

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİKLİ SİSTEMLERDE GÜÇ FAKTÖRÜ
DÜZELTİLMESİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ**

Elektrik Müh. Ali KIRICI

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

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP

İstanbul, 2007

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLARIN AÇIKLANMASI	3
2.1. Harmoniklerin Üretilmesi.....	4
2.2. Harmonik Akımların Akış Yönü.....	5
2.3. Gerilim ve Akım Harmonikleri Arasındaki İlişki.....	5
2.4. Harmonik Seviyesi Sınırlamaları.....	6
3. HARMONİKLERİN ANALİZİ VE FOURIER SERİLERİ.....	10
3.1. Fourier Analizi.....	10
3.2. Fourier Serilerinin Harmonikli Gerilim ve Akım Dalgalarına Uygulanması...	11
4. HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR.....	22
4.1. Kurulu Harmonik Kaynaklar.....	22
4.2. Yeni Harmonik Kaynaklar.....	22
4.3. Generatörler.....	22
4.4. Transformatörler.....	24
4.5. Ark Prensibi ile Çalışan Aygıtlar.....	27
4.6. Güç Elektronik Düzenekli Donanımlar.....	28
4.7. Döner makineler.....	31
5. HARMONİKLERİN ÇEVRE TÜKETİCİLERE VE ŞEBEKEYE OLAN ETKİLERİ.....	33
5.1. Transformatörler Üzerindeki Etkiler.....	33
5.2. Döner makineler Üzerindeki Etkiler.....	34
5.3. Generatör ve Şebeke Gerilimi Üzerindeki Etkiler.....	34
5.4. Kondansatör Üniteleri Üzerindeki Etkiler.....	35
5.5. İletim Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri.....	36
5.6. İletkenler Üzerindeki Etkiler.....	37
5.7. Sigortalar Üzerindeki Etkiler.....	37
5.8. Koruma Röleleri Üzerindeki Etkiler.....	38
5.9. Yalıtıma Etkiler.....	38
5.10. Anahtarlama Elemanları Üzerindeki Etkiler.....	38
5.11. Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkiler.....	39

5.12.	Kontrol Aygıtları Üzerindeki Etkiler.....	40
5.13.	İletişim Aygıtları Üzerindeki Etkiler.....	40
5.14.	Aydınlatma Aygıtları Üzerindeki Etkiler.....	40
6.	ELEKTRİK TESİSLERİNDE REZONANS OLAYLARI VE BUNLARA KARŞI ALINAN TEDBİRLER.....	41
6.1.	Rezonans Olayları.....	41
6.2.	Harmonik Rezonanslarına karşı tedbirler.....	44
7.	HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTİLMESİNİN BİLGİSAYAR BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ.....	46
7.1.	Sinüsoidal Kaynak ve Nonlineer Yükten Oluşan Devreler.....	46
7.2.	Nonsinüsoidal Kaynak ve Lineer Yükten Oluşan Devreler.....	54
7.3.	Nonsinüsoidal Kaynak ve Nonlineer Yükten Oluşan Devreler.....	58
8.	SONUÇLAR	61
	KAYNAKLAR.....	63
	ÖZGEÇMİŞ.....	65

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 2.1 Sinüsoidal gerilim eğrisi
Şekil 2.2 3. ve 5. harmonikleri içeren dalga şekilleri
Şekil 2.3 Harmonik akımlarının akış yönü
Şekil 4.1 Sinüsoidal şebeke gerilimi ile transformatörün demir çekirdeğine ait mıknatıslanma eğrisi yardımı ile mıknatıslanma akımının elde edilmesi
Şekil 4.2 Tek fazlı köprü eviricinin basit şeması ve evirici çıkışında görülen dalga şekli
Şekil 5.1 6 darbeli köprü çeviricide tipik gerilim ve hat akımı dalga şekli
Şekil 6.1 Seri rezonans devresi
Şekil 6.2 Paralel rezonans devresi
Şekil 6.3 Paralel rezonans devresinin fazör diyagramı
Şekil 7.1 Sinüsoidal kaynak ve nonlineer yüke sahip devrenin paralel kompanzasyonu
Şekil 7.2 Simülatöre ait çalışma adımları
Şekil 7.3 Arayüz ekranında gerilim değişkenleri penceresi
Şekil 7.4 Arayüz ekranında akım değişkenleri penceresi
Şekil 7.5 1. devre tipine ait uygulamada devre parametreleri ve C-GF grafiği
Şekil 7.6 Nonsinüsoidal kaynak ve lineer yüke sahip devrenin paralel kompanzasyonu
Şekil 7.7 2. devre tipine ait uygulamada devre parametreleri ve C-GF grafiği
Şekil 7.8 Nonsinüsoidal kaynak ve nonlineer yüke sahip devrenin paralel kompanzasyonu
Şekil 7.9 3. devre tipine ait uygulamada devre parametreleri ve C-GF grafiği

ÇİZELGE LİSTESİ

- Çizelge 2.1 Uluslararası harmonik limitleri
Çizelge 4.1 154/31.5 kV' luk bir trafonun akım harmonikleri
Çizelge 4.2 Ark ocaklarında en çok rastlanan harmonik akımlarının temel harmonik akımının yüzdesi cinsinden ortalama değerleri
Çizelge 4.3 Doğrultucu tipi ve darbe sayısına göre toplam harmonik bozunumu
Çizelge 4.4 Rotoru sargılı asenkron motorda üretilen akım harmonikleri
Çizelge 5.1 Generatörler için negatif sıralı akım sınırlamaları

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum bu tez çalışmasında harmonikli devrelerde güç faktörünün düzeltilmesine ilişkin araştırmalarımın ve çalışmalarımın sonucu olarak harmonikli devre tiplerini analiz ederek devre parametrelerini hesaplayan bir programı MATLAB ortamında son kullanıcıya yönelik hazırlamaya çalıştım.

Tez sürecimin her aşamasında anlayışını ve desteğini hiç bir zaman esirgemeyen tez danışmanım sayın hocam Y. Doç. Dr. Erdin GÖKALP'e,

Tezimin oluşturulmasında beni yüreklendiren ve yönlendiren değerli hocam Dr. Arif KARAKAŞ'a,

Ve hayatımın her aşamasında olduğu gibi yüksek lisans tezi aşamasında da beni her zaman destekleyen, anlayışını hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü borç bilirim.

Ali KIRICI

İSTANBUL, 2007

ÖZET

Elektrik enerji sistemlerinde, ideal olarak, akım ve gerilim dalga şeklinin sinüsoidal olması ve şebeke frekansının 50 Hz. lik tek bir frekans olması istenir. Fakat, gerek akım ve gerilimleri arasındaki ilişki doğrusal olmayan (nonlineer) elemanların sisteme bağlanması gerekse bazı elektriksel olayların olması neticesinde, sistemde temel bileşen dışında, harmonik akım ve gerilim bileşenleri dolaşmaya başlar.

Harmonik bileşenler sistemdeki akım ve gerilime ait sinüs formunun bozulmasına yol açarlar ve Fourier serileri ile yapılan analizler sonucu bulunurlar.

Nonlineer yüklerin, sinüs formunda bozulmalara yol açtığı yıllardır bilinmesine rağmen, günümüzde dalga şeklindeki bozukluğa duyarlı elemanların kullanılmasının yaygınlaşması, bu konudaki çalışmaları daha önemli hale getirmiştir.

Harmoniklerin bulunmadığı enerji sistemlerinde basit bir inceleme ile güç faktörünün istenen aralıkta tutulması mümkün iken harmonikli ortamda, harmonik bileşenlerin bulunması, toplam harmonik distorsiyonunun bulunması ve güç faktörünün optimizasyonuna ilişkin ek analizler gerekmektedir. Bu çalışmada harmonikli olası devre tiplerine ait parametreleri hesaplayarak devreyi analiz eden, MATLAB’ da hazırlanmış, dosya adı GÜÇ FAKTÖRÜ OPTİMİZASYON ANALİZÖRÜ olan bir program sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Harmonikler, Harmonikleri azaltma, Güç faktörünün düzeltilmesi

ABSTRACT

In electrical energy systems, ideally, the wave form of current and voltage is required to be sinusoidal and this wave form has to have a single 50 Hz frequency. But because of the loads on the system that has a nonlinear relationship between their voltage and current forms or for some other electrical reasons, beside the main voltage and current, some harmonics occur.

Harmonics disturb the sinusoidal form of voltage and current in the power system are calculated with the use of fourier series analyses.

Nonlinear loads to disturb the sinusoidal wave form was known for many years. But today, the use of equipment that is sensitive to disturbance has largely increased, therefore the studies about the harmonics become vital.

With a simple study, the power factor of an energy system that has no harmonics can be easily tuned to the desired range. Studying a system with harmonics requires additional analyses to calculate the harmonic components, total harmonic distortion and to optimize the power factor.

In this study, a MATLAB program named as POWER FACTOR OPTIMIZATION ANALYSER that calculates the parameters for possible circuit types that include harmonics, is presented.

Keywords: Harmonics, reduction of harmonics, power factor correction.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin diğer enerji türleriyle kıyaslanıp sağladığı avantajlar göz önüne alındığında, kullanımının kaçınılmaz olduğu anlaşılır. Gün geçtikçe elektrik enerjisine olan talep artmakta ve bu durum, üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında, enerjinin sürekliliği, gerilim ve frekansın kararlılığı, işletmelerde güç faktörünün 1' e yakınlığı, faz gerilimlerinin dengeli olması ve oluşan harmoniklerin belirli bir aralıkta sınırlandırılması gibi bazı kriterlerin göz önünde tutulmasını gerekli kılar. Son yıllarda üzerindeki çalışmalar daha da önemli hale gelen bu konu, elektrik mühendisliğinde “güç kalitesi” olarak bilinmektedir.

Elektrik güç sistemlerine bağlanan ve akım ve gerilimleri arasındaki matematiksel ilişki doğrusal olmayan (nonlinear) elemanlar harmonik kirliliğin başlıca sebebidir. Manyetik ya da elektrik devre lineersizliğine sahip olan bu elemanlar sisteme bağlandığında devrede harmonik akım ve gerilimlere neden olup son kullanıcıya verilen enerjinin kalitesini olumsuz etkilerler.

Güç sistemlerindeki akım ve gerilim büyüklüklerinin ideal olarak temel frekanslı sinüsoidal bir değişime sahip olması arzu edilir. Bu değişimin ön koşulu ise sinüsoidal bir kaynak ve bu kaynağa bağlı tüm yüklerin lineer karakterde olmasıdır. Ne var ki, günümüzde özellikle yarı iletkenlerin, cihazlarda çok daha yaygın olarak kullanılması, ark prensibiyle çalışan cihazların kullanılması gibi sebeplerden dolayı sistemlerdeki akım ve gerilimin dalga şekli bozulur ve sistemde harmonikler oluşur. Güçleri düşük de olsa enerji sistemlerindeki nonlinear yüklerin sayılarının fazla olması, sistemdeki ek kayıpların ve harmonik distorsiyon değerinin yükselmesine yol açar.

Harmonikler güç sistemlerinde genel olarak cihazların zarar görmesine hatta tamamen kullanılamaz hale gelmesine ve işletmenin sürekliliğinin riske girmesine sebep olurlar. Kendileri harmonik üretmedikleri halde harmonikli sistemden beslenen tüketiciler harmonik kirliliğe maruz kalabilir ve çeşitli olumsuzluklar yaşayabilirler.

Harmonik bileşenler Fourier serileri yardımıyla yapılan analizler sonucu belirlenebilmektedir. Fransız fizikçisi Joseph FOURIER, zamana göre sinüsoidal değişmeyen fakat periyodik olarak değişen dalgaların yine zamana göre değişik genlik ve frekanstaki sonsuz sayıdaki sinüsoidal dalgaların toplamı olacağını göstermiştir. Joseph Fourier tarafından açıklanan bu ifadeye fourier analizi veya fourier serisi denir.

Fourier serileri, harmonikli dalganın fonksiyonunu sinüsoidal bir hale getirir. Bu fonksiyonlara periyodik fonksiyonlar da denir. Fourier serilerinin, elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analizi olarak adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada, harmonikli ortamda güç faktörünün düzeltilmesine ilişkin yaklaşımlar yer almaktadır. Ayrıca olası tüm devre tipleri için devre parametrelerini hesaplayarak devreyi analiz eden, matlab ortamında hazırlanmış ve kullanıcı arayüzüne sahip bir program sunulmaktadır.

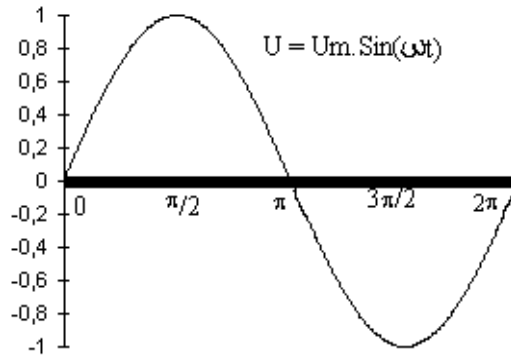
Tezin birinci bölümünde, harmoniklerle ilgili, genel anlamda kısa açıklamalar yapılmış, ikinci bölümde harmoniklerin tanımına ve temel kavramlara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, harmoniklerin analizi anlatılmış ve Fourier serileri tanıtılmaya çalışılmıştır. Dördüncü bölüm, harmonik üreten kaynakları beşinci bölüm ise harmoniklerin sisteme ve çevre kullanıcılara etkileri hakkındaki bilgileri kapsamaktadır. Altıncı bölümde, harmoniklerin rezonansa etkisi ve rezonansa karşı alınması gereken önlemler açıklanmıştır. Yedinci bölümde, harmonikli devrelerde, güç faktörünün optimizasyonua ilişkin bilgiler sunulmuş ve her devre tipi için sonuçların alınabileceği bir matlab simulink uygulamasına yer verilmiştir. Sekizinci bölüm sonuçları kapsamakla birlikte bu bölümde harmoniklerin optimum seviyede giderilmesi için yapılması gerekenler ve alınması gereken tedbirler açıklanmaya çalışılmıştır.

2. HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLARIN AÇIKLANMASI

Elektrik sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin sinüsoidal ve 50 Hz frekansta (Şekil 2.1.) olması arzu edilir. Bu koşul elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir.

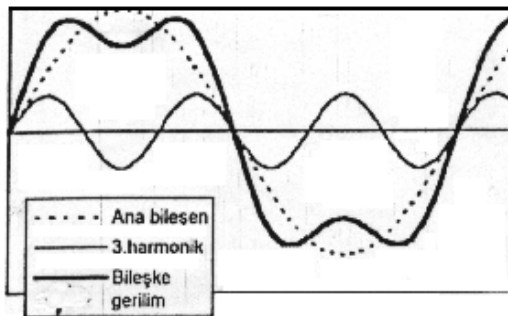
Ancak, enerjinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve kullanımını gibi işletmeden gelen bazı etkilerden dolayı akı, akım ve gerilim gibi temel büyüklükler sinüsoidal özelliklerini kaybederler. Dalga biçimleri oldukça karmaşık hale gelir. Bu karmaşık dalgalar ise sonuçta harmonik içerir veya oluştururlar. Şekil 2.2. a ve b 'de 3. ve 5. harmonikleri içeren dalgalar görülmektedir.

Bu açıklamadan anlaşılacağı üzere, işletme araçlarının elektriksel büyüklüklerinin hesaplanması esnasında karakteristiklerin lineer olmaması ayrıca göz önünde bulundurulmalıdır.

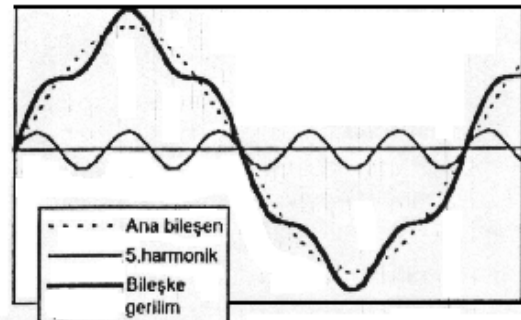


Şekil 2.1. Sinüsoidal Gerilim Eğrisi

Şekil 2.2. a ve b' de çeşitli bileşik dalga şekilleri ve bu dalga şekillerinin temel bileşeni (1.harmonik) ile çeşitli harmonikleri görülmektedir.



