

47004



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ
VE
HARMONİKLERİN SÜZÜLMESİ



Elek.Müh. Bekir HASARLI

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Selahattin DİNLER

İSTANBUL, 1995

İÇİNDEKİLER

ÖZET

ABSTRACT

BÖLÜM 1: GİRİŞ

| | |
|---|---|
| 1.1. Genel Giriş ve Tanıtım | 1 |
| 1.2. Harmonikler | 2 |
| 1.3. Harmoniklerin Matematiksel Analizi | 3 |

BÖLÜM 2: HARMONİK KAYNAKLARI

| | |
|--|----|
| 2.1. Giriş | 7 |
| 2.2. Transformatörler | 7 |
| 2.2.1. Bir Fazlı Transformatörler | 8 |
| 2.2.2. Üç Fazlı Transformatörler | 9 |
| 2.2.2.1. Yıldız-Yıldız Bağlanma | 9 |
| 2.2.2.2. Üçgen-Yıldız Bağlanma | 10 |
| 2.3. Statik Dönüştürücüler | 10 |
| 2.3.1. Büyük Güç Dönüştürücüler | 11 |
| 2.3.1.1 Altı Darbeli Dönüştürücü | 11 |
| 2.3.1.2. Oniki Darbeli Dönüştürücü | 14 |
| 2.3.1.3. Transformatör ve Sistem Empedansının Etkisi | 16 |
| 2.3.1.4. Doğru Gerilim Harmonikleri | 17 |
| 2.3.2. Orta Büyüklükteki Dönüştürücüler | 19 |
| 2.3.2.1. Dönüştürücülerden Beslenen d.a. Sürücüler | 19 |
| 2.3.2.2. Yarı-Kontrollü Doğrultma | 21 |
| 2.3.2.3. Evirici Beslemeli a.a. Sürücüler | 22 |
| 2.3.2.4. Darbe Genişlik Modülasyonlu Eviriciler | 24 |
| 2.3.3. Düşük Güç Dönüştürücüler | 27 |
| 2.2.4. Dönüştürücülerin Sıradışı Harmonik davranışı | 28 |
| 2.4. Ark Kaynakları | 28 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 2.5. Statik VAR Kompanzatörler | 30 |
| 2.6. Döner Makinalar | 31 |

BÖLÜM 3: HARMONİKLERİN ETKİLERİ

| | |
|--|----|
| 3.1. Giriş | 33 |
| 3.2. Harmonik Akımlarının Normal Akışı | 33 |
| 3.3. Gerilim ve Akım Harmonikleri Arasındaki İlişki | 33 |
| 3.4. Toplam Harmonik Distorsiyon(Bozulma) | 35 |
| 3.5. Harmonik Rezonansları | 35 |
| 3.5.1. Paralel Rezonans | 37 |
| 3.5.2. Seri Rezonans | 38 |
| 3.6. Transformatörler Üzerindeki Etkiler | 40 |
| 3.7. Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler | 40 |
| 3.8. Kablolar ve İletim Hatları Üzerindeki Etkiler | 42 |
| 3.9. Kondansatörler Üzerindeki Etkiler | 43 |
| 3.10. Güç Elektronikleri Elamanları Üzerindeki Etkiler | 45 |
| 3.11. Anahtarlama Elamanları ve Koruma Röleleri Üzerindeki Etkiler | 45 |
| 3.12. Ölçme Cihazları Üzerindeki Etkiler | 46 |
| 3.13. İletişim Hattaları Üzerindeki Etkiler | 47 |
| 3.14. Harmonik Bozulmanın Güç Faktörüne Etkisi | 48 |
| 3.15. Küçük Güçlü Tüketiciler Üzerindeki Etkileri | 49 |
| 3.16. Harmonikler ve Simetrik Bileşenler | 49 |
| 3.17. Harmonik Standartları | 50 |

BÖLÜM 4: SİSTEM MODELLEMESİ SİMÜLASYONU

| | |
|--|----|
| 4.1. Giriş | 53 |
| 4.2. Sistem Elemanlarının Modellenmesi | 53 |
| 4.3. Y_{BARA} Matrisi Oluşturma | 55 |
| 4.4. Harmoniklerin Ölçülmesi | 59 |
| 4.4.1. Harmonik Analizi İçin Kullanılan Temel Cihazlar | 59 |

BÖLÜM 5: HARMONİKLERİN SÜZÜLMESİ

| | |
|---|----|
| 5.1. Giriş | 61 |
| 5.2. Harmonik Filtreleriyle İlgili Genel Tanımlar | 61 |
| 5.3. Filtre Tasarım Kriteri | 64 |
| 5.4. Ayarlı Filtreler | 65 |
| 5.4.1. Tek Ayarlı Filtreler | 65 |
| 5.4.2. Çift Ayarlı Filtreler | 69 |
| 5.4.3. Otomatik Ayarlı Filtreler | 71 |
| 5.5. Sönümlü Filtreler | 72 |
| 5.5.1. Sönümlü Filtre Tipleri | 72 |
| 5.5.2. Sönümlü Filtre Tasarımı | 73 |
| 5.6. Yüklerin Ayrı Ayrı Filtrelenmesi | 75 |
| 5.7. Dağınık Harmonik Kaynakların Filtrelenmesi | 77 |
| 5.8. Filtre Elemanlarının Özellikleri | 79 |
| 5.8.1. Kondansatör | 79 |
| 5.8.2. Endüktans | 80 |
| 5.9. Filtre Maliyeti | 80 |
| 5.10. D.a. Taraf Filtreleri | 81 |

BÖLÜM 6: SAYISAL UYGULAMA

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KAYNAKLAR

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Bu çalışmada, güç sistemlerinde harmonik üreten kaynaklar, harmoniklerin olumsuz etkileri genel olarak incelenmiş ve harmoniklerin süzülmesine ilişkin genel kurallar ve filtre tasarımı ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Güç sistemlerinde dalga şekli bozulmasının en önemli nedeni, akım ve gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Giriş gücünü sinüs biçimli bir elektrik sisteminden alan bu yüklerin akımları harmonikler içerir. Harmonik akımları, devrelerini diğer elemanlar üzerinden tamamlayarak harmonik gerilimleri oluştururlar. Harmonikler elemanların ısınmasına, yalıtımlarının zorlanmasına, bazı durumlarda zarar görmelerine ve devre dışı kalmalarına neden olur. Özellikle, güç faktörü düzeltilmesinde kullanılan kondansatörler ile sistem empedansı arasında oluşan harmonik rezonansları sonucunda önemli problemler ortaya çıkabilir.

Günümüzde, güç sistemlerinde birçok durumda önemli harmonik kaynağı olmalarının yanısıra, harmonik bozulmaya karşı çok duyarlı olan güç elektroniği elemanlarının yaygın olarak kullanılması, harmonik bozulmanın kabuledilebilir sınırlar altında tutulmasını gerektirmektedir. Bu durumda amaç, harmonik rezonanslarını önlemek ve harmonik akım ve gerilim genliklerini mümkün olduğu kadar azaltmaktır. Bu amaçla, güç sistemlerinde harmonik bozulmayı en aza indirmek için uygun yerlerde harmonik filtrelerine gereksinim duyulur. Teknik ve ekonomik durumlar da dikkate alınarak, genelde harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sunan paralel filtreler tercih edilir. Filtre tasarımındaki pratik kriter, harmonik akım ve gerilimleri cinsinden ifade edilen sorunu, diğer tüketiciler ile ortak bağlantı noktasında kabul edilebilir bir seviyeye azaltmaktır. Belirli harmonik frekanslarına ayarlanan filtreleri, tespit edilen uygun yerlere yerleştirmek ve sistemle etkileşimlerini kontrol etmek suretiyle, etkin harmoniklerin süzülmesi gerçekleştirilmiş olur.

Bu çalışmanın sayısal uygulama bölümünde, doğrusal olmayan bir yük içeren örnek bir enerji sistemi gözönüne alınmıştır. Bir simülasyon programı kullanılarak yapılan analizde, 5. ve 7. harmonikleri süzmeye yönelik harmonik filtrelerinin devrede olup olmamasını içeren iki ayrı durum dikkate alınarak, bu filtrelerin etkinliği incelenmiştir.

SUMMARY

This work focuses on source of harmonics in power systems and their undesired effects in general, and studies the optimum solutions to harmonic elimination and filter design in detail.

In a power system, the main reason of a waveform distortion is the presence of nonlinear loads connected to the system. These nonlinear loads are supplied by a sinusoidal source. However, the current that they draw contains strong harmonics. These harmonics currents create also harmonically rich voltages at the terminals of other loads connected to the same system. Harmonics, overheating and the degradation of the insulation in the system may take place. Specially the capacitor banks that are used in power factor correction system can create a resonant frequencies with the effects of system's own impedance. This resonant frequencies may cause highly important harmonic problems in the system.

In today's power electronics, the common use of the elements of the power electronics very much susceptible to harmonic distortion in addition to their being an important harmonic source in power systems requires the harmonic distortion be kept under acceptable limits. In this case, the aim is to prevent harmonic resonances and reduce the amplitudes of harmonic currents and voltages as much as possible. For this purpose, there exists need for harmonic filters in proper locations to make the harmonic distortion minimum in power systems. Considering technical and economic sides, shunt filters that provide low impedance to harmonic currents is generally preferable. Practicable criterion of filter design is to reduce the problem reducing the problem to an acceptable level at the point of common coupling with other consumers, the problem being expressed in terms of harmonic current and harmonic voltages. These filters are adjusted to filter out certain harmonics and they are installed proper locations in the power systems. Thereby they reduce the magnitudes of undesired harmonics created in the systems.

In the numerical part of this work, an energy system having a nonlinear load is considered. In the analysis part, using a simulation program two different cases are taken into consideration to see whether harmonic filters which have the aim of eliminating 5th and 7th harmonics serve their purpose and effects of these filters investigated.

BÖLÜM 1: GİRİŞ

1.1.Genel Giriş ve Tanıtım

İdeal bir elektrik güç sisteminde enerji, tek ve sabit bir frekansta ve belirli gerilim seviyelerinde sağlanır. Bununla birlikte, bazı olumsuzluklar nedeniyle bu şartların hiçbiri pratikte sağlanamaz. Gerilim ve frekans sapma problemleri ve bunları kontrol altında tutma işlemleri, güç sistem analizlerinin ana problemini oluşturur.

Güç sistemlerinde hesaplamalar yapılırken, şebekede üretilen gerilimin sinüs biçiminde olduğu kabul edilir. Gerçekte, şebekedeki bazı yükler, doğrusal olmayan karakteristikleri nedeniyle gerilim dalga şeklinin tam sinüs biçiminden ayrılmasına yol açarlar. Gerilim ve akım dalga şekli bozulmasının en önemli nedeni, uç gerilimi ile akımı arasındaki bağıntısı doğrusal olmayan yüklerdir. Böyle 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.

Güç sistemlerinde dalga şekli bozulması yeni bir olay değildir. Harmoniklerin meydana getirdiği problemler uzun yıllardan beri bilinmektedir. Dalga şekli bozulmasını kabul edilebilir oranlarda tutmak, alternatif akımın ilk günlerinden beri güç mühendislerinin ilgi odağı olmuştur. Transformatörler ve generatörler incelenirken, bunların aynı zamanda birer harmonik kaynağı olduğu vurgulanmıştır. (Arrilliaga et al, 1985)

Düşük maliyetli yarı-iletken elemanların yapılması, güç dönüşümünün ileri tekniklerini mümkün kılmış, statik doğrultucular ve sürücüler daha eski dönüşüm yöntemlerinin(motor-generatör setleri) yerini almıştır. Bununla birlikte, bu eleman ve donanımlar, güç sistemlerinde önemli problemler ortaya çıkarmıştır. Dönüştürme işlemlerinin neden olduğu harmonik akımlar ve gerilimler ile faz kontrollü statik doğrultmayla ilişkili olan düşük güç faktörü bu problemlerin temelini oluştururlar. Ekonomik durumlar ve sistem gerilim regülasyonu gereksinimi, sistemin güç faktörünü iyileştirmeyi gerekli kılar. Bu iyileştirme, sisteme paralel güç faktörü düzeltme kondansatörlerinin eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Ancak, bu kondansatör gruplarının

uygulanması, harmonik akım ve gerilimleri ile etkileşimlerinin sonucu olarak problemlere yol açmıştır.(Joseph et al, 1990)

Güç sisteminde doğrusal olmayan yüklerin kullanımının ve harmonik problemlerinin artış göstermesi sonucu, harmoniklere göre sistem donanımının çalışması ve yük karakteristikleri gündeme gelmiştir. Güç sistem kirlenmesi ile ilgili endişenin artması aşağıdaki faktörlerden dolayıdır:

- Güç sisteminde harmonik üretiminin artmasına neden olan, doğrusal olmayan gerilim-akım karakteristiğine sahip güç elektroniği aygıtlarının uygulamalarındaki artış. Bu aygıtlar, örneğin motor sürmeleri için kullanılan doğrultucular, eviriciler, v.s. ve elektrokimyasal yükler için kullanılan dönüştürücülerden ibarettir.

- Harmonik seviyelerini artıran rezonans durumları için potansiyel artış sunan, güç faktörü düzeltilmesi ve gerilim regülasyonu için kullanılan paralel kondansatör gruplarının uygulamalarındaki artış.

-Harmonik gerilim ve akımlarına karşı çok duyarlı olan aygıt tasarımındaki toleranslarda azalma.

Gerilim bozulmasının etkisi, genel olarak üç kısım altında toplanabilir:(IEEE Com. Report, 1985)

- 1- Gerilim etkilerinden dolayı yalıtım zorlanmaları
- 2- Akım akışından dolayı ısı zorlanmalar
- 3- Kötü çalışma(Arızalanma)

Dalga şekli bozulmasına karşı çok duyarlı olan elektronik donanımlar, son yıllarda ortaya çıkan önemli problemleri oluşturmaktadırlar. Günümüzde, güç elektroniği eleman ve donanımlarının güç sistemlerinde yaygın olarak ve gittikçe artan bir şekilde kullanımı, harmoniklere olan ilgi ve çalışmaları da artırmıştır.

1.2.HARMONİKLER

Bir harmonik, 'periyodik bir dalganın, temel frekansın tam katı olan bir frekansa sahip sinüs biçimli bileşeni' olarak tanımlanır. Böylece harmonikler, bir elektrik sisteminde temel frekansın bazı tam katlarında ortaya çıkan akımlar ve gerilimler olarak dikkate alınırlar. Buna göre harmonik frekansı,

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (n \neq 1) \quad (1.1)$$

olacaktır. Burada:

n = Harmoniklerin mertebesi

f_1 = Temel frekans

Dengeli üç fazlı alternatif akım şebekelerinde, kalıcı durumda etkin olabilecek harmonikler,

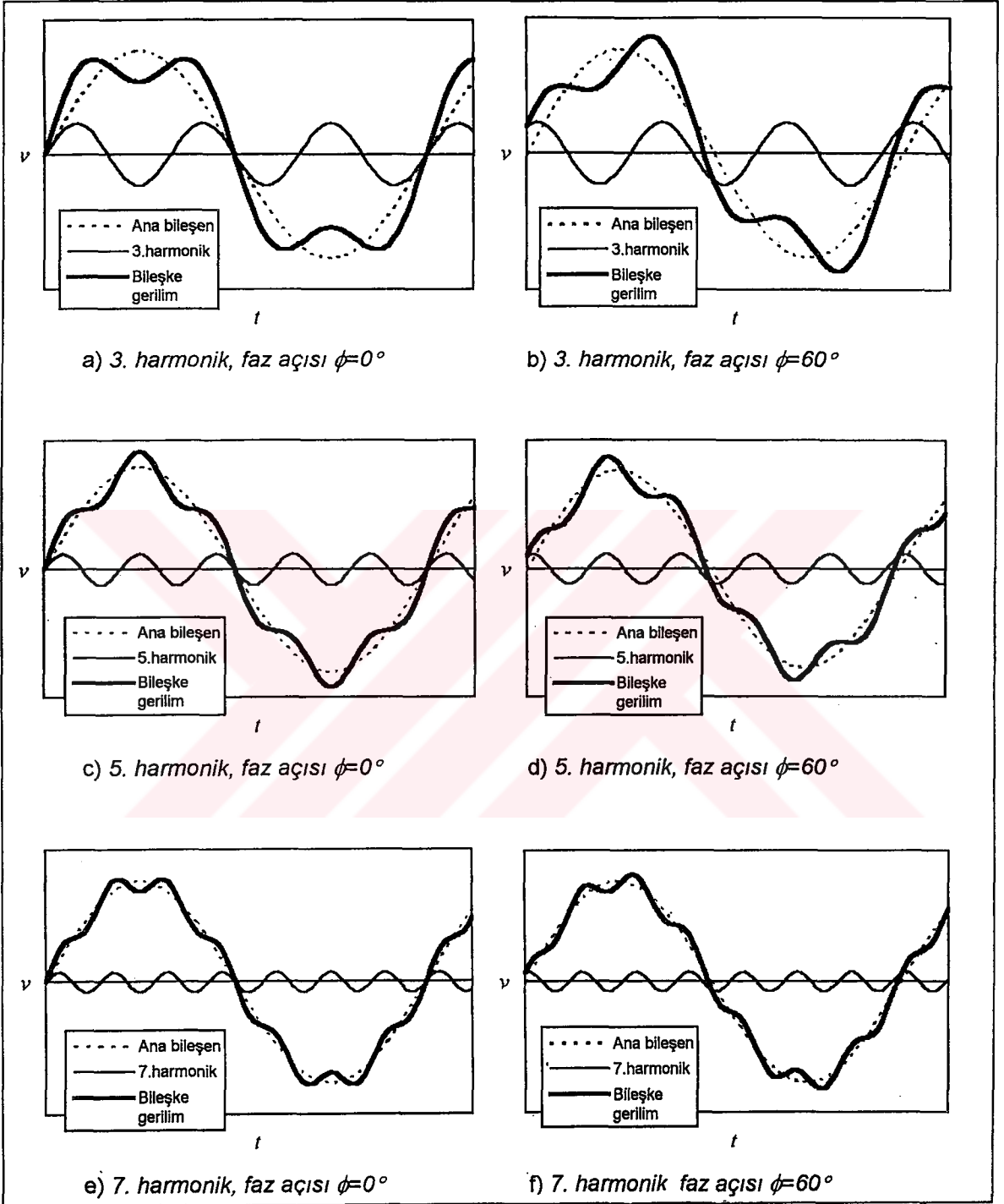
$$n = 6k \pm 1 \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.2)$$

eşitliğiyle bulunur. Buna göre 5,7,11,13,... mertebeli harmonikler etkin olabilir. Görüldüğü gibi çift mertebeli harmonikler ile üçlü(üç ve üçün katı) harmonikler sözkonusu değildir. Dengesiz bir sistemde ise, sistem parametrelerine ve çalışma koşullarına bağlı olarak her mertebeden harmonikler görülebilir. Harmonik akım ve gerilimlerinin genlikleri harmonik mertebesiyle ters orantılıdır; mertebe büyüdükçe genlik azalır.(Wirt, 1984)

Temel bileşenle aynı ve farklı fazlarda olan 3.,5. ve 7. harmoniklerin bulunması durumunda, bileşke gerilim dalga şekilleri Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Bu dalga şekillerinde temel bileşen, güç sistemlerinde temel kabul edilen ideal gerilim dalga şeklinin 50 Hz bir sinüs biçimli örneğidir. 150, 250 ve 350 Hz frekanslı harmoniklerin temel bileşene eklenmesiyle, değişik faz açılarında sinüs biçimli dalgadaki bozulmalar görülmektedir. (Joseph et al,1990)

1.3. HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

Şekil 1.1.'dekine benzer şekilde bozulmuş dalga şekillerinden zarar gören bir elektrik sisteminde, problemler daha çabuk kestirilmeli ve sistem, özel harmonik akım ve gerilimleri bakımından analiz edilmelidir. Fourier analiz teorisine göre, bozulmuş bir periyodik dalga şeklinin harmonik bileşenleri bir Fourier serisiyle ifade edilebilir. Fourier analiz tekniklerini uygulayarak bozulmuş bir periyodik dalga şekli, 50 Hz'in tam katları olan frekanslara sahip sinüs biçimli dalga şekillerinin bir serisine ayrılabilir.



Şekil 1.1. Bileşke gerilim dalga şekilleri

Peryodik bir $X(t)$ fonksiyonunun Fourier serisi şöyle ifade edilir:

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \quad (1.3)$$

Bu ifade, periyodik bir fonksiyonun frekans domenindeki gösterilişidir. Burada, a_0 $X(t)$ fonksiyonunun ortalama değeri, a_n ve b_n ise serinin katsayılarıdır. n .harmonik vektörüne karşılık gelen ifade,

$$A_n \angle \varphi_n = a_n + jb_n \quad (1.4)$$

olarak verilir. Burada n . harmoniğin genliği,

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{ile,}$$

Faz açısı ise,

$$\varphi_n = \tan^{-1}(b_n / a_n) \quad \text{ile verilir.}$$

Serideki a_0 , a_n ve b_n aşağıdaki eşitliklerden bulunur:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) dt \quad (1.5)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt, \quad n = 1 \rightarrow \infty \quad (1.6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt, \quad n = 1 \rightarrow \infty \quad (1.7)$$

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



BÖLÜM 2: HARMONİK KAYNAKLARI

2.1. GİRİŞ

Arızasız bir işletmede harmonikler çeşitli nedenlerle ortaya çıkarlar. Magnetik ve elektrik devrelerdeki doğrusal olmayan olaylar ana nedenlerdir. Magnetik devrelerde doyma olayı, elektrik devrelerinde ark olayı ve güç elektroniğinde sinüs eğrisinin kesilmesi olayı doğrusal olmayan olaylardır. Örneğin; generatör, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren elemanlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirler. Ark fırınları ve kaynak makinaları gibi normal işletmeleri gereği bir arkın oluşması sonucunda da harmonikler üretilir. Doğrultucular ve tristörler sinüs biçimli akımı keserken yine harmonikler oluşur. (Bayram, 1985)

Önceki bölümde belirtildiği gibi, kısaca, karakteristiği doğrusal olmayan elemanlar 50 Hz temel frekanslı aktif ve reaktif güç tüketirken, harmonik frekanslı akımlar üretirler. Harmonik akımları devrelerini diğer elemanlar üzerinden tamamlayarak, harmonik frekanslı gerilimlerin oluşmasına neden olurlar.

Güç sistemlerinde başlıca harmonik üreten kaynaklar şunlardır:

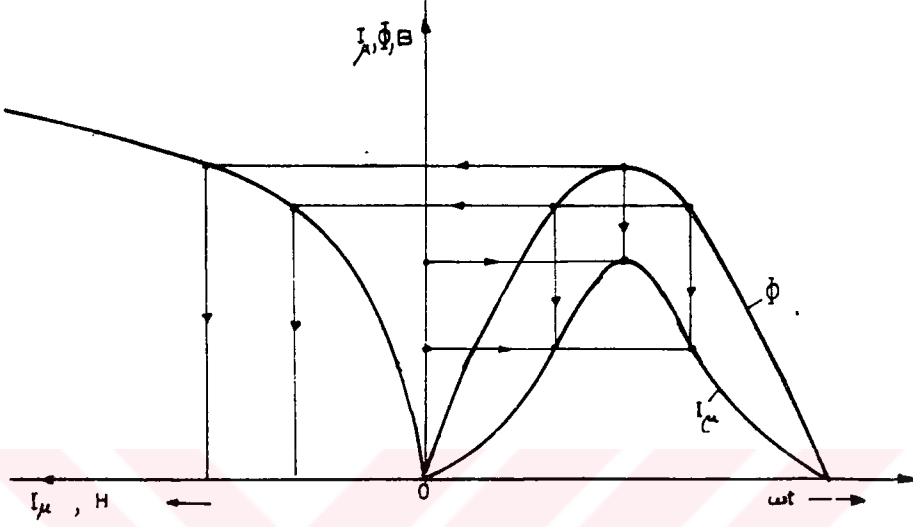
- 1- Transformatörler
- 2- Statik dönüştürücüler
- 3- Ark kaynakları
- 4- Statik VAR kompanzatorleri
- 5- Döner makinalar

Bu bölümde bu harmonik kaynakları sırasıyla açıklanmıştır.

2.2. TRANSFORMATÖRLER

Transformatörler, bobinler v.b. gibi demir çekirdeği bulunan sargılar, eskiden beri bilinen önemli harmonik üreticilerdir. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin doğrusal olmayışına dayanır. Transformatörler sinüs biçimli bir gerilimle beslendiklerinde, şebekeden bir mıknatıslama akımı çekerler.

