

- a) yavaşça değişen harmonikler,
 - b) değişken (düzensiz) harmonikler,
 - c) hızlı değişen harmonikler,
 - d) araharmonikler,
- olarak karakterize edilmiştir.

A ve B doğruluk sınıfları ve gerekli şartlar tanımlanmıştır.

Bağlı harmonik değerlerin ölçümünde, frekansın akım veya gerilim transformatörünün transfer oranına bağlı olması önemlidir. Harmonik ölçümünde transfer oranı sapması %5'i; faz açısı ölçümünde 5° yi aşmamalıdır.

Frekans-domenli ve zaman-domenli enstrümantasyon incelenmiştir. Değişen ve hızlı değişen harmoniklerin ölçümünde frekans-domenli devreler kullanılmamalı, zaman-domenli enstrümanlar kullanılmalıdır.

Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) tekniğinde temel frekansa bağlı olan faz gecikmesinin ölçümü yapılıyorsa pencere zamanı temel frekansa çok kesin bir şekilde senkronize edilmelidir.

Frekans-domeni enstrümantasyonu gelecekte istatistiksel analizler için pek fazla kullanılmayacaktır. Besleme sistemlerinde harmoniklerin ölçülmesi ve tespiti yanında istatistik bir analiz de sistemin karakteristiğini tanımak ve buna göre önlemler alınması bakımından önemlidir.

Zaman-domenli enstrümantasyon sayesinde 1 s den bir hafta ve daha uzun aralıklarda harmonik ölçümü, saklanması, verilen referans değerlerle karşılaştırılması yapılabilmektedir.

Günümüzde, tartışılan konulardan biri de harmonik üretiminin ve tüketiminin tespiti ve fiyatlandırılıp bazı tarifelere oturtulmasıdır. Her evsel ve endüstriyel elektrik tüketicisi harcadığı enerjinin ücretini ödemektedir. Harmoniklerin ölçüm ve analiz teknikleri bu bakımdan da önem taşımaktadır. Bu sayede, sistemden harmonik çekilmesine veya sisteme harmonik verilmesine sebep olan tesislerin tespiti, tedbir alması için (günümüzde reaktif güç kompanzasyonu zorunludur) aynı zamanda bir yaptırım sağlanması amaçlanmaktadır.



KAYNAKLAR

1. Arillaga, J., Bradley ,D.A., Bodger, P.S., 1985. "Power System Harmonics", John Willey and Sons.
2. Attar, F., 1994. "Non-Linear Yüklere İçeren Elektrik Enerji Sistemlerinin İşlemesinde Harmoniklerin Etkinlikleri ve Kayıp Analizi", Yayınlanmamış Doktora Tezi, YTÜ.
3. Bayram, M., Temmuz-Ağustos 1985. "Elektrik Tesislerinde Rezonans Olayları", Elektroteknik Mecmuası, İTÜ.
4. Boduroğlu, T., 1988. "Elektrik Makinaları Dersleri, Cilt I: Transformatörler", Beta Yayınevi 6. Baskı.
5. Brown, P.J., 1990. "Computerized Simulation and Measurement of Power System Harmonics", Ph.D. Thesis, İTÜ.
6. Cummings, P.G., Nov/Dec 1986. "Estimating Effect of System Harmonics on Losses", IEEE Trans. on Industry Applications, vol IA-22 no:6, pp. 1121-1125.
7. Duffey, C.K., Nov/Dec 1989. "Update of Harmonic Standart IEEE-519: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Trans. on Industry Applications, vol IA-25 no:6, pp. 1025-1034.
8. Dugan, R.C., 1987. "Electric Power System Design Guide", McGraw-Edison Power System Division of Cooper Industries, pp. 2-51.
9. Freund, A., March 1988. "Nonlinear Loads Mean Trouble", EC&M, pp. 83-90.
10. Gonzales, D.A., May/June 1987. "Design of Filters to Reduce Harmonic Distorsion in Power System Harmonics", IEEE Trans. on Industry Applications, vol IA-23 no:3, pp. 504-511.
11. IEC 1000-4-7., July 1991. "Part 4:Testing and Measurement Techniques-Section 7: General Guide on Harmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto", pp. 17-57.
12. IEEE Committee Report, Sept. 1985. "The Effect of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-104, no:9, pp. 2555-2563.
13. IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, 1992. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems".

14. IEEE Working Group on Power System Harmonics, 1993. "Power System Harmonics: An Overview", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-102,pp. 2455-2460.
15. Joseph, S., et al, Subjack, J.R., McQuilkin, J.S., 1990. "Harmonics-Causes, Effects, Measurements and Analysis: An Update", IEEE Trans. on Industry Applications, vol IA-26 no:6, pp. 1034-1041.
16. Meliopoulos, A.P.S., 1986. "Effects of Harmonics on Power Transformers", Second International Conference on Harmonics in Power Systems, pp. 201-213.
17. Montanari, G.C., 1987. "Voltage Distorsion Compensation in Electrical Plants Supplying Static Power Converters", IEEE Trans. on Industry Applications, vol IA-23 no:1, pp. 181-187.
18. Rice, D.E., Jan/Feb 1986. "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their Effects on Power Systems Components", IEEE Trans. on Industry Applications, vol IA-22 no:1, pp. 161-177
19. Shipp,D.D., Sept/Oct 1979. "Harmonic Analysis and Suppression for Elektrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads", IEEE Trans. on Industry Applications, vol IA-15 no:5, pp. 453-458.
20. Wirth, R.K., 1984. "Analysis of Harmonics and Their Effects on Power Systems", Brown Boveri review.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : **Süleyman Süha TOK**

Doğum Tarihi : **27.10.1974**

Doğum Yeri : **Sarayköy-Denizli**

EĞİTİM

Denizli Lisesi 1988-1991

Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Müh. Bölümü 1991-1995

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 1995-

MESLEK

ELTEM A.Ş. -Kalite Güvencesi Yöneticisi- 1996-1997

TANTEKİN Elektrik Makina -Şantiye Şefi- 1997-