Şekil 2.2.a. n=3 φ=0°



Şekil 2.2.b. n=5 φ=0°

Şekil 2.2.a ve b, 3. ve 5. harmonikleri içeren dalga şekilleri.

2.1. Harmoniklerin Üretilmesi

Bir işletmede harmonik oluşmasının başlıca nedeni, elektrik devrelerinde kullanılan lineer olmayan devre elemanlarıdır. Bu devre elemanlarının, gerilimi ile akımı arasındaki bağıntının lineer olmayışından harmonikler oluşmaktadır. Magnetik devrelerin aşırı doyması, elektrik arkları ve güç elektroniği devrelerindeki sinüsoidal gerilimin anahtarlanması ve kıyılması lineer olmayan olaylardır.

Demir çekirdekli aygıtlar doyma bölgesinde çalışıyorlarsa harmonik akımları üretirler. Ark fırınları ve kaynak makinaları da harmonik üreten kaynaklardandır. Redresör ve tristörler, sinüsoidal akım dalgasını kıyarken harmonikler oluştururlar. Ayrıca yüksek gerilim hatlarındaki korona olayları ve kısadevre arızalarında meydana gelen arklar da harmonik oluşturabilirler.

Bu tür lineer olmayan yükler, 50 Hz temel frekanslı aktif ve reaktif güçle birlikte, harmonik frekanslı akımlar üreten tüketiciler olarak kabul edilirler. Bu tüketicilerin ürettiği harmonik frekanslı akımlar, devrelerini şebeke ve diğer tüketiciler üzerinden tamamlayarak harmonik frekanslı gerilimler meydana getirirler. Bu gerilimler ise başlangıçta tam sinüsoidal kabul edilen gerilimin dalga şeklini bozarlar. Bu bozulma, diğer bir tabirle şebekenin değişik noktalarındaki gerilim harmoniklerinin değeri; yükün meydana getirdiği harmonik akımının değerine, civar tüketicilerin ve şebekenin parametrelerine doğrudan doğruya bağlıdır.

Harmonik akımlar nedeniyle sistemdeki gerilim düşümleri artacak, generatör, transformatör ve motorlardaki kayıplar büyüyecek ve ayrıca harmonikler nedeniyle sistemde çeşitli frekanslar bulunacağından rezonans meydana gelme olasılığı artacaktır. Rezonans sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler işletmedeki aygıtlara zarar verecektir.

Uygulamada en çok 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerle karşılaşılır. Ancak 11. ve 13. harmoniklerin genlikleri temel dalgaya göre çok küçük olduğundan özel haller dışında dikkate alınmazlar. Daha çok 5. ve 7. harmoniklere ilişkin önlemler alınmaya çalışılır. Elektrikli cihazlara en büyük zararı frekansı 5 kHz' den küçük olan harmoniklerin verdiği kabul edilmektedir.

Harmonik üretimi bakımından çok çeşitli imkanlarla karşılaşılır. En belirgin sınır halleri şunlardır:

Harmoniksiz gerilim ile işletme: İşletme araçlarının karakteristikleri lineer değilse harmonikli akım meydana gelir. Bu akımın, iç empedansı çok büyük olan bir akım kaynağında üretildiği kabul olunur.

Harmoniksiz akım ile işletme: İşletme araçlarının karakteristiğinin lineer olmaması sebebi ile harmonikli bir gerilim meydana gelir. Bu gerilimin iç empedansı ihmal edilebilecek kadar küçük olan bir gerilim kaynağından üretildiği kabul edilir.

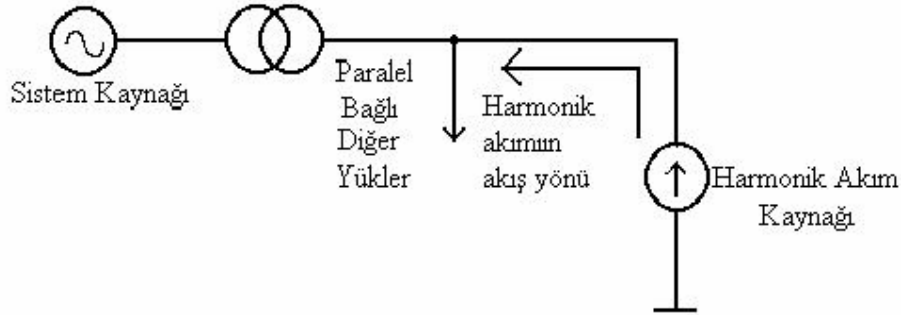
Bazı hallerde akım harmonikli ise, bunun etkisi ile gerilimde harmonik kazanır. Aksine bir durum olarak, gerilim harmonikli ise, bu, akımında harmonikli olmasını gerektirir.

Bunlardan en önemlisi ve pratikte en çok rastlanan durum, birinci hale tekabül eder; yani şebekeden tesise uygulanan faz arası gerilim sinüs şeklinde olduğu halde özellikle akım ve bu arada faz gerilimi harmonikli olurlar.

2.2. Harmonik Akımlarının Akış Yönü

Harmonik akımları genellikle harmonik kaynağından sistem kaynağına doğru akarlar. Şekil 2.3.'te harmonik akımlarının akış yönü görülmektedir. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarının toplamıdır.

Tipik olarak sistem kaynak empedansı, paralel bağlı yük empedanslarının toplamının (paralel eşdeğerlerinin) %5'i kadardır. Bu yüzden normal olarak harmonik akımlarının %90-95'i sisteme doğru akar. Eğer yüklerin büyük bir çoğunluğu lineer ise generatörlerde önemli miktarda harmonik akımı oluşmaz.



Şekil 2.3. Harmonik akımlarının akış yönü

2.3. Gerilim ve Akım Harmonikleri ve Aralarındaki İlişki

Güç sisteminde gerilim, harmonik bileşenler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenir. Buna karşılık harmonikli bir akım, sadece harmonikli akım üreten bir yüke etki edebilir. Tabii ki gerilimdeki harmoniklerin nedeni, güç sistemi empedansından akan harmonikli bir akımdır. Bu nedenle gerilim harmoniklerini önlemenin yolu, harmonik akımlarının akışını kontrol etmek ve bu akımları gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmaktır. Sistemdeki herhangi bir yerde harmonikli bir akımın oluşması, her zaman sorunların ortaya çıkacağı anlamına gelmez. Güç sistemi herhangi bir sorun yaratmadan önemli miktarda

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

Eğer harmonikli akım bir yüksek empedans yolunda veya rezonans devresinde akarsa, gerilimlerde harmonik bileşenler içermeye başlar. Yani sonuçta dolaylı bir etkidir. Akım harmoniklerinin tek doğrudan etkisi akım yolunda bulunan elemanlarda ek ısınmaya ve kayıplara yol açmasıdır.

Güç sistemlerinde gerilim veya akım harmoniklerinden hangisinin daha önemli olduğunu ve hangisinin kontrol edilmesi gerektiğini söylemek zordur. Bunun için sistemin genel olarak ele alınması gereklidir.

Önceden belirtildiği gibi lineer olmayan bir elemanın akım-gerilim karakteristiği lineer değildir. Eleman eğer saf sinüs biçimli bir gerilim kaynağına bağlanırsa, elemanın akımı harmonik bileşenler içerir. Eğer eleman saf sinüs biçimli bir akım kaynağına bağlanırsa, elemanın gerilimi harmonik bileşenler içerir. Yani lineer olmayan bir elemanın akım veya gerilimden herhangi birisi veya her ikisi birden harmonik bileşenler içerebilir. Ancak her ikisi birden saf sinüs biçimli olamaz.

Güç sistemlerinde güç kaynağının empedansı yük empedansına göre genelde küçüktür. Bu nedenle sistemdeki gerilim harmonik seviyeleri, bazen izin verilebilir değerleri aşmasına rağmen genelde düşüktür. Sistemdeki akım dalga şekli yaklaşık olarak sabittir ve lineer olmayan yükler, sabit harmonik akım kaynakları olarak düşünülebilirler. Paralel rezonans koşullarında bazı özel frekanslarda kaynak empedansı oldukça büyük değerler alabilir.

Görüldüğü gibi harmonik akım üreten lineer olmayan yüklerin etkisi, sistem karakteristiklerine (özellikle sistem empedansına) bağlıdır. Harmonikli akım dalga şekline sahip bir yükün ilk aşamada hem güç sistemine hem de diğer tüketicilere olumsuz bir etkisi olacağını söylemek doğru değildir.

2.4. Harmonik Seviyesi Sınırlamaları

Teknolojinin ilerlemesiyle harmonik kaynaklarının sayısında gittikçe artmaktadır. Artan bu harmonik kaynaklarında elektrik şebekelerinde istenilmeyen olaylara yol açmaktadır. Bundan dolayı çeşitli ülkelerdeki standart kuruluşları harmoniklere karşı bazı sınırlamalar getirmeyi uygun bulmuştur. Bu konuda dikkate alınan en önemli ölçüt Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) 'dır. Başka bir deyişle bozulma faktörüdür. Genlikler, gerilimlerin genliğini gösteriyorsa gerilim toplam harmonik distorsiyonu (gerilim bozulma faktörü) THD_V , akımların genliğini gösteriyorsa akım toplam harmonik distorsiyonu (akım bozulma faktörü) THD_I , adını alırlar. (THD_V) en çok paralel bağlı yükleri incelemek için yararlı olurken; (THD_I) devre kesici ve transformatör gibi güç sistemine seri olarak bağlı elemanlar üzerinden

akan harmonik akımları tanımlamak için kullanılır. [6] Gerilim harmonikleri sistemdeki tüm yükleri etkilediğinden ve harmonik akımlarının etkisi özel sistem karakterlerine bağlı olduğundan, gerilim harmonikleri için standart sınırlamalar belirlemek daha kolaydır.

Gerilim Toplam Harmonik Distorsiyonu (Gerilim Bozulma Faktörü) THD_V ,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (2.1)$$

şeklindedir.

Akım Toplam Harmonik Distorsiyonu (Akım Bozulma Faktörü) THD_I ,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.2)$$

şeklindedir.

Bunun yanında özellikle Avrupa’da güç sistem harmonik distorsiyonu ölçümünde “Tepe Faktörü” (DIN) kullanılmaktadır. Tepe faktörü (DIN) dalga şeklinin bir diğer karakteristiğidir. Tepe değerinin RMS değerine oranı olarak tanımlanır ve ideal bir sinüs eğrisi için $\sqrt{2}$ ’dir. Tepe faktörü (DIN) bazı problemlerin tanımlanması için uygun olmakla birlikte, işaretin genel bozulmasını nicelendirmekte yetersizdir.

$$\text{Tepe Faktörü(DIN)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{mn}^2}}{U_{RMS}} \quad (2.3)$$

şeklindedir.

U_{RMS} ’nin By Parseval’s teoremine göre değeri,

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (2.4)$$

şeklindedir.

Küçük mertebeli harmoniklerin distorsiyonlarında (TDH_V) ve (DIN) faktörleri yaklaşık olarak birbirine eşittir. Çizelge 2.1 ‘de uluslararası harmonik limitleri görülmektedir.

Çizelge 2.1 Uluslararası Harmonik Limitleri

	Gerilim	THD _v	THD _i	V _n / V _i	V _n / V _i	I _n / I _i
Ülkeler	Değerleri			Tek	Çift	
	KV	%	%	%	%	%
Avustralya	<33	5.0		4.0	2.0	
Dağıtım,	33~66	3.0		2.0	1.0	
İletim,	>110	1,50		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
U.S.A. Özel	2,4~66	8.0				
	>115	1,5				
Genel	33~66	5.0				
	>132	1,5				
Batı Almanya	<15	3.0			5.0	
Türkiye	*	1,6		1.0	0,6	
İngiltere	<0,415	5.0		4.0	2.0	
	6,6~11	4.0		3.0	1,75	
	33~66	3.0		2.0	1.0	
	>132	1,5		1.0	0,5	

Besleme kaynağı, harmonik üreten bir yük için kullanılmadıkça dağıtım sistemlerindeki gerilim harmonikleri normalde %5' den daha az olmalıdır. Bu sınırlar, motorları ve elektronik kontrol elemanlarını içeren paralel bağlı yüklerin harmoniklerini temel almaktadır.

Bazı standartlar bu sınırlamalarda daha duyarlı davranmakta THD için %3, her bir harmonik gerilim için ise %2 gibi sınırlamalar getirmektedir. Sistemdeki harmonik gerilim sınırlamalarını her bir tüketici için söylemek zordur. Çünkü güç sistemindeki akım ve gerilimlerin harmonik içeriği sabit değildir.

Her bir tüketicinin oluşturduğu harmonik akımları ve her bir tüketici için sistem empedans karakteristikleri birbirinden farklıdır. Tüketicilerin oluşturduğu harmoniklerin faz açılarının da etkisi vardır.

Doğrusal olmayan yüklerin sistemdeki dağılımından, kondansatörlerin devreye girip çıkmasından etkilenir. Ayrıca, bir güç sisteminde değişik tipte ve çok sayıda yüklerin bulunması harmoniklerin yarattığı bütün bozucu etkileri ifade edebilecek yalın bir ölçüt geliştirmesini zorlaştırmaktadır.

3. HARMONİKLERİN ANALİZİ VE FOURIER SERİLERİ

Alternatif akım tesislerinde elektrik enerjisinin üretilmesi ve tüketilmesi esnasında gerilimin ve akımın tam sinüs şeklinde olması arzu edilir ve normal şebeke frekansı 50 Hz'dir. Fakat bazı yan tesirler ve bozucu olaylar yüzünden gerilimin ve akımın şekli bozulur ve sinüsoidal olma özelliklerini kaybederler.

Harmonik dalgaların, sinüsoidal gerilimin nonlinear bir yüke verilmesiyle yada sinüsoidal olmayan bir gerilimin lineer veya nonlinear bir yüke verilmesiyle oluştuğu görülmektedir.

3.1. Fourier Analizi

Fransız fizikçisi Joseph FOURIER, zamana göre sinüsoidal değişmeyen fakat periyodik olarak değişen dalgaların yine zamana göre değişik genlik ve frekanstaki sonsuz sayıdaki sinüsoidal dalgaların toplamı olacağını göstermiştir. Joseph Fourier tarafından açıklanan bu ifadeye fourier analizi veya fourier serisi denir.

Fourier serileri, harmonikli dalganın fonksiyonunu sinüsoidal bir hale getirir. Bu fonksiyonlara periyoda haiz fonksiyonlarda denir. Fourier serilerinin, elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analiz olarak adlandırılmaktadır.

3.1.1. Periyodik Fonksiyonlar

t bağımsız bir değişken olmak üzere f (t) fonksiyonu $T \neq 0$, $-\infty < t < \infty$ için $f(t) = f(t+T)$ eşitliğini sağlayan T sayısına periyot, f (t) fonksiyonuna da periyodik fonksiyon denir. Sin(t) ve Cos(t) trigonometrik fonksiyonlarının periyodu $T=2\pi$, Sin(nt) ve Cos(nt) ($n > 0$) trigonometrik fonksiyonlarının ise $T=2\pi/n$ 'dir.

3.1.2. Trigonometrik Seriler

Fizikte $f(t) = F_m \cdot \sin(\omega t + \alpha)$ şeklinde tanımlanan periyodik fonksiyona harmonik yada harmonik titreşim fonksiyonu denir.

Öte yandan harmonik fonksiyonun periyodu $T=2\pi/\omega$ olmak üzere $f(t) = f(t+2\pi/\omega)$ $-\infty < t < \infty$ elde edilir. F_m genlik, ω harmoniğin açısal frekansı (açısal hızı), $\omega t + \alpha$ ifadesi faz, α sabitine de başlangıç fazı denir.

$A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ ve $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$ gerçel sabitler olmak üzere,

$$F(t) = A_0 + A_1 \cdot \sin(1t) + A_2 \cdot \sin(2t) + A_3 \cdot \sin(3t) + \dots + A_n \cdot \sin(nt) + B_1 \cdot \cos(1t) + B_2 \cdot \cos(2t) + B_3 \cdot \cos(3t) + \dots + B_n \cdot \cos(nt) \quad (3.1)$$

ve

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(nt) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \cos(nt) \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilen ifadeler t cinsinden trigonometrik seri denir.