Demir çekirdeğin magnetik karakteristiği doğrusal olmadığından, bu mıknatıslama akımı sinüs biçimli değildir. Şekil 2.1.'de mıknatıslama karakteristiği ve mıknatıslama akımının oluşması gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Mıknatıslama akımı

2.2.1. Bir Fazlı Transformatörlerde Harmonikler

Şebeke gerilimi belli bir değerin 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 harmonik 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 oldukça yüksektir. Bu nedenle, harmonik akımlarının primer ve hat empedansında oluşturduğu gerilim düşümleri, özellikle düşük yüklerde büyük değerler alırlar. Bu gerilim düşümleri nedeniyle, transformatöre uygulanan gerilim de 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. Üç Fazlı Transformatörlerde Harmonikler

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

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 arasında faz farkı şuna eşittir:

$$\varphi_n = n.\varphi_1 = n.2\pi/3 = n.120^\circ \quad (2.1)$$

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 emk'lar sinüs biçiminden ayrılırlar. Yıldız noktasında yığılan bu akımların oluşturduğu akılar da her üç fazda aynı yöndedirler. Bu akılar devrelerini kapamak için yol arayarak, hava veya yağ içinde kendilerine yol seçerler; imkan bulurlarsa kazana atırlar ve kazanda emk'lar endükleyerek kazanın ısınmasına neden olurlar. Ayrıca, bu üçlü harmonikler, her üç fazda aynı fazda gerilim düşümleri meydana getirerek yıldız noktasının kaymasına neden olurlar.

Üçlü harmoniklerin kötü etkilerinden kurtulmak için tersiyer sargı kullanılır. Görmüş olduğu görevden 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. Üçgen-Yıldız Bağlama

Primer sargısı üçgen bağlı 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)

2.3. Statik Dönüştürücüler

Güç elektroniği düzenekli donanımlar önemli birer harmonik kaynağıdır. Bunları genel anlamda doğrultucular, eviriciler, doğrudan frekans çeviriciler ve a.a. kıyıcılar olarak sıralayabiliriz. Bu aygıtlar, elektronik anahtarlama prensibiyle çalıştıkları için harmonik üretmektedirler.

Statik güç dönüştürücüleri tarafından üretilen harmoniklerin incelenmesi için şunların dikkate alınması gerekir:

- Dönüştürücü uçlarındaki a.a. gerilim dalga şekli,
- Dönüştürücü yapısı,
- Kontrol tipi,
- A.a. sistem empedansı,
- D.a. devre parametreleri gibi.

Güç sistemlerinde geniş uygulama alanları bulunan dönüştürücüleri üç ana başlık altında toplayabiliriz:

a) Büyük güç dönüştürücüleri: Bu dönüştürücülerin güçleri MW'lar mertebesindedir. Daha çok, yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletiminde ve özel metal endüstrisinde kullanılırlar.

b) Orta büyüklükteki dönüştürücüler: Bu dönüştürücüler üretim endüstrisinde, motor kontrolünde ve ayrıca elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılırlar.

c) Düşük güç dönüştürücüleri: Televizyon setlerinde ve akü doldurma devrelerinde kullanılan dönüştürücüler örnek verilebilir.

2.3.1. Büyük Güç Dönüştürücüleri

Büyük güç dönüştürücüleri d.a. taraflarında a.a. taraflarından daha yüksek endüktansa sahiptirler. Böylece, dönüştürücü a.a. tarafında harmonik akım kaynağı, d.a. tarafında ise harmonik gerilim kaynağı gibi davranır. A.a. tarafında görülen harmonik mertebeleri,

$$n = qk \pm 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2)$$

eşitliğiyle verilir. Burada, q, darbe sayısıdır ve dönüştürücülerde darbe sayısı genelde 6, 12 veya 24'tür. İdeal olarak, bir dönüştürücü tarafından üretilen harmonik akımlarının genliği, harmonik mertebesiyle ters orantılı olarak azalır.

2.3.1.1. Altı Darbeli Dönüştürücü

Altı darbeli bir dönüştürücüde, a fazındaki alternatif akımın frekans domenindeki karşılığı aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left\{ \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \right\} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikten bir takım sonuçlar çıkarmak mümkündür. Bu sonuçları şöyle sıralayabiliriz:

- 1- Üçlü harmonikler yoktur.
- 2- k 'nın tam değerleri için $6k \pm 1$ mertebeli harmonikler vardır.
 - * $6k+1$ mertebeli harmonikler doğru bileşene,
 - * $6k-1$ mertebeli harmonikler ise ters bileşene aittirler.
- 3- Temel bileşenin etkin genliği,

$$I_1 = (1/2) \cdot (2\sqrt{3} \pi) \cdot I_d = (\sqrt{6} / \pi) \cdot I_d \quad (2.4)$$

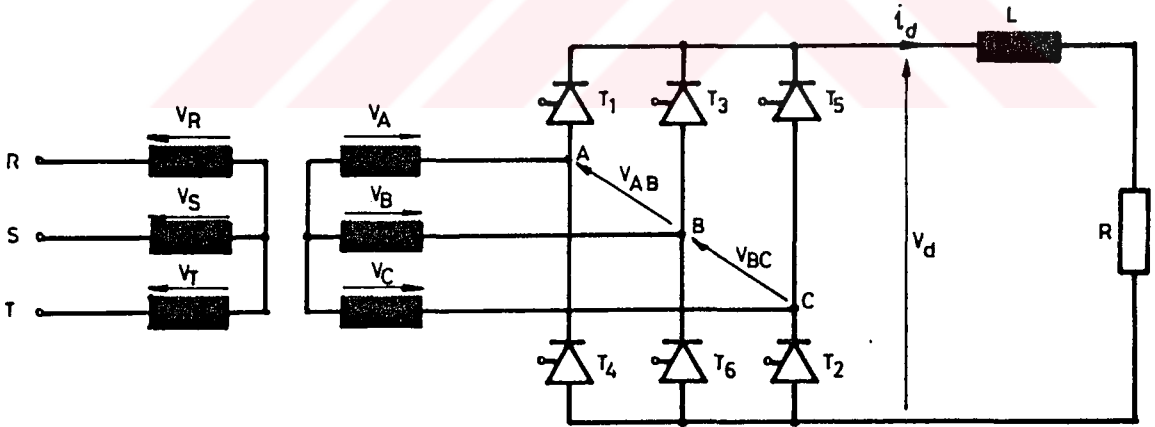
olur.

- 4- n . harmoniğin etkin genliği,

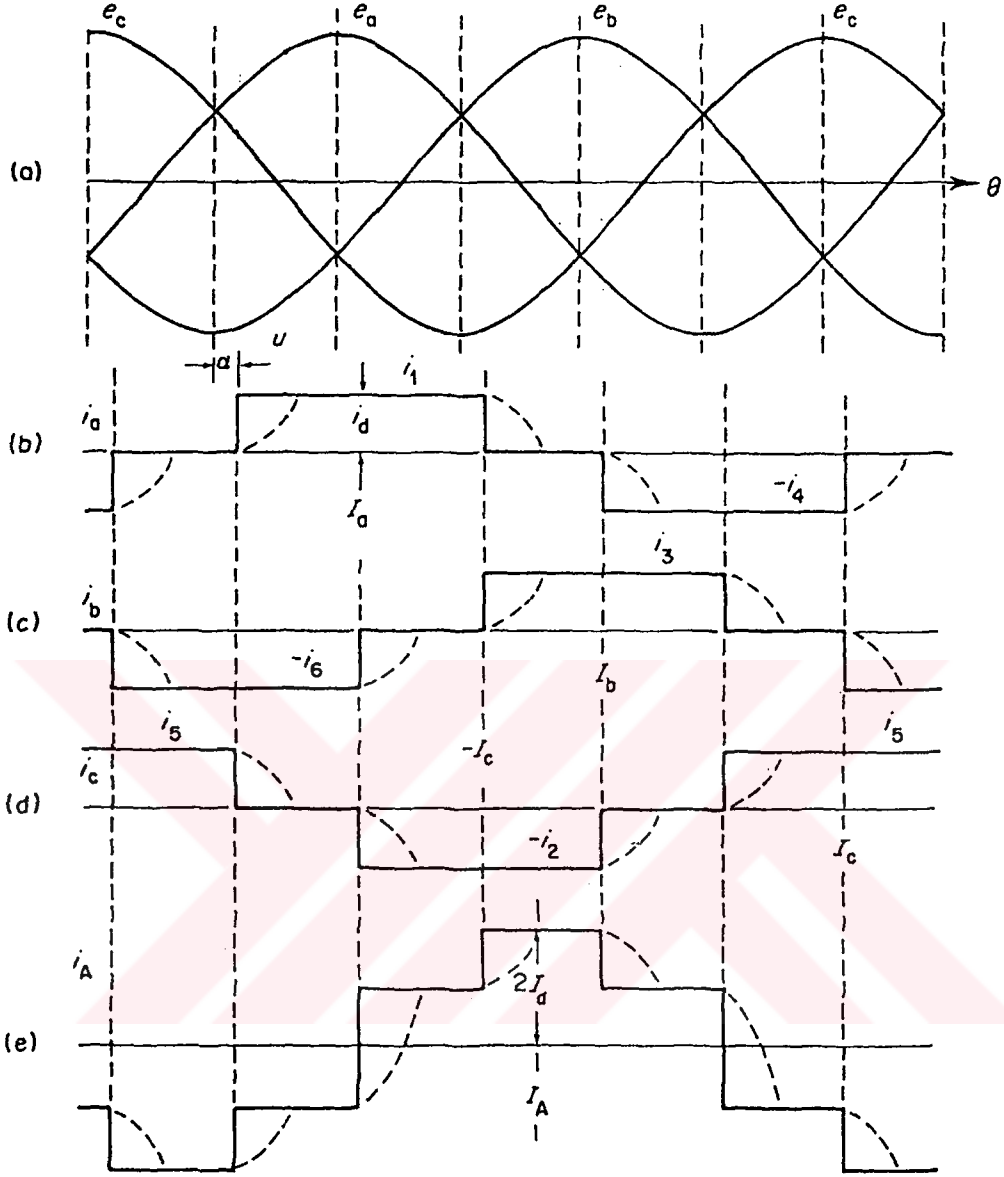
$$I_n = I_1 / n \quad (2.5)$$

olur.

Şekil 2.2'de altı darbeli köprü devresi ve Şekil 2.3'de de dalga şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Altı darbeli köprü devresi



Şekil 2.3. Altı darbeli köprü dalga şekilleri:

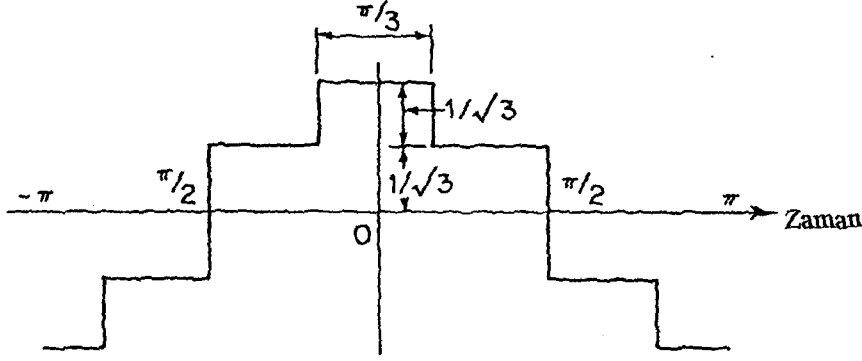
(a) Faz-nötr gerilimleri

(b)-(c)-(d) Dönüştürücü tarafındaki faz akımları

(e) Üçgen-yıldız bağlı transformatörlü sistemdeki faz akımı

Dönüştürücü transformatörünün primer veya sekonder üç fazlı sargılarından biri üçgen bağlı ise, a.a. tarafındaki akım dalga şekilleri, 120° farklı dikdörtgen şeklindeki iki sekonder akım arasındaki ani farklılıklardan oluşurlar.

Yıldız-yıldız bağlamaya ait primer ve sekonder gerilimleri esas alınır, üçgen-yıldız bağlamada çevrim oranı olarak tanımlanan $\sqrt{3}$ faktörü kullanılır. Bu durumdaki akım dalga şekli, şekil 2.4'de gösterildiği gibi olur.



Şekil 2.4. Üçgen-yıldız bağlı transformatörlü bir altı-darbe dalga şeklinin zaman domeninde gösterilişi

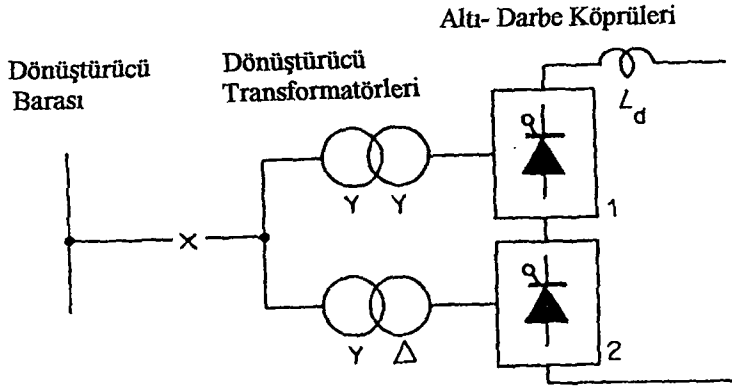
Primer tarafta a fazındaki akım için Fourier serisi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left\{ \cos\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \dots \right\} \quad (2.6)$$

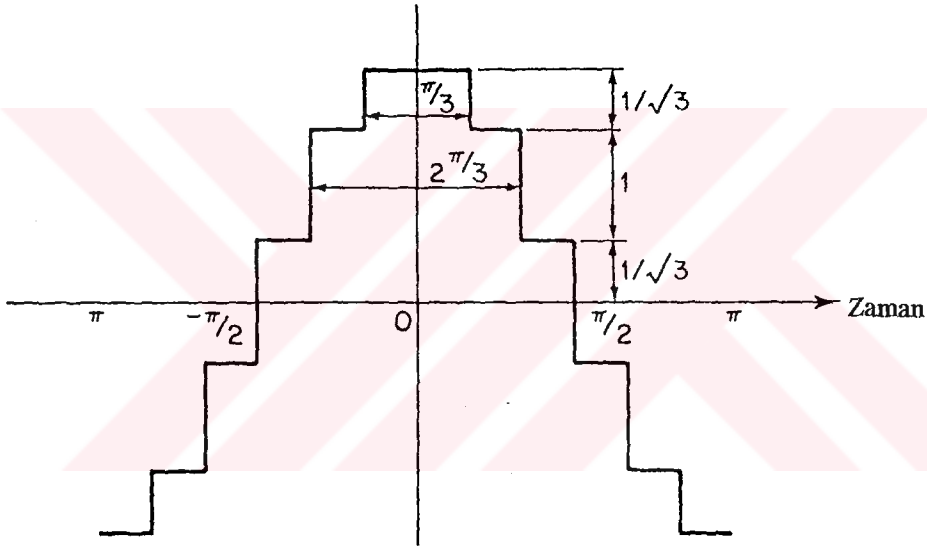
Bu serinin yıldız-yıldız bağlama durumundaki seriye göre farkı, sadece k'nın tek sayı değerleri için $6k \pm 1$ mertebeli harmoniklerin (5., 7., 11., 13., ... v.s.) ters dönmüş olmasıdır.

2.3.1.2. Oniki Darbeli Dönüştürücü

İki altı darbeli dönüştürücünün birleştirilmesiyle oniki darbeli dönüştürücü oluşturulur. Paralel bağlı, temel gerilimleri eşit ve 30° faz farklı olan iki adet üç fazlı transformatörden besleme yapılır. Şekil 2.5'de oniki darbeli bir dönüştürücü ve Şekil 2.6'da bu dönüştürücüye ait faz akımının dalga şekli görülmektedir.



Şekil 2.5. Oniki darbeli dönüştürücü bağlantısı



Şekil 2.6. Oniki-darbe faz akımının zaman domeninde gösterilişi

Bileşke alternatif akım, yıldız-yıldız ve üçgen-yıldız bağlı dönüştürücü transformatörlerin Fourier serilerinin (sırasıyla (2.3) ve (2.6) eşitlikleri) toplamı şeklinde verilir:

$$(i_a)_{12} = 2 \left[\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right] I_d \left[\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \frac{1}{13} \cos 13 \omega t - \frac{1}{23} \cos 23 \omega t + \dots \right] \quad (2.7)$$

Bu seriden görüldüğü gibi, sadece $12k \pm 1$ mertebeli harmonikler mevcuttur. k 'nın tek sayı değerleri için $6k \pm 1$ mertebeli harmonik akımları (5.,7.,17.,19.,...v.s.) iki dönüştürücü transformatörü arasında dolaşrlar, fakat a.a. şebekeye girmezler.

12-darbe işletimini sağlamak için 30° faz farklı iki transformatör kullanılır. 24-darbe işletimi için 15° faz farklı dört adet transformatör, benzer şekilde 48-darbe işletimi için ise 7.5° faz farklı sekiz adet transformatör gerekir.

2.3.1.3. Transformatör ve Sistem Empedansının Etkisi

Pratikte, komütasyon devresinde reaktansın varolması, geliş ve gidiş fazlarının iletim çakışmasına neden olur.

Yüksek darbe şekilleri, üç-darbe gruplarının bileşiminden meydana gelir. Örneğin, üç-darbe grubuna ait komütasyon çakışmaları, Şekil 2.3'de kesik çizgilerle gösterilmiştir. Akım dalga şeklinde ideal kare dalganın merkezine göre varolan çift simetri, komütasyon çakışmasından dolayı bozulur. Komütasyon gerilimine karşılık gelen bir kaynak kullanarak ve tam bir endüktif komütasyon devresi kabul ederek, komütasyon akımı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$i_c = \frac{E}{\sqrt{2}X_c} (\cos\alpha - \cos\omega t) \quad (2.8)$$

Burada X_c , komütasyon devresinin faz başına reaktansıdır ve genelde transformatörün kaçak reaktansı sayesinde belirlenir.

Komütasyon sonunda $i_c = I_d$, $\omega t = \mu$ ve (2.8) eşitliği aşağıdaki gibi olur:

$$i_c = \frac{E}{\sqrt{2}X_c} (\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)) \quad (2.9)$$

(2.8) ve (2.9) eşitlikleri oranlandığında, $\alpha < \omega t < \alpha + \mu$ aralığında,

$$i_c = I_d \left(\frac{\cos\alpha - \cos\omega t}{\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)} \right) \quad (2.10)$$

olur. Pozitif akım darbelerinin kalan kısmı, $\alpha + \mu < \omega t < \alpha + 2\pi/3$ için,

$$i = I_d, \quad (2.11)$$

Negatif akım darbesi hala yarım dalga simetrisini korur ve böylece, sadece tek sıralı harmonikler varolur.

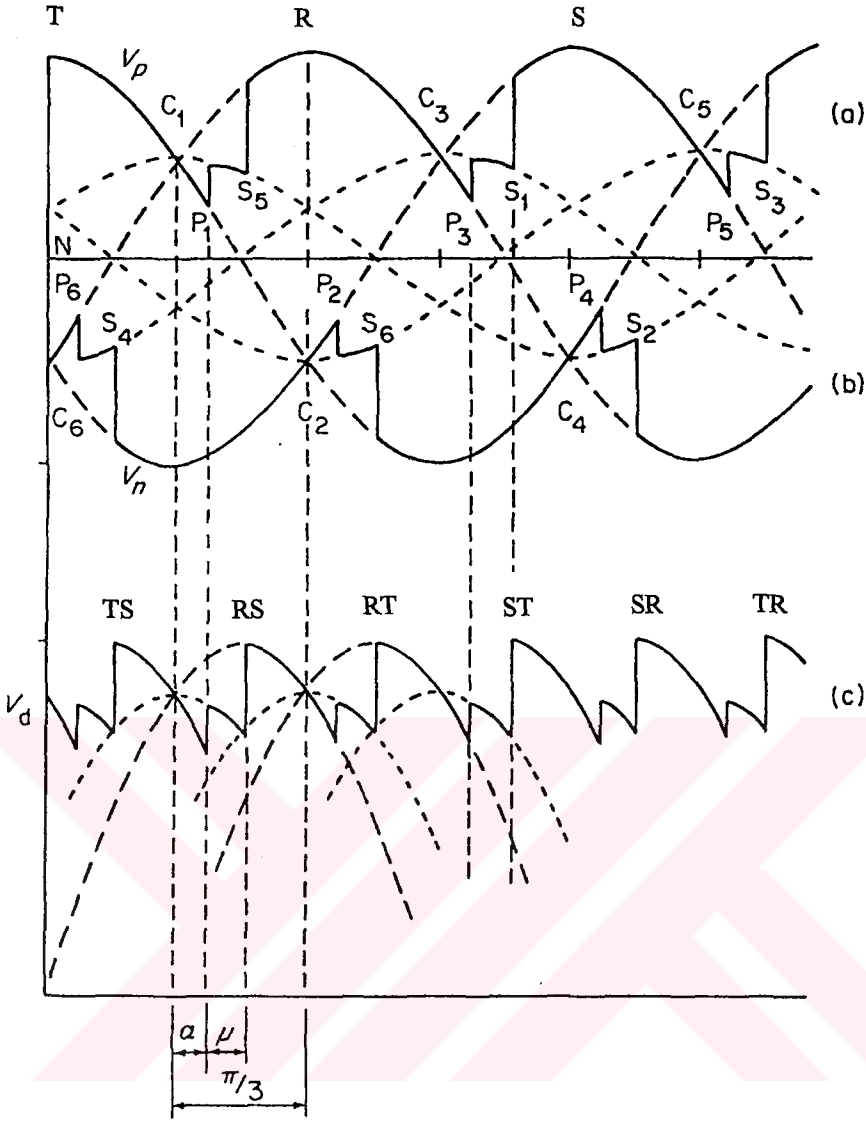
Özetlersek; sistem empedansının varolması, akım dalga şeklinin harmonik içeriğini azaltmaktadır. Bu etki, kontrolsüz doğrultma durumunda daha belirgin olur. Daha büyük tetikleme açılarına sahip akım darbeleri, pratikte a.a. sistem reaktansından etkilenmezler.

2.3.1.4. Doğru Gerilim Harmonikleri

Doğru akım tarafındaki gerilim harmoniklerinin mertebesi, darbe sayısına bağlı olarak,

$$n = q k, \quad k=1,2,3\dots \quad (2.12)$$

olarak ifade edilir. Şekil 2.7'de altı darbeli bir dönüştürücüye ait d.a. gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Altı darbeli dönüştürücü d.a. gerilim dalga şekilleri: a)Pozitif uçta b)Negatif uçta. c)Çıkış uçları arasında.

D.a. gerilim dalga şekli harmonik gerilimlerinin etkin genliği aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_n = \frac{V_{co}}{\sqrt{2(n^2-1)}} \left\{ (n-1)^2 \cos^2 \left[(n+1) \frac{\mu}{2} \right] + (n+1)^2 \cos^2 \left[(n-1) \frac{\mu}{2} \right] - \right. \\ \left. - 2(n-1)(n+1) \cos \left[(n+1) \frac{\mu}{2} \right] \cos \left[(n-1) \frac{\mu}{2} \right] \cos(2\alpha + \mu) \right\}^{1/2} \quad (2.13)$$

Burada V_{c_o} , en büyük ortalama doğrultulmuş gerilim olup, altı darbeli bir dönüştürücü için $3(\sqrt{2})V_c/\pi$ olur. V_c , fazlar arası(komütasyon) etkin gerilimdir.

İlk önce, (2.13) eşliğinde $\alpha=0$ ve $\mu=0$ değerlerini yerine koyduğumuzda aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$V_{n_o} = \sqrt{2} V_{c_o} / (n^2 - 1) \quad (2.14)$$

V_{n_o} ve V_{c_o} ifadelerini oranlarsak,

$$\frac{V_{n_o}}{V_{c_o}} = \frac{\sqrt{2}}{(n^2 - 1)} \cong \frac{\sqrt{2}}{n^2} \quad (2.15)$$

bulunur.

Genelde, harmonikler α artışlarına bağlı olarak artarlar. $\alpha = \pi/2$ ve $\mu=0$ için ,

$$\frac{V_{n_o}}{V_{c_o}} = \frac{\sqrt{2} n}{(n^2 - 1)} \cong \frac{\sqrt{2}}{n} \quad (2.16)$$

elde edilir. Bu eşitlik, sistemdeki harmoniklerin en büyük oranını belirttiği için oldukça önemlidir.

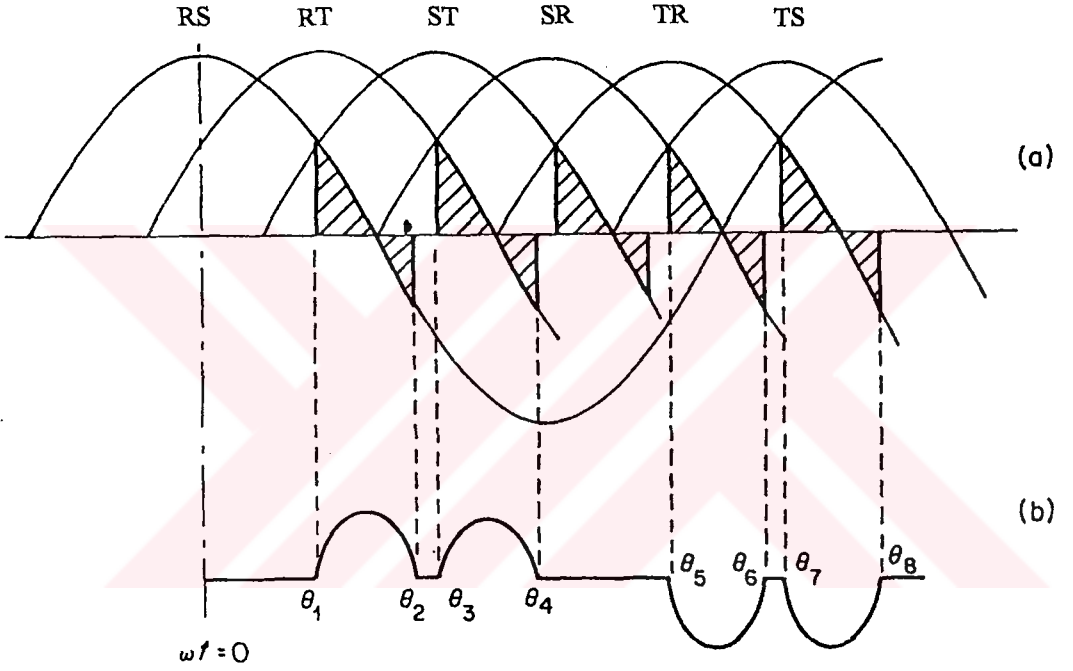
2.3.2. Orta Büyüklükteki Dönüştürücüler

Orta büyüklükteki dönüştürücülerin endüstriyel tesislerde, özellikle a.a. ve d.a. motor kontrolünde çok geniş kullanım alanları vardır.

2.3.2.1. Dönüştürücüden Beslenen d.a. Sürücüler

Motor armatür sargısının sınırlanmış endüktansı ve tetikleme açısının büyük değişimi dikkate alınarak, büyük boyuttaki dönüştürücülerin sabit d.a. kabulü gerçekleşmez.

Bilindiği gibi, bir d.a. yükü en basit bir şekilde bir direnç, endüktans ve geri emk'dan oluşan bir eşdeğer devre olarak gösterebiliriz. Anma yük koşullarında tetikleme gecikmesi düşük tutulmasına rağmen, motor yol alma süresince veya hafif yük koşulları süresince gecikme artar ve akım süreksiz olabilir. Bu aşırı çalışma koşulu, altı darbeli doğrultma için Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Süreksiz dalga şekilleri: a) D.a. gerilim b) R fazındaki a.a. akım

Şekil 2.8'deki akım dabelerine Fourier analizini uyguladığımızda, 5. harmoniğin aynı temel bileşenli dikdörtgen dalga şekillerinin üç katına ulaşabilen tepe değerlerine sahip olduğunu görebiliriz.

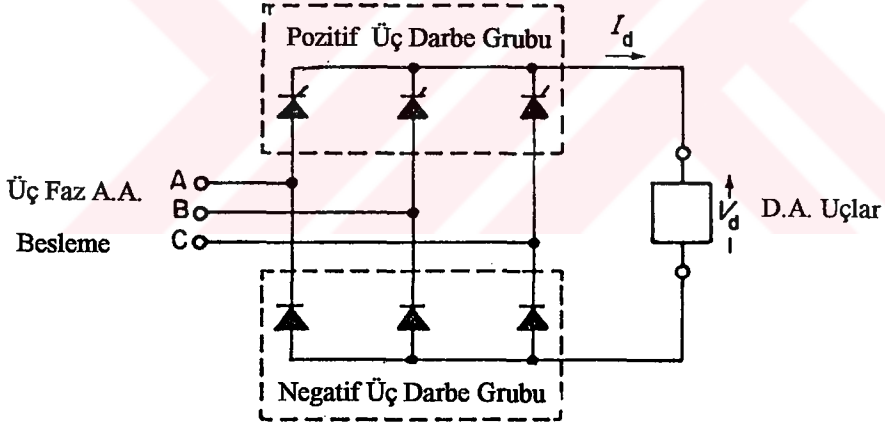
D.a. motorlar, dönüştürücüler ile kullanım için özel olarak tasarlanırlar. Bu motorların endüvi reaktansı, süreksiz akımlardan kaçınmak için genelde artırılır.

2.3.2.2. Yarı-kontrollü Doğrultma

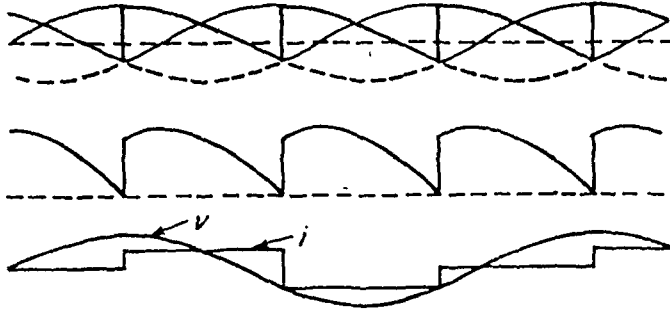
Değişken hızlı d.a. tahrik devrelerinde yarı-kontrollü doğrultucuların kullanımı, ekonomik olmaları bakımından genelde tercih edilmektedir. Bu doğrultucular tam yükte çalıştıklarında, hemen hemen tam kontrollü dönüştürücüler gibi aynı harmonik akımları üretirler ve çok verimli çalışırlar.

Bununla birlikte, işletim koşulları altında gereken tetikleme gecikmeleri sonucu, akım dalga şeklinin yarı dalga simetrisi Şekil 2.10'da görüldüğü gibi kaybolur. Düşük yüklerde çalıştıklarında, çok düşük bir güç faktörüne sahip olmalarının yanısıra aynı zamanda, çift mertebeli harmoniklerle önemli miktarda dalga şekli bozulmasına neden olurlar.

Şekil 2.9'da üç fazlı yarı-kontrollü dönüştürücünün bağlantı şeması, Şekil 2.10'da ise $\alpha=60^\circ$ için bu dönüştürücüye ait teorik dalga şekilleri gösterilmiştir.



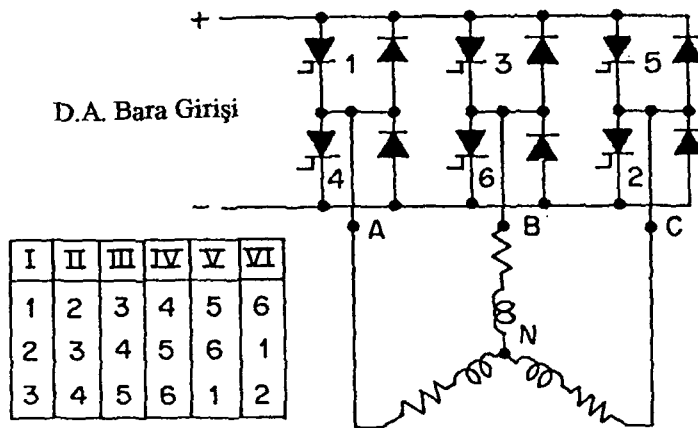
Şekil 2.9. Üç fazlı yarı-kontrollü dönüştürücü



Şekil 2.10. $\alpha=60^\circ$ için yarı-kontrollü dönüştürücüye ait dalga şekilleri

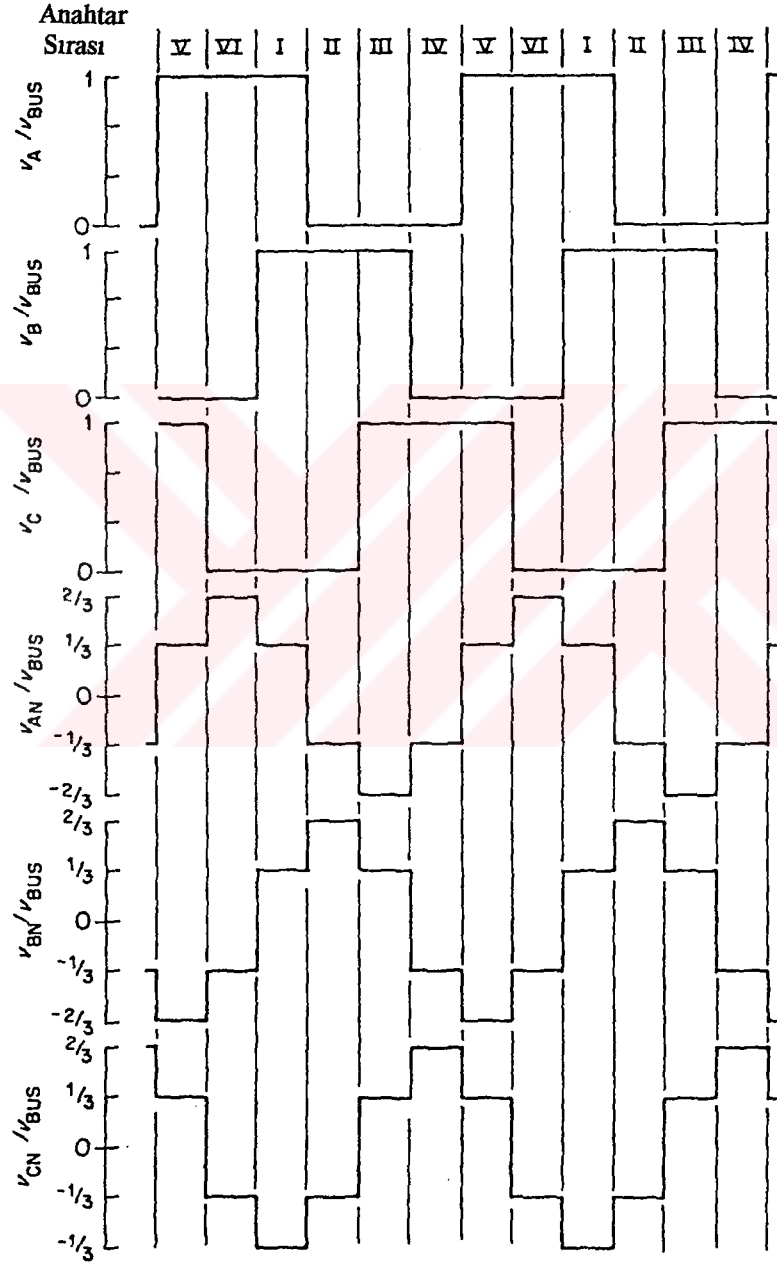
2.3.2.3. Evirici Beslemeli a.a. Sürücüler

A.a. sürücü kontrolünde yaygın olarak kullanılan üç fazlı evirici köprü devresi, Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, herbiri geri besleme diyoduna sahip ters paralel bağlanmış 6 adet kontrollü tristörden meydana gelir. Köprü, ya kontrollü bir doğrultucudan sağlanan değişken bir d.a. gerilim ile yada sabit bir d.a. gerilim ile beslenir. Her iki durumda da kararlı durum işletmesi için d.a. gerilim seviyesi sabit düşünülebilir.



Şekil 2.11. Anahtar kapama sırası verilen temel üç faz evirici devresi ve dengeli motor yükü

Bir a.a. motoru besleyen basit bir evirici devresi için motor faz giriş gerilimi, tüm evirici fazında yok edilmiş olan üçlü harmonikler hariç tutularak, evirici faz çıkış gerilimine eşit olur. Üçlü harmoniklerin yok edilmesinin etkisi Şekil 2.12'de görülmektedir. Ayrıca, motor faz mıknatıslama endüktansı(L_m), giriş gerilim dalga şekli için integre edici bir filtre gibi davranır.



Şekil 2.12. Temel 6-adım dalga şekilleri

Motor faz gerilimi V_p , mıknatıslama akımı i_p ve hava aralığı akı fazörü Φ_p olmak üzere, motor faz harmoniklerinin bağıl genlikleri Tablo 2.1’de özetlenmiştir.

Tablo 2.1. Motor faz harmoniklerinin bağıl genlikleri

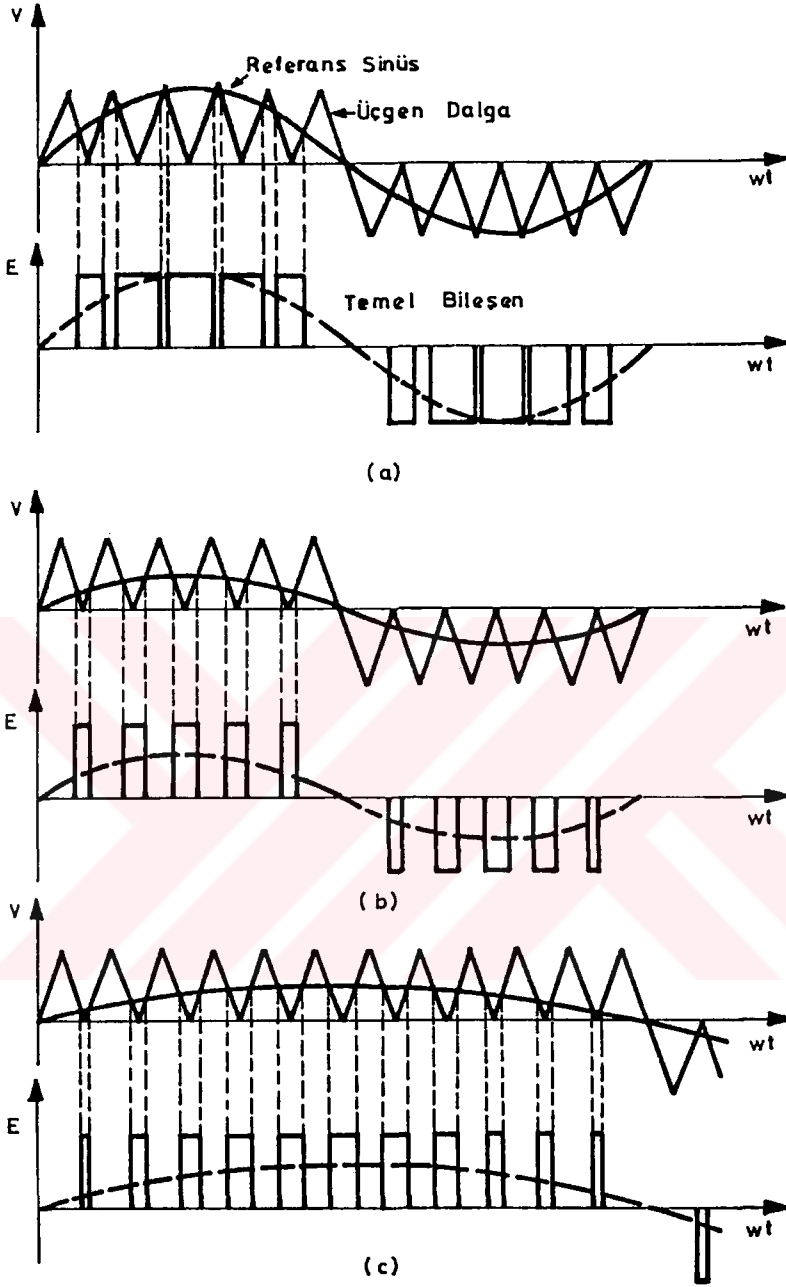
| Değer | HARMONİK MERTEBESİ, n | | | | | | | | |
|----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 23 | 25 |
| V_p | 1.000 | 0.200 | 0.143 | 0.091 | 0.077 | 0.059 | 0.053 | 0.043 | 0.040 |
| i_p | 1.000 | 0.040 | 0.020 | 0.008 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| Φ_p | 1.000 | 0.040 | 0.020 | 0.008 | 0.006 | 0.003 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |

Bazı yüksek-güç evirici beslemeli a.a. motor hız kontrol düzeneklerinde, frekans ile gerilimi doğrusal olarak değiştirmek için d.a. barada ayrı bir d.a. kısıyıcı güç kaynağı kullanılır. Bu durumda, evirici çıkış gerilim dalga şekilleri daima kare dalgadır (Şekil 2.12) ve hava aralığı akı vektörleri Tablo 2.1’de verilen bağıl genliklere sahiptirler. (Arrilliaga et al, 1985)

2.3.2.4. Darbe Genişlik Modülasyonu Eviriciler

Darbe genişlik modülasyonu (DGM), d.a. gerilim kontrolünden bağımsız olmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, evirici çıkışın gerilimini ve frekansını belirleyecek bir sinüs referans işareti, frekans ve genliği sinüsten daha büyük bir üçgen dalga ile karşılaştırılır. Bu iki işaretin çakışma noktaları tristörlerin tetikleme anlarını belirler. Modülasyonu işaret, iki işaretin eşit olduğu noktalarda seviye değiştirmektedir.

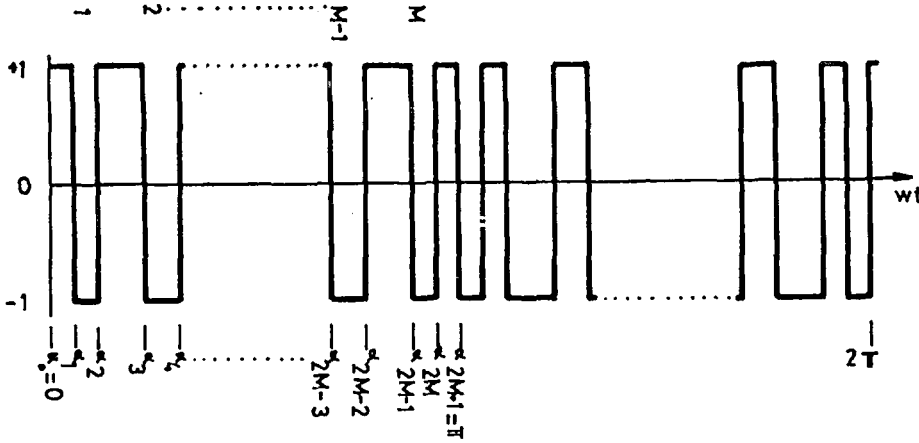
Evirici çıkış gerilimini azaltmak veya yükseltmek için referans sinüsün genliği azaltılır veya yükseltilir. Şekil 2.13’de DGM’li evirici çıkış dalga şekilleri görülmektedir.



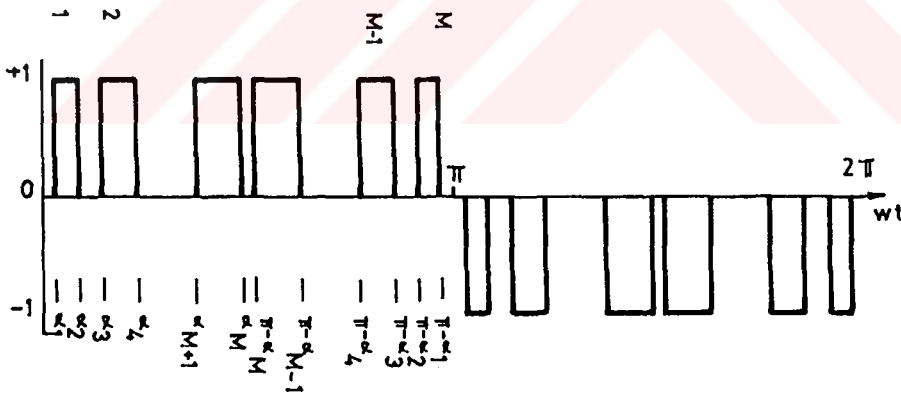
Şekil 2.13. DGM'li evirici çıkış dalga şekilleri

Evirici çıkışındaki istenmeyen harmonikler, harmonik yok etme yöntemi olarak bilinen bir yöntemle giderilebilir ve aynı zamanda temel bileşen genliği kontrol edilebilir. DGM yöntemiyle elde edilen M darbeleri dalga şekilleri yarı dalga köprü evirici için Şekil

2.14'de, tam dalga köprü evirici için Şekil 2.15'de verilmiştir. Burada $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M$ tetikleme açılarıdır.



Şekil 2.14. M darbesi olan yarı dalga köprü eviricinin çıkış dalga şekli



Şekil 2.15. M darbesi olan tam dalga köprü eviricinin çıkış dalga şekli

Şekil 2.14 ve 2.15'deki evirici çıkış dalga şekillerine Fourier yöntemi uygulandığında, yarım ve çeyrek dalga simetrisi göz önüne alınarak harmonik katsayıları bulunur. Yarı dalga köprü için,

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \text{Cos } n\alpha_k \right] \quad (2.17)$$

Tam dalga köprü için,

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[\sum_{k=1}^M (-1)^{k+1} \text{Cos } n\alpha_k \right] \quad (2.18)$$

elde edilir.

Burada tam dalga köprü örneğini ele alırsak, $i = 1, 2, 3, \dots, M$ için,

$$F_i(\alpha) = \frac{4}{n_i \pi} \left[\sum_{k=1}^M (-1)^{k+1} \text{Cos } n_i \alpha_k \right] = 0 \quad (2.19)$$

denklemleri doğrusal olmayan M bilinmeyenli, M denklem oluşturur. Bu deklemler takımının uygun bir sayısal çözümlene yöntemiyle (Newton-Raphson) çözülmesi, harmonikleri gidermek için gerekli α_i tetikleme açılarını verir. Mikroişlemci uygulamalarıyla harmonikleri büyük oranlarda gidermek mümkündür. (Şenlik, 1989)

2.3.3. Düşük Güç Dönüştürücüleri

Düşük güç dönüştürücülerin harmonik bozulmaya katkılarını belirlemek için iki tip yük gözönüne alınabilir. Bunlardan biri, bazı zamanlarda sorunların ortaya çıktığı televizyon setleridir. Diğeri ise, elektrik aletlerinde kullanıldığında önemli derecede harmonik içeren bir kaynak olan akü doldurma devreleridir. Bu yükler, aynı anda etken olan birimlerin sayısı çok olduğunda önemlidirler. (Arrillaga et al, 1985)

2.3.3. Dönüştürücülerin Sıradışı Harmonik Davranışı

Dönüştürücüler, tipik harmonik davranışlarını birtakım varsayımlara göre gösterirler. Bu teorik varsayımları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1-Üç fazlı sistemin tüm parametrelerinin simetrik olması: Alternatif gerilimler genlik olarak eşit, tam sinüs biçimli, aralarındaki faz farkı 120° (dengeli) ve pozitif sıradadırlar.

2-Doğru akım tarafındaki akım dalgalılığının sıfır olması(harmonik bileşen içermemesi): Bu durumda doğru akım tarafındaki düzleştirme endüktansı için $L_m = \infty$ varsayımı yapılmaktadır.

3-Tristörlerin eşit zaman aralıklarında tetiklenmesi, yani tüm tetikleme açılarının eşit olması.

4-Her üç fazdaki komütasyon endüktanslarının eşit olması.

5-Dönüştürücünün kararlı halde olması.

6-D.a. veya a.a. tarafında herhangi bir başka harmonik kaynağı bulunmaması.

Yapılan bu kabullere göre tipik harmonik davranışı gösteren altı ve oniki darbeli dönüştürücüler, pratik çalışma koşullarında bu kabullerden bir veya birkaçının bozulması durumunda sıradışı harmonik davranışı gösterirler.

Düşük mertebeli sıradışı harmonikler normalde kendilerine yakın mertebelerdeki tipik harmoniklerden büyüklük olarak çok daha küçüktürler. Büyük mertebelerde ise hem tipik hem de sıradışı harmoniklerin büyüklükleri küçüktür.(Reeve, 1971)

2.4. Ark Kaynakları

Normal çalışmalarını ark ile sürdüren tesislerde ve cihazlarda önemli harmonikler oluşur. Ark, akım ile gerilim arasında doğrusal olmayan bir bağıntının bulunduğu fiziksel bir olaydır. Ark kaynaklarının ürettikleri akım harmoniklerini mertebe ve değer bakımından hesap etmeye imkan yoktur, çünkü arkın meydana gelişi, o anda etkili olan birçok ansal iç ve dış tesirlere bağlıdır. Bu nedenle, ark akımında her mertebeden harmonik bulunduğu gibi, bunların değerleri zamana bağlı olarak değişebilir.(Bayram, 1985)

Başlıca ark kaynakları şunlardır:(Dugan, 1987)

- Ark fırınları
- Floresan lambalar
- Sodyum veya civa buharlı lambalar

Ark fırınlarının aktif direnci sabit değildir. Bir yarı periyodun başlangıcında direnç büyüktür. Bundan sonra en düşük bir değere düşer ve yarı periyodun sonuna doğru tekrar yükselir. Bu yüzden, akım tam sinüs biçiminde değildir ve birçok harmonikler içerir. Ergitme safhasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda eridikten sonra, yani ark sakinleşince harmonikler azalır. Tablo 2.2’de ark fırınlarında görülen ortalama harmonik değerleri verilmiştir.

Yukarıdaki açıklamadan anlaşıldığı gibi, ark fırını bir harmonik generatörü gibi tesir eder. Ark fırınına paralel bağlı devrelerde, şartların gerçekleşmesi halinde rezonans olayı oluşabilir. Ayrıca, şebekeye geçen harmonik akımları, diğer tüketicilerin bağlı bulunduğu barada harmonik gerilimleri meydana getirirler.(Bayram, 1983)

Aydınlatma amaçlı floresan lambalar ve sodyum veya civa buharlı lambalar önemli harmonik üreticilerdir. Bu lambalar, ark fırınına göre daha iyi bir davranışa sahip olmalarına rağmen, benzer harmonik akımları üretirler.(Dugan, 1987)

Tablo 2.2. Ortalama harmonik değerleri

| <u>Harmonikler</u> | <u>Ortalama genlik (%)</u> |
|--------------------|----------------------------|
| 2 | 4 - 9 |
| 3 | 6 - 10 |
| 4 | 2 - 6 |
| 5 | 2 - 10 |
| 6 | 2 - 3 |
| 7 | 3 - 6 |
| 9 | 2 - 5 |

2.5. Statik VAR Kompanzatorleri

Tristör kontrollü reaktör(TKR), ark fırınlı güç dağıtım sistemlerinde bir şönt kompanzator olarak veya değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Gerilim seviyelerini korumak, gerilim flikerini azaltmak, güç faktörünü düzeltmek, faz dengesizliğini gidermek ve güç sistem kararlılığını sağlamak TKR'nin uygulama alanlarıdır.