3.2 Fourier Serilerinin Harmonikli Gerilim ve Akım Dalgalarına Uygulanması

3.2.1. Harmonikli Gerilimin Fourier Analizi

Sinüs şeklinde olmayan bir gerilim için,

$$u(t) = A_0 + A_1.\text{Sin}(1\omega t) + A_2.\text{Sin}(2\omega t) + A_3.\text{Sin}(3\omega t) + \dots + A_n.\text{Sin}(n\omega t) + B_1.\text{Cos}(1\omega t) + B_2.\text{Cos}(2\omega t) + B_3.\text{Cos}(3\omega t) + \dots + B_n.\text{Cos}(n\omega t) \quad (3.3)$$

$$u(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n.\text{Sin}(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n.\text{Cos}(n\omega t) \quad (3.4)$$

fourier katsayıları cinsinden (3.3) ve (3.4) formülleri yazılabilir. Şimdi formül (3.4)'ü genlikler cinsinden yazalım,

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{mn}.\text{Sin}(n\omega t + \alpha_n) \quad (3.5)$$

şeklindedir.

n. harmonik geriliminin (U_{mn}) tepe (maksimum) değeri,

$$U_{mn} = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (3.6)$$

şeklindedir.

n. harmonik geriliminin (α_n) faz açısı,

$$\alpha_n = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (3.7)$$

'dir.

3.2.2. Harmonikli Akımın Fourier Analizi

Yukarıda verilen formülleri akımlar için de düzenlersek,

$$i(t) = a_0 + a_1.\text{Sin}(1\omega t) + a_2.\text{Sin}(2\omega t) + a_3.\text{Sin}(3\omega t) + \dots + a_n.\text{Sin}(n\omega t) + b_1.\text{Cos}(1\omega t) + b_2.\text{Cos}(2\omega t) + b_3.\text{Cos}(3\omega t) + \dots + b_n.\text{Cos}(n\omega t) \quad (3.8)$$

$$i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n.\text{Sin}(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n.\text{Cos}(n\omega t) \quad (3.9)$$

fourier katsayıları cinsinden (3.8) ve (3.9) formülleri yazılabilir. Şimdi (3.9) formülünü genlikler cinsinden yazalım,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (3.10)$$

şeklindedir.

n. harmonik akımının (I_{mn}) tepe değeri,

$$I_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3.11)$$

şeklindedir.

n. harmonik akımının (β_n) faz açısı,

$$\beta_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (3.12)$$

'dir.

Yukarıdaki formüllerde;

t : Bağımsız değişkendir. Elektrik enerji sistemlerinde (ωt) olarak kullanılır.

A₁, A₂, ... ,A_n ve **a₁,a₂, ... ,a_n** : Harmonikli gerilim ve akımların fourier serilerinin sinüslü bileşenlerinin çarpım katsayılarıdır.

B₁, B₂, ... ,B_n ve **b₁,b₂, ... ,b_n** : Harmonikli gerilim ve akımların fourier serilerinin kosinüslü bileşenlerinin çarpım katsayılarıdır.

U_{mn} ve **I_{mn}** n. : Harmonikli gerilim ve akımın tepe (maksimum) değeridir.

α₁, α₂, α₃, ... ,α_n ve **β₁, β₂, β₃, ... , β_n** : Gerilim ve akımın faz açısıdır.

nω : n. harmoniğin dairesel frekansı (açısal hızı)'dır.

3.2.3. Fourier Serisinin Katsayılarının Bulunması

Fourier serisinin katsayılarını analitik, grafik yada ölçme yöntemiyle bulabiliriz. Eğer harmonikli dalğanın denklemi yazılabiliyorsa analitik yöntem kullanılabilir.

Ancak harmonikli dalğanın denkleminin yazılamadığı durumlarda grafiklerden yararlanılır. Grafikler genellikle, osilaskoptan çekilen fotoğrafla (osilogramla) elde edilir. Grafikleri harmoniklere ayırmak için teoride çeşitli yöntemler kullanılır. Bunlara Peryy metodu, Rothe'nin grafik metodu, Runge metodu ve Fisher-Hinnen'in grafik metodu gibi metotlar örnek olarak verilebilir. Bu grafik metotlarının ortak noktası, harmonikli dalğanın periyodunu eşit dilimlere bölmek ve bu zaman dilimlerindeki eğrinin almış olduğu değerleri sentezleyerek, karmaşık eğriyi harmoniklerine ayırmaktır.

Dalgaların harmoniklerini ölçmek için çeşitli ölçüm cihazlarında kullanılır. Bunlara örnek olarak süperheterodin tipi harmonik genlik analizörü, dijital harmonik analizörü, örnekleme yöntemiyle çalışan analog harmonik analizörü ve band geçiren filtre tipi analizörleri verebiliriz. Bu harmonik analizörlerinin pek çoğunun yapmış olduğu ölçüm oran ölçümüdür. Yani harmonikli dalganın genliğinin temel bileşenin genliğine olan oranını ölçerler.

Harmonikli dalganın denklemi yazılabiliyorsa analitik yöntemle katsayılarını bulabiliriz.

Harmonikli gerilimin fourier serisinin katsayılarını,

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u(t) dt \quad (3.13)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (3.14)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (3.15)$$

formülleri ile bulabiliriz.

Harmonikli akımın fourier serisinin katsayılarını,

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(t) dt \quad (3.16)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (3.17)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (3.18)$$

formülleri ile bulabiliriz.

Periyodu ($0 \sim 2\pi$) veya ($-\pi \sim \pi$) alabiliriz.

Genellikle rastlanan periyodik alternatif akım büyüklüklerinde pozitif ve negatif yarı dalgaların yüzeyleri birbirine eşit olduğundan, doğru gerilim bileşeni (A_0, a_0) bu gibi hallerde sıfıra eşittir.

3.2.4. Dalga Simetrisi

Sinüsoidal olmayan periyodik dalga şekillerinin özelliklerine göre fonksiyonun yapısı da bazı özellikler gösterir.

a) $u(t) = u(-t)$ ise buna çift simetrik fonksiyon denir ve bu durumda $A_n=0$ 'dır ve fonksiyon sadece kosinüslü terimlerden oluşur.

$$A_n=0 \quad B_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{Çift simetri.}$$

b) $u(t) = -u(-t)$ ise buna tek simetrik fonksiyon denir ve bu taktirde $B_n=0$ 'dır ve fonksiyon sadece sinüslü terimlerden oluşur.

$$B_n = 0 \quad A_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad \text{Tek simetri}$$

c) $u(t) = -u(t - \pi)$ veya $u(t) = -u(t + \pi)$ ise yani fonksiyon (0) noktasına göre simetrik ise bu durumda $u(t)$ fonksiyonu yarı dalga simetriye sahiptir. Tek veya çift simetriden farklı olarak yarı dalga simetrisi $t=0$ noktasının seçimiyle ilgili değildir. Yarı dalga simetrisine sahip bir fonksiyonun fourier serisinde sadece tek harmonikleri ihtiva ettiği görülür. A_n ve B_n 'nin yalnız tek sayılı terimleri olduğu için harmonik mertebesi $n = 1,3,5,7,9...$ gibi sayılar alır.

n = tek yarı dalga simetrisi

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (3.19)$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (3.20)$$

n = çift yarı dalga simetrisi

$$A_n = 0 \quad B_n = 0$$

d) Bir dalga şekli için tek simetri yada çift simetri ile birlikte yarı dalga simetrisi de mevcut olabilir.

- $u(t) = -u(t - \pi)$ veya $u(t) = -u(t + \pi)$ ve $u(t) = -u(-t)$

Yarı dalga simetri ve Tek simetri

$$A_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad \mathbf{n = tek} \quad (3.21)$$

$$A_n = 0 \quad \mathbf{n = çift}$$

$$B_n = 0$$

- $\mathbf{u(t) = -u(t - \pi)}$ veya $\mathbf{u(t) = -u(t + \pi)}$ ve $\mathbf{u(t) = u(-t)}$

Yarı dalga simetri ve Çift simetri

$$B_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \mathbf{n = tek} \quad (3.22)$$

$$B_n = 0 \quad \mathbf{n = çift}$$

$$A_n = 0$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eğer yarı dalga simetrisi yanında $u(t) = -u(\pi - t)$ ise yani eğrinin bir yarı periyottaki bölümü π kadar kaydırıldığında ikinci yarı periyottaki bölümüne t eksenine göre simetrik ve eşit ise, bu durumda fonksiyon tek mertebeli sinüs fonksiyonlarından oluşur. Sinüsoidal olmayan endüksiyon, akım, gerilim vb.. gibi elektriksel büyüklükler için en çok rastlanan şekiller dikdörtgen, eşkenar üçgen ve trapez dalga şekilleri veya bunun benzerleridir. Bu eğrilerde $A_n=0$ olduğu gibi $n=1,3,5,9\dots$ dır, yani bu eğrilere ait fourier serisi tek mertebeli sinüslü terimlerin toplamına eşittir. Bunlardan 3. ve 3'ün katları olan 3., 9., 15., ... vb.. gibi harmoniklerin R, S, T fazlarındaki değerleri arasındaki faz farkları , 120° 'nin ve 240° 'nin 3 katına veya 3'ün katlarına eşit olduklarından bu faz farkları daima 360° 'nin tam sayılı katlarına eşittir. Bu yüzden 3 ve 3'ün katlarına eşit olan harmonikler daima R, S ve T fazlarında eşit fazlıdır ve cebirsel toplanırlar; onun için bunlara sıfır bileşenide denilebilir. Bunun dışında kalan 1., 7., 13., gibi harmonikler sağa dönen (doğru sistem) ve 5., 11., 17., gibi harmonikler sola döner (ters sistem) sistemler verirler.

3.2.5. Harmonikli Gerilim ve Akımın Ortalama Değeri

Harmonikli gerilimin ve akımın ortalama değerlerini,

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) dt \quad (3.23)$$

ve

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(t) dt \quad (3.24)$$

formülleri ile bulabiliriz.

Periyodik alternatif akım büyüklüklerinde U_0 ve I_0 değerleri (doğru gerilim bileşenleri) sifıra eşittir.

3.2.6. Harmonikli Gerilim ve Akımın Etkin Değeri

- **Gerilim denklemi ;**

Formül (3.5)'teki gerilim denklemi,

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n)$$

şeklindeydi.

Yukarıdaki formülü açarsak;

$$u(t) = U_0 + U_{m1} \cdot \sin(1\omega t + \alpha_1) + U_{m2} \cdot \sin(2\omega t + \alpha_2) + U_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots \\ \dots + U_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (3.25)$$

şeklinde olacaktır.

Sinüsoidal olmayan bir dalganın etkin (efektif veya rms) değeri, harmonik değerlerinin karesel ortalamasına eşittir.

Elektrik makinalarında konstrüksiyon bakımından çift harmonik bulunmadığı için gerilimin ani değerinin karesi;

$$u^2(t) = [U_0 + U_{m1} \cdot \sin(1\omega t + \alpha_1) + U_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \alpha_3) + U_{m5} \cdot \sin(5\omega t + \alpha_5) + \\ \dots + U_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n)]^2 \quad (3.26)$$

olacağından bu ifade,

$$u^2(t) = U_0^2 + U_{m1}^2 \cdot \sin^2(1\omega t + \alpha_1) + U_{m3}^2 \cdot \sin^2(3\omega t + \alpha_3) + U_{m5}^2 \cdot \sin^2(5\omega t + \alpha_5) + \dots \\ + U_{mn}^2 \cdot \sin^2(n\omega t + \alpha_n) + \dots \\ + 2U_0 \cdot U_1 \cdot \sin(1\omega t + \alpha_1) + 2U_0 \cdot U_3 \cdot \sin(3\omega t + \alpha_3) + 2U_0 \cdot U_5 \cdot \sin(5\omega t + \alpha_5) + \dots \\ + 2U_0 \cdot U_n \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n) + \dots + \\ + 2U_1 \cdot U_3 \cdot \sin(1\omega t + \alpha_1) \cdot \sin(3\omega t + \alpha_3) + 2U_1 \cdot U_5 \cdot \sin(1\omega t + \alpha_1) \cdot \sin(5\omega t + \alpha_5) + \dots \\ + 2U_k \cdot U_r \cdot \sin(k\omega t + \alpha_k) \cdot \sin(r\omega t + \alpha_r) + \dots \quad (3.27)$$

şeklini alır.

0'dan 2π 'ye kadar, 1 periyot için $u^2(t)$ 'nin integralini hesaplayalım. Sabit terimin integrali,

$$\int_0^{2\pi} U_0^2 dt = 2\pi \cdot U_0^2$$

(3.28)

Sinüslerin karelerinin 1 periyot için integralleri ise,

$$U_{mn}^2 \cdot \text{Sin}^2(n\omega t + \alpha_n) = \frac{U_{mn}^2}{2} \cdot [1 - \text{Cos } 2 \cdot (n\omega t + \alpha_n)] \quad (3.29)$$

olduğu göz önünde tutularak

$$2\pi \cdot \frac{U_{mn}^2}{2}$$

şeklinde olacaktır.

$2U_0 \cdot U_n \cdot \text{Sin}(n\omega t + \alpha_n)$ şeklindeki sinüsoidal terimlerin 1 periyot için integralleri sıfırdır.

$2U_k \cdot U_r \cdot \text{Sin}(k\omega t + \alpha_k) \cdot \text{Sin}(r\omega t + \alpha_r)$ şeklindeki iki sinüs çarpımı halindeki terimler iki kosinüs farkına eşit olduklarından, 1 periyot için hesaplanan integralleri sıfır olacaktır. O halde,

$$U^2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u^2(t) dt = U_0^2 + \frac{U_{m1}^2}{2} + \frac{U_{m3}^2}{2} + \frac{U_{m5}^2}{2} + \dots + \frac{U_{mn}^2}{2} \quad (3.30)$$

ve buradan,

$$U = \sqrt{U_0^2 + \frac{1}{2} \cdot (U_{m1}^2 + U_{m3}^2 + U_{m5}^2 + \dots + U_{mn}^2)} \quad (3.31)$$

bulunur. $U_{mn} = \sqrt{2} \cdot U_n$ olduğundan gerilimlerin tepe (maksimum) değerleri yerine etkin değerleri yazılırsa,

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots + U_n^2} \quad (3.32)$$

formülü elde edilir.

Yukarıda gerilim için yazılan denklemler, akım içinde yazılacak olursa;

• **Akım denklemi;**

Formül (3.10)'daki akım denklemi,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \text{Sin}(n\omega t + \beta_n)$$

şeklindeydi. Bu formülü açarsak,

$$i(t) = I_0 + I_{m1} \cdot \text{Sin}(1\omega t + \beta_1) + I_{m2} \cdot \text{Sin}(2\omega t + \beta_2) + I_{m3} \cdot \text{Sin}(3\omega t + \beta_3) + \dots + I_{mn} \cdot \text{Sin}(n\omega t + \beta_n) \quad (3.33)$$

olacaktır. Sinüsoidal olmayan bir dalganın etkin (efektif veya rms) değeri, harmonik değerlerinin karesel ortalamasına eşit olacağından, dalganın karesini alırsak ;

$$i^2(t) = [I_0 + I_{m1} \cdot \sin(1\omega t + \beta_1) + I_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \beta_3) + I_{m5} \cdot \sin(5\omega t + \beta_5) + \dots + I_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \beta_n)]^2 \quad (3.34)$$

buradan,

$$\begin{aligned} i(t) = & I_0^2 + I_{m1}^2 \cdot \sin^2(1\omega t + \beta_1) + I_{m3}^2 \cdot \sin^2(3\omega t + \beta_3) + I_{m5}^2 \cdot \sin^2(5\omega t + \beta_5) + \dots \\ & + I_{mn}^2 \cdot \sin^2(n\omega t + \beta_n) + \dots + \\ & + 2I_0 \cdot I_1 \cdot \sin(1\omega t + \beta_1) + 2I_0 \cdot I_3 \cdot \sin(3\omega t + \beta_3) + 2I_0 \cdot I_5 \cdot \sin(5\omega t + \beta_5) + \dots \\ & + 2I_0 \cdot I_n \cdot \sin(n\omega t + \beta_n) + \dots + \\ & + 2I_1 \cdot I_3 \cdot \sin(1\omega t + \beta_1) \cdot \sin(3\omega t + \beta_3) + 2I_1 \cdot I_5 \cdot \sin(1\omega t + \beta_1) \cdot \sin(5\omega t + \beta_5) + \dots \\ & + 2I_k \cdot I_r \cdot \sin(k\omega t + \beta_k) \cdot \sin(r\omega t + \beta_r) + \dots \end{aligned} \quad (3.35)$$

şeklini alır. Gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra ;

$$I^2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i^2(t) dt = I_0^2 + \frac{I_{m1}^2}{2} + \frac{I_{m3}^2}{2} + \frac{I_{m5}^2}{2} + \dots + \frac{I_{mn}^2}{2} \quad (3.36)$$

ifadesi bulunur ve buradan,

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{1}{2} \cdot (I_{m1}^2 + I_{m3}^2 + I_{m5}^2 + \dots + I_{mn}^2)} \quad (3.37)$$

şeklini alır. $I_{mn} = \sqrt{2} \cdot I_n$ olduğundan akımların maksimum (tepe) değerleri yerine etkin değerleri yazılırsa,

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots + I_n^2} \quad (3.38)$$

formülü elde edilir.

Yukarıda verilen formüllerde (U_0) ve (I_0) değerleri yani **doğru gerilim bileşenleri, periyodik alternatif akım büyüklüklerinde** pozitif ve negatif yarı dalgaların yüzeyleleri birbirine eşit olduğundan, **sıfıra eşittir.**

3.2.7. Harmonikli Sistemlerde Şebekeden Çekilen Aktif Güç

Zamanın periyodik bir fonksiyonu olan bir gerilimin Fourier serisi şeklinde açılımı,

$$u(t) = U_{m1} \cdot \sin(1\omega t + \alpha_1) + U_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \alpha_3) + U_{m5} \cdot \sin(5\omega t + \alpha_5) + \dots + U_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (3.39)$$

ve aynı şekilde, zamanın periyodik bir fonksiyonu olan bir akımın Fourier serisi şeklinde açılımı da,

$$i(t) = I_{m1} \cdot \sin(\omega t + \beta_1) + I_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \beta_3) + I_{m5} \cdot \sin(5\omega t + \beta_5) + \dots + I_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (3.40)$$

olsun. Bu gerilim ve akımın meydana getirecekleri aktif gücün ani değeri;

$$\begin{aligned} p(t) = u(t) \cdot i(t) = & U_{m1} \cdot \sin(\omega t + \alpha_1) \cdot [I_{m1} \cdot \sin(\omega t + \beta_1) + I_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \beta_3) + \dots] \\ & + U_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \alpha_3) \cdot [I_{m1} \cdot \sin(\omega t + \beta_1) + I_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \beta_3) + \dots] \\ & + U_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n) \cdot [I_{m1} \cdot \sin(\omega t + \beta_1) + I_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \beta_3) + \dots] + \dots \end{aligned} \quad (3.41)$$

olacaktır.

Bu ifadede,

$$\begin{aligned} & \bullet U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \sin(\omega t + \alpha_1) \sin(\omega t + \beta_1) + U_{m3} \cdot I_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \alpha_3) \sin(3\omega t + \beta_3) + \dots \\ & + U_{mn} \cdot I_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n) \sin(n\omega t + \beta_n) + \dots \end{aligned} \quad (3.42)$$

gibi ωt 'nin aynı katlarının sinüslerinin çarpımları ile

$$\bullet U_{mp} \cdot I_{mq} \cdot \sin(p\omega t + \alpha_p) \sin(q\omega t + \beta_q) \quad (3.43)$$

gibi ω 'nın birbirinden farklı katlarının sinüslerinin çarpımları şeklindeki terimler bulunacaktır. ω 'nın aynı katlarının sinüslerinin çarpımlarını genel olarak,

$$\bullet U_{mn} \cdot I_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n) \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (3.44)$$

şeklinde gösterebiliriz. Öteki terimler de genel olarak bir önceki formül şeklinde gösterilebilir. Gücün 1 periyot için ortalama değerini hesaplayalım. Bunun için (3.43) ve (3.44) ifadelerini iki kosinüs farkı olarak yazalım. (3.43) ifadesi,

$$\frac{U_{mp} \cdot I_{mq}}{2} \cdot (\cos[(p-q)\omega t - (\alpha_p - \beta_q)] - \cos[(p+q)\omega t - (\alpha_p + \beta_q)]) \quad (3.45)$$

şeklini alır. $p \neq q$ olduğu için, bu şekilde iki kosinüs farkı 1 periyot için hesaplandığı zaman sonuç sıfır olur.

(3.44) ifadesi ise;

$$\frac{U_{mn} \cdot I_{mn}}{2} \cdot [\cos(\alpha_n - \beta_n) - \cos(2n\omega t - \alpha_n - \beta_n)] \quad (3.46)$$

şeklini alacaktır ve bu şekildeki kosinüs farklarının 1 periyot için integralleri hesaplanırsa ;

$$\int_0^{2\pi} \text{Cos}(2n\omega t - \alpha_n - \beta_n) dt = 0$$

ve

$$\int_0^{2\pi} \text{Cos}(\alpha_n - \beta_n) dt = 2\pi \cdot \text{Cos}(\alpha_n - \beta_n) \quad (3.47)$$

elde edilecektir. O halde,

$$P_{\text{ort}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} p(t) dt$$

$$P_{\text{ort}} = \frac{1}{2} \cdot [U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \text{Cos}(\alpha_1 - \beta_1) + U_{m3} \cdot I_{m3} \cdot \text{Cos}(\alpha_3 - \beta_3) + \dots + U_{mn} \cdot I_{mn} \cdot \text{Cos}(\alpha_n - \beta_n)] \quad (3.48)$$

bulunur. Buradan, akım ve gerilimlerin maksimum değerleri yerine etkin değerlerini koyarak ve $\alpha_1 - \beta_1 = \varphi_1$, $\alpha_3 - \beta_3 = \varphi_3$, ... $\alpha_n - \beta_n = \varphi_n$ olduğunda göz önüne tutularak (3.48) ifadesinde yerine konursa, bağıntı (3.49)' da görüldüğü gibi gücün ortalama değeri bulunur.

Gücün ortalama değeri ;

$$P_{\text{ort}} = U_1 \cdot I_1 \cdot \text{Cos} \varphi_1 + U_3 \cdot I_3 \cdot \text{Cos} \varphi_3 + \dots + U_n \cdot I_n \cdot \text{Cos} \varphi_n \quad (3.49)$$

elde edilir. Buradan görülüyor ki, sinüsoidal olmayan periyodik akım ve gerilimlerin meydana getirdikleri gücün ortalama değeri, bütün harmoniklere tekabül eden ortalama güçlerin toplamına eşittir. Bu ortalama değer, aynı zamanda, aktif gücede eşit olduğundan, gücün etkin değeri (3.50) bağıntısından bulunabilir.

Gücün etkin değeri ;

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \text{Cos} \varphi_1 + U_3 \cdot I_3 \cdot \text{Cos} \varphi_3 + \dots + U_n \cdot I_n \cdot \text{Cos} \varphi_n \quad (3.50)$$

'dir.

3.2.8. Harmonikli Sistemlerde Görünür Güç

Bir fazlı bir tüketicinin çektiği görünür (zahiri) güç, gerilimin etkin (efektif) değeri ile akımın etkin değerinin çarpımına eşittir ve

$$S = U_n \cdot I_n \quad (3.51)$$

formülü ile hesaplanır.

Görünür gücün, gerilim ve akımların genlikleri (maksimum değerleri) cinsinden değeri,

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} U_{mn}^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn}^2} \quad (3.52)$$

şeklindedir.

Görünür gücün, gerilim ve akımların etkin değerleri cinsinden değeri ise,

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3.53)$$

şeklinde ifade edilebilir.

3.2.9. Harmonikli Sistemlerde Şebekeden Çekilen Reaktif Güç

Harmonikli sistemlerde reaktif güç, görünür ve aktif güç yardımıyla bulunabilir.

$$Q^2 = S^2 - P^2 \quad (3.54)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.55)$$

$$Q = \sqrt{\left[\left(\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 \right) \cdot \left(\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right) \right] - \left[\sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos\phi_n \right]^2} \quad (3.56)$$

4. HARMONİK ÜRETEN KAYNAKLAR

Günümüzde harmonik üreten kaynaklar iki kısımda incelenebilmektedir. Birincisi bilinen ve kurulu harmonik kaynaklar ve diğeri de yeni ve gelecek harmonik kaynaklardır.

4.1. Kurulu Harmonik Kaynaklar

- Döner makinaların gerilim dalga şeklinde dalgalanmalar,
 - Hava-aralıklı senkron üstü çalışan relüktans makinasının kutup derecelerinde değişimler,
 - Ani yük değişimi nedeniyle senkron makinadaki akı bozunumu,
 - Senkron makinaların hava aralığındaki değişken akının sinüs biçiminde olmayan dağılımı,
 - Transformatörlerin mıknatıslanma akımı,
 - Doğrultucular, eviriciler, ark fırınları, gerilim denetleyicileri, frekans çeviriciler vb. yüklerden dolayı şebekenin doğrusal olmayışı,
- şeklindedir.

4.2. Yeni Harmonik Kaynaklar

Sistemde kurulu harmonik kaynaklara değinilirken, güç şebekesi yeni harmonik kaynaklara maruz kalmaktadır;

- Yük uyumu ve motor verimliliğini sağlamak için yapılan enerji dönüşümü ölçüm çalışmalarında, anahtarlama ve güç yarı iletken aygıtların kullanılması,
- Tahrik için kullanılan hız denetleyicileri gibi motor kontrol aygıtları,
- Yüksek-gerilim doğru-akım güç dönüşümü ve iletimi,
- Genellikle sürekli değişen değişken-VAR kaynakları gibi yerleştirilen statik-VAR kompanzatorleri,
- Batarya şarjında güç düzeltilmesine gereksinim duyan elektrikli araçların artan bir şekilde yaygın olarak kullanımı,
- DC/AC güç çeviricilerine gereken magneto-hidrokinamikler, depolama bataryaları ve yakıt hücreleri gibi doğrudan enerji dönüşüm aygıtlarının artan kullanımı,
- Büyük fırınlarda kullanılan darbe veren modülasyonlu ısı elemanları.

4.3. Generatörler

En tabii harmonik üretici kaynaklardan biri generatörlerdir; zira şartlar elverişli olduğu takdirde, temel frekanslı gerilimin üretilmesi yanında ister istemez yüksek harmonikli gerilimler de meydana gelmektedir. İndüksiyon kanuna göre stator sargılarında indüklenen emk, Φ indüksiyon akısı ile orantılıdır. Bu durumda emk' nın sinüs şeklinde olması Φ ' nin de sinüs şeklinde olmasına bağlıdır. Halbuki mesela çıkık kutuplu ve kutup başlığı boyunca hava aralığı sabit olan senkron makinelerde alan eğrisi yaklaşık dikdörtgen ve yuvarlak kutuplu makinelerde trapez şeklindedir. Bu gibi sinüzoidal olmayan eğriler 1.., 3.., 5... vb. gibi tek

mertebeli sinüslü terimlerin toplamına eşit olduğundan, endüklenen emk da prensip itibariyle aynı mertebeden harmonikleri ihtiva eder. n arttıkça harmoniklerin frekansları $50.n$ Hz değerine yükselirken, bunların genlikleri de düşer.

n' inci harmonik geriliminin efektif değeri;

$$U_n = 4,44n.f_1.\omega k_n \Phi_n \quad (4.1)$$

olup burada;

f_1 = temel harmoniğin frekansı

ω = bir faz sargısının sarım sayısı

k_n = n'inci harmoniğin sargı faktörü

Φ_n = alan eğrisinin n' inci harmoniği

n= harmonik derecesi

Yukarıda açıklandığı gibi, 3 ve 3' ün katı gerilim harmonikleri her üç faz sargısında da aynı fazda olduklarından, bunlar üç fazlı bir döner alan oluşturamazlar; ancak her bir faz sargısının ya başından sonuna veya sonundan başına doğru yönelmişlerdir. Eğer statorun her üç faz sargısı aralarında yıldız bağlanmışlarsa, 3. ve 3' ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunurlar. Buna karşılık faz arası gerilimler iki faz geriliminin farkına eşit olduklarından, eşit fazlı harmonikler birbirini yok ederler ve faz arası gerilimler bu harmoniklerden arınmış olurlar. Eğer yıldız bağlı böyle bir generatöre, yıldız bağlı simetrik üç fazlı bir tüketici bağlanırsa ve bunun yıldız noktası generatör yıldız noktasına bağlanmazsa, tüketici gerilimlerinde eşit fazlı harmonikler bulunmaz ve 3. ve 3' ün katı harmonikli akımlar geçemez. Eğer tüketicinin yıldız noktası, bir nötr iletkeni üzerinden generatör yıldız noktasına bağlanırsa, faz iletkenlerinden 3. ve 3'ün katı frekanslı I_0 gibi bir sıfır bileşen akımı geçer ve bunlar yıldız noktasında toplanarak nötr iletkeni üzerinden $3I_0$ değerinde bir akım geçer, bu akım tüketicide aynı şekilde 3. ve 3' ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getiriler, dolayısıyla tüketici gerilimi de harmonik içerir, fakat faz arası gerilimlerde 3' ün katı frekanslı harmonikler bulunmazlar. Sıfır akım bileşimini sınırlandırmak için generatörün yıldız noktasına uygun bir reaktans seri bağlanır.

Generatör sargıları üçgen bağlanmışsa, her faz sargısına ait eşit fazlı harmonik emk' ları, kapalı üçgen sargı içinde cebirsel toplanırlar ve üç katı genlikli eşit fazlı bir harmonik emk meydana gelir. Buna bağlı olarak da üçgen sargı içinde 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akımlar sargı içinde kalırlar ve dışarıdaki faz iletkenlerinde bulunmazlar. Bu sirkülasyon akımları makinenin yüküne hemen hemen hiç bağlı değildirler. Fakat bunlar

sargılarda oldukça büyük kayıpların meydana gelmesine yol açarlar. Onun için elektrik makinelerinde üçgen bağlamadan olduğu kadar kaçınılır.

Şebekedeki lineer olmayan tüketiciler ve harmonik üreticileri ile korona olayları ve şebeke hataları sebebi ile meydana gelen harmonik akımlar, devrelerini enerji nakil hatları ve generatörlerin stator sargıları üzerinden tamamlar. Bu harmoniklerin zararlı tesirlerini kısmen karşılayabilmek için generatörlerde amortisman sargılarından yararlanılır. Mesela stator sargılarından 5. ve 7. harmonikler geçer ise, 5. harmonik stator alanına göre bir ters alan ve 7. harmonik ise bir doğru alan oluşturur. Bu alanlardan biri doğru ve diğeri ters yönde olmak üzere, Bunlar amortisman sargı çubuklarını 6 katı frekans ile keserler. Böylece amortisman sargısından geçen 6 kat frekanslı akımlar, kendilerini endükleyen alanları söndürecek şekilde tesir ederler. Normal şartlar altında amortisman sargıları üzerinden akım geçmediği halde, söz konusu harmonik akımların etkisi ile ilave ısınma baş gösterir. Onun için amortisman sargıları, bu ısınmaya dayanacak şekilde yapılmak zorundadır.

Bazı generatör arızalarında, mesela iki fazlı kısa devrelerde alternatif akım endüvi reaksiyonu ve bunun sonucu olarak stator ve rotor sargıları arasındaki frekans yansıması sebebi ile, kısa devre olmayan stator fazında yüksek mertebeli ve tek sayılı harmonikler meydana gelirler. Aynı şekilde yıldız noktası topraklanmış generatörlerde bir fazlı bir kısa devre halinde, kısa devre olmayan her iki faz sargısının, mıknatıslanma karakteristiğinin şiddetli doyma bölgesinde çalışmaları sebebi ile gerilimde harmonikler baş gösterir.