Tipik bir TKR'nin güç devresi Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Güç kayıplarından dolayı sadece küçük bir faz bileşeni içeren reaktör akımı, gerilimden yaklaşık 90° geridedir. Tam iletim akımı sinüs biçimli olmakla birlikte, tristörlerin tetikleme gecikmesi akım genliğini azaltır ve dalga biçimini değiştirir. Her iki tristör için tetikleme açısı dengeli ise, kısmi iletim sonucu oluşan harmonik akımları tek sıralı olacaktır. Harmonik bileşenin etkin değeri,

$$I_n = \frac{4 V}{\pi X} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad (2.20)$$

eşitliğiyle verilir. Burada:

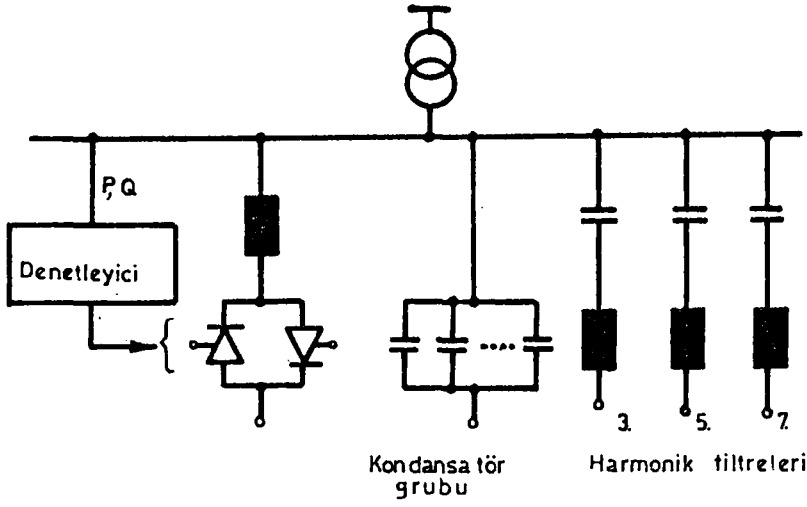
$$n = 3, 5, 7, \dots$$

V= Hatlararası temel gerilim

X= Herbir fazdaki reaktörlerin toplam endüktif reaktansı

α = Tetikleme açısı

Dengeli durumlar için 25. mertebeye kadar kadar olan harmoniklerin en büyük genlikleri Tablo 2.3'de verimiştir. Tam iletimde temel bileşen genliğinin yüzdesi olarak verilen değerler, faz ve hat akımlarının her ikisi için aynıdır. Parantez içindeki değerler üçlü harmoniklere aittir. Dengeli durumlarda üçlü harmonikler faz akımlarında görülecek, fakat hat akımlarında görülmeyecektir. Bununla birlikte, kararsız ark periyotları süresince etkin olan dengesiz durumların bulunduğu tipik bir ark fırın uygulamasında, hat akımlarında bazı üçlü harmonikler görülecektir. Faz akımlarının dengesiz olduğu durumda, hat akımlarında faz harmoniklerinin fazör toplamları olan özel harmonikler görülür.



Şekil 2.16. TKR ve sabit kondansatörlü bir kompanzasyon sistemi

Tablo 2.3. TKR'de harmonik akımlarının en büyük genlikleri

| Harmonik Mertebesi | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 |
|-------------------------|---------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| Harmonik Genliği (%) | (13.78) | 5.05 | 2.59 | (1.57) | 1.05 | 0.75 | (0.57) | 0.44 | 0.35 | (0.29) | 0.24 | 0.20 |

2.5. Döner Makinalar

Bir döner makinanın oluşturduğu harmonikler, stator ve rotorundaki olukların neden olduğu magnetik relüktanstaki değişimlerle ilişkilidir. Döner makinaların harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni, alan şekli ve ana devreler ile kaçak yollardaki doymadır. (Dugan, 1987)

Generatörler, bilinen en eski harmonik aynaklarından biridir. Senkron generatörlerde kutup başlarına, oluk sayısına ve sargıların oluklara sarılma şekline göre hava aralığındaki akı sinüs biçimli değildir. Dolayısıyla, sinüs biçiminde olmayan bu akının harmonik bileşenlerini aynı zamanda endüklenen emk da içerir. Kutup başları

boyunca hava aralığı relüktansındaki değişmeler ve akının değişik nedenlerle bozulması da harmoniklerin oluşmasına neden olur.

Generatörün harmonik üretimini azaltmak için sargılarda yıldız veya yıldız noktası yalıtılmış bağlantı tercih edilir, kutuplara uygun şekiller verilir ve oluklar yarı meyilli yapılır. Bunlar gibi ve diğer uygun yapım tedbirleri alınarak gerilim eğrisinin sinüs biçimine yakın olması sağlanır. Bundan dolayı, generatörler önemli harmonik üreticisi sayılmazlar(Bayram, 1985). Endüksiyon motorları da, benzer şekilde değişik yapım tedbirleri alındığından dolayı önemli harmonik üreticisi sayılmazlar.



BÖLÜM 3: HARMONİKLERİN ETKİLERİ

3.1. GİRİŞ

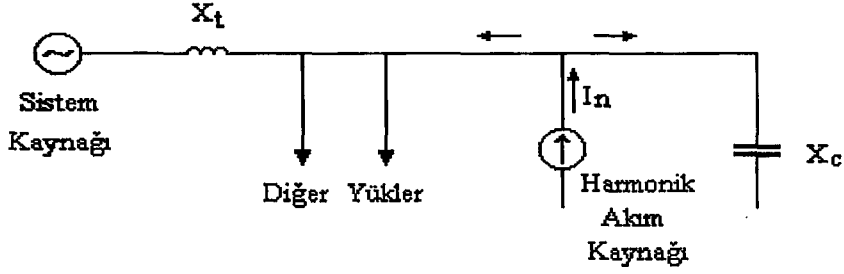
Harmonikler güç sistemindeki tüm elemanları etkilerler. Bunun sonucunda elemanların ısınmasına, yalıtımlarının zorlanmasına, bazı durumlarda zarar görmelerine ve devre dışı kalmalarına neden olurlar. Bazı elemanlar için değişik sonuçlar da mümkündür. Bu bölümde önce konu başlıkları altında gerekli ön bilgiler verilip, sonra harmoniklerin sistem elemanları üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

3.2. Harmonik Akımlarının Normal Akışı

Harmonik akımları, harmonik kaynağından en düşük empedansa doğru akma eğilimindedirler. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarının paralel eşdeğerlerinin toplamıdır. Genelde sistem kaynak empedansı, paralel bağlı yüklerin toplam empedansından(paralel eşdeğer toplam) çok daha düşüktür. Harmonik akımları çok büyük miktarı sistem kaynağına doğru akmak üzere, empedans oranlarına 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)

3.3. Gerilim ve Akım Harmonikleri Arasındaki İlişki:

Güç sisteminde gerilim harmonik bileşenler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenir. Harmonik içeren bir akım ise sadece harmonik akımı 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.



Şekil 3.1. Harmonik akımlarının normal akışı

Sistemin herhangi bir yerinde oluşan harmonik akımlarının her zaman sorunlara neden olacağı söylenemez. Güç sistemi herhangi bir önemli sorun oluşturmadan önemli miktarda harmonik akımı taşıyabilir. Bir sorunun ortaya çıkması için harmonikli akımın yüksek bir empedans yolunda veya iletişim devrelerinde akması gerekir.

Harmonik içeren bir akım, yüksek bir empedans yolunda veya 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, doğrusal 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 herikisi birden harmonik bileşenler içerebilir, fakat herikisi birden tam sinüs biçimli olamaz.

Sistem kaynağının 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)

3.4. Toplam Harmonik Distorsiyon(Bozulma)

Harmonik etkilerinin incelenmesinde, Toplam Harmonik Distorsiyon(THD) ölçüt olarak alınır. THD, gerilim ve akım için şöyle tanımlanır:

Gerilim için,

$$THD_V = \left[\sum_{n=2}^n U_n^2 / U_1^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

Akım için,

$$THD_I = \left[\sum_{n=2}^n I_n^2 / I_1^2 \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

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 frekanslarına bağlıdır.(Freund, 1988)

3.5. Harmonik Rezonansları

Bir güç sisteminde işletim durumunda harmoniklerin etkileri iki bakımdan incelenir:

1-Harmonik rezonans oluşma olasılığının incelenmesi

2-Çeşitli anahtarlama ve yük koşullarına göre, sistemin harmonik akım ve gerilim genliklerinin belirlenmesi

Bu durumda amaç, harmonik rezonanslarını önlemek ve harmonik akım ve gerilim genliklerini mümkün olduğu kadar azaltmaktır.

Bilindiği gibi, endüktif reaktans frekans ile doğru orantılı olarak artmasına rağmen, kapasitif reaktans frekans ile ters orantılı olarak azalır. Herhangi bir endüktans-kapasite (LC) devresinde, rezonans frekansında endüktif reaktans kapasitif reaktansa eşit olur. Yani,

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \quad (3.3)$$

ve rezonans frekansı,

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

olur. Güç sistemine güç faktörünü düzeltmek için kondansatörler eklendiğinde, seri veya paralel rezonans oluşabilir. Rezonans durumlarında aşırı akım ve gerilimler ortaya çıkar. Sistem rezonansı, harmonik frekanslarından birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkacaktır. Böylece, rezonansın oluştuğu harmonik mertebesi,

$$n = \frac{1}{2\pi f_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad (3.5)$$

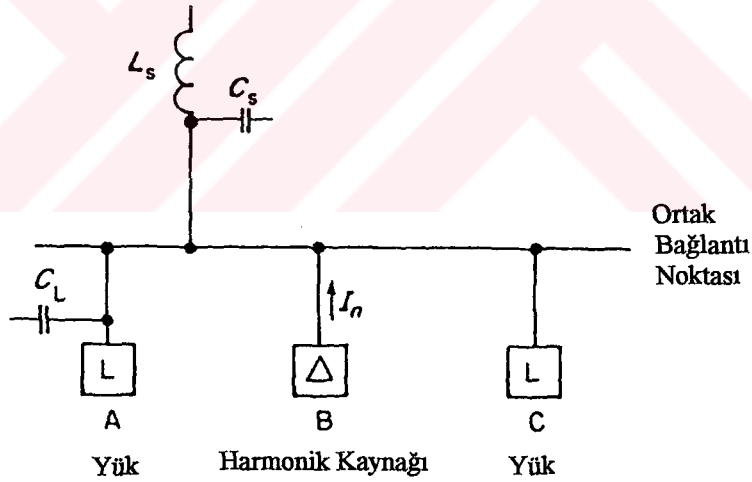
olur.(Shipp, 1979) (Bayram, 1985)

Sistemdeki rezonans durumları, harmonik seviyelerini etkileyen çok önemli etkenlerdir. Seri rezonans harmonik akım akışı için düşük bir empedans göstermesine rağmen, paralel rezonans yüksek empedans gösterir. Rezonans durumları bir sorun oluşturmadığında, sistem önemli seviyelerdeki harmonik akımlarını taşıyabilir. Ancak, bu

harmonik akımlar, önemli gerilim bozulmasına ve akım büyümesine neden olan paralel rezonans yüksek empedans görürler. Bu nedenle, sistemin cevap karakteristiklerini analiz etmek ve sistem rezonans sorunlarını gidermek çok önemlidir.(IEEE Ind. Ap. Soc., 1992)

3.5.1. Paralel Rezonans

Paralel rezonans olayı en çok karşılaşılan problemlerden biridir. Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinin yakınında, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Bu durum, o civarda endüktans ile kapasite arasında gidip gelerek büyüyen bir akıma neden olur. Bu yüksek salınım akımı, dağıtım ve telefon devrelerinde gerilim bozulmasına ve telefon parazitlerine neden olabilir(IEEE Ind.Ap. Soc.1992). Şekil 3.2’de bir paralel rezonans devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Ortak bağlantı noktasında paralel rezonans oluşumu

Kaynağın tamamen endüktif olduğu kabul edilerek, rezonans frekansı,

$$f_p = f_1 \sqrt{\frac{S_K}{S_C}} \quad (3.6)$$

olarak ifade edilir. Burada:

f_p = Paralel rezonans frekansı

f_1 = Temel frekans

S_K = Kaynağın kısa devre gücü[VA]

S_C = Kondansatörün anma gücü[VAr]

Sistem gözönüne alındığında, ileri bir zamanda paralel rezonans oluşabilir. Sistem endüktansı(L_S) ile sistem kapasitesi(C_S) yada yük kapasitesi(C_L) arasında oluşabilecek rezonans durumunda, B tüketicisinden gelen harmonik akım, barada yüksek bir empedansla karşılaşır.

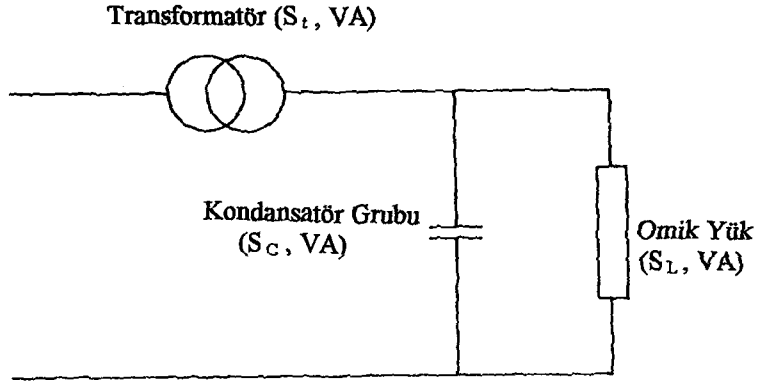
Varolan rezonans durumlarını belirlemek için, baradaki harmonik gerilim ile birlikte, herbir tüketici yük ve kaynakların harmonik akımlarını ölçmek gerekir. Genelde, harmonik gerilimi yüksek bir değerdeyken baradan sisteme doğru küçük bir akım akıyorsa, sistem içerisindeki rezonansa işaret eder. Buna karşılık, tüketici A yüküne doğru akan ve barada harmonik gerilimlerine neden olan yüksek bir harmonik akım, sistem endüktansı ve yük kondansatörü arasındaki rezonansı belirtir.

Paralel rezonansda yüksek bir empedans gören harmonik akımları, harmonik gerilimlerine neden olurlar. Bu gerilim harmonikleri, kondansatör gruplarında ve sistem reaktansında yüksek harmonik akımlarına neden olur. Böylece, paralel rezonans harmonik akımlarını daha da büyütmüş olur.(Arrilliaga et al, 1985)

3.5.2. Seri Rezonans

Seri rezonans, hat veya transformatör reaktansları ile kondansatörlerin oluşturduğu seri devrenin bir sonucudur. Şebekedeki bir harmonik kaynağının ürettiği herhangi bir harmonik akım frekansı, bu seri devrede rezonans koşulu sağlayabilir.

Şekil 3.3'de gösterilen devre göz önüne alındığında, daha yüksek frekanslarda kapasitif reaktans ihmal edilebilir.



Şekil 3.3. Seri rezonans devresi

Bu koşullar altında,

$$f_s = f_1 \sqrt{\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_L^2}{S_c^2}} \quad (3.7)$$

eşitliği sağlandığı zaman, bir seri rezonans koşulu oluşacaktır. (Arrillaga et al, 1985)

Burada:

f_s = Seri rezonans frekansı

S_t = Transformatörün anma gücü

Z_t = Transformatörün birim empedansı

S_L = Omik yükün gücü

Seri rezonans, rezonans frekansı ile uyuşan harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağlar. Böylece, harmonik akımlarında bir büyüme söz konusu değildir. Ancak, harmonik akımları şebekenin istenmeyen bölümlerinde akabilirler. Bunun sonucunda iki tür sorun ortaya çıkabilir:

1- Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler varsa, önemli ölçüde parazitler oluşabilir.

2- Rezonans kolundaki harmonik akımlarının yoğunluğu nedeniyle, kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir.

Yük, rezonans koşullarının oluşturduğu harmoniklerin zayıflamasında temel bir etkidir. Sistemdeki yüklerin seviyesi arttıkça akım daha düşük empedans yollarından akacaktır. Bu nedenle, harmonik artışı zayıflar. Birçok endüstriyel sistemlerde olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde veya yüklerin tümünü motorlar oluşturuyorsa, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlıdır.(Gonzales, 1987)

3.6. Transformatörler Üzerindeki Etkiler

Harmonikler transformatörlere iki şekilde etki ederler. 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 olur.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'dir.(Freund, 1988)

Ayrıca, transformatörlerin bağlama şekillerine göre harmoniklerin etkileri önceki bölümde belirtilmiştir(Bkz. Konu 2.2).

3.7. Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler

Harmonik akım ve gerilimlerinin döner makinalar üzerindeki önemli etkisi, harmonik frekanslarındaki demir ve bakır kayıplarının artması nedeniyle ısınmadaki artıştır. Ayrıca, harmonik bileşenler makina verimine ve momentine de etki ederler. (Freund, 1988)

Bir dönüştürücü tarafından üretilen sinüs biçimli olmayan bir gerilim, stator sargısında endüklendiğinde bir sirkülasyon harmonik akımı meydana gelir. Harmonik akımının genliği stator sargı şekline(örneğin 3-faz veya 6-faz), harmonik reaktanslara ve rotor bastırma etkisine göre değişir. 5., 7. ve 11. gibi harmonik gerilimlerinin herbiri, stator sargısında karşılık gelen bir harmonik akım üretecektir. Bu harmonik mertebelerinin herbiri, simetrik bileşenler teorisine göre doğru veya ters sıralı olarak belirtilebilir. Bu akımlar, stator sargısında ek ısınmaya neden olurlar.

Statordaki herbir harmonik akım akışı, hava aralığında harmonik magnetomotor kuvvetlerinin(MMK) bir serisini oluşturur. MMK, rotorda harmonik akımlarının akışını sağlar. Herbir harmonik akım doğru veya ters sıralı bileşen olarak ifade edildiğinde, hava aralığı harmoniği MMK'nin dönüşü rotor dönüşüne göre ya ileri yada geri olacaktır (Hanna,1989). Tablo 3.1, altı darbeleri bir dönüştürücüyle bağlantı durumunda harmonik sıra karakteristiklerini ve stator ve rotor harmoniklerini verir.

Tablo 3.1. Stator ve rotor harmonikleri

| Harmonik Mertebesi | Simetrik Bileşen | Stator Harmoniği | Harmonik Dönüş yönü | Rotor Harmoniği |
|-----------------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| 1 (Temel) | + | 1 (Temel) | İleri | --- |
| 5 | - | 5 | Geri | 6 |
| 7 | + | 7 | İleri | 6 |
| 11 | - | 11 | Geri | 12 |
| 13 | + | 13 | İleri | 12 |
| 17 | - | 17 | Geri | 18 |
| 19 | + | 19 | İleri | 18 |
| 23 | - | 23 | Geri | 24 |
| 25 | + | 25 | İleri | 24 |

Rotor harmoniklerinin iki tür etkisi olabilir:

1- Bileşke rotor ısınması

2-Salınım momentleri

Üç fazlı bir endüksiyon motorunda, harmonik akımlarının oluşturduğu akı yoğunluğu dalgaları arasındaki etkileşim gürültüye neden olabilir. Ayrıca, harmoniklerin hava aralığında bileşke akı üretmesi sonucu oluşan harmonik momentler nedeniyle, motor kalkış yapamayabilir veya senkronaltı hızlarda çalışabilir.(IEEE Ind.Ap.Soc.,1992)

Çeşitli harmonik çiftleri(5. ve 7. gibi), türbin-generatör gruplarında veya bir motor-yük sisteminde mekanik salınımlara neden olurlar. Harmonik akımlarının ve temel bileşenin magnetik alanları arasındaki etkileşimin neden olduğu salınım momentleri bir mekanik rezonans frekansına uyduğu zaman mekanik salınımlar oluşur. Mekanik salınım frekansı elektriksel frekansa yakın olursa, yüksek zorlamalı mekanik kuvvetler oluşabilir.

Standartlar motorlar için kesin akım ve gerilim harmonik sınırlamaları vermemiştir. Endüksiyon motorları için %5'lik bir gerilim harmoniği sınırlaması kabul edilebilir.(Freund, 1988)

3.8. Kablolarda ve İletim Hatlarında Etkileri

Bir iletkende sinüs biçimli olmayan bir akım akışı, deri olayı(skin effect) ve yakınlık etkisi(proximity effect) olaylarından dolayı, dalga şeklinin etkin değeri için tahmin edilenin üstünde bir ek ısınmaya neden olacaktır. Söz konusu heriki olay, iletken boyutu ve aralığı ile değiştiği gibi, frekansın da bir fonksiyonu olarak değişir.

Bu iki etkinin sonucu olarak, özellikle büyük boyutlu iletkenler için etkin alternatif akım direnci R_{AC} , doğru akım direnci R_{DC} 'den daha büyük bir değere sahip olur. Bir kabloda yüksek frekanslı harmonikler içeren akım aktığında, kablo için eşdeğer R_{AC} , I^2R kaybının artmasıyla daha da yükselir.

Harmonikli akım akışı sonucu iletim hatlarında ek $I_n^2 R_n$ kayıplarının oluşması yanısıra, aynı zamanda $I_n Z_n$ harmonik gerilim düşümleri oluşur.(Rice, 1986)

3.9. Kondansatörler 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)

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

$$X_{cn} = X_c / n \quad (3.8)$$

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,

$$I_n = n \omega C U_n \quad (3.9)$$

ve gücü,

$$Q_n = n \omega C U_n = I_n^2 / n \omega C \quad (3.10)$$

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

$$U_c = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (3.11)$$

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

$$I_c = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3.12)$$

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)

Gerilim bozulması durumunda kondansatörlerde oluşan ek kayıplar,

$$\text{Ek kayıplar} = \sum_{n=2}^n C(\tan\delta)_n \omega_n V_n^2 \quad (3.13)$$

olarak ifade edilir(Arrilliaga et al,1985). Burada:

$(\tan\delta)_n$ = Kayıp faktörü

$\omega_n = 2\pi f_n$

V_n = n. harmoniğin etkin genliği

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

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (3.14)$$

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

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

Anma etkin gerilimi : %10 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.

Daha önce açıklandığı gibi, genelde tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucu oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörlerde ısınmayı ve gerilim zorlamalarını artırarak ömürlerini kısaltırlar.(Freund, 1988)

3.10. 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, gerilimin 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 karşı 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 kontrolleriyle ilgili parazitler

3.11. Anahtarlama Elemanları ve Koruma Röleleri Üzerindeki Etkiler

Harmonik akımları anahtar elemanında ısınmayı ve kayıpları artırarak, anahtarın akım kesme yeteneğini etkileyebilir. Etkili harmonikler nedeniyle söndürüm bobinlerinin

düzensiz çalışması sonucu devre kesicileri akımı kesemezler. Sönüm bobini düzensiz çalışırsa, arkin uzamasına ve kesicinin görevini yerine getirememesine neden olur. Aynı zamanda, harmonik akımları sigortaların minimum erime zamanlarını azaltarak, akım-zaman karakteristiklerinde değişmelere ve dolayısıyla istenmeyen çalışma durumlarına neden olabilirler.

Tepe gerilimine, akım veya gerilim sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik bozulmadan olumsuz yönde etkilenirler. Harmoniklerin rölelerin çalışmalarına etkileri şunlardır:(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.

-Değişik 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.

3.12. Ölçme Cihazları Üzerindeki Etkiler

Özellikle rezonans olayları sonucu oluşan yüksek harmonik akımları ve gerilimleri, ölçme ve enstrmantasyonu da etkiler. Elektrik saatleri gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel bileşen akımı görürler. Diskte oluşan moment, akının ve diskte endüklenen eddy akımının çarpımına eşittir. Herikisi 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)

3.13. 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 parazitleri şunlardır:(Joseph et al, 1990)

- 1- Endüklenen hat gürültüsü
- 2- Güç hat taşıyıcı sistemleri vasıtasıyla oluşan parazitler
- 3- Röle arızaları

Bu konuyla ilgili olarak Telefon Etkileşim(Influence) faktörü(TIF) tanımlanmıştır. TIF, bir dalga şeklinin(genliğinin değil) göstergesi olan boyutsuz bir büyüklüktür ve aşağıdaki ifade ile verilir:

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum (I_f W_f)^2}}{X_t} \quad (3.15)$$

veya eşdeğer olarak,

$$TIF = \sqrt{\sum \left[\frac{(X_f W_f)}{X_t} \right]^2} \quad (3.16)$$

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:

$$W_f = 5 P_f f \quad (3.17)$$

Burada:

$P_f = f$ frekansındaki C mesaj ağırlığı

$f =$ Dikkate alınan frekans

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

3.14. Harmonik Bozulmanın Güç Faktörüne Etkisi

Güç faktörü(g.f.), güç tüketiminin karakter değerinin bir görünüşünü sunar. G.f.'nün düşük değeri, yükün gereken kaynak-güç kapasitesinden yetersiz faydalandığını gösterir. Gerilim dalga şekli sinüs biçimli ise g.f.'i aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$g.f. = (V_1 I_1 \cos \phi_1 / V_1 I_{rms}) = (I_1 / I_{rms}) \cos \phi_1 = \mu \cos \phi_1 \quad (3.18)$$

Burada, $\cos \phi_1$ gerilim ve akımın temel bileşenleri arasındaki yer eğiştirme faktörü ve μ bir akım bozulma faktörüdür. $\cos \phi_1$ değeri 1'den büyük olamayacağı için birim güç faktörü sadece $\mu=1$ olduğunda sağlanır.