4.4. Transformatörler

En önemli harmonik üreticiler, transformatörler, bobinler vb, gibi demir çekirdeği bulunan sargılardır. Bunların harmonik üretme özelliği demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmayışına bağlıdır. Şebekeden sinüs şeklinde bir gerilim alındığında, bir mıknatıslanma akımı çekilir. Demir çekirdeğin magnetik karakteristiği lineer olmadığından, bu mıknatıslanma akımı sinüs şeklinde değildir. Şekil 4.1' de sinüsoidal şebeke gerilimi mıknatıslanma karakteristiği ve mıknatıslanma akımı verilmiştir.

Harmoniksiz şebeke gerilimi;

$$U(t) = U \cdot \cos(\omega t + \varphi_n) \quad (4.2)$$

olup sargı akısı;

$$\phi = \frac{1}{\omega} \int u dt \quad (4.3)$$

ifadesine göre hesaplandığında, stasyoner durumda endüksiyon için;

$$B = B \cdot \sin(\omega t + \varphi_n) \quad (4.4)$$

ifadesi bulunur.

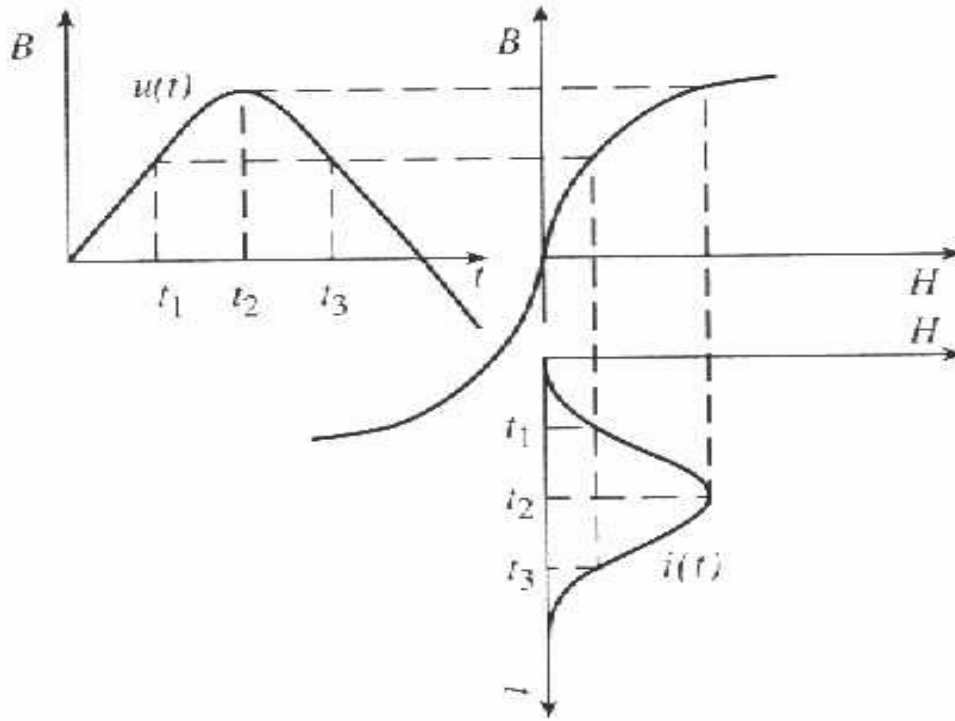
Histeresiz ihmal edilirse, mıknatıslanma eğrisi n dereceli bir polinom ile ifade edilebilir. Bu eğri 0- noktasına göre simetrik olduğundan bu polinomda n derecesi 1, 3, 5,vb. gibi tek sayılar alır.

Buna göre H alan şiddeti ve i mıknatıslanma akımı için, $n=1, 3, 5, \dots$ olmak üzere;

$$H = \sum H_n \sin\{n(\omega t + \varphi_n)\} \quad (4.5)$$

$$i = \sum i_n \sin\{n(\omega t + \varphi_n)\} \quad (4.6)$$

ifadeleri bulunur. Arızasız stasyoner durumda buna göre yalnız tek mertebeli akım harmonikleri meydana gelir.



Şekil 4.1. Sinüsoidal şebeke gerilimi ile transformatörün demir çekirdeğine ait mıknatıslanma eğrisi yardımı ile mıknatıslanma akımının elde edilmesi

Doyma arttıkça harmoniklerin genlikleri de büyür. Harmonik akımları transformatörün primer reaktansı ve generatörün kaçak reaktansı üzerinden geçtiğinden, bunlar üzerinde harmonikli gerilim düşümleri meydana gelir. Bu yüzden generatör EMK' si sinüs şeklinde olduğu halde, generatör uçlarındaki gerilimin şekli bozulur.

Mıknatıslanma akımının harmoniklerinin tepe değerleri, temel mıknatıslanma akımının tepe değerlerinden epeyce küçüktür. Esasen transformatörlerin mıknatıslanma akımları da, nominal akımların %1- %10' u kadardır. Buna rağmen transformatör reaktansı frekansla

orantılı olarak arttığından, özellikle düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının sebep olduğu reaktif gerilim düşümleri büyük değerler alır.

Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi, esas olarak şu faktörlere bağlıdır:

-Transformatör sargılarının bağlantı tarzı,

-Primerdeki yıldız bağlı sargılarda yıldız noktasının, şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmamasına,

-Transformatörde mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olması.

Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3. ve 3'ün katı harmoniklerin en önemli özellikleri, aralarındaki faz farkının 360° nin tam sayılı katlarına eşit olması, yani hepsinin aynı fazda almalarıdır. 3. ve 3'ün katı harmoniklerin bu özelliği açısından transformatörlerin çeşitli bağlamaları ve çeşitli çekirdek şekilleri aşağıda incelenmiştir.

a) Transformatör yıldız/yıldız bağlı ve primer yıldız noktası nötr hattına bağlanmış:

Nadir olarak kullanılan bu bağlama tarzı, boşa çalışmada, serbest mıknatıslanmalı (Mantel tipi veya 3 adet bir fazlı transformatörden oluşan tip) transformatörlerde her bir faz sargısından denklem (4.6)' da ifade edilen akım gibi bir mıknatıslanma akımı geçer. Ancak temel harmoniğin faz akımları arasında 120° lik faz farkı olduğundan, yıldız noktasında bunların toplamı sıfır eder. 3. ve 3'ün katı harmonik akımları ise eşit fazlı olduklarından yıldız noktasında cebirsel toplanırlar. Onun için nötr hattından, her bir faz sargısından gelen 3. ve 3'ün katı frekanslı harmonik akımının 3 katına eşit bir akım geçer. Buna karşılık 3'ün katlarına eşit olmayan 5., 7., 11., 13... gibi harmoniklerin toplamı da yıldız noktasında sıfıra eşit olduğundan, bunlar da nötr hattından geçmezler.

Yıldız/yıldız bağlı transformatörün primer yıldız noktası, nötr hattına bağlanmışsa, mıknatıslanma akımının 3. ve 3'ün katı harmonikleri, yıldız noktasından dışarıya akma imkanı bulamazlar. Zira her üç faz sargısının akımları toplamı her an sıfıra eşit olmalıdır. Temel harmonik ile 5., 7., 11., .. gibi harmonikler bu şartı gerçekleştirdikleri halde 3., 9., 15., gibi harmonikler eşit fazlı olduklarından bu şartı gerçekleştiremezler.

b) Yıldız/üçgen bağlı transformatörler:

Eğer primer yıldız noktası şebekenin nötr hattına bağlanmışsa, sekonder sargının üçgen bağlanmasının hiçbir etkisi olmaz. Primer yıldız noktası nötr hattına bağlanmış ise 3. ve 3'ün katı akı harmonikleri, üçgen sekonder sargıda 3. ve 3'ün katı frekanslı sirkülasyon akımlarının geçmesine sebep olur ki, bu akımlar da kendilerini indükleyen akılara ters yönde etki ederek bunları söndürürler.

c)Primer sargısı üçgen bağlı transformatörler:

Primer sargısı üçgen bağlı ise, her bir sargı kendi başına beslenmiş gibi tesir eder. Faz sargılarında mıknatıslanma akımında 3., 9., 15., gibi harmonikler meydana gelir. Bunlar her faz sargıda eşit fazlı olduklarından, üçgen bağlı sargı içinde kalırlar ve dışarı çıkamazlar. Bu yüzden şebekeden çekilen mıknatıslanma akımında 3., 9., 15., vb. gibi harmonikler çekilirler. Buna karşılık şebekeden 1., 5., 7..vb. gibi harmonikler çekilirler. Böylece magnetik akının sinüs şeklinde olabilmesi için mıknatıslanma akımında gerekli bütün harmonikler bulunduğundan, mıknatıslanma zorunlu olmaz ve magnetik akı 3., 9., 15.. vb. gibi harmonikleri ihtiva etmez.

Modern transformatörlerde soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş sac kullanıldığından, magnetik akı ve bunun sonucu olarak mıknatıslanma akımı çok düşük değerler alır. Böylece şebekede harmonik tehlikesi geniş çapta önlenir.

Çizelge 4.1' de 154/31.5 kV' luk bir trafonun harmonik akımları görülmektedir.

Çizelge 4.1 154/31.5 kV' luk bir trafonun akım harmonikleri

Faz	Gerilim (kV)	Akım (A)	3.harmonik	5.harmonik	7.harmonik	9.harmonik
2U	$31.5/\sqrt{3}$	1.180	11.19	23.12	10.98	1.1
2V	$31.5/\sqrt{3}$	0.813	29.50	23.20	10.43	1.65
2W	$31.5/\sqrt{3}$	1.210	15.78	23.23	10.24	0.87

4.5. Ark Prensibi İle Çalışan Aygıtlar

Sistemde harmonik problemlere neden olan büyük ark fırınları vardır. Ancak bunların dışındaki ark kaynakları ark yükünün önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Aydınlatma amaçlı kullanılan ark ve flüoresan lambalar, ark fırınına göre daha az harmonik üretmelerine rağmen benzer harmonik akımlara neden olabilmektedirler.

4.5.1. Ark fırını

Ark ocakları ve kaynak makineleri gibi normal çalışmalarını ark ile sürdüren cihazlarda ve tesislerde de önemli harmonikler meydana gelirler. Ark ocaklarının ve kaynak makinalarının ürettikleri akımların harmoniklerinin, hangi mertebede ve hangi değerde olduğu, hesap yolu ile tayin etmek mümkün değildir. Zira arkın meydana gelişi, o anda etkili olan bir çok tesadüfi iç ve dış tesirlere bağlıdır. Onun için ark akımında tek ve çift, her mertebeden harmonik bulunduğu gibi, bunların değerleri zamana baplı olarak her an değişebilirler. Ayrıca harmonikler ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına da bağlıdır. Onun için böyle bir

işletmedeki akım harmonikleri hakkında bilgi edinebilmek için bunların ölçülmesi veya akım eğrilerinin analizinin yapılması gerekir. Ark ocaklarında, temel harmoniğin yüzdesi cinsinden en çok rastlanan harmonik akımlarının ortalama değerleri Çizelge 4.2 ' de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Ark ocaklarında en çok rastlanan harmonik akımlarının temel harmonik akımının yüzdesi cinsinden ortalama değerleri

Genlik (%)		
n	ortalama	En büyük
2	4...9	30
3	6...10	20
4	2...6	15
5	2...10	12
6	2...3	10
7	3...6	8
9	2...5	7

4.5.2. Civa ve sodyum buharlı aydınlatma armatürleri

Bu cihazlar da ark prensibine göre çalışırlar. Tek olarak önemsiz sayılabilirler, fakat hepsi bir arada düşünüldüğünde önemli bir harmonik kaynağı oluştururlar.

4.5.3. Kompakt flüoresan lambalar

Kompakt flüoresan lambalar akkor lambalara yeni ve alternatif bir seçenek olarak tanımlanmıştır. Bunların aydınlatma özellikleri karşılaştırıldığında akkor lambalardan daha uzun ömürlü oldukları ve daha az enerji sarf ettikleri görülmüştür. Ancak kompakt flüoresan lambalarda kullanılan magnetik çekirdek veya elektronik balast harmonik akımına önemli bir kaynak olabilmektedir.

4.6. Güç Elektronik Düzenekli Donanımlar

Güç elektronik düzenekli donanımlar önemli bir harmonik kaynağıdır. Bu sistemler genel anlamda doğrultucular, eviriciler, direkt frekans dönüştürücüler, ac ve dc kıyıcılar olarak sıralanabilir. Bu sistemler elektronik anahtarlama prensibiyle çalıştıkları için, sisteme harmonik üretmektedirler.

Ac/Dc dönüştürücüler ortak bağlı güç sistemlerinde çeşitli harmonikler oluştururlar. Bu harmoniklerin seviyeleri güç sistemi ve dönüştürücü parametrelerinden etkilenirler. Statik güç

dönüştürücüleri tarafından üretilen harmoniklerin incelenmesi için şu parametreler dikkate alınmalıdır:

- Dönüştürücü kontrol sisteminin gecikme açısı
- Dönüştürücü kontrol sisteminin tipi
- Dc devre parametreleri
- Ac sistem empedansı
- Dönüştürücü uçlarındaki AC gerilim dalga şekli

Harmonik akımların ana kaynakları, faz açısı ile kontrol edilmiş olan doğrultucular ve eviricilerdir. Bunlar büyük güç dönüştürücüleri, orta büyüklükteki dönüştürücüler ve düşük güç dönüştürücüler şeklinde sıralanabilir. Düşük güç dönüştürücüleri televizyon düzeneklerinde, ses ve görüntü aygıtlarında kullanılır. Büyük ve orta güçteki dönüştürücüler ise genellikle sanayide kullanılır.

4.6.1. Doğrultucular

Enerji tesislerinde güç elektroniği gittikçe önem kazanmakta, doğrultucular ile tristörlerin geniş uygulama alanı bulunmaktadır. Bunlar da transformatörler kadar ve hatta daha çok harmonik ürettiklerinden, şebekede büyük sorunlara yol açmaktadır.

Doğrultucularla harmonik üretilmesi, akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. Sinüs şeklinde alternatif bir gerilime bağlı olan bir doğrultucu, şebekeden I_1 temel harmonik akımı ile birlikte, yaklaşık olarak;

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (4.7)$$

harmonik akımlarını çekerler. Doğrultucularda darbe sayısı p olmak üzere harmonik derecesi;

$$n = kp \mp 1 \quad (4.8)$$

değerini alır. Burada $k=1, 2, 3, \dots$ gibi tamsayılardır. Genellikle doğrultucularda darbe sayısı 6, 12, 24 veya 36' dır.

Buradan görülüyor ki darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri o kadar yüksek ve harmonik değerleri o kadar küçük olur.

Pratikte ölçülen harmonik akımları, denklem 4.7' de hesaplanan değerden daha küçüktür ve (4.7) ifadesinin k_n gibi bir katsayı ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$I_n = \frac{I_1}{n} k_n \quad (4.9)$$

k_n katsayısı 1' den küçüktür ve doğrultucunun kontrolüne bağlı olarak çeşitli harmoniklerde farklı değerler alır. Doğrultucularda darbe sayısı ne kadar küçük olursa, harmonik dereceleri de o kadar yüksek ve harmonik akımlarının değerleri de o kadar küçük olur.

Çizelge 4.3' te omik yük için çeşitli doğrultucuların toplam harmonik bozunumları tetikleme açısı $\alpha=0$ için verilmiştir.

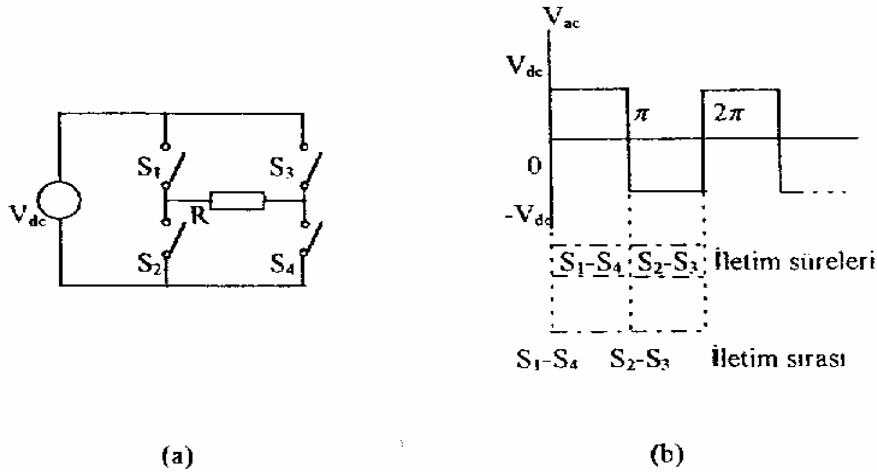
Bu tablodan görüleceği gibi, bir periyottaki darbe sayısı p arttığında, başka bir deyişle faz sayısı yükseldiğinde dalgalılık azalmaktadır.