Güç faktörü kompanzasyonu, bozulmuş balga şekilleriyle doğrudan ilişkili değildir. Kayıpsız elemanlar, genel olarak en uygun g.f.'nü doğrudan veren görünen gücün g.f. kompanzasyonu minimizasyonu için kullanılırlar.

G.f. düzeltilmesi için görünen gücün bir bileşeni, uluslararası bir komite tarafından reaktif güç olarak adlandırılmış ve bu güç,

$$Q = \sum_1^n V_n I_n \sin \theta_n = \frac{1}{2\pi} \sum_1^n \frac{1}{n} \int_0^T V_n di_n \quad (3.19)$$

ifadesiyle açıklanmıştır. Bu ifadenin fiziksel bir anlamı olmamasına rağmen, esas olarak iki durumdan dolayı kabul edilmiştir:

1-Doğrusal sistemlerde bu eşitliğin korunum özelliğinin olması.

2-Genel bir doğrusal olmayan sistemde görünen gücün aşağıdaki gibi ifade edilebilmesinin mümkün olması:

$$S = (P^2 + Q^2 + D^2)^{1/2} \quad (3.20)$$

Burada P ortalama güç ve D, bozulma(distorsiyon) gücü olarak adlandırılan ek bir bileşendir.(Arriliaga et al 1985)

3.15. Küçük Güçlü Tüketiciler Üzerindeki Etkiler

Bu etkiler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1-Tepe gerilimine etki eden harmonikler, TV görüntü kalitesini bozabilir.

2-Floresan veya civa buharlı lambalarda, balastların ve devrenin endüktansı ile kondansatörler bir rezonans devresi oluştururlar. Bir harmonik frekansında rezonans oluştuğunda aşırı ısınma ve arızalar oluşabilir.

3-Bilgisayarlar harmoniklere karşı çok duyarlıdır. Çeşitli üretici firmalar tarafından harmonikler için sınırlar konmuştur.

4-Tristör kontrollü hız kontrol cihazlarının kullanıldığı tüketiciler üzerinde harmoniklerin birtakım olumsuz etkileri olabilir. Örneğin, tristör tetikleme gecikmeleri, hatalı çalışma v.b. sayılabilir.(Arriliaga et al, 1985)

3.16. Harmonikler ve Simetrik Bileşenler

Sistem ve harmonik üreten yük dengeli ve temel frekans değeri doğru sırada ise harmonikler, Tablo 3.2'de gösterilen sırayı periyodik olarak izleyen simetrik bileşenleri oluştururlar.

Tablo 3.2. Harmoniklerin simetrik bileşenlere göre sıraları

| Mertebe | Sıra |
|-----------|------|
| 1 (Temel) | + |
| 2 | - |
| 3 | 0 |
| 4 | + |
| 5 | - |
| 6 | 0 |
| 7 | + |
| 8 | - |
| 9 | 0 |
| ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ |

Dengeli durumda tüm üçlü harmonikler sıfır sıradadırlar. Tek sayılı üçlü harmonikler güç sistemlerinde çok yaygın olarak bulunurlar. Bu harmonikler genellikle nötr hattı veya toprak hattı olan artık akım yollarında akarlar ve güç sisteminde diğer harmoniklere göre daha büyük sorunlara yol açarlar. Artık akım yollarının empedansı genellikle büyük olduğundan önemli miktarda gerilim harmonikleri ortaya çıkar. Ayrıca, artık akım yollarının iletişim hatları ile bağlantısı olduğunda, iletişim prazitleri meydana gelir.

Önceden belirtildiği gibi(Bkz.Konu 2.2) üçlü harmonikleri önlemenin yollarından en yaygın olanı transformatörlerde üçgen bağlama yapılmasıdır. Üçgen bağlantı, sıfır sıra harmoniklerinin kontrol edilmesinde genelde çok etkili olup, doğrusal olmayan yüklerden güç sistemine doğru akan sıfır sıra akımları üçgen bağlantı tarafından engellenebilir.(Meliopoulos, 1986)

3.17. Harmonik Standartları

Güç sistem harmoniklerine ilişkin tüm standartlar aşağıdaki amaçları içerir:

a) Sistem elemanlarının toleranslarına göre, güç sistem akım ve gerilim dalga şekilleri bozulmalarını sınırlamak.

b) Sisteme bağlı tüketiciler için uygun bir besleme gerilim dalga şekli sağlamak.

c) Güç sisteminin diğer sistemlerin (telefon şebekesi gibi) çalışması ile girişimine engel olmak.

Gerilim harmonikleri sistemdeki tüm yükleri etkilediğinden ve harmonik akımlarının etkisi özel sistem karakteristiklerine bağlı olduğundan, gerilim harmonikleri için standart sınırlamalar belirlemek daha kolaydır.

IEEE Standart 519-1981'e göre gerilim bozulma sınırlamaları Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Gerilim Bozulma Sınırları

| Güç Sistemi Gerilim Seviyesi | Özel Sistem THD _v (%) | Genel Sistem THD _i (%) |
|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 460 V | 10 | 5 |
| 2.4 - 6.9 kV | 8 | 5 |
| 115 kV ve yukarısı | 1.5 | 1.5 |

Güç sistemlerinde harmonik kaynaklarının önemli sayıda artması sonucu, çeşitli ülkeler harmonik bozulma için standartlar oluşturmuşlardır. Bazı ülkeler için harmonik bozulma standartları Tablo 3.4'de verilmiştir. (Arrillaga et al, 1985)

Tablo 3.4 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

| Ülkeler | Gerilim | THD _v | THD _i | V _n / V ₁ | V _n / V ₁ | I _n / I ₁ |
|--------------------|--------------|------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | Tek | Çift | | | |
| Avustralya | Dağıtım 33 | 5.0 | | 4.0 | 2.0 | |
| | İletim 33-66 | 3.0 | | 2.0 | 1.0 | |
| | 110 | 1.5 | | 1.0 | 0.5 | |
| Kanada | 12 | 7.0 | 12.0 | 3.0 | 1.0 | 8.0 |
| | 12-44 | 6.0 | 10.0 | 1.5 | 1.0 | 6.0 |
| | 155 | 4.0 | 8.0 | 1.0 | 1.0 | 4.0 |
| İngiltere | 415 | 5.0 | | 4.0 | 2.0 | |
| | 6.6-11 | 4.0 | | 3.0 | 1.75 | |
| | 33-66 | 3.0 | | 2.0 | 1.0 | |
| | 132 | 1.0 | | 1.0 | 0.5 | |
| Amerika (b) (c) | 2.4-66 | 8.0 | | | | |
| | > 115 | 1.5 | | | | |
| | 2.4-66 | 5.0 | | | | |
| | > 115 | 1.5 | | | | |
| Fransa | (a) | 1.6 | | 1.0 | 0.6 | |
| Türkiye | (a) (*) | 1.6 | | 1.0 | 0.6 | |
| Almanya | (d) | 3.0 | | | 5.0 | |

Bu tabloda:

(a) Tüm gerilimler, (b) Özel sistem, (c) Genel sistem, (d) Harmonik mertebesi <15

(*)Kesin değerler olmayıp, TEK tarafından harmonik sınırlamalarıyla ilgili çalışmalar sürmektedir.

BÖLÜM 4: MODELLEME VE SİMÜLASYON

4.1. GİRİŞ

Güç sistemlerinde harmonikleri belirlemek ve değerlerini hesaplamak için, harmoniklere neden olan doğrusal olmayan yüklerin harmonik bağımlı modellenmesi ve sistem simülasyonunun yapılması gerekir. Ayrıca, güç sistemine bağlı olan şebeke elemanları da karakteristik değerleri dikkate alınarak harmonik bağımlı modellenmelidir. Kurulacak sistem modeli gerçek sistemin özelliklerini sağlayacak şekilde olmalıdır.

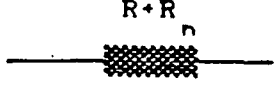


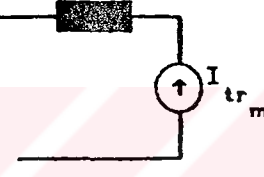

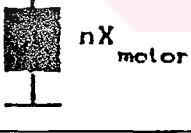
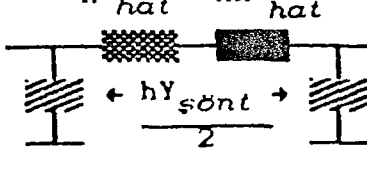
Simülasyon çalışmalarında frekans ve zaman domeni modellenmesi olmak üzere iki şekilde modelleme yapılabilir. Doğrusal olmayan ve zamanla değişen yükleri zaman domenindeki analiz teknikleri ile modellemek gerekir. Harmonik akım genliklerini ve faz açılarını belirlemek için FFT hesaplama yöntemi uygulanır. Frekans domenindeki modelleme, sistem elemanlarının temel frekansın bir fonksiyonu olarak modellenmesini ve eleman karakteristiklerindeki değişimlerin harmonik mertebelerine bağımlı olmasını gerektirir. Dengeli sistemlerde tek faz modelleme, dengesiz sistemlerde ise üç faz modelleme kullanılır.

4.2. Sistem Elemanlarının Modellenmesi

Harmonik üreten kaynaklarda zaman veya frekans domeni modellenmesi yaparken, sistem elemanlarını oluşturan direnç, kapasite ve endüktans değerlerinin sabit olduğu düşünülmektedir. Sistem elemanlarının empedans değerleri admitans değerlerine dönüştürülerek Y_{BARA} matrisi oluşturulur. Dengeli bir sistem modellenmesinde, bulunan Y_{BARA} matris admitansları doğru bileşen değerleridir. Dengesiz bir sistemde ise, simetrik bileşenler kullanılarak modelleme yapılır.

Tablo 4.1'de sistem elemanlarının frekans domenindeki harmonik bağımlı modelleri, Tablo 4.2'de ise parametrelerin temel bileşen ve harmonik karşılıkları verilmiştir.

Tablo 4.1. Sistem elemanlarının frekans domeninde harmonik bağımlı modelleri

| ELEMANLAR | HARMONİK BAĞIMLI MODEL |
|-------------------------------------|--|
| DİRENÇLER | $R + R_n$  |
| ENDÜKTANSLAR | nX_{ind}  |
| KONDANSATÖRLER | nY_{kap}  |
| TRANSFORMATÖRLER (Doymalı durum) | X_{tr}  |
| TRANSFORMATÖRLER (Seri Model) | nX_{tr}  |
| MOTORLAR | nX_{motor}  |
| İLETİM HATLARI | R_{hat} nX_{hat} $hY_{şönt}$ $\frac{2}{2}$  |

Tablo 4.2. Parametrelerin frekans modelinde gösterilişi

| <u>Parametre</u> | <u>Temel bileşen</u> | <u>Harmonik</u> |
|------------------|--|--|
| ω | $2\pi f$ | — |
| ω_n | $n2\pi f$ | $n\omega$ |
| X_{end} | ωL_{end} | nX_{end} |
| Y_{end} | $(X_{end})^{-1}$ | $(nX_{end})^{-1}$ |
| X_{motor} | ωL_{motor} | nX_{motor} |
| Y_{motor} | $(X_{motor})^{-1}$ | $n(X_{motor})^{-1}$ |
| X_{tr} | ωL_{tr} | nX_{tr} |
| Y_{tr} | $(X_{tr})^{-1}$ | $(nX_{tr})^{-1}$ |
| X_{hat} | ωL_{hat} | nX_{hat} |
| Y_{hat} | $(X_{hat})^{-1}$ | $(nX_{hat})^{-1}$ |
| X_{kap} | $(\omega C_{kap})^{-1}$ | $(n\omega C_{kap})^{-1}$ |
| Y_{kap} | ωC_{kap} | nY_{kap} |
| $Y_{şönt}$ | ωC_{hat} | $nY_{şönt}$ |
| X_f | $\left[\omega L_f - \frac{1}{\omega C_f} \right]$ | $\left[n\omega L_f - \frac{1}{n\omega C_f} \right]$ |
| Y_f | $(X_f)^{-1}$ | $\frac{n\omega C_f}{n^2 \omega^2 L_f C_f - 1}$ |

4.3. Y_{BARA} Matrisi Oluşturma

Admitans değerlerine göre yazılan Y_{BARA} matrisi kompleks ve simetriktr. Ayrıca, matris birçok sıfırlı bileşen içerdiğinde seyrek olur. Seyreklik yüzdesi matris boyutu ile artar.

Y_{BARA} admitans matrisinin elemanlarını yazacak olursak,

Y_{ii} = Matrisin köşegeni üzerinde bulunan ve i. düğüme bağlı olan admitansların toplamıdır.

Y_{ij} = Matrisin köşegeni dışında bulunan ve i. ve j. düğümler arasındaki admitanslar toplamının ters işaretlisidir.

Dengeli durum modellemesinde, bara admitans matrisi yalnızca şebekenin doğru sıra bileşenlerinden oluşur. + indisi doğru sıra, - indisi ters sıra ve 0 indisi sıfır sıra bileşelerini gösterir. Buna göre, dengeli durum için Y_{BARA} matrisi aşağıdaki gibi verilir:

$$[Y_{BARA}] = \begin{bmatrix} Y_{+11} & Y_{+12} & \dots & Y_{+1m} \\ Y_{+21} & Y_{+22} & \dots & Y_{+2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{+m1} & \dots & \dots & Y_{+mm} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Burada,

$$Y_{ii} = \sum_{k=1}^m [Y_{P_{ik}} + Y_{S_{ik}}] \quad (4.2)$$

$$Y_{ik} = Y_{ki} = -Y_{S_{ik}} \quad (4.3)$$

ifadelerine eşit olur. i. ve k. düğümler arasındaki seri admitansların toplamı aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$\overline{Y_{S_{ik}}} = \frac{1}{Z_{S_{ik}}} = \frac{1}{R_{S_{ik}} + jX_{S_{ik}}} = \frac{R_{S_{ik}} - jX_{S_{ik}}}{R_{S_{ik}}^2 + X_{S_{ik}}^2} \quad (4.4)$$

Bu eşitliği harmonikleri içerecek şekilde yazacak olursak,

$$[\overline{Y_{S_{ik}}}]_n = \frac{[R_{S_{ik}}]_n - j[X_{S_{ik}}]_n}{[R_{S_{ik}}]_n^2 + [X_{S_{ik}}]_n^2} \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte:

$$R_{s_{ik_n}} = n \cdot \text{harmonik için sistemin i. ve k. düğümleri arasındaki seri direnci}$$

$$X_{s_{ik_n}} = nX_{s_{ik}} \quad (\text{reaktanslar için})$$

$$X_{s_{ik_n}} = \frac{X_{s_{ik}}}{n} \quad (\text{kapasitanslar için})$$

Benzer şekilde, şebekedeki paralel elemanlar için admitans değerleri aşağıdaki gibi olur:

$$\left[\overline{Y_{p_{ik}}} \right]_n = \frac{\left[R_{p_{ik}} \right]_n - j \left[X_{p_{ik}} \right]_n}{\left[R_{p_{ik}} \right]_n^2 + \left[X_{p_{ik}} \right]_n^2} \quad (4.6)$$

Dengesiz işletme durumlarında, Y_{BARA} matrisi yerine bu matrisin simetrik bileşen modelini temsil eden Y_{SYMBARA} matrisi kullanılır. Bu durumda matris, içindeki her elemanın doğru, ters ve sıfır sıra bileşenlerini içerecektir. Gerçek veriler uygun olmadığında, doğru ve ters sıra admitansları yaklaşık olarak birbirine eşit kabul edilir:

$$[Y_{\text{-BARA}}] = [Y_{\text{+BARA}}] \quad (4.7)$$

Simetrik bileşen matrisi aşağıdaki gibi verilir:

$$[Y_{\text{SYMBARA}}] = \begin{bmatrix} \left| \begin{array}{ccc} Y_{+11} & \phi & \phi \\ \phi & Y_{-11} & \phi \\ \phi & \phi & Y_{011} \end{array} \right| & \dots & \left| \begin{array}{ccc} Y_{+1m} & \phi & \phi \\ \phi & Y_{-1m} & \phi \\ \phi & \phi & Y_{01m} \end{array} \right| \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \left| \begin{array}{ccc} Y_{+m1} & \phi & \phi \\ \phi & Y_{-m1} & \phi \\ \phi & \phi & Y_{0m1} \end{array} \right| & \dots & \left| \begin{array}{ccc} Y_{+mm} & \phi & \phi \\ \phi & Y_{-mm} & \phi \\ \phi & \phi & Y_{0mm} \end{array} \right| \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Sonuç olarak, dengeli harmonik işletim çalışmaları için sistem pasif ve doğrusal kabul edilir. Harmonik üreticiler bu sisteme akım kaynağı olarak eklenir. Bileşke sistem harmonik gerilimleri admitans matris yöntemiyle bulunur. Böyle bir sistem için oluşturulan algoritma yalnızca kararlı durum için geçerlidir. Oysa, fiziksel bir sistemin harmonik davranışları değişebilir.

Dengesiz sistemde ise bilindiği gibi, Y_{BARA} matrisinin modellenmesi için tüm sıra bileşenlerinin değerleri gereklidir. Sistemde doğrusal olmayan yüklerin modellenmesi için durum değişkenleri analizi kullanılır.

$$[V_{BARA}]_n = [Y_{BARA}]_n^{-1} \cdot [I_{BARA}]_n \quad (4.9)$$

Yukarıdaki verilen eşitlik ile hem dengeli hem de dengesiz durum koşullarında analiz yapılabilir. Dengesiz sistem işletiminde simetrik bileşen ifadeleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$[V_{SYMBARA}]_n = [V_{+i} V_{-i} V_0 \dots V_{+k} V_{-k} V_{0k} \dots V_{+m} V_{-m} V_{0m}]^T \quad (4.10)$$

$$[I_{SYMBARA}]_n = [I_{+i} I_{-i} I_{0i} \dots I_{+k} I_{-k} I_{0k} \dots I_{+m} I_{-m} I_{0m}]^T \quad (4.11)$$

Güç sistemi bara gerilimlerindeki harmonikler, frekans domenindeki analiz sonucunda bulunur. Ancak, bu yöntemde doğrusal olmayan bir yük modellenirken gerilimin sinüs biçimli olduğu kabul edilir. Gerilimin sinüs biçimli olmaması durumunda doğrusal olmayan yükün davranışı durum değişkenleri yöntemiyle bulunur. (*) (Brown, 1990)

(*)Bu konuda daha ayrıntılı bilgi, 'Brown, P.J., 1990. Computerized Simulation and Measurement of Power System Harmonics, Ph.D. Thesis, İTÜ' kaynağında bulunmaktadır.

4.4. Harmoniklerin Ölçülmesi

Akım ve gerilim harmoniklerinin ölçümleri, elektrik enerjisinin güvenilir dağılımı için zorunludur. Aşağıdakiler bu ölçümlerin önemini vurgulayan birkaç nedendir:

1-Harmoniklerin varolan değerlerini gözlemle, tavsiye edilen ve kabuledilebilir seviyelere göre kontrol etme.

2-Harmonik üreten cihazların kontrolü.

3-Tüketici ve sistem kaynağı için kabul edilemez cihaz performansı hakkında durumların tespiti ve giderilmesi.

4-Varolan doğal seviyelerin gözlenmesi ve akım ve gerilim harmoniklerinin zaman değişimindeki eğilimin izlenmesi.

5-Harmonikli yük akışlarını içeren simülasyon çalışmalarının doğrulanması için ölçüm yapılması.

6-Faz açısına göre gerilim ve akım harmoniklerinin ölçülmesi. Böyle ölçümler doğrusal olmayan yükler bağılyken veya bağıly değilken yapılabilir ve belli bir yerde harmonik sürme noktası empedansının belirlenmesine yardımcı olabilir.

Harmonik ölçümleri için kullanılan teknikler, sıradan güç sistemleri ölçmelerinde farklılık gösterirler. Sıradan gerilim, akım güç ölçümlerinin frekans band genişliği, dağıtım frekansına yakın frekansların dar bir bandına yönelmek suretiyle gerçekleştirilebilir. Güç sistem harmoniklerinin incelenmesinde 3 kHz'e kadar çıkabilen daha geniş bant genişlikleri gereklidir.

4.4.1. Harmonik Analizi İçin Kullanılan Temel Cihazlar

1-Osiloskop: Dalga biçiminin osiloskoptaki görüntüsü, bozulmanın tipi ve derecesi hakkında anında sayısal bilgiler verir. Bazen, akım ve gerilim dalga biçimlerinde varolan görülebilir bozulma sayesinde rezonans durumları saptanabilir.

2-Spektrum Analizörü: Bu cihazlar bir işaretin güç dağılımını frekansın bir fonksiyonu olarak gösterirler. Belirli frekans aralıkları taranır ve analiz edilen işaretin

tüm bileşenleri, harmonikleri ve harmonik girişimleri ekranda gözlenir. Görüntü formatı CRT veya çizelge kaydedicisi olabilir.

3-Harmonik analizörü: Bu cihazlar periyodik bir fonksiyonun genliğini(daha çok faz açısı olarak) ölçerler ve gözlenen işaretin çizgisel spektrumunu sağlarlar. Çıkış kaydedilebilirveya analog/digital ölçü cihazı ile gözlenebilir.

4-Distrosiyon Analizörü: Bu cihazlar doğrudan THD'i gösterirler.

5-Digital Harmonik Ölçme Cihazı: Digital analiz iki temel teknikle gerçekleştirilebilir:

a)Digital filtre aracılığıyla: Bu yöntem analog filtrelemeye benzerdir. Çift kanal digital işaret analizörleri digital filtrelemeyi içerirler. Özel bir ölçümün kuruluşunda, ölçülecek frekans aralığı digital filtreyi bu aralık için kurar. Ayrıca, çok büyük bir temel bileşenin varlığında, küçük harmoniklerin yokolmasını optimize etmek için bant genişliği değiştirilir.

b)Hızlı Fourier Dönüşüm(FFT) Tekniği: Bu teknik, çok büyük sayıdaki fonksiyonların değerlendirilmesine olanak sağlayan spektrum analizini gerçekleştiren çok hızlı bir yöntemdir. Çok kanallı analog-digital dönüşüm ve mikro veya mini bilgisayarlar gerçek-zaman veri toplamada kullanılırlar.

Dalga biçimlei analog veya digital teknikler kullanarak uygun bant genişliği ile kaydedildiği zaman, harmonik bileşenlerin FFT hesabı, mühendislik birimlerine dönüştürme, istatistiklerin hesabı ve sonuçların çizilmesi ve çıktısının alınması uygun imkanlar kullanarak laboratuarlarda gerçekleştirilebilir.(IEEE Ind. Ap. Soc., 1992)

BÖLÜM 5: HARMONİKLERİN SÜZÜLMESİ

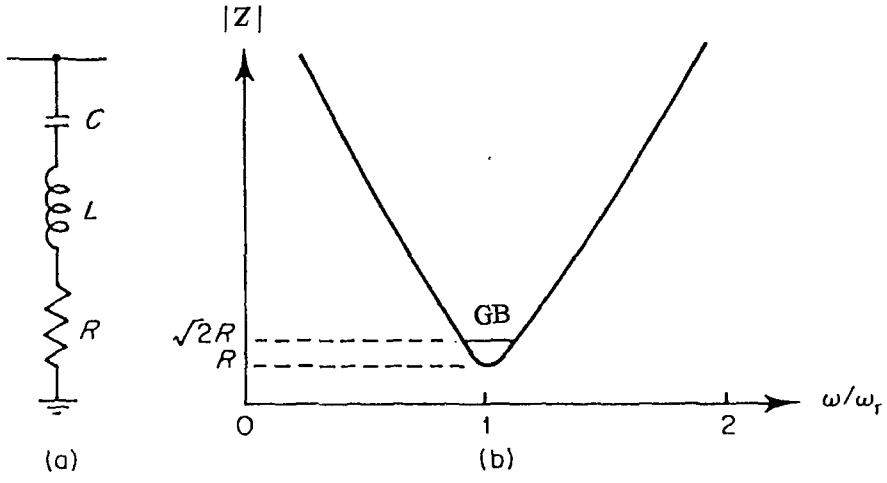
5.1. GİRİŞ

Harmonik filtrelerinin genel amacı, belirlenen frekanslardaki akım ve gerilimlerin etkisini azaltmaktır. Amaç, sadece özel bir harmoniğin güç sistemine veya güç sistem elemanlarına girmesini önlemek ise, seri filtre kullanmak mümkündür. Paralel endüktans ve kapasiteden oluşan seri filtre, harmonik frekansına karşı yüksek bir empedans gibi davranır. Bununla birlikte, bu çözüm, kaynaktan üretilen harmonikleri bastırmak için çok kullanılan bir yöntem değildir. Çünkü, doğrusal olmayan elemanların (örneğin, statik dönüştürücüler gibi) harmonik üretmeleri, normal çalışmalarının bir gereğidir. Aynı zamanda, seri filtreler tüm yük akımını taşımak zorundadırlar ve faz gerilimine göre tam olarak yalıtılmalıdırlar. Genelde, güç sistemlerinde harmonik frekanslı akımlara düşük empedanslı bir yol sağlayan paralel filtreler kullanılır. Paralel filtreler temel frekansta reaktif güç üretebilirler ve daha ekonomiktirler. En önemli özellikleri de tasarımlarının kolay olmasıdır.

A.a sistemin empedansına bakmaksızın harmonik akımları ve gerilimleri en aza indirmek için seri ve paralel filtre bileşimleri tasarlanabilir, fakat bu yöntem ekonomik değildir.

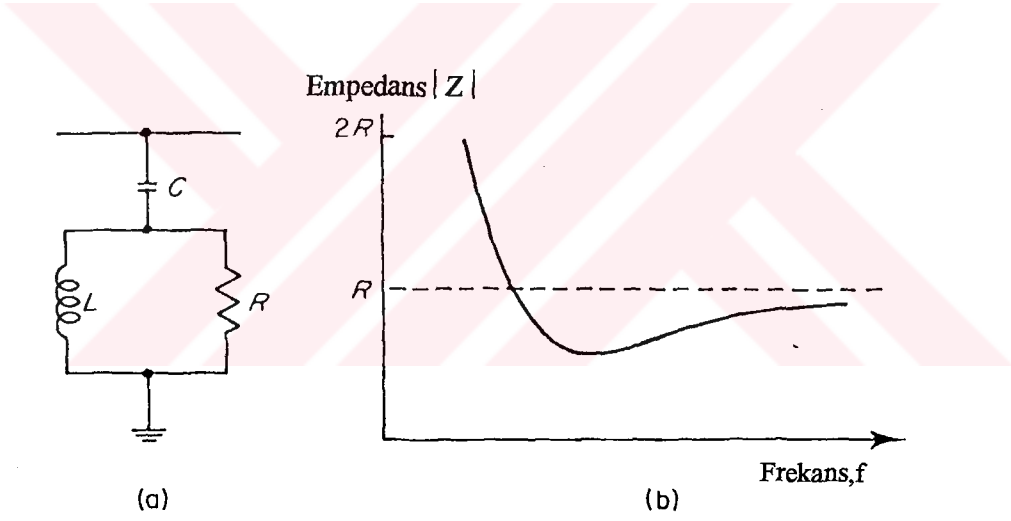
5.2. Harmonik Filtreleriyle İlgili Genel Tanımlar

Paralel filtreler, endüktif ve kapasitif reaktansları eşit kılan frekansa ayarlanabilir. Kalite faktörü Q , ayar keskinliğini belirler. Q faktörü bakımından filtreler ya yüksek Q yada düşük Q tipindedirler. Yüksek Q tipi filtrelerde Q değeri 30 ile 60, düşük Q tipi filtrelerde 0.5 ile 5 arasında değerler alır. Yüksek Q filtresi, düşük harmonik frekanslarından birine ayarlanır. Düşük Q filtresi ise, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir ve yüksek mertebeli harmonikleri süzmek için kullanıldığında yüksek geçiren filtre olarak da sunulur. Düşük ve yüksek Q tipi filtreler ve frekans-empedans değişimleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil.5.1.(a)Tek ayarlı filtre devresi

(b)Frekans-empedans değişimi



Şekil 5.2. (a)İkinci merteye sönümlü paralel filtre devresi

(b)Frekans-empedans değişimi

Ayarlı bir filtrede Q ifadesi,

$$Q = X_0 / R \quad (5.1)$$

olarak tanımlanır. Burada, X_0 rezonans frekansındaki reaktansı(kapasitenin veya endüktansın) ve R filtrenin direncini göstermektedir.

Şekil 5.1 (b)'de gösterildiği gibi, bant geçiren filtre, filtre reaktansının filtre direncine eşit olduğu frekanslar ile sınırlı olarak tanımlanır. Yani, empedans açısı 45° 'dir ve empedans modülü $\sqrt{2} R$ 'dir. Kalite faktörü ve geçiş bandı(GB) arasındaki ilişki,

$$Q = \omega_n / GB \quad (5.2)$$

olarak verilir. Burada, ω_n rad/s olarak ayarlanan açısal frekanstır.

Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde ayarın keskinliği, ayarlı filtrelelerinin tersidir. Yani,

$$Q = R / X_0 \quad (5.3)$$

Bir filtrenin anma ayar frekansından uzaklaşması, ayar sapma faktörü δ ile tanımlanmıştır:

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (5.4)$$

Bu faktör çeşitli etkileri içerir. Örneğin,

1-Temel frekanstaki değişimler

2-Yıpranma ve sıcaklığın neden olduğu filtre kapasite ve endüktansındaki değişimler

3-Ayarlama kademelerinin sınırlı olmasının ve yapım toleranslarının neden olduğu uygun olmayan ayarlama

Örneğin, L ve C'deki %2'lik bir değişim ile sistem frekansındaki %1'lik bir değişim, aynı ayar sapmasına neden olur. Buna göre, δ genelde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (5.5)$$

Aynı zamanda, bu faktörü temel frekans toleransı %TFT, kapasite ısı faktörü %KIF, bobin ısı faktörü %BIF ve ortam sıcaklığı bakımından ifade etmek mümkündür. Bu durumda ayar sapma faktörü,

$$\delta = \%TFT \left[1 + \frac{1}{2} (\%KIF.20 + \%BIF.20) \right] \quad (5.6)$$

olarak ifade edilir.

5.3. Filtre Tasarım Kriteri

Bir filtrenin büyüklüğü temel frekanstaki reaktif güç ile açıklanır. Bu güç, kapasiteler tarafından sağlanan temel reaktif güce eşittir. Bir filtrenin tüm kollarının toplam büyüklüğü, harmonik kaynağının reaktif güç gereksinimi ve a.a. şebeke tarafından karşılanan bu gereksinimin miktarı sayesinde hesaplanır.

Filtre tasarımının ideal kriteri, dalga şekli bozulmasının neden olduğu tüm zararlı etkilerin giderilmesidir. Ancak, filtrelemeyi aynı zamanda teknik ve ekonomik açıdan incelemek gerekir. Teknik açıdan incelersek, a.a. şebekenin tamamındaki harmonik dağılımı hakkında tahmin yürütme çok zordur. Ekonomik açıdan incelersek, örneğin, telefon sistemlerinde önleyici ölçmeler yapılarak telefon parazitlerinin azaltılması daha ekonomik olarak sağlanabilir.

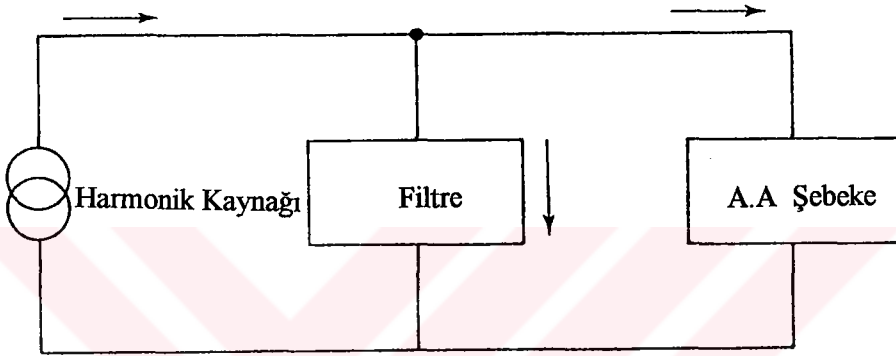
Daha pratik bir kriter, harmonik akım ve gerilimleri cinsinden ifade edilen sorunu, diğer tüketiciler ile ortak bağlantı noktasında kabul edilebilir bir seviyeye indirmektir. Şebeke empedans değişimlerinde uygun bir gerilim sınırı içinde kararlı kalmak daha kolay olduğundan, filtre tasarımı için harmonik gerilimlerine göre kurulan bir kriter daha uygundur.

Uygun bir filtre tasarımı aşağıdaki adımları gerektirir:

1-Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik akımların, paralel bağlı filtrelerin bağlı olduğu sisteme ilgili frekanslarda aktığı kabul edilir ve ilgili frekanslardaki harmonik gerilimler hesap edilir. Bununla ilgili devre şeması Şekil 5.3’de gösterilmiştir.

2-(1)’de bulunan sonuçlar gerilim distorsiyonu, telefon etkileşim faktörü(TIF) ve akım giriş faktörü($IT=IXTIF$) gibi faktörlerin hesaplanmasında kullanılır.

3-Filtre elemanları, yani kapasite, endüktans ve dirençler anma değerleri ve kayıplarıyla birlikte hesaplanır.



Şekil 5.3. Gerilim harmonik bozulmasının hesabı için devre şeması

Harmonik akım kaynağı, filtre admitansı ve ve sistem admitansının filtre tasarımında ayrıntılı olarak gözönüne alınması gerekir.

Ekonomik açıdan baktığımızda, düşük harmonik mertebeleri için genellikle tek ayarlı filtreler kullanılır. Tek ayarlı filtrelerde kullanılan kapasitenin büyük olacağı gözönüne alınarak, yüksek harmonik mertebeleri için yüksek geçiren filtreler kullanmak daha uygundur.

5.4. Ayarlı Filtreler

5.4.1. Tek Ayarlı Filtreler

Tek ayarlı bir filtre, tek bir harmonik frekansına(genellikle 5.,7.,11. ve 13.)ayarlı seri RLC devresidir(Bkz. Şekil 5.1).Bu filtrenin empedansı,

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5.7)$$

olarak verilir. Bu ifade, rezonans frekansında(f_n) R'e eşit olur. Filtre elemanlarının(R,L,C) seçiminde, iki temel tasarım parametresi olan kalite faktörü Q ve ayar sapma faktörü δ değerleri dikkate alınır. Filtre empedansını bu parametrelerle ifade etmek için aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$\omega = \omega_n (1 + \delta) \quad (5.8)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.9)$$

ω_n = Ayar açısal frekansı(rad/s)

$$X_o = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.10)$$

X_o = Rezonans frekansındaki reaktans(Ω)

$$Q = \frac{X_o}{R} \quad (5.11)$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_o} = \frac{1}{\omega_n R Q} \quad (5.12)$$

$$L = \frac{X_o}{\omega_n} = \frac{R Q}{\omega_n} \quad (5.13)$$

(5.11), (5.12) ve (5.13) eşitliklerini (5.7) eşitliğinde yerine yazarsak, yapılan işlemler sonucu,

$$Z_f \cong R(1 + j2\delta Q) \quad (5.14)$$

$$|Z_f| \cong R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{1/2} \quad (5.15)$$

olarak bulunur.

Filtre tasarımında empedanslar yerine admitanslar ile işlem yapmak daha uygundur. Buna göre admitans ifadesi,

$$Y_f \cong \frac{1}{R(1 + j2\delta Q)} = G_f + jB_f \quad (5.16)$$

$$|Y_f| \cong \frac{1}{R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{1/2}} \quad (5.17)$$

ve kondüktans ve süseptans ifadeleri,

$$G_f = \frac{Q}{X_0(1 + 4\delta^2 Q^2)} \quad (5.18)$$

$$B_f = -\frac{2\delta Q^2}{X_0(1 + 4\delta^2 Q^2)} \quad (5.19)$$

olacaktır.

Filtre barasındaki harmonik gerilimi ise şöyledir:

$$V_n = \frac{I_n}{Y_{nf} + Y_{sn}} = \frac{I_n}{Y_n} \quad (5.20)$$

Bu eşitlikten görüleceği gibi, gerilim bozulmasını azaltmak için sisteme paralel bağlı filtrenin toplam admitansını artırmak gerekir.

En büyük harmonik gerilimi V_n 'i bulabilmek için şebeke admitansı(Y_{sn}) ve frekans sapmasını(δ) belirlemek gerekir. Harmonik gerilim δ ile arttığından dolayı umulan en büyük sapma değeri δ_m ve gerçeğe uygun en kötü sistem durumu(en düşük admitans) dikkate alınmalıdır. Bu durum, iyi bir tahmin yapılabilmesi için en uygun bir Q değerinin belirlenmesi gerekliliğini ortaya koyar.

Q ve δ cinsinden (5.20) eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$|V_n| = I_n \left\{ \left[G_{sn} + \frac{1}{R(1+4\delta^2 Q^2)} \right]^2 + \left[B_{sn} - \frac{2\delta Q}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (5.21)$$

Empedans düzleminde incelediğimizde, harmonik empedanslar orjinden geçen iki düz doğru ve bir daire tarafından belirlenen bir bölgede çemberlenir. Buna göre, şebeke empedansının faz açısı 90° 'nin altında sınırlanabilir. Genellikle frekansın artmasıyla faz açısı azalır. Böylece, en yüksek harmonik gerilimi, δ 'ın ters işaretlisi φ_{sn} faz açısı kullanılarak elde edilebilir. φ_{sn} 'i pozitif ve δ 'ı negatif alarak (5.21) eşitliği,

$$|V_n| = I_n \left\{ \left(|Y_{sn}| \cos \varphi_{sn} + G_f \right)^2 + \left(-|Y_{sn}| \sin \varphi_{sn} + B_f \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (5.22)$$

olur. En büyük $|V_n|$ i veren admitans,

$$|Y_{sn}| = \frac{\cos \varphi_{sn} (2Q\delta \tan \varphi_{sn} - 1)}{R(1+4Q^2\delta^2)} \quad (5.23)$$

olup, buradan en büyük $|V_n|$,

$$|V_n| = I_n \omega_n L \left[\frac{1+4Q^2\delta^2}{Q(\sin \varphi_{sn} + 2Q\delta \cos \varphi_{sn})} \right] \quad (5.24)$$

bulunur. En düşük harmonik gerilimini sağlayan kalite faktörü,

$$Q = \frac{1 + \text{Cos}\varphi_{sn}}{2\delta\text{Sin}\varphi_{sn}} \quad (5.25)$$

ve bu değer için elde edilecek en düşük harmonik gerilimi,

$$|V_n| = I_n \omega_n L \left[\frac{4}{1 + \delta \text{Cos}\varphi_{sn}} \right] = \frac{2I_n R}{\text{Sin}\varphi_{sn}} \quad (5.26)$$

olarak elde edilir.

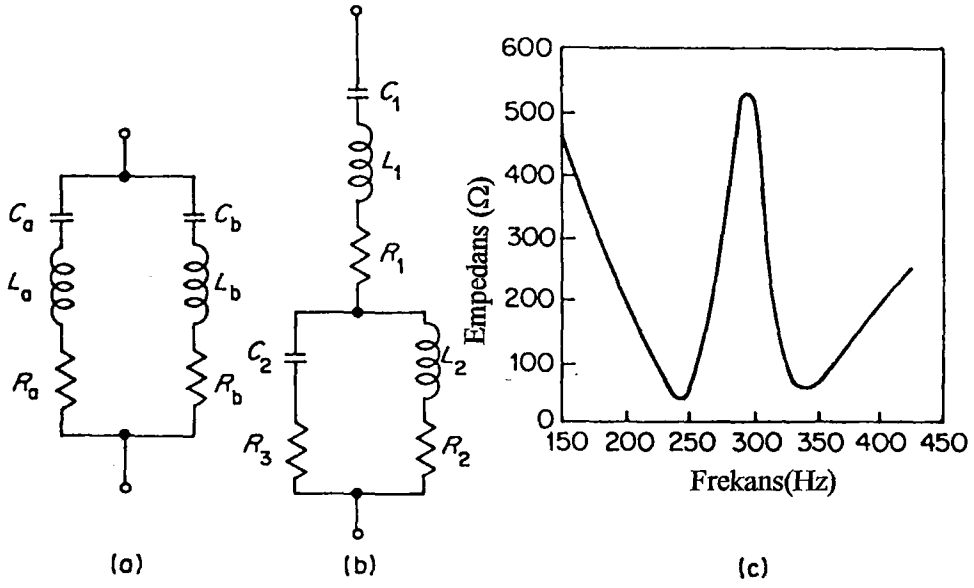
Bununla birlikte, bu şartlar altında filtreler sadece en küçük harmonik gerilimi sağlamak için tasarlanmazlar. Güç sistemi ve filtre güvenliği açısından en olumsuz koşulların da göz önüne alınması gerekir. Normalde, kayıpları azaltmak için büyük bir Q değerinin seçilmesi gerekir. En küçük harmonik gerilimi durumunu da ele alırsak, Q ve δ değerlerinin en büyük değerde olması gerekmektedir. Dolayısıyla, φ_{sn} faz açısı en büyük değerde olmalıdır. Bu durumda (5.25) eşitliği,

$$Q = \frac{1 + \text{Cos}\varphi_m}{2\delta\text{Sin}\varphi_m} \quad (5.27)$$

olacaktır.

5.4.2. Çift Ayarlı Filtreler

Rezonans frekansları yakınında, iki tek ayarlı filtrenin(Şekil 5.4(a)) eşdeğer empedansı ile pratik olarak Şekil 5.4(b)'de gösterilen çift ayarlı filtrenin empedansı aynıdır.



Şekil 5.4. (a) İki tek ayarlı filtrenin bileşim devresi (b) Çift ayarlı filtre devresi
(c) 5. ve 7. harmonik frekanslarına ayarlı çift ayarlı filtrede empedans değişimi

Bu filtrelerin elemanları arasında aşağıdaki bağıntılar vardır:

$$C_1 = C_a + C_b \quad (5.28)$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \quad (5.29)$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad (5.30)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 - (L_a + L_b)} \quad (5.31)$$

$$R_2 = R_a \left[\frac{a^2(1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] + R_b \left[\frac{1-x^2}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] + R_1 \left[\frac{(1-x^2)(1-ax^2)}{(1+x^2)(1+ax^2)} \right] \quad (5.32)$$

Burada:

$$a = \frac{C_a}{C_b} \quad \text{ve} \quad x = \sqrt{\frac{L_b C_b}{L_a C_a}}$$

Yukarıdaki pratik yaklaşım, R_1 direncinin ihmal edilmesiyle gerçekleşir. R_1 'in değeri L_1 endüktansının en küçük direnci ile belirlenir.

Üç ve dört ayarlı filtrelerde tasarlanabilir, fakat ayarlama zorluğundan dolayı tam etki sağlamazlar.

Tek ayarlı filtreler ile karşılaştırıldığında, çift ayarlı filtreler temel frekanstaki güç kayıplarında azalma avantajına sahiptir. Diğer bir üstünlükleri ise, yüksek gerilim uygulamalarında tüm hat darbe gerilimlerine maruz kalacak endüktans sayısının azalmasından dolayıdır.

5.4.3. Otomatik Ayarlı Filtreler

Ayarlı filtre tasarımında en büyük frekans sapmasını azaltmak avantajlıdır. Bu durum, kapasitesi otomatik olarak anahtarlanarak veya endüktansı değiştirilerek ayarlanan filtreler yapmak suretiyle sağlanabilir. \pm %5'lik bir sapma aralığı genellikle düşülen yeterlidir. Filtredeki harmonik frekans reaktif gücünü ölçen ve bu reaktif gücün işaret ve genliğine göre L ve C'yi kontrol eden bir kontrol sistemi, yüksek gerilim d.a. dönüştürücülerde kullanılmıştır. Otomatik ayarlı filtreler sabit filtrelere aşağıdaki üstünlükleri sağlar:

1- Kapasite değeri daha düşüktür.

2- Kullanılan kapasiteyi, birim maliyet ve hacim başına yüksek bir reaktif güç değerini ve kapasitenin yüksek sıcaklık katsayısını birleştirerek bir düzen sağlar.

3- Daha yüksek Q'dan dolayı güç kaybı daha küçüktür.

5.5. Sönümlü Filtreler

Sönümlü filtrelerin üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

1- Sıcaklık değişimi, frekans sapması , elemanların yapım toleransı, kapasite elemanlarının kaybı v.s. gibi etkenlerden fazla etkilenmezler.

2- Artan anahtarlama ve bakım sorunları bakımından paralel kolların ek devrelere ayrılmasına gerek duyulmaksızın, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar.

3- Ayarlı filtrelerin kullanımı, genellikle daha düşük değere ayarlı filtre frekansının altındaki bir harmonik mertebesinde, filtre ve sistem empedansları arasında veya ayarlı filtre frekansları arasında paralel rezonans ile sonuçlanır. Böyle durumlarda bir veya daha fazla sönümlü filtre kullanımı daha uygun bir seçenektir.

Sönümlü filtrelerin sakıncaları ise şunlardır:

1- Çoğu durumda iyi bir performans, güç faktörü düzeltilmesi için gerekli sınırlar dahilinde karşılanabileceğinden, sönümlü filtrelerin daha yüksek temel frekans reaktif güç değerlerine göre tasarlanmaları gerekir.

2- Direnç ve reaktördeki kayıplar daha fazladır.

5.5.1. Sönümlü Filtre Tipleri

Yüksek geçiren sönümlü filtrelerin dört ayrı tipi birinci mertebe, ikinci mertebe, üçüncü mertebe ve C tipi olmak üzere Şekil 5.5'de gösterilmiştir.

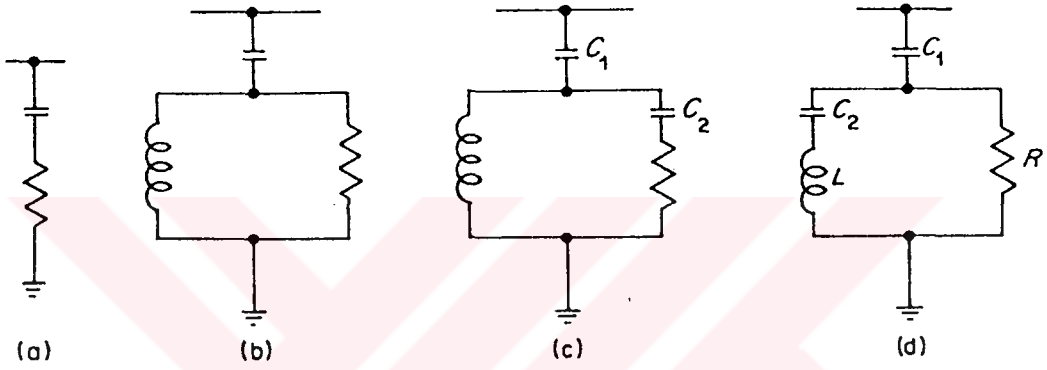
Bu filtre tipleri sırasıyla aşağıdaki özelliklere sahiptir:

a) Birinci mertebe filtre, normalde büyük bir kapasite gerektirdiğinden ve temel frekansta aşırı kayıplara sahip olduğundan dolayı kullanılmaz.

b) İkinci mertebe tipi en iyi filtreleme performansı sağlar, fakat üçüncü mertebe tipiyle karşılaştırıldığında daha yüksek temel frekans kayıplarına sahiptir.

c) İkinci derece filtreye göre temel üstünlüğü, C_2 kapasitesinin neden olduğu frekansta empedans artmasından dolayı temel frekans kaybında önemli miktardaki azalmadır.

d) C-tipi filtreleme performansı, ikinci ve üçüncü tiplerin performansları arasında yer alır. C-tipinin temel üstünlüğü, C_2 ve L seri bağlı olduğundan temel frekans kayıplarında önemli miktardaki azalmadır. Bu filtre, temel frekans sapmalarına ve eleman değerlerindeki değişimlere karşı daha duyarlıdır.



Şekil 5.5. Yüksek geçiren sönümlü filtreler:

- a) Birinci mertebe
- b) İkinci mertebe
- c) Üçüncü mertebe
- d) C-tipi

5.5.2. Sönümlü Filtrelerin Tasarımı

Sönümlü bir filtre tasarlanırken Q , gerekli frekans bandı üzerinde en iyi karakteristiği verecek şekilde seçilir. Ayarlı filtredeki gibi en uygun Q yoktur.

Sönümlü filtrelerin davranışı iki temel parametre ile açıklanmıştır:

$$f_0 = 1 / 2\pi CR \quad (5.33)$$

$$m = L / R^2 C \quad (5.34)$$

Gerekli frekans aralığı üzerinde uygun bir yüksek empedans oluşturacak şekilde, tipik m değerleri 0.5 ve 2 arasındadır.

İkinci merteye sönümlü filtre admitansının kondüktans ve süseptans ifadeleri,

$$G_f = \frac{m^2 x^4}{R_1 \left[(1 - mx^2)^2 + m^2 x^2 \right]} \quad (5.35)$$

$$B_f = \frac{x}{R_1} \left[\frac{1 - mx^2 + m^2 x^2}{(1 - mx^2)^2 + m^2 x^2} \right] \quad (5.36)$$

olur. Burada $x = f/f_0$ 'dır.