Çizelge 4.3 Doğrultucu tipi ve darbe sayısına göre toplam harmonik bozunumu

Doğrultucu tipi	p	Toplam harmonik bozunumu
Bir fazlı yarım dalga	-	77
Bir fazlı tam dalga	2	44
İki fazlı tam dalga	2	44
Üç fazlı yarım dalga	3	20
Üç fazlı tam dalga	6	6
Altı fazlı yarım dalga	6	6

4.6.2. Eviriciler

Tek fazlı evirici devresi ve çıkış gerilimi dalgası şekil 4.2' de görülmektedir. Uygulamalarda devrede bulunan anahtarlar yerine transistör, tristör ve bunların değişik tipleri olan yarı iletken elemanlar kullanılır. Devrenin çalışma ilkesi, girişteki kaynağın, yük uçlarına eşit süreyle ters bağlanması esasına dayanır. Bunu gerçekleştirmek için S_1-S_4 ve S_2-S_3 anahtar çiftleri ardışık olarak biri kapalı iken diğeri açık kalacak şekilde çalıştırılır. Böylece girişteki doğru gerilim yüke eşit süreyle bir düz bir ters olarak uygulanmış olacağından evirici çıkış gerilimi kare dalga bir alternatif gerilim olacaktır.



Şekil 4.2.a) Tek fazlı köprü evirici basit şeması b) Evirici çıkışında görülen dalga şekli

Şekil 4.2.b' de görüldüğü gibi üzere evirici çıkışındaki kare dalga sinüs biçiminde olmayıp, harmonik içermektedir. Çıkış geriliminin içerdiği harmonikler hem denetleme devresini oluşturan elemanların çalışmasını olumsuz olarak etkilemekte, hem de evirici eğer alternatif akım motoru gibi elektromekanik bir yükü besliyorsa, motorda mekanik bir rezonansa ve istenmeyen bir gürültüye neden olmaktadır.

Bu etkiler nedeniyle birçok uygulamalarda evirici çıkış gerilim dalgasının içerdiği harmoniklerin belirli bir düzeyin altında tutulması gerekir. Bunu başarmak için temel bileşen dışındaki harmoniklerin filtrelerle süzülmesi veya evirici çıkışındaki düşük harmonik içeren bir dalga biçimi oluşturmak gerekir.

4.6.3. Motor hız kontrol devreleri

Bu ifadeden, direkt frekans çeviricisi veya alternatif akım kısıyıcısı yardımıyla ayarlanan asenkron motorlar, statik kramer sistemi olarak bilinen, bilezikli asenkron motorlarda hız kontrolünü sağlayan sistemler, senkron motor hız düzenekleri ve kontrollü doğrultucularla beslenen doğru akım hız kontrol sistemleri anlaşılmaktadır. Elektrikli ulaşım araçları, bu bölümün önemli bir harmonik kaynağıdır.

4.6.4. Kesintisiz güç kaynakları(UPS)

Kesintisiz güç kaynağı doğrultucu, evirici, direkt geçiş devresi ve akümülatörden oluşur. Doğrultucu, şebeke gerilimini doğru gerilime çevirir, evirici ise bu doğru gerilimden genliği ve frekansı değişmeyen dalgalı bir gerilim üretir.

Giriş enerji kesildiği zaman doğru gerilim devresine paralel bağlı olan akümülatör grubu, eviricide gerekli olan enerjiyi sağlamaya devam eder ve çıkışta hiç kesilmeyen bir enerji sağlanmış olur.

Bu sistemlerde sözü edilen statik çeviriciler, doğrultucu ve eviriciler güç elektronikli cihazlardan meydana geldiği için şebekeye harmonik verirler.

4.6.5. Statik-VAR sistemleri

Elektronik alandaki gelişmelerden elektrik mühendisliği de payını almakta ve yüksek güçlü tristörlerin üretilmesi ile statik-VAR sistemleri de gündeme gelmektedir. Bu cihazlar, tristör kontrollü reaktör ve sabit veya tristör anahtarlamalı kondansatörle, modern GTO ile yapılan güç çeviricilerdir. Bu sistemlerde de güç elektroniği elemanları kullanıldığı için şebekeye harmonik verirler.

4.7. Döner Makinalar

Bir döner makinanın oluşturduğu harmonikler ilke olarak makinanın stator ve rotorundaki olukların neden olduğu magnetik relüktanstaki değişimlerle ilişkilidir. Döner makinaların

harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni, alan şekli ve ana devrelerle kaçak yollardaki doymadır. Bir makine için gerçek alan şekli makinanın tasarımının bir fonksiyonudur.

4.7.1. Senkron makinada üretilen gerilim harmonikleri

Alan sisteminin magnetik akısı hava aralığı etrafında düzgün bir sinüs şeklinde dağıtılabılırse her bir endüvi bobinde üretilen emk, her bir sarım için;

$$e = 2.\pi.\phi.\sin\omega t \quad [V] \quad (4.10)$$

tur. Burada Φ her bir kutup için toplam akı, f frekansı ise $f=np$ formülüne göre n hızı ve p kutup çifti ile ilişkilidir. Bununla beraber akı bu yolla tam olarak dağıtılamadığı için sinüs şeklinde olmayan bir alan dağılımı aşağıdaki gibi harmonik serisine açılabilir.

$$f(t) = f_1.\sin\frac{2.\pi.t}{T} + f_3.\sin\frac{2.\pi.t}{T} + f_5.\sin\frac{2.\pi.t}{T} + \dots \quad (4.11)$$

harmonik emk genliği, harmonik akısı, sargının etkili elektriksel dağılımı, kutup ayağı ve fazlar arası bağlantı metodu ile belirlenir. Oluk harmonikleri, stator nüvesinin eğimi değiştirilerek, kutup yüzeyindeki sindirici barların merkez hattının yer değiştirmesiyle, kutup ayaklarının şekillendirilmesiyle, oluk malzemesi olarak çelik malzeme kullanılmasıyla azaltılabilir.

4.7.2. Asenkron makinada üretilen gerilim harmonikleri

Bir asenkron motorun stator senkron döner alan hızı, temel bileşen frekansı ile dalga boyunun çarpımına eşittir ($f_1\lambda$). Harmonikler elektriksel asimetri nedeniyle de ortaya çıkmaktadır. 0.9 birim değer hızında dönen 6 kutuplu rotoru sargılı bir asenkron motor için rotor sargısı tarafından üretilen akım harmonik genlikleri ve bunun nedenleri çizelge 4.4' te verilmektedir.

Çizelge 4.4 Rotoru sargılı asenkron motorda üretilen akım harmonikleri

Frekans (Hz)	Ana dalgaya göre % akım değeri	Neden
20	3.0	Kutup dengesizliği
40	2.4	Rotor-kutup dengesizliği
50	100.0	Temel bileşen karşıtlığı
80	2.3	Kutup dengesizliği
220	2.9	5. ve 7. harmonikler
320	3.0	Karşıtlık
490	0.3	11. ve 13. harmonikler
590	0.4	Karşıtlık

5. HARMONİKLERİN ÇEVRE TÜKETİCİLERE VE ŞEBEKEYE OLAN ETKİLERİ

Bu bölümde, harmoniklerin şebekeler, etrafındaki tüketicilere ve donanımlara olan olumsuz etkileri ele alınmıştır. Bu etkiler ayrıntılı olarak incelenmeden önce aşağıda verildiği gibi ana başlıklar halinde sıralanabilir.

Harmonikler;

1. Kondansatör gruplarının yalıtkanlıklarının bozulmasına veya kondansatörün aşırı yükten dolayı kötü çalışmasına,
2. Taşıyıcı güç sistemleri ve dalga kontrolünde parazite, yük kontrolü, ölçme uzaktan anahtarlama yapan sistemlerin kötü çalışmasına,
3. Asenkron ve senkron makinalarda aşırı ısınmaya ve bundan dolayı kayıplara,
4. Rezonans nedeniyle sistemde aşırı gerilim ve aşırı akımlara,
5. Sistemde oluşturduğu aşırı gerilimden dolayı, kullanılan iletkenlerin yalıtkanların bozulmasına,
6. İletişim sistemlerinde parazite,
7. Endüksiyon prensibine göre çalışan ölçü aletlerinde hatalara,
8. İşaret parazitlerine ve rölelerin kötü çalışmasına,
9. Yaygın olarak kullanılan motor denetleyicilerinde ve güç istasyonu uyarım sistemlerinde parazite,
10. Asenkron ve senkron makinalarda mekaniksel titreşime,
11. Sıfır gerilim geçişine veya titremeye dayanan ateşleme devrelerinin kararsız çalışmasına, neden olur.

5.1. Transformator Üzerindeki Etkiler

Transformatörlerde harmoniklerin etkileri iki kısımda incelenir.

1- Akım harmoniklerinin etkileri:

- Akım devresinde akan yüksek harmoniklerden dolayı ek joule ($I^2.R$) kayıplarının oluşması,
- Çekirdek kaybının artması
- Haberleşme devreleri ve emniyet araçları üzerine magnetik etkiler yapması

2- Gerilim harmoniklerinin etkileri:

- Dielektrik zorlamasının artması,
- Haberleşme devrelerine elektrostatik etkiler yapması,
- Transformatörün endüktansı ile transformatöre bağlı bir tüketicinin kapasitansı arasında rezonans meydana getirebilmesi

Harmonik frekansların karesiyle orantılı olan iletkenlerdeki girdap akımı kayıplarının toplamı;

$$W_E = w \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n I_n}{I_1} \right)^2 \quad (5.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

W_E = Toplam girdap akımı kaybı

W = Nominal temel akımda girdap akımı kaybı

I_n =n.harmonik akımı

I_1 = nominal temel akım

n =harmonik derecesi

Sinüs şeklinde bir gerilimle beslenen bir transformatörün çekirdek kayıpları;

$$P_{\text{çekirdek}} = (k_1 f + k_2 f^2) V^2 \quad (5.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ilk terim histeresiz kaybı ve ikinci terim çekirdekdeki girdap akımı kaybıdır.

Transformatör kayıplarına, frekansa bağlı harmonik gerilimlerin ve harmonik akımların her ikisinin neden olduğuna dikkat edilmelidir. Kayıplar artan frekansla artar ve bunun sonucunda yüksek frekanslı harmonik bileşenler, transformatörün ısınmasına neden olan düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemli olabilmektedir.

Transformatör ve generatörler, aşırı ısınmadan dolayı anma değerlerinin %70' ine ulaştıklarında devre dışı kalabilirler.

5.2. Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler

Harmonik akım ve gerilimlerin döner makinalar üzerindeki birinci etkisi, diğer elemanlarda olduğu gibi harmonik frekanslardaki demir ve bakır kayıpları nedeniyle ısınmadaki artıştır. Ayrıca harmonik bileşenler, makine verimine ve momentine etki ederler.

Elektrik makinalarındaki kayıplar uygulanan gerilimin frekans içeriğine bağlıdır. Motor sıcaklığındaki artış motorun ömrünü kısaltmaktadır. Bundan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir.

5.3. Generatör ve Şebeke Gerilimi Üzerindeki Etkiler

Endüktif reaktans, frekans ile orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle temel harmonikteki değeri X_L olan endüktif bir reaktans, harmonik derecesi n olan bir akım karşısında;

$$X_{L_n} = n.X_L \quad (5.3)$$

değerini alır. Yani akımın frekansı büyüdükçe endüktif reaktans değeri de büyür. Her ne kadar boşta çalışan generatörlerde sinüs şeklinde bir gerilim endüklenirse de şebekede üretilen harmonikler nedeniyle, yüklenen generatör sargılarından harmonikli akımlar geçtiğinde, bunlar, stator kaçak reaktanslarında kaçak alanlar ve yüksek harmonikli gerilim düşümü

meydana getiriler. Generatör de endüklenen gerilim sinüs şeklinde olmasına rağmen, bu nedenle generatör uçlarındaki gerilimin ve şebeke geriliminin şekli bozulur.

Çizelge 5.1. Generatörler için negatif sıralı akım sınırlamaları

Generatörün türü	İzin verilen %
Silindirik rotorlu	
Endirekt soğutma	10
Direkt soğutma	
960 MVA' ya kadar	8
961-1200 MVA	6
1201-1500 MVA	5

5.4. Kondansatör Üniteleri Üzerindeki Etkiler

Genel olarak, eğer kondansatörler nominal şebeke gerilimine bağlı oldukları halde şebekeden büyük akım çekiyorlarsa, bunu başlıca üç nedeni vardır: ya kondansatörün kapasitesi nominal kapasiteden büyüktür, ya da şebeke frekansı, nominal değerinden yüksektir. Fakat aşırı akımların en önemli sebebi, şebeke geriliminin harmonikler ihtiva etmesidir.

Harmonik seviyelerinde, gerilim ve güç katsayısının düzeltilmesinde kullanılan paralel kondansatörler, önemli bir etki yapmaktadır. Kondansatörler harmonik üretmezler, ancak şebekelerde rezonansa geçme olasılıkları vardır. Eğer bu kondansatörler, sistemde harmonik frekansı yakınında rezonansa geçiyorlarsa, yüksek akım veya gerilimlere neden olabilirler. Kondansatör grubu bulunan düşük gerilim sisteminin rezonans frekansı;

$$n_r = \sqrt{Q_S / Q_C} \quad (5.4)$$

şeklinde bulunabilir. Burada;

n_r =Rezonansın oluştuğu harmonik derecesi

Q_S = Oluşan kısa devre gücü (kVA)

Q_C = Kondansatör grubunun gücü (kVAr)

Birçok düşük gerilim kuruluşlarında, aşağıdaki kurallar izlenmektedir.

- Eğer harmoniğin yük üzerine oluşturduğu kVA cinsinden etkisi, transformatörün gücünün (kVA) %10' undan küçükse, kondansatör rezonanstan endişelenmeden kullanılabilir.
- Eğer harmoniğin yük üzerinde oluşturduğu kVA cinsinden etkisi, transformatörün gücünün %30' undan küçükse ve kondansatör gücü(kVAr), transformatör gücünün %20' sinden küçükse kondansatörler rezonanstan endişelenmeden kullanılabilir.

c) Eğer harmoniklerin yük üzerinde oluşturduğu kVA cinsinden etkisi, transformatör gücünün (kVA) %30' undan büyükse, kondansatörler filtre olarak kullanılmalıdır.

Ayrıca harmonik bileşenler, kondansatörlerde ısınmaya ve yalıtım zorlamalarına neden olmaktadır.

Kapasitif reaktans, frekansla ters orantılı olarak değişir. Bu nedenle temel harmonikteki değeri X_C olan kapasitif reaktans, harmonik derecesi n olan bir akımda

$$X_{cn} = \frac{X_C}{n} \quad (5.5)$$

değerini alır. Yani akımın frekansı büyüdükçe kapasitif reaktans küçülür. Bunun sonucu olarak büyük harmonik frekanslarda kondansatörler daha büyük akımlar çeker ve aşırı yüklenir. n .harmoniğin U_n gerilimi altında kondansatörün çektiği akım;

$$I_n = \omega_n \cdot C \cdot U_n = n \cdot \omega \cdot C \cdot U_n \quad (5.6)$$

ve gücü;

$$Q_n = n \cdot \omega \cdot C \cdot U_n^2 = \frac{I_n^2}{n \cdot \omega \cdot C} \quad (5.7)$$

değerini alır. Burada $\omega = \omega_1$ temel harmoniğin dairesel frekansıdır.

Kondansatörün uçlarındaki gerilimin etkin değeri;

$$U_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (5.8)$$

dir. Kondansatör uçlarındaki akımın etkin değerini de aynı şekilde harmonik akımlarının karesel ortalamasına eşittir.

$$I_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (5.9)$$

Bu akım, harmonikli gerilimin etkin değerine eşit sinüs şeklinde bir gerilim altında kondansatörün çektiği akımdan büyüktür. Bu nedenle kondansatör tesislerinde besleme iletkeninin kesitinin, sigortaların ve anahtarların seçiminde, harmonikli akımın sinüs şeklinde nominal akımdan daha büyük olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

5.5. İletim Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri

Bir şebekede harmonik akımların akışı, iki ana etki meydana getirir. Bunlardan biri akım dalga şeklinin artırılmış etkin değerinin neden olduğu ilave iletim kaybıdır.