En küçük admitans(yani, $Y_{sn} + Y_F$),

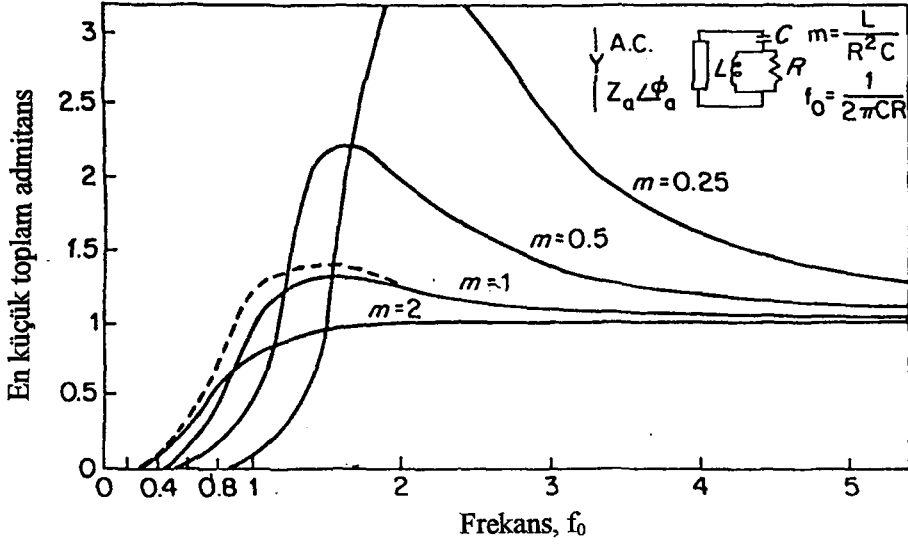
$$Y = B_f \cos \phi_m + G_f \sin \phi_m \quad (5.36)$$

olarak ifade edilebilir. Bu eşitlikteki her iki terimin pozitif olması ve x 'in küçük olması aşağıdaki eşitliği verir:

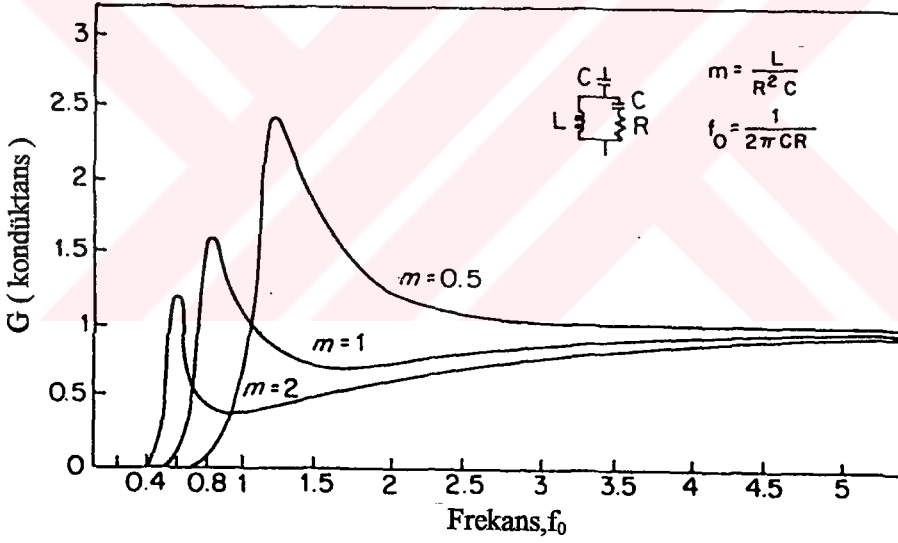
$$|\cot \phi_f| = |G_f / B_f| = |\tan \phi_m| \quad (5.37)$$

x 'in daha büyük değerleri için en küçük toplam admitans, filtrenin admitansına eşittir(yani $Y_{sn} = 0$).

Şekil 5.6, kayıpsız bir sistem(yani $\phi = \pm 90^\circ$) ile paralel bağlı ikinci merteye sönümlü filtre için tipik en küçük admitansları gösterir. Eşit kapasiteler durumunda, üçüncü merteye filtrenin kondüktans bileşeni G_f , karşılaştırma yapmak amacıyla Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Bu şekiller, üçüncü merteye filtre tepelerinin ikinci mertebekilerden daha keskin olduğunu göstermektedir.(Arrilliaga et al 1985)



Şekil 5.6. İkinci mertbe yüksek geçiren filtre admittansı



Şekil 5.7. Üçüncü mertbe filtre için kondüktans bileşeni

5.6. Yüklerin Ayrı Ayrı Filtrelenmesi

Harmonik kaynaklarının sayısı birden fazla ve yerleri belli ise en iyi yaklaşım, filtreleri kaynaklara yakın bir yere yerleştirmektir. Ancak, harmonik kaynakları küçük ve

güç sisteminin her yerine dağılmış ise, bu yaklaşım ekonomik olmaz. Bu nedenle, yüklerin ayrı ayrı filtrelenmeleri gerekir.

Herbir yüke filtre yerleştirmede ilk adım, güç sistemindeki harmonik kaynaklarının belirlenmesidir. Bu kaynaklar endüstriyel güç sistemlerinde iyi bilinmesine rağmen, dağıtım sistemlerinde araştırma yapmak gerekebilir. Harmonikler farklı zamanlarda ve farklı seviyelerde ortaya çıkabilirler. Yapılan çeşitli incelemelerle belirlenemeyen harmonik kaynaklarını bulmak için şu yol izlenir:

1-Sistemdeki tüm kondansatörler, ters gerilim ayar etkileri olmayacak şekilde sistemden çıkarılırlar.

2-Kondansatörlerin olmadığı bu sistemde harmonik akımlarının izlediği yollar belirlenir.

Kondansatörler sistemden çıkarıldıklarında sistem endüktif karakterde olur. Endüktif bir devrede harmonikler doğrusal olmayan yüklerden sisteme doğru aktığından, harmoniklerin izlenmesi ve harmonik kaynağının bulunması oldukça kolaylaşır. Ancak, bazı durumlarda kendine özgü özelliklere sahip bir harmonik kaynağını tanımak zordur.

Sistemdeki tüm doğrusal olmayan yükler birtakım harmonikler üretirler. Harmonikler çok geniş bir alana dağılmış ise beklenmeyen harmonik seviyeleri oluşabilir ve bu durumda farklı filtreleme teknikleri gerekebilir.

Yüklerin ayrı ayrı filtrelenmesinde izlenecek yol şu şekildedir:

1-Harmonik kaynağının ürettiği en düşük mertebeli harmoniğe göre tek ayarlı filtre bir bant geçiren filtre tasarlanır.

2-Toplam harmonik akım ve gerilimleri hesaplanarak filtrenin etkinliği belirlenir.

3-Filtre parametreleri kabul edilen toleranslara göre değiştirilerek, filtrenin etkinliği yeniden kontrol edilir.

4-Filtre görevini yerine getiremiyorsa ve diğer harmonikler sorun yaratıyorsa, çift ayarlı bir bant geçiren filtre denenir ve bu filtre ekonomik açıdan yüksek geçiren bir filtre ile karşılaştırılır.

5-Filtre ile sistemin rezonans oluşturduğu frekans değeri kontrol edilir. Sürekli ve geçici hallerde beklenmedik sorunları önlemek amacıyla, bu frekansın harmonik frekanslarına yakın bir değerde olmamasına dikkat edilir.

Güç sisteminde rezonansla ilgili bir harmonik sorunu olduğunda, bant geçiren filtre kullanımından başka seçenekler de vardır.

Endüstriyel güç sistemlerinde yapılan gözlemler, en uygun reaktif güç kompanzasyonu için seçilen kondansatör gruplarının 5. harmonik frekansında rezonansa neden olduklarını göstermiştir. Benzer olay dağıtım sistemlerinde de oluşur. Kondansatör grupları sisteme geniş bir şekilde dağılmışlarsa rezonans frekansı daha düşük olur.

Kondansatörlerin büyüklükleri ve yerleri değiştirilerek, sistemdeki rezonans koşulları ortadan kaldırılabılır. Bu durum pratikte uygun değilse, kondansatörlere seri bir endüktans bağlanabilir. Böylece, bant geçiren filtreye benzer bir filtre elde edilir. Ancak, burada endüktansın amacı, bant geçiren filredeki gibi kondansatörü özel bir harmonik frekansına ayarlamak değil, rezonans frekansını düşürmek ve harmonik frekansından uzaklaştırmaktır. Bu nedenle, bant geçiren filtredeki gibi kesin tasarım gerektirmez. (Hammond, 1988)

5.7. Dağınık harmonik Kaynaklarının Filtrelenmesi

Dağıtım sistemleri, genellikle küçük boyutlu ve sisteme dağılmış dağılmış durumda olan birçok harmonik kaynağına sahiptirler. Güç sistemlerinde güç dönüştürücülerinin sayısının gün geçtikçe arttığı düşünülürse, sistemdeki harmonik sorununun doğrudan birkaç büyük harmonik kaynağına bağlanamayacağı görülür. Gerilim harmonikleri izin verilen sınırları aştığında, harmonikleri azaltmak için kondansatör gruplarının büyüklük ve yerlerinin değiştirilmesi veya yüklerin ayrı ayrı filtrelenmesi gibi çözümlerin pratik olmadığı durumlarda, besleyicilerin genel olarak filtrelenmesi gerekir.

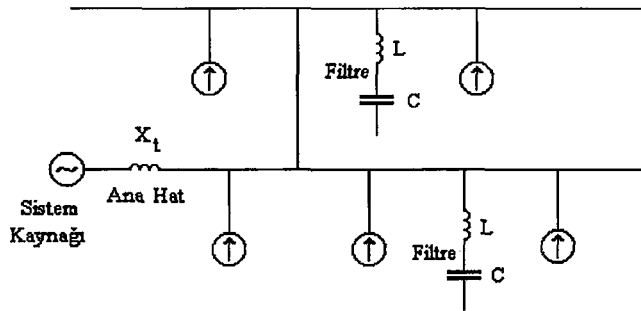
İdeal çözüm, herbir harmonik kaynağına yakın bir yere filtre yerleştirilmesi olmakla birlikte, bu çözüm pratik değildir ve çok sayıda filtre kullanımını gerektirir. Dağıtım sistemlerindeki harmonik sorunlarının nedeni, çok uzun bir akım yolundan veya rezonans devrelerinden geçen harmonik akımlarıdır. Bu nedenle, dağınık harmonik kaynaklarının filtrelenmesindeki temel ilke, harmonik akımları için daha düşük empedans yolları sağlamaktır. Önceden de belirtildiği gibi, harmonik akımları normal olarak

harmonik kaynaklarından sisteme doğru akarlar. Filtreler, dağınık filtreleme boyunca harmonik akımlarının yollarını kısaltmak için besleyicinin(yani sistem kaynağının) sonuna yerleştirilmelidir. Genelde besleyicinin herbir ana hattı için bir filtre yerleştirmek yeterlidir ve bunun için varolan kondansatörler kullanılabilir. Ancak, sonradan oluşabilecek kötü koşullar dikkate alınarak bunun iyi araştırılması gerekir.

Dağınık harmonik kaynaklarının filtrelenmesinde izlenecek yol aşağıdaki gibidir:

- 1- Zararlı harmoniklerin belirlenmesi
- 2- Filtre yerlerinin seçilmesi
- 3- Filtrelerin tasarımı ve etkinliğinin incelenmesi
- 4- Sistemdeki sorunların tekrar incelenerek kontrol edilmesi

Bir filtrenin yerini belirlemenin yollarından biri, besleyici için çizilen üç boyutlu empedans grafiğidir. Bu grafikteki tepeler paralel rezonans noktaları olup, zararlı bir harmoniğin göstergesidirler. Bu tepelerin frekans değerlerinin karşı geldiği yerler, filtreler için aday yerleri oluştururlar. Filtreler yerleştirdikten sonra etkinliklerini araştırmak için üç boyutlu grafik yeniden geliştirilir. Besleyici üzerindeki tüm noktalar için THD, tahmin edilmelidir. Harmonik kaynağı hakkında yeterli bilgi yoksa, sistem boyunca teorik bir kaynak kullanılabilir. Şekil 5.8'de dağınık harmonik kaynaklarının filtrelenmesine bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Dağınık harmonik kaynaklarının filtrelenmesi

Sistemin herbir ana hattı için bir filtre yeterli olmakla birlikte, daha yüksek mertebeli harmonikler filtrelenecekse birden fazla filtre gerkebilir. Bu durumda filtreleri aynı yere yerleştirmesi gerilim harmonikleri için çok etkili olmasına rağmen, harmonik

akımlarının yoğunluğunun artması sonucu iletişim devreleri için zararlı koşullar oluşabilir. Bu nedenle, filtreler belirli uzaklıklarla birbirlerinden ayrılırlar; daha yüksek frekansa ayarlı olanlar daha uzağa yerleştirilirler.(Lowenstein, 1988)

5.8. Filtre Elemanlarının Özellikleri

Kondansatör, endüktans ve dirençlerin akım ve gerilim değerleri, aktif ve reaktif güçleri ve kayıpları, ilgili baralardaki temel ve harmonik gerilim içeriğine göre belirlenir.

Bu elemanların değerleri, zarar görmemeleri için umulan en ağır koşullara göre belirlenmelidir. Yani, en yüksek temel gerilim, en yüksek etkili frekans sapması ve diğer kaynaklardan ve filtre ile a.a. arasındaki mümkün rezonanslardan gelen harmonik akımlar dikkate alınmalıdır.

5.8.1. Kondansatör

Kondansatörler, istenen toplam gerilim ve kVA değerinin elde edilmesi için seri ve/veya paralel bağlanan standart birimlerdir. Kondansatörlerin temel özellikleri aşağıdaki gibidir:

- a) Sıcaklık katsayısı
- b) Birim hacim başına reaktif güç
- c) Güç kaybı
- d) Güvenilirlik
- e) Maliyet

Kondansatörün kendi ısısının veya çevre sıcaklığının etkisi sonucu oluşan kapasite değişiminin neden olduğu saptamaya engel olmak gerekir. Bu nedenle, ayarlı filtrelerde kapasitenin çok düşük sıcaklık katsayısı arzu edilir. Dikkat edilirse bu özellik, sönümlü filtreler veya güç kondansatörleri için önemli değildir.

Kondansatörler, çok yüksek gerilim zorlamalarında çalıştırılarak ve kayıpların düşük olması sağlanarak, birim hacim başına yüksek reaktif güç sağlarlar. Bu nedenle, dielektriğin ısıl tahribine engel olmak için kabul edilebilir aşırı gerilimde çalışmanın

uzamasından kaçınılmalıdır. Ayrıca, dielektriğin zararlı iyonizasyonunu önlemek için daha yüksek aşırı gerilimde çok kısa çalışmadan da kaçınmak gerekir.

Kondansatörün gerekli reaktif güç değeri, ilgili frekansların (temel ve harmonik) herbirindeki reaktif güçlerin toplamıdır.

5.8.2. Endüktans

Tasarlanacak filtre devrelerinde gerekli olan endüktanslarda, yüksek frekansların yol açtığı deri etkisi ve histerezis kayıplarının dikkate alınması gerekir. Ayrıca, demir akı seviyesinin etkisi (magnetik doğrusalsızlığın neden olduğu sapama) de dikkate alınmalıdır. Bu durum, normalde demir çekirdekler kullanıldığında düşük akı yoğunluklarının kullanılmasını gerekli kılar. Başka bir seçenek olarak, filtre endüktansları magnetik olmayan çekirdeklerle daha iyi tasarlanırlar.

En düşük maliyet için, etkin harmonik frekansındaki Q değeri (genellikle 50-150 arasındadır) seçilebilir. Bununla birlikte, normalde daha düşük Q değerleri gereklidir ve bu değerler seri bir direnç kullanarak elde edilir.

Endüktans değerleri, genelde en büyük etkin akıma ve anahtarlama dalgalanmalarına dayanabilecek gerekli yalıtım seviyesine bağlıdır. Normalde R ve L, ayarlı filtrenin toprak kısmını oluşturur.

5.9. Filtre Maliyeti

Etkin bir filtre, en az maliyetle harmonikleri yeteri derecede süzer ve bir miktar reaktif güç sağlar. Filtre kayıplarının maliyeti, reaktif güce bir miktarı da filtrelemeye yüklenebilir. Genellikle filtre elemanlarının maliyet analizinde aşağıdaki kabuller yapılır:

1-) Tipik bir tesiste bir kondansatör grubu, işletme geriliminde herbiri anma değerine sahip olan ve dahili bir sigorta ile korunan kondansatör birimlerinin matrisinden oluşur. Böylece bir kondansatör grubunun maliyeti, tüm birimleri içeren en küçük matris değerine kadar yaklaşık olarak sabittir. Daha yüksek değerler için gerektiğinde herbir seri gruba bir veya daha fazla birim eklenir ve MVAr veya boyut başına uygun bir tam maliyet elde edilebilir. Farklı anma değerli standart birimlerin geçerliğinde durum daha

da karışır ve artımsal maliyet, kondansatör grubu boyutlarının çeşitli bantları için değişir. Bu gibi faktörler, tam bir maliyet hesabı geliştirilmesinde dahil edilmesine rağmen, genelde kondansatörlerin maliyetinin kendi değerleriyle(MVAr) orantılı olduğu kabul edilmektedir.

2-)Filtre endüktanslarının maliyeti, büyük ölçüde yapım biçimlerine bağlı olmasına rağmen, farklı değerli birimler için büyük ölçüde değişir. Bu yüzden, analizde kullanılan maliyet yaklaşımı,

$$\text{Endüktans maliyeti} = U_K + U_L \times (\text{Toplam MVAr değeri})$$

olarak verilir. Burada U_K , sabit maliyet bileşeni ve U_L , MVAr değeri başına endüktans artımsal maliyetidir.

3-) Herbir filtre kolundaki Q ayarı için gerekli direncin güç değeri, şüphesiz bir dereceye kadar maliyeti etkiler. Bununla birlikte, genel bir analizde birimin anma direncini önceden belirlemek zordur, çünkü endüktansın Q faktörüne bağlıdır. Bu nedenle ve bir de direncin maliyetinin diğer elemanlara göre düşük olması nedeniyle, analizde direnç başına sabit maliyet bölüştürülür.

4-)Güç kayıp tahmini amacıyla endüktansın direncinin tüm frekanslarda sabit olduğu kabul edilebilir.(*)

5.10. D.A. Taraf Filtreleri

Statik dönüştürücülerde doğrultucu gerilim dalgalanması harmonik akımları üretmesine rağmen, diğer işlemler veya alıcılar üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmadıklarından dolayı, bunlar çıkışta nadiren filtrenirler.

Havai hatların kullanıldığı yüksek gerilim d.a. iletim, girişim problemlerinden dolayı özel bir durum arzeder. 2. Bölümde de belirtildiği gibi, harmonik akımlar gecikme ve tetikleme açıları, çakışma açısı, d.a. devre empedansları gibi bilinen faktörlere bağlıdır.

D.a. iletim düzenlerinde d.a. filtrelerin performansını belirlemek için üç farklı kriter kullanılmıştır:

(*Filtrelerin maliyet hesabı konusunda ayrıntılı bilgi, 'Arrillaga, J. et al, 1985, Power System Harmonics, John Willey and Sons.' kaynağında bulunmaktadır.

a) D.a. yüksek gerilim barası üzerindeki en büyük gerilim TIF.

b)Yüksek gerilim d.a. hatta yakın geçen telefon hatlarındaki en büyük izin verilebilir gürültü.

c)Yüksek gerilim d.a. hattından 1 km uzaktaki bir paralel test hattında endüklenen en büyük gürültü yoğunluğu.

Harmonik akımı, büyük değerdeki düzleştirme endüktansıya küçük bir değere indirildiğinden dolayı, bileşen değerleri a.a. filtreye göre önemli ölçüde farklıdır. Sonuç olarak, kondansatör maliyeti tamamen kapasite değerine ve d.a. gerilime bağlıdır. Kondansatör en yüksek maliyete sahiptir ve ilk önce seçilir. Böylece endüktans, verilen bir frekans için sabittir. Kalite faktörünün seçimi a.a. filtredeki gibi yapılır. (Arriliaga et al, 1985)



BÖLÜM 6: SAYISAL UYGULAMA

Harmonik filtrelerinin etkinliğini incelemek amacıyla, doğrusal olmayan yük akımlarını içeren bir enerji sistemi üzerinde sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1'de gösterilen, 154 kV'luk ulusal enerji ağından beslenen enerji sistemi gözönüne alınmıştır.



Şekil 6.1. Örnek enerji sistemi

Örnek sisteme ilişkin hat parametreleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Örnek sisteme ilişkin hat parametreleri

| busbar 1 -> busbar 2 | n | R | X | B | L | In |
|----------------------|---|--------------|--------------------|-----------|--------|--------|
| | | [ohm / km] | [m Ω /km] | [mS/km] | [km] | [kA] |
| K2 -> K3 | 1 | 0.2300 | 0.4000 | 334.20 | 5.0000 | 0.302 |

Baralara ilişkin bilgiler Tablo 6.2'de listelenmiştir.

Tablo 6.2. Örnek sisteme ilişkin bara bilgileri

| bus | rtd.V [kV] | P.u [-] | Pm [MW] | Qm [MVar] | P1 [MW] | Q1 [MVar] | Shunt [MW] | Shunt [MVar] | bus type |
|-----|---------------|------------|------------|--------------|------------|--------------|---------------|-----------------|-------------|
| K1 | 154.00 | 1.020 | 0.06 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | SL |
| K2 | 15.00 | 1.001 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | PQ |
| K3 | 15.00 | 1.000 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | PQ |
| K4 | 0.40 | 1.000 | 0.00 | 0.000 | 1.481 | 1.340 | 0.00 | 0.00 | PQ |

Örnek sistem üzerinde K4 barasında doğrusal olmayan yük bulunmaktadır. Bu yükün harmonik akımları Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3. Harmonik kaynağına ilişkin harmonik akım değerleri

| busbar | frequency 1 - 8 in Hz | | | | |
|---------|-----------------------|---------|--------|--------|--------|
| K4 | 50.0 | 250.0 | 350.0 | 550.0 | 650.0 |
| Current | 793.0 | 25.0000 | 9.0000 | 8.0000 | 6.0000 |

Sistemde yer alan transformatörlere ilişkin parametreler Tablo 6.4’de verilmiştir.

Tablo 6.4. Örnek sistemde yer alan transformatör parametreleri

| busbar 1 i | -> busbar 2 j | rated power n*[MVA] | rated V. i [kV] | rated V. j [kV] | Uk [%] | Pcu [kW] | Io [%] |
|---------------|------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-------------|-----------|
| K1 | K2 | 1* 40.0 | 154.0 | 15.0 | 11.8 | 160. | 0.40 |
| K3 | K4 | 1* 8.5 | 15.0 | 0.4 | 6.0 | 5. | 2.00 |

5. ve 7. harmonikleri süzmek üzere K4 barasına iki ayrı tek ayarlı filtre devresinin yerleştirilmesi öngörülmüştür. Eleman değerleri Ek1’de verilen bu filtrelerin etkinliğini incelemek amacıyla iki ayrı durum göz önüne alınmıştır (Tablo 6.5). Tablo 6.5’teki ‘1’ ve ‘0’ indisleri VAR/YOK anlamındadır.

Tablo 6.5. Sayısal uygulamaya ilişkin öngörülen durumlar

| Durum | Filtreler |
|-------|-----------|
| I | 1 |
| II | 0 |

Sistemin simülasyonunda ‘DIGSILENT Version 9.1’ yazılım programı kullanılmıştır. Program çıktıları EK2’de topuca verilmiştir.

Hesaplama sonucu iki ayrı durum için bazı karşılaştırmalar yapmak üzere bazı sonuçlar Tablo 6.6 -Tablo 6.9' da verilmiştir.

Tablo 6.6. Durum I için K2-K3 baraları arasındaki hattın harmonik akımları

| Frekans (Hz) | İletilen Akım (A) |
|--------------|-------------------|
| 250 | 0.325 |
| 350 | 0.222 |
| 550 | 0.876 |
| 650 | 0.657 |

Tablo 6.7. Durum II için K2-K3 baraları arasındaki hattın harmonik akımları

| Frekans (Hz) | İletilen Akım (A) |
|--------------|-------------------|
| 250 | 5.234 |
| 350 | 1.884 |
| 550 | 1.675 |
| 650 | 1.256 |

İki ayrı durum için baralardaki 'Toplam Harmonik Distorsiyon' hesaplanmış, sonuçlar Tablo 6.8 ve Tablo 6.9' da verilmiştir.

Tablo 6.8. Durum I için hesaplanan baralara ilişkin THD_v

| Bara No | THD _v (%) |
|---------|----------------------|
| K1 | 0.003 |
| K2 | 0.097 |
| K3 | 0.334 |
| K4 | 0.469 |

Tablo 6.9. Durum II için hesaplanan baralara ilişkin THD_v

| Bara No | THD _v (%) |
|---------|----------------------|
| K1 | 0.008 |
| K2 | 0.235 |
| K3 | 0.847 |
| K4 | 1.243 |

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik güç sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin 50 Hz frekansa salınan ve sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak, doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonikler nedeniyle akı, akım ve gerilim gibi büyüklükler sinüs biçiminde olmaktan çıkarlar ve dalga biçimleri oldukça karmaşık hale gelir. Bunun sonucunda, işletim açısından arzu edilmeyen önemli sorunlar ortaya çıkar.

Bu çalışmada, elektrik enerjisi kullanan tüm kesimler için çok önemli olan ve önemi giderek artan harmonikler konusu incelenmiş ve harmoniklerin giderilmesi için alınması gereken tedbirlerin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde genel tanıtım yapılarak harmonik tanımına yer verilmiş ve harmoniklerin matematiksel olarak analizine değinilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde harmonik üreten kaynaklar ve bunların harmonik üretme özellikleri açıklanmıştır.

-Transformatörlerin harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin doğrusal olmayışına dayanır. Anma gerilimlerinin üzerinde bir gerilimle beslendiklerinde çekirdek doyması sonucu, mıknatıslama akımı harmonik bileşenler içerir. Harmonik bileşenler yüksek bir empedans gördüklerinde besleme gerilimi de harmonik bileşenler içerir. Besleme gerilimi mıknatıslama akımına tekrar etki ederek harmonik seviyelerini daha da büyütür. Güç sistemlerinde etkili bir gerilim kontrolü ile harmonik seviyeleri düşürülebilir.

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

-Güç sistemlerinde en önemli harmonik kaynağı olan dönüştürücüler, sistem karakteristiklerine bağlı olarak a.a. ve d.a. taraflarında tipik veya sıradışı harmonikler üretirler. Temel çok fazlı dönüştürücü 6-darbe birimlidir. 12-darbe işletimini sağlayarak 5.,7.,17. ve 19.,...vs. harmonikler giderilebilir. Bunun için paralel bağlı, 30° faz farklı iki adet transformatörden besleme yapılır. Daha yüksek darbe birimli işletmeler

gerçekleştirerek diğer harmonikler giderilebilir. Örneğin, 24-darbe işletimi için 15° faz farklı dört adet transformatör kullanılmalıdır.

-Yarım dalga doğrultma, transformatörü doyuma ulaştıran bir d.a. bileşene sahip çift mertebeli harmonikler üretir. Bundan kaçınılarak tam dalga doğrultma uygulanmalıdır.

-Dönüştürücülerde tipik harmonikleri önlemenin en etkili yolu, uygun filtreleme tekniklerinin uygulanmasıdır.

- DGM'li eviricilerde çıkış dalga şeklinin Fourier analizi yapılarak uygun bir sayısal çözümleme yöntemiyle gerekli tetikleme açılarının belirlenmesi sonucunda, mikroişlemci uygulamalarıyla harmonikler büyük oranlarda giderilebilirler.

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

Çalışmanın üçüncü bölümünde güç sistemlerinde harmoniklerin olumsuz etkileri açıklanmış, harmoniklere getirilen sınırlamalardan bahsedilmiştir.

-Harmonikler sistem elemanlarının çalışmalarını olumsuz olarak etkileyerek ek kayıpların oluşmasına yol açmakta, dolayısıyla 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 nedenle, harmonik akımlarının akışını kontrol ederek gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmak gerekir.

-Harmonikler rezonans oluşma olasılığını artırmaktadır. Harmonik rezonansları sonucu oluşan aşırı yüksek harmonik akım ve gerilimleri önemli problemlere neden olur. Kondansitörlerin büyüklükleri ve yerleri değiştirilerek sistemdeki rezonans koşulları ortadan kaldırılabılır. Kompanzasyon tesisi kurulurken aşırı kompanzasyondan kaçınılmalı ve sistemde hiç bir zaman gereğinden fazla kondansatör bulunmamasına dikkat edilmelidir. Rezonansları önlemek için en etkili yöntem paralel filtreler kullanmaktır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde modelleme ve simülasyon konusu genel olarak incelenmiş harmoniklerin ölçülmesinin önemi vurgulanmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde harmoniklerin süzülmesine ilişkin genel ilkeler ortaya konmuş ve uygun filtre tasarımı ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

- Harmonik filtrelerin genel amacı, belirlenen frekanslardaki harmonik akım ve gerilimlerinin genliğini azalmaktır. Güç sistemlerinde genellikle harmonik akımlarına düşük empedanslı bir yol sunan paralel filtreler kullanılır. Bu filtreler temel frekansta reaktif güç üretebilirler, daha ekonomiktirler ve seri filtrelere göre tasarımları daha kolaydır.

- Teknik ve ekonomik durumlar da dikkate alındığında, filtre tasarımında pratik kriter, harmonik bozulmayı diğer tüketiciler ile ortak bağlantı noktasında kabul edilebilir bir seviyeye indirmektir.

- Ekonomik durum dikkate alınarak düşük mertebeli harmonikleri süzmek için (5., 7., 11.) bant geçiren filtreler kullanılır. Daha yüksek mertebeli harmonikler (13. üzeri) için yüksek geçiren filtreler kullanmak daha uygundur. 11. ve 13. harmonikleri süzmek için 11. veya 12. harmonik frekansına ayarlı bant geçiren filtre devresi seçilebilir.

- Varolan kondansatör gruplarına, istenen harmonik frekansında rezonans oluşturacak biçimde seçilen seri endüktans bobinleri eklenebilir. Böylece, 50 Hz' de kompanzasyon yapılırken, harmonik akımlarının süzülmesi de sağlanmış olur.

Çalışmanın altıncı bölümünde 154/15 kV'luk bir indirici transformatör üzerinden beslenen ve doğrusal olmayan bir yük içeren bir enerji sistemi göz önüne alınmıştır. 5. ve 7. harmonikleri süzmeye yönelik filtre devrelerinin devrede olup olmasını içeren iki ayrı durum dikkate alınarak filtrelerin etkinliği incelenmiştir. Harmonik güç akışı için örnek sistem elemanlarına ilişkin değerler her iki durum için hesaplanmıştır. Örnek olarak K2-K3 baraları arasındaki hattın harmonik akımlarını incelediğimizde, Durum I'de önemli ölçüde azalma görülmektedir (Tablo 6.6 -Tablo 6.7). Aynı zamanda, harmoniklerin etkisi açısından temel ölçüt olan THD, baralarda her iki durum için hesaplanmıştır (Tablo 6.8 -Tablo 6.9). Filtrelerin varolduğu durumda baralara ilişkin THD' larında önemli ölçüde azalma görülmüştür (Hesaplamalara ilişkin bilgisayar program çıktıları Ek 2' de verilmiştir). Bu örnek sistemde daha etkili bir harmonik süzme işlemi için 11. ve 13. harmonikleri süzmeye yönelik 600 Hz'e ayarlı bir filtre

eklenebilir. Bu durum için filtrenin getireceği maliyetle, ek kayıp ve zararların maliyeti karşılaştırılarak bir sonuca gidilmelidir.

Ülkemizde harmonikler konusunun fazla gecikmeden ele alınmasında ve bazı önleyici tedbirlerin getirilmesinde büyük yarar vardır. Sanayi tesislerinde filtre kullanılmasının teşvik edilmesi ve tüketicilerin sebep olduğu THD ölçüsünde yeni bir fiyat tarifesi uygulanması gibi tedbirler düşünülebilir.



KAYNAKLAR

- 1-Arrilliaga, J., Bradley,D.A., Bodger,P.S., 1985. Power System Harmonics. John Wiley and Sons.
- 2-Bayram, M., 1983. Hızlı Değişen Olaylarda Reaktif Güç Kompanzasyonu, Reaktif Güç Semineri, TMMOB-EMO.
- 3-Bayram, M., Temmuz-Ağustos 1985. Elektrik Tesislerinde Rezonans Olayları, Elektroteknik Mecmuası, İTÜ.
- 5-Boduroğlu, T., 1988. Elektrik Makinaları Dersleri, Cilt I:Transformatörler, Beta Yayınevi (6. Baskı).
- 6-Brown, P.J., 1990. Computerized Simülasyon and Measurement of Power System Harmonics, Ph.D. Thesis, İTÜ.
- 7-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.
- 8- DIGSILENT Data Systems, Integrated Electrical Engineering Program, Version 9.1
- 8-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
- 9-Dugan, R.C., 1987. Electric Power System Design Guide, Mc Graw-Edison Power System Division of Cooper Industries, pp.2-51.
- 10-Freund, A., March 1988. Nonlinear Loads Mean Trouble, EC&M, pp.83-90.
- 11-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.
- 12-IEEE Committe Report, September 1985. The Effects 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-Hammond, P.W., Jan/Feb 1988. A Harmonic Filter Installation to Reduce Voltage Distorsion from Static Power Converters, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-24, no:1, pp.53-58.

- 14-Hanna, R.A., Sep/Oct 1989. Harmonics and Technical Barriers in Adjustable Speed Drives. IEEE Trans. on Industry Applications, vol.IA-25, no:5, pp.894-900.
- 15-IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, 1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519-1992.
- 16-IEEE Working Group on Power Systems Harmonics, 1983. Power Systems Harmonics: An Overview. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-102, pp. 2455-2460.
- 17-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.
- 18-Lowenstein, M.Z., March 1988. Controlling Harmonics While Improving Power Factor, Electrical Systems Design, pp. 38-44.
- 19-Meliopoulos, A.P.S., 1986. Effects of Harmonics on Power Transformers, Second International Conference on Harmonics in Power Systems, pp. 201-213.
- 20-Montanari, G.C., 1987. Voltage Distorsion Compesation in Electrical Plants Supplying Static Power Converters, IEEE Trans. on Industry Applications, vol.IA-23, no:1, pp. 181-187.
- 21-Reeve, J., 1971. Harmonic Interaction Between HVDC Converters and AC Power Systems, IEEE Winter Power Meeting, pp. 2785-2793.
- 22-Rice, D.E., Jan/Feb 1986. Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their Effect on Power Systems Components. IEEE Trans. on Indusry Applications, vol.IA-22, no:1, pp. 161-177.
- 23-Shipp, D.D., Sep/Oct 1979. Harmonic Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads, IEEE Trans. on Industry Applications, vol.IA-15, no:5, pp. 453-458.
- 24-Şenlik, İ., Ekim 1989. Eviriciler, Güç Elektroniği Semineri, TMMOB-EMO
- 25-Wirth, R.K., 1984. Analysis of Harmonics and Their Effects on Power Systems, Brown Boveri Review 1/2



EK1- Örnek Sisteme İlişkin Şönt Data

DigSILENT / Rev. 9.15 Shuntdata /shunt 1

| | | |
|--|---------|---|
| connec. bus : K4 operation mode : 1 max no of steps : 2 act no of steps : 1 rtd. shunt volt.: 0.4 connection mode : Y | 0.40 kV | shunt: 1 max. shunts: 2 |
| Capacitor (values per step) rtd. power : 200. kVAR rtd. current : 288.6751 A susceptance : 1250000. yS capacitance : 3978.873 yF | kV | Reactor (values per step) p - degree : 2.1 % resonance freq. : 345.0327 Hz rtd. power : 0. kVAR rtd. current : 0. A reactance : 0.0168 Ohm inductance : 0.053476 mH amplific. factor: 50. resistance : 0.000336 Ohm |

DigSILENT / Rev. 9.15 Shuntdata /shunt 1

| | | |
|--|---------|---|
| connec. bus : K4 operation mode : 1 max no of steps : 4 act no of steps : 4 rtd. shunt volt.: 0.4 connection mode : Y | 0.40 kV | shunt: 2 max. shunts: 2 |
| Capacitor (values per step) rtd. power : 200. kVAR rtd. current : 288.6751 A susceptance : 1250000. yS capacitance : 3978.873 yF | kV | Reactor (values per step) p - degree : 4.1 % resonance freq. : 246.9324 Hz rtd. power : 0. kVAR rtd. current : 0. A reactance : 0.0328 Ohm inductance : 0.104406 mH amplific. factor: 50. resistance : 0.000656 Ohm |

EK2

EK2.1. Örnek Sisteme İlişkin Durum I için Simülasyon Sonuçları

```

-----
| I C H T N E R I | DIGSILENT example | Order: |
| Stuttgart | Harmonic Load Flow Calculation | Date: |
|
| Table A | Harmonic load flow calculation | Annex: / 1 |
|
| Area: AREA1 | Frequency: 250. Hertz | Bus-Data |
|
| No Bus | rtd. V | Harm - voltage | Uk/rt. V |
| | [KV] | [ V] | [deg] | [%] |
|-----|-----|-----|-----|
| 1 K1 | 154.00 | 0.448 | 82.83 | 0.00 |
| *** | | | | |
| 2 K2 | 15.00 | 1.202 | 83.56 | 0.01 |
| *** | | | | |
| 3 K3 | 15.00 | 4.611 | 79.09 | 0.05 |
| *** | | | | |
| 4 K4 | 0.40 | 0.191 | 80.94 | 0.08 |
| *** | | | | |
|-----|-----|-----|-----|

```



```

-----
| F I C H T N E R | DIGSILENT example | Order: |
| Stuttgart | Harmonic Load Flow Calculation | Date: |
|
| Table A | Harmonic load flow calculation | Annex: / 1 |
| Area: AREA1 | Frequency: 350. Hertz | Bus-Data |
|
| No Bus | rtd. V | Harm - voltage | Uk/rt. V |
| | [KV] | [ V] | [deg] | [%] |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 K1 | 154.00 | 0.460 | 86.36 | 0.00 |
| **** | | | | |
| 2 K2 | 15.00 | 1.233 | 86.89 | 0.01 |
| **** | | | | |
| 3 K3 | 15.00 | 4.626 | 83.76 | 0.05 |
| **** | | | | |
| 4 K4 | 0.40 | 0.188 | 85.09 | 0.08 |
| **** | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|

```

| Table A : Harmonic load flow calculation | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|-----------------|-------------------|-------|---------|--------|--------|
| Area: AREA1 Frequency: 350. Hertz | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | < receiving end < | [deg] | [A] | Annex: | |
| i | j | | j | | [deg] | [deg] | [A] | | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K3 | / | 3 | 0.256 | 177.183 | 0.221 | -2.373 |

| Table A : Harmonic load flow calculation | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|-----------------|-------------------|-------|--------|--------|---------|
| Area: AREA1 Frequency: 350. Hertz | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | < receiving end < | [deg] | [A] | Annex: | |
| i | j | | j | | [deg] | [deg] | [A] | | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K1 | / | 1 | 0.256 | -2.817 | 0.025 | 177.183 |
| 2 | K4 | / | 4 | K3 | / | 3 | 8.373 | -2.373 | 0.221 | 177.627 |

```

-----
| F I C H T N E R I | DIGSILENT example | Order: |
| Stuttgart | Harmonic Load Flow Calculation | Date: |
|
| Table A | Harmonic load flow calculation | Annex: / 1 |
| Area: AREA1 | Frequency: 550. Hertz | Bus-Data |
|
| No Bus | rtd. V | Harm - voltage | Uk/rt. V |
| | [KV] | [V] | [deg] | [%] |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 K1 | 154.00 | 3.668 | 89.52 | 0.00 |
| **** | | | | |
| 2 K2 | 15.00 | 9.841 | 89.86 | 0.11 |
| **** | | | | |
| 3 K3 | 15.00 | 34.639 | 88.01 | 0.40 |
| **** | | | | |
| 4 K4 | 0.40 | 1.327 | 88.89 | 0.57 |
| **** | | | | |
-----

```

| Table A Harmonic load flow calculation Annex: / 2 | | | | | | | | | | |
|---|----------|------|--------|------|-----------------|-----|-------------------|----------|-------|-------|
| Area: AREA1 Frequency: 550. Hertz Line-Data | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [A] | < receiving end < | [deg] | [A] | [deg] |
| i | j | | j | | | | | | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K3 | / | 3 | 1.299 | -179.955 | 0.876 | 0.880 |

| Table A Harmonic load flow calculation Annex: / 3 | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|-----------------|-----|-------------------|-------|-------|----------|
| Area: AREA1 Frequency: 550. Hertz Transformer-Data | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [A] | < receiving end < | [deg] | [A] | [deg] |
| i | j | | j | | | | | | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K1 | / | 1 | 1.299 | 0.045 | 0.128 | -179.955 |
| 2 | K4 | / | 4 | K3 | / | 3 | 33.192 | 0.880 | 0.876 | -179.120 |

| | | | | |
|--------------------|-----|--------------------------------|----------------------------|--------------|
| IF I C H T N E R I | | DIGSILENT example | | Order: |
| Stuttgart | | Harmonic Load Flow Calculation | | Date: |
| Table A | | Harmonic load flow calculation | | Annex: / 1 |
| Area: AREA1 | | Frequency: 650. Hertz | | Bus-Data |
| No | Bus | rtd. V [KV] | Harm - voltage [V] [deg] | Uk/rt. V [%] |
| 1 | K1 | 154.00 | 3.956 89.32 | 0.00 |
| **** | | | | |
| 2 | K2 | 15.00 | 10.614 89.60 | 0.12 |
| **** | | | | |
| 3 | K3 | 15.00 | 35.779 88.13 | 0.41 |
| **** | | | | |
| 4 | K4 | 0.40 | 1.310 88.89 | 0.57 |
| **** | | | | |

| Table A : Harmonic load flow calculation | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|-----------------|-----|-------------------|---------|--------|-------|
| Area: AREA1 | | | | | | | | | | |
| Frequency: 650. Hertz | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [A] | < receiving end < | [deg] | Annex: | |
| i | j | | j | | | [A] | [deg] | | / | |
| 1 | K2 | / | 2 | K3 | / | 3 | 1.186 | 179.763 | 0.657 | 0.909 |

| Table A : Harmonic load flow calculation | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|-----------------|-----|-------------------|--------|--------|----------|
| Area: AREA1 | | | | | | | | | | |
| Frequency: 650. Hertz | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [A] | < receiving end < | [deg] | Annex: | |
| i | j | | j | | | [A] | [deg] | | / | |
| 1 | K2 | / | 2 | K1 | / | 1 | 1.186 | -0.237 | 0.117 | 179.763 |
| 2 | K4 | / | 4 | K3 | / | 3 | 24.880 | 0.909 | 0.657 | -179.091 |

EK2.2. Örnek Sisteme İlişkin Durum II için Smülasyon Sonuçları


```

-----
IF I C H T N E R I : DIGSILENT example           ; Order:
; Stuttgart      ; Harmonic Load Flow Calculation ; Date:
;
;
Table A      ; Harmonic load flow calculation      ; Annex: / 1
-----
Area: AREA1   Frequency: 250. Hertz              ; Bus-Data
-----
No  Bus      rtd. V      Harm - voltage      Uk/rt. V
      [KV]      I V I      [deg]      [%]
-----
1  K1      154.00      7.223      88.55      0.01
****
2  K2      15.00      19.376     89.28      0.22
****
3  K3      15.00      74.346     84.81      0.86
****
4  K4      0.40      3.080      86.65      1.33
****
-----

```

```

-----
| Table A | Harmonic load flow calculation | Annex: | / | 2 |
-----
| Area: AREA1 | Frequency: 250. Hertz | Line-Data |
-----
| No | from bus | (No) to bus | (No) | > sending end > | < receiving end < |
| | | | | | [A] | [deg] [A] | [deg] |
-----
| 1 | K2 | / | 2 | K3 | / | 3 | 5.627 | 179.698 | 5.234 | 0.000 |
-----

```

```

-----
| Table A | Harmonic load flow calculation | Annex: | / | 3 |
-----
| Area: AREA1 | Frequency: 250. Hertz | Transformer-Data |
-----
| No | from bus | (No) to bus | (No) | > sending end > | < receiving end < |
| | | | | | [A] | [deg] [A] | [deg] |
-----
| 1 | K2 | / | 2 | K1 | / | 1 | 5.627 | -0.302 | 0.554 | 179.698 |
| 2 | K4 | / | 4 | K3 | / | 3 | 198.250 | 0.000 | 5.234 | 180.000 |
-----

```

```

-----
| F I C H T N E R I | DISILENT example | Order: |
| Stuttgart | Harmonic Load Flow Calculation | Date: |
|
| Table A | Harmonic load flow calculation | Annex: | / | 1 |
| Area: AREA1 | Frequency: 350. Hertz | Bus-Data |
|
| No Bus | rtd. V | Harm - voltage | Uk/rt. V |
| | [KV] | [V] | [deg] | [%] |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 K1 | 154.00 | 3.917 | 88.74 | 0.00 |
| **** | | | | |
| 2 K2 | 15.00 | 10.508 | 89.26 | 0.12 |
| **** | | | | |
| 3 K3 | 15.00 | 39.429 | 86.13 | 0.46 |
| **** | 0.000 | | | |
| 4 K4 | 0.40 | 1.604 | 87.46 | 0.69 |
| **** | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|

```

| Table A Harmonic load flow calculation Annex: / 2 | | | | | | | | | | |
|---|----------|------|--------|------|-----------------|-------|-------------------|---------|-------|-------|
| Area: AREA1 Frequency: 350. Hertz Line-Data | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [deg] | < receiving end < | [deg] | | |
| i | j | | j | | [A] | [A] | [deg] | [deg] | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K3 | / | 3 | 2.180 | 179.556 | 1.884 | 0.000 |

| Table A Harmonic load flow calculation Annex: / 3 | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|-----------------|-------|-------------------|--------|-------|---------|
| Area: AREA1 Frequency: 350. Hertz Transformer-Data | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [deg] | < receiving end < | [deg] | | |
| i | j | | j | | [A] | [A] | [deg] | [deg] | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K1 | / | 1 | 2.180 | -0.444 | 0.214 | 179.556 |
| 2 | K4 | / | 4 | K3 | / | 3 | 71.370 | 0.000 | 1.884 | 180.000 |

```

-----
| F I C H T N E R | DIGSILENT example | Order: |
| Stuttgart | Harmonic Load Flow Calculation | Date: |
|
| Table A | Harmonic load flow calculation | Annex: / 1 |
|
| Area: AREA1 | Frequency: 550. Hertz | Bus-Data |
|
| No Bus | rtd. V | Harm - voltage | Uk/rt. V |
| | [KV] | [ V] | [deg] | [%] |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 K1 | 154.00 | 7.011 | 88.64 | 0.01 |
| **** | | | | |
| 2 K2 | 15.00 | 18.809 | 88.98 | 0.22 |
| **** | | | | |
| 3 K3 | 15.00 | 66.205 | 87.13 | 0.76 |
| **** | | | | |
| 4 K4 | 0.40 | 2.535 | 88.01 | 1.10 |
| **** | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|

```

| Table A Harmonic load flow calculation Annex: / 2 | | | | | | | | | | |
|---|----------|------|--------|------|-----------------|-----|-------------------|---------|-------|-------|
| Area: AREA1 Frequency: 550. Hertz Line-Data | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [A] | < receiving end < | [deg] | [A] | [deg] |
| i | j | | j | | | | | | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K3 | / | 3 | 2.483 | 179.165 | 1.675 | 0.000 |

| Table A Harmonic load flow calculation Annex: / 3 | | | | | | | | | | |
|---|----------|------|--------|------|-----------------|-----|-------------------|--------|-------|---------|
| Area: AREA1 Frequency: 550. Hertz Transformer-Data | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [A] | < receiving end < | [deg] | [A] | [deg] |
| i | j | | j | | | | | | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K1 | / | 1 | 2.483 | -0.835 | 0.244 | 179.165 |
| 2 | K4 | / | 4 | K3 | / | 3 | 63.440 | 0.000 | 1.675 | 180.000 |

| IF I C H T N E R I | | DISSILENT example | | Order: |
|--------------------|-----|--------------------------------|------------------------|-----------------|
| Stuttgart | | Harmonic Load Flow Calculation | | Date: |
| Table A | | Harmonic load flow calculation | | Annex: / 1 |
| Area: AREA1 | | Frequency: 650. Hertz | | Bus-Data |
| No | Bus | rtd. V [KV] | Harm - voltage [V] | Uk/rt. V [%] |
| 1 | K1 | 154.00 | 7.566 | 88.41 |
| **** | | | | 0.01 |
| 2 | K2 | 15.00 | 20.297 | 88.69 |
| **** | | | | 0.23 |
| 3 | K3 | 15.00 | 68.424 | 87.22 |
| **** | | | | 0.79 |
| 4 | K4 | 0.40 | 2.505 | 87.99 |
| **** | | | | 1.08 |

| Table A : Harmonic load flow calculation | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|-----------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| Area: AREA1 | | | | | | | | | | |
| Frequency: 650. Hertz | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [deg] | [A] | < receiving end < | [deg] | |
| i | j | | j | | | | | | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K3 | / | 3 | 2.267 | 178.854 | 1.256 | 0.000 |

| Table A : Harmonic load flow calculation | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|-----------------|-------|--------|-------------------|-------|---------|
| Area: AREA1 | | | | | | | | | | |
| Frequency: 650. Hertz | | | | | | | | | | |
| No | from bus | (No) | to bus | (No) | > sending end > | [deg] | [A] | < receiving end < | [deg] | |
| i | j | | j | | | | | | | |
| 1 | K2 | / | 2 | K1 | / | 1 | 2.267 | -1.146 | 0.223 | 178.854 |
| 2 | K4 | / | 4 | K3 | / | 3 | 47.580 | 0.000 | 1.256 | 180.000 |

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Bekir Hasarlı

Doğum Tarihi: 01.01.1971

Doğum Yeri: Lüleburgaz

Eğitim

Lüleburgaz Lisesi: 1985-1988

Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Müh. Bölümü:1988-1992

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: 1992-

Meslek

İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü Arş. Gör. :1994