Örneğin bu (5.10) ifadesiyle gösterilebilir.

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n \quad (5.10)$$

burada I_n , n.harmonik akımını, R_n ise harmonik frekansındaki sistem direncini gösterir.

Harmonik akım akışının ikinci etkisi, farklı devre empedansları geçişlerinde harmonik gerilim düşümlerinin yaratılmasıdır. Kablo ile taşıma durumunda, harmonik gerilimler, kendi tepe gerilimlerine oranla dielektrik gerilimleri arttırmırlar. Bu etki kablonun yararlı ömrünü kısalttığı gibi, arıza sayısındaki artışlara da neden olurlar ve bu yüzden onarım maliyetleri de artar.

Korona başlangıcındaki ve sönme seviyelerindeki harmoniklerin etkileri, tepeden tepeye gerilimin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi, temel bileşen ve harmonikler arasındaki faz ilişkisine bağlıdır.

5.6. İletkenler Üzerindeki Etkiler

Harmonik akımlarının iletkenlerde ısınmaya neden olduğu iki durum söz konusudur.

Birincisi durum literatüründe deri olayı ve yakınlık etkisi olarak adlandırılan etkilerdir. Akım iletkenin dışına doğru yoğunlaştığında iletkenin direnci büyür. Bu olaya deri olayı denir ve frekansla artar. Yaklaşım etkisi ise iletkenin içindeki akım dağılımının komşu iletkenlerde akan akımın yarattığı magnetik alanlar tarafından etkilenmesi olayıdır. ikinci durum ise, harmonikler, tek fazlı yükleri besleyen üç fazlı dört telli sistemlerin nötr iletkenlerinde anormal ölçülerde büyük akımlara neden olmaktadır. Bazı güç kaynakları önemli oranda üçüncü harmonik üretir. Temel frekanstaki dengeli üç fazlı akımlar nötr iletkeninde akım yaratmazlar. Ancak üç fazlı sistemlerde üçüncü harmonikler nötr iletkeninde birbirini zayıflatmaz, tam tersine güçlendirir. Hatta nötr akımı faz akımının 1.7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenleri faz iletkenleri ile aynı boyutlarda olduğundan, bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu soruna en çok üç fazlı dağıtım sisteminin, tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem nötr iletkeninin , faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğünde boyutlandırılmasıdır.

5.7. Sigortalar Üzerindeki Etkiler

Paralel bir kondansatör ünitesindeki sigortanın atması aşırı harmonik seviyelerinin ilk göstergesidir. Büyük harmonik akım seviyeleri, sigortaların zaman-akım karakteristiklerinde değişimlere ve dolayısıyla istenmeyen çalışma biçimlerine neden olabilir. Az miktarda hatalarda harmonikler, minimum erime zamanlarını azaltabilir.

5.8. Koruma Röleleri Üzerindeki Etkiler

Sistem harmonikleri, rölelerin kötü çalışmasına neden olur. Çalışmaları tepe gerilimlerine ve/veya akımlarına, veya gerilimin sıfır geçişlerine bağlı röleler, dalgalı harmonik bozunumundan oldukça etkilenmektedir. Aşırı seviyedeki üçüncü harmonik akımı, toprak rölelerinin hata yapmasına neden olabilir. Rölelerin harmoniklerden başlıca etkileniş biçimleri şunlardır:

1. Daha büyük tepe değerleriyle yavaş çalışmak yerine daha küçük tepe değerleriyle hızlı çalışma eğilimi gösterirler.
2. Statik röle çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlenir.
3. Aşırı gerilim ve aşırı akım rölelerinin çalışma karakteristikleri değişir.
4. Harmonik bileşene bağlı olarak rölelerin çalışma momentlerinin yönü değişebilir.
5. Çalışma zamanları, ölçüle büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak oldukça büyük bir farklılık gösterebilir.
6. Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem de ayar gerisi çalışma gösterebilir.
7. Fark röleleri yüksek hızda çalışmayabilir.

Genelde rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Olağan dışı durumlar dışında röle çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri %10-20 civarındaki seviyelerdir.

5.9. Yalıtıma Etkiler

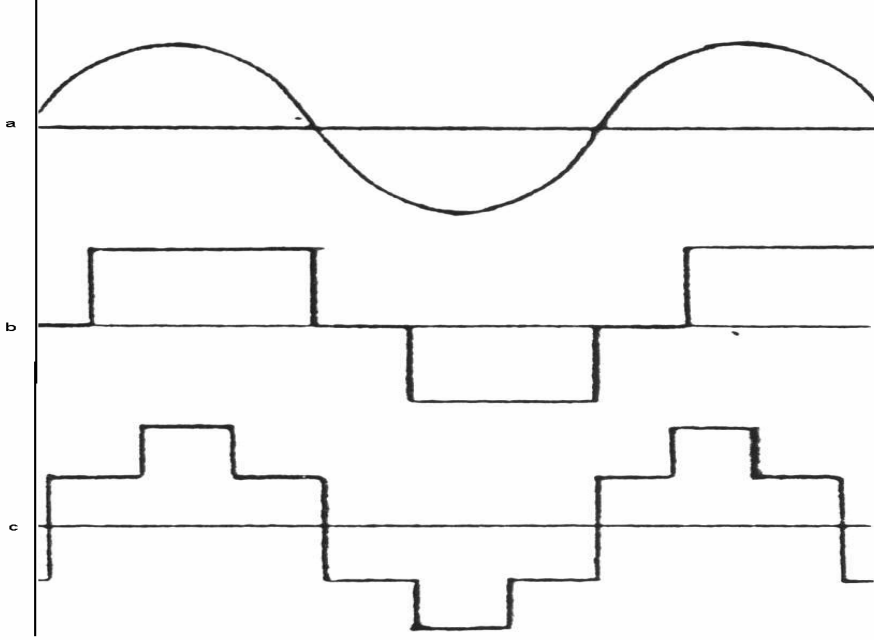
Sinüs şeklindeki gerilim eğrisine eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu çeklindeki sivri, çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri, örneğin gerilim rezonansı gibi hallerde makine ve transformatör sargılarının izolasyonu ve kondansatörlerin dielektrik maddesi için büyük bir tehlike oluştururlar ve bazen izolasyonda delinmeye yol açabilirler. Buna karşılık mesnet, askı ve geçit izolatörleri için bu gibi aşırı gerilimler hemen hemen hiçbir tehlike yaratmazlar. Ayrıca aşırı gerilimin, koronanın başlamasına, yalıtımın bozulmasına ve çalışma arızasına neden olduğu bilinmektedir. Bunlara ek olarak harmonikler güç hattı taşıma sistemlerinde kullanılan hat filtrelerinin kötü çalışmasına neden olmaktadır.

5.10. Anahtarlama Elemanları Üzerindeki Etkiler

Akım dalgasındaki harmonik bileşenler, anahtarın akım kesme yeteneğini olumsuz yönde etkileyebilir. Harmonik bileşenlerin oluşturduğu bu problem, sıfır geçişlerde akımın yüksek di/dt genliklerinde olması nedeniyle kesme işleminin daha zor yapılmasıdır. Bu durum şekil 5.1'deki akım şekliyle gösterilmiştir. Burada altı darbeli bir çevirici köprüsünün karakteristiği görülmektedir. Şekil 5.1.a' da çevirici bağlantısı nedeniyle sıfır akım geçişi uzatılmıştır.

Bununla birlikte şekil 5.1.b' de sıfır akım geçişinde di/dt , çevirici bağlantısının kare dalga karakteristiği nedeniyle çok yüksektir.

Devre kesicinin başarısızlığı, aşırı harmonikler oluştuğunda, yeterli çalışması gereken söndürme bobinlerinin yetersizliğine bağlanmaktadır. Söndürme bobinleri, kesme işlemi olan yerde, ark oluşunun içerisinde arkın hareketine yardımcı olmaktadır. Bu bobinlerin yetersiz çalışması arkın uzamasına neden olmakta ve kesme işlemi başarısızlıkla sonuçlanmaktadır.



Şekil 5.1. 6 darbeli köprü çeviricide tipik gerilim ve hat akımı dalga şekli

- a) Yüksüz hat gerilimi
- b) Δ - Δ veya Wye-Wye bağlantılı transformatörlü hat akımı
- c) Δ -Wye veya Wye- Δ bağlantılı transformatörlü hat akımı

Kesme işlemi için anahtarlama aygıtlarına harmonik akımların seviyelerinde endüstri tarafından belirlenmiş standartlar yoktur. Bütün kesme testleri nominal besleme frekansında denenmiştir.

5.11. Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkiler

Ölçme ve enstrümantasyon, harmonik akımlardan, özellikle, yüksek harmonik gerilimden dolayı rezonans oluştuğunda etkilenmektedir. Sayaçlar ve aşırı akım röleleri gibi endüksiyon diskli aygıtlar sadece temel akımı görmek için tasarlanmıştır. Ancak doğrusal olmayan yükler, ve/veya harmonik bozunumu nedeniyle oluşan faz dengesizliklerinden dolayı meydana gelen harmonik akımlar bu aygıtların çalışmalarına hataya neden olabilmektedir.

Modern etkin değer voltmetreleri ve ampermetreleri dalda şeklindeki bozulmalardan nispeten etkilenmezler. Bu aletlerde, giriş gerilimi veya giriş akımı, elektronik bir çoklayıcı kullanılarak üretilmiştir. Bu teknikte gerilim veya akımın etkin değeri harmonik genliğinden veya fazından bağımsızdır.

Endüksiyon diskli elektrik sayaçları en yaygın kullanılan enerji ölçülerdir. Bu aletler, frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından dolayı hatalar üretirler. Akımın ve gerilimin her ikisinin de değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlarda %20' lere kadar varan hatalar meydana gelmiştir. Sinüs biçiminde olmayan akım ve gerilimlerin yoğun olarak bulunduğu ortamlarda endüksiyon diskli elektrikli sayaçların kullanımından kaçınmak gerekir. Çünkü, hatalı ölçümler yapmak dışında 400-1000Hz aralığındaki rezonanstan kaynaklanan arızalar da olasıdır.

5.12. Kontrol Aygıtları Üzerindeki Etkiler

Özellikle ateşleme anları, gerilimin sıfır geçişlerine göre ayarlanmış olan kontrol cihazları ve otomatik anahtarlar, harmonikler nedeni ile hatalı çalışırlar. Normal frekanslı gerilim üzerine bindirilmiş olan harmonik gerilimleri kısa süreli, iğne şeklinde ani yükselen uçları yarıiletkenlerin delinmesine neden olur.

5.13. İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler

Çok yüksek dereceli harmonikler, genliklerinin küçük olması nedeniyle kuvvetli akım tesislerinde zararsız oldukları halde, haberleşme tesislerinde parazitler oluşturarak zarar verirler. Harmonik akımları iletişim hatlarına endüksiyon veya doğrudan iletim yoluyla girerler. Hem endüksiyon yoluyla hem de doğrudan iletim yoluyla akım geçmesine neden olan, sistemin nötr hattı akımıdır.

5.14. Aydınlatma Aygıtları Üzerindeki Etkiler

Akkor flemanlı lambalarda harmonikler, lambanın ömrünü kısaltır. Çünkü lambanın ömrü, çalışma geriliminin seviyesine duyarlıdır. Eğer çalışma gerilimi, harmonik bozulma nedeniyle normal etkin gerilime oranla yüksekse, flamanın daha çok ısınmasına ve lambanın ömrünün kılmasına neden olacaktır.

Deşarjlı aydınlatmada, harmoniklerin, duyulabilir gürültüden başka bilinen bir etkisi yoktur. Düşük basınçlı sodyum buharlı lambalar, yüksek basınçlı civa buharlı veya flüoresan lambalar gibi deşarjlı lambalarda, akım sınırlaması yapan endüktif balastlar vardır. Güç katsayısını düzeltmek için kullanılan kondansatörler genellikle bu elemanların yanına konulur. Çift flüoresan lambalarda balast yardımıyla lamba akımı fazları birbirinin zıttı yapılarak güç katsayısı düzeltilmiş olur.

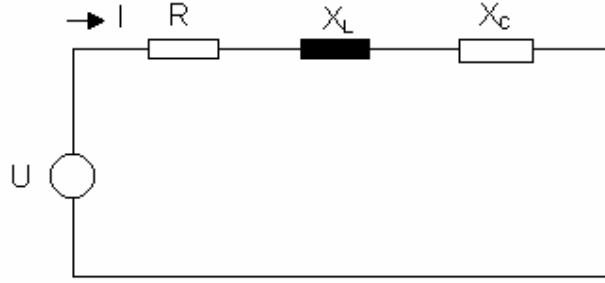
6. ELEKTRİK TESİSLERİNDE REZONANS OLAYLARI VE BUNLARA KARŞI ALINAN TEDBİRLER

Harmonikler içeren bir gerilim, endüktans ve kapasitansların bulunduğu bir devreye uygulanırsa, harmonik frekansların birinde rezonans meydana gelebilir. Bir kondansatör grubunun kapasitif reaktansı doğrudan doğruya frekans ile azalacak, endüktif reaktansı ise frekans ile artacaktır. Herhangi bir LC devresinin rezonans frekansında, endüktif reaktans, kapasitif reaktansa eşit olur. Güç faktörünü düzeltmek için kondansatörlerden yararlanılan elektriksel sistemlerde, devrenin yapısına bağlı olarak seri rezonans, paralel rezonans veya her ikisinin bileşimi meydana gelebilir.

6.1. Rezonans Olayları

6.1.1. Seri rezonans

Seri rezonans, elektrik enerjisi üreten generatörden başlamak üzere iletim hatları, transformatörler ve dağıtım hatlarıyla birlikte güç kondansatörlerine kadar tüm sistem seri rezonans devresini teşkil eder.



Şekil 6.1. Seri rezonans devresi

Şekil 6.1' deki devrede U ve R sabit tutulup, L, C veya f değiştirilmek suretiyle $X_L = X_C$ yapılırsa $\tan\phi = (X_L - X_C)/R$, $\phi = 0$ olur ve akım ile gerilim aynı faza gelir. Bu durumda $Z = R$ olarak minimum bir değer alır ve devreden geçen akım maksimum olur ($I_r = U/R$). Bu hale rezonans hali denir ve bağlama şeklinden dolayı 'Seri Rezonans' adını alır. R direncinin uçlarındaki gerilim, doğrudan doğruya sisteme uygulanan U gerilimine eşit olur. X_L ve X_C gerilimleri değerce birbirine eşit fakat zıt yöndedirler. Seri rezonans devresinde U gibi belirli harmonikleri içeren bir gerilim uygulandığında devreden, I gibi aynı harmonikleri içeren bir akım geçer ve n.harmonikte devrenin empedansı;

$$Z = R + j.n.X_L - j.n.X_C \quad (6.1)$$

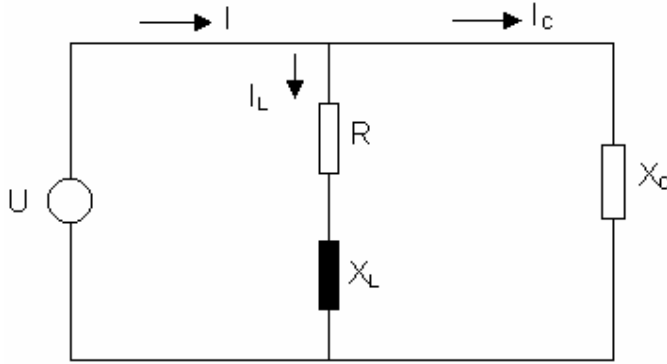
$$Z = R + j \left[n.\omega.L - \frac{1}{n.\omega.C} \right] \quad (6.2)$$

$$n.\omega.L = \frac{1}{n.\omega.C} \quad (6.3)$$

$$f_{\text{seri}} = \frac{1}{2\pi n\sqrt{LC}} \quad (6.4)$$

İdeal durumda, yani kayıpsız rezonans devresinde $R=0$ olduğundan bir tür kısa devre baş gösterir ve sonsuz büyük bir akım geçer. Bu durumda endüktif ve kapasitif dirençler üzerinde çok büyük gerilimler meydana gelir. Bu nedenle seri rezonansa 'gerilimler rezonansı' da denir.

6.1.2.Paralel rezonans



Şekil 6.2. Paralel rezonans devresi

Yukarıdaki devrede endüktans ve kapasitans üzerinden geçen akım;

$$I_L = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (6.5)$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} \quad (6.6)$$

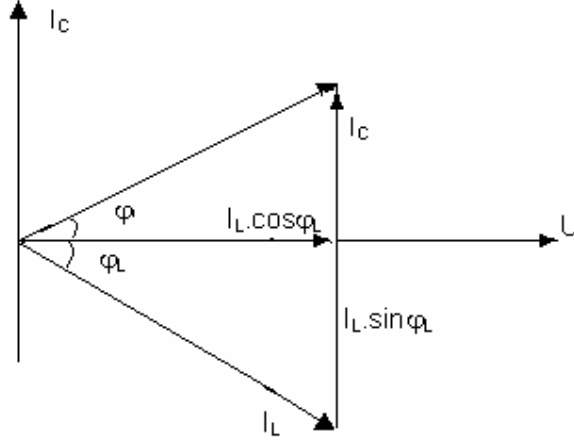
şeklinde hesaplanır. Burada;

$$\tan \varphi_L = \frac{X_L}{R} \quad (6.7)$$

dir.

$\varphi_L = U$ ile I_L arasındaki faz açısıdır.

$I_C = \text{Gerilimden } 90^\circ \text{ ileri fazdadır.}$



Şekil 6.3. Paralel rezonans devresinin fazör diyagramı

U gerilimi ile I akımının aynı fazda olmaları için $\varphi=0$ olmalı, yani $I_C=I_L \cdot \sin\varphi_L$ olması gerekir. Bu ifadeye I_L , I_C yerine eşitlik (4.5) ve(4.6)'daki değerleri, $\sin\varphi_L$ yerine,

$$\sin\varphi_L = \frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (6.8)$$

konursa;

$$\frac{1}{X_C} = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2} \quad (6.9)$$

olur.

(6.9) şartı yerine geldiğinde rezonans akımı (I_r), I_L akımının aktif bileşenine eşit olur.

$$I_r = I_L \cdot \cos\varphi_L = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2} U = \frac{R \cdot U}{X_L \cdot X_C} = \frac{U}{\frac{X_L \cdot X_C}{R}} = \frac{U}{R_0} \quad (6.10)$$

Bu durumda devre rezonans halindedir. Bağlama şeklinden dolayı 'paralel rezonans' adını alır. Paralel rezonans halinde devre omik bir direnç gibi davranır ($\varphi=0$). Bu omik direnç;

$$R_0 = \frac{X_L \cdot X_C}{R} = \frac{L/C}{R} \quad (6.11)$$

formülü ile hesaplanır. Bobinin R direnci ne kadar küçükse R_0 direnci o kadar büyük ve rezonans halinde esas devreden geçen I_r akımı da o derece küçük olur.

Paralel rezonans devresinde belirli harmonikleri içeren bir U gerilimi uygulandığında devreden I gibi aynı harmonikleri içeren bir akım akacaktır. Bu durumda devre admitansı;

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C \quad (6.12)$$

denklem düzenlenirse;

$$Y = \frac{R}{R^2 + n^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2} + j \left[n \cdot \omega \cdot C - \frac{n \cdot \omega \cdot L}{R^2 + n^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2} \right] \quad (6.13)$$

$X_L = X_C$ rezonans koşuluna göre

$$n \cdot \omega \cdot C = \frac{n \cdot \omega \cdot L}{R^2 + n^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2} \quad (6.14)$$

ve buradan;

$$C = \frac{L}{R^2 + n^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2} \quad (6.15)$$

$$n \cdot \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2 \cdot C}{L}} \quad (6.16)$$

ve paralel rezonans frekansı;

$$f_{r \text{ paralel}} = \frac{1}{2\pi n \sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2 \cdot C}{L}} \quad (6.17)$$

olur. Rezonans halinde I akımı çok küçük olsa da endüktans ve kapasitanstan geçen akımlar çok büyük olur. Bu nedenle paralel rezonansa, ‘akımlar rezonansı’ da denir.

6.2. Harmonik Rezonanslarına Karşı Tedbirler

Harmonik rezonanslarının zararlı etkilerine karşı tesisleri korumak için genel olarak bazı tedbirler alınır. Bunlardan birincisi, doğrultucu tesislerinde darbe sayısının yüksek seçilmesidir. Örneğin 6 darbeleri bir doğrultucu yerine 12 veya daha yüksek darbeleri doğrultucuların kullanılmasıyla harmoniklerin dereceleri yükselir ve genlikleri düşer. Bu sayede harmoniklerin etkisi de geniş ölçüde azalmış olur.

İkinci olarak, kompanzasyon tesislerinin buldukları yerlerde üçgen sargısı bulunan transformatörler seçilir. Bu gibi transformatörler, ya üst gerilim tarafında üçgen bağlı bir sargı ya da büyük güçlü transformatörlerde olduğu gibi, kapalı üçgen bağlı üçüncü bir sargı ile donatılırlar Bu sayede genliği en büyük olan 3. harmonikler şebekeye geçemez.

Başka bir önlem de doğrultucu tesislerini iki kısma ayırıp, bir kısmını üç sargılı bir transformatörün yıldız bağlı sekonder sargısından ve diğer kısmını ise üçgen bağlı ikinci sekonder sargısından beslemektir. Bu sayede 5. ve 7. harmonikler önemli derecede azaltılırlar.

6.2.1. Seri rezonansı önleyici tedbirler

Seri rezonans meydana geldiğinde devreden geçen büyük akımlar, anahtarların ve kontaktörlerin kontaklarında aşırı ısınmaya yol açar, böylece devreyi artık kontrol etme olanağı kalmaz. Ayrıca devredeki bağlantı iletkenlerinde, özellikle kondansatör bağlantılarında aşırı ısınmalar ve kısa devreler baş gösterir. Harmonik akımların etkisiyle kondansatör aşırı ısınır bozulma tehlikesi oluşur.

Kondansatörlerin ayarlı olması halinde, rezonans frekansından başka, belirli bir frekansta değişen kapasiteye göre de rezonans şartları gerçekleşebilir. Bu nedenle rezonans olasılığını azaltmak için kondansatörde regülatör kullanılmamalı ve tesis sabit bir kondansatör gücü ile çalıştırılmalıdır.

Bazı hallerde harmonik frekansları ve kondansatör sabit oldukları halde tesiste yapılan bir değişiklik, örneğin bazı paralel transformatörlerin veya bazı motorların devreye girip çıkması, X_L değerinin değişmesine ve böylece yeni bir rezonans şartının oluşmasına yol açabilir. Bu gibi durumlarda sadece devredeki kondansatör değeri değiştirilerek rezonans şartı bozulabilir. Şebekeden gelen harmonik akımların etkisiz hale getirmek ve rezonansı önlemek için en uygun çözüm en belirgin harmonik frekansları için filtreler tasarlanmaktadır.

Kondansatörlerin $1.3 I_n$ değerine kadar aşırı akımla çalışmalarına izin verilir. Alçak gerilim tesislerinde kondansatörler için akımlara karşı özel koruma düzenleri ile korunurlar. Bunlar arasında sigortalar en uygun koruma elemanlarıdır. Magnetik aşırı akım açıcıları frekansa bağlı olduklarından, ayarlanan değer in altında yanlış açmalara neden olabilirler. Bu nedenle otomatik anahtarlar, akım transformatörleri üzerinden bağlanan termik anahtarlar ile donatılırlar.

6.2.2.Paralel rezonansı önleyici tedbirler

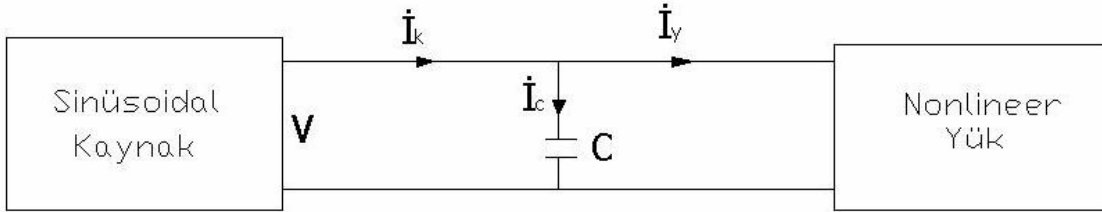
Paralel titreşim devrelerinde, rezonans baş göstermese de harmonik üreticilerden şebekeye oldukça büyük harmonik akımları verilir. Yüksek harmonik frekansları ile orantılı olarak şebeke reaktansı da büyüdüğünden büyük harmonikli gerilim düşümleri meydana gelir. bu da şebeke geriliminin şeklinin bozulmasına yol açar. harmonikli gerilimin ayrıca tüketiciler üzerinde olumsuz etkileri olur.

Hem şebekenin harmonik akımları ile beslenmesini önlemek hem de harmonik rezonanslarına engel olmak için kondansatörler yerine filtre devreleri paralel bağlanır. Bunun için kondansatörler iki, üç veya dört gruba ayrılır ve bunlarla $n= 5,7,11,13$. harmoniklere uygun filtreler tasarlanır. Bu durumda I_n harmonik akımları filtreler tarafından yutulur. Her bir filtre devresinin kondansatör gücü, buna ait I_n harmonik akımları ile I_{C1} temel harmonik akımının karesel ortalamasının, izin verilen kondansatör akımın etkin değerini aşmayacak şekilde saptanır .

7. HARMONİKLİ SİSTEMLERDE GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTİLMESİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ

Harmoniklerin bulunmadığı enerji sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu basit bir inceleme ile yapılabilmekte ve güç faktörü istenilen aralıkta tutulabilmektedir. Fakat kaynağın nonsinüsoidal olması veya yükün nonlinear olması durumunda, devrede harmonikler oluşur ki bu durumda, güç faktörünün düzeltilmesi işleminde bazı ek tedbirler almak gerekir. Yükün endüktif ya da kapasitif olma durumuna göre ya da kaynağın durumuna göre devrede akım ya da gerilim harmonikleri dolaşabilir. Uygulamada endüktif karakterli yüklere daha sık rastlanmaktadır. Bu tip devrelerde, eğer devrede nonsinüsoidal büyüklükler yok ise şönt kompanzasyon yapılarak güç faktörü düzeltilmeye çalışılır. Bu bölümde yapılan analizler yükün endüktif karakterde olduğu göz önünde tutularak yapılacaktır. Ayrıca Matlab' da hazırlanan bir simülink kullanılarak olası devre tiplerine ilişkin sayısal uygulamalara yer verilecektir. Aşağıda W. Shepherd ve P. Zand tarafından geliştirilen güç faktörü düzeltilmesi yaklaşımına ilişkin devre tipleri görülmektedir. Her bir devre tipinin analizi yapıldıktan sonra Matlab simülink ile sayısal bir uygulama yapılarak sonuçlar alınmış, adım adım kullanıcı arayüzüne ait görüntülere yer verilerek programın çalışma mantığı açıklanmıştır.

7.1. Sinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yüklerden Oluşan Devreler



Şekil 7.1 Sinüsoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip devrenin paralel kompanzasyonu

Yukarıda şekli verilen, sinüsoidal kaynak (veya şebeke) ve nonlinear karaktere sahip yükten oluşan devre tipinde, devre parametrelerini hesaplamak için yapılan analizde, devreye şönt kapasitörün ilavesiyle güç faktörü iyileştirmesinin yanı sıra, toplam harmonik distorsiyon değerinin değişimini de incelemek gerekmektedir. Çünkü nonlinear karakterli yükün sebep olacağı harmoniklere ilave olarak kapasitörün bağlanmasıyla da harmonik bileşenlerde artış görülecektir.

Sinüsoidal bir kaynaktan beslenen nonlinear bir yükün çekeceği aktif gücü, harmonikli akım ve gerilimin temel bileşeni belirler. Kaynak tarafından üretilen gücün kayıpsız olarak yüke iletildiği düşünüldüğünde, yüke ait aktif güç şöyle ifade edilebilir:

$$P_k = P_y = V \cdot I_{Y1} \cdot \cos \psi_{Y1} = V \cdot I_{K1} \cdot \cos \psi_{K1} \quad (7.1)$$

Burada;

I_{Y1} : Yük akımının temel bileşeni

I_{K1} : Kaynak akımının temel bileşeni

ψ : Gerilim ait faz açısının akıma ait faz açısından farkı

Devreden de anlaşılacağı gibi, kondansatör elemanının çektiği akım ile yük akımının vektörel toplamı kaynak akımını verecektir.

$$\dot{I}_K = \dot{I}_Y + \dot{I}_C \quad (7.2)$$

Burada kondansatör akımı (\dot{I}_C) bulunurken,

$$\dot{I}_C = j \cdot \omega \cdot C \cdot V \quad (7.3)$$

formülü kullanılır. Devreye kondansatör elemanı bağlanmadan önce akıma ait toplam harmonik distorsiyonu;

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_2^n I_n^2}}{I_1} \quad (7.4)$$

şeklinde hesaplanır. Devreye ait güç faktörünün tanımı ise;

$$GF = P_k / S_k \quad (7.5)$$

şeklinde dir. Görünür güç;

$$S = V \cdot I_k \quad (7.6)$$

olduğundan güç faktörü;

$$GF = P_k / V \cdot I_k \quad (7.7)$$

olarak da yazılabilir. Burada I_k ;

$$I_k = \sqrt{\sum_1^n I_n^2} \quad (7.8)$$

formülü ile hesaplanır.

W. Shepherd ve P. Zand' ın yaklaşımlarına göre devrenin güç faktörü

$$GF = \frac{I_{Y1} \cdot \cos \Psi_{Y1}}{\sqrt{V^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + I_{Y1}^2 - 2 \cdot V \cdot I_{Y1} \cdot \omega \cdot C \cdot \sin \Psi_{Y1} + \sum_2^n I_{Yn}^2}} \quad (7.9)$$

olup en büyük güç faktörünü sağlayan paralel kapasiteyi bulabilmek için $dP / dC = 0$ ifadesinden yararlanılarak

$$C_k = \frac{I_{Y1} \cdot \sin \Psi_{Y1}}{\omega \cdot V} \quad (7.10)$$

olarak belirlenebilir. Bu kondansatör değeri güç faktörünü maksimum yapacak değer olduğuna göre GF ifadesinde yerine yazılırsa;

$$GF_{\max} = \frac{I_{Y1} \cdot \cos \Psi_{Y1}}{\sqrt{I_{Y1}^2 \cdot \cos^2 \Psi_{Y1} + \sum_2^n I_{Yn}^2}} = \frac{P_K}{\sqrt{P_Y^2 + D_Y^2}} \quad (7.11)$$

olarak elde edilir. Burada Dy distorsiyon gücü olup devrede harmonik bileşenler bulunduğu için ortaya çıkmakta ve güç faktörünü belirli bir değerden sonra sınırlandırmaktadır. denklemin gösteriyor ki devrede harmonikler yok edilmedikçe güç faktörü ancak belirli bir yere kadar artırılabilir. Bu değerden sonra güç faktörünü istenen değere yükseltebilmek için harmoniklerin giderilmesini de kapsayan çözümler bulunmalıdır. Yüke paralel kondansatör bağlanmasıyla yapılan reaktif güç kompanzasyonu işlemi ile devrede güç faktörü, kapasite değerinin artan değerleri için önce maksimum değerine kadar artacak daha sonra azalmaya başlayacaktır. Azalmaya başladığı nokta devrenin kapasitif karaktere geçtiğinin bir göstergesidir.

Kondansatör elemanı bağlandıktan sonra toplam kaynak akımı I_k hesaplanır ve akıma ait yeni toplam harmonik distorsiyonu değeri;

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_2^n I_n^2}}{I_1} \quad (7.12)$$

olarak bulunur.

Sayısal Uygulama-1

Nonlineer bir yük

$$V(t) = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin(\omega t) \text{ [V]}$$

değerindeki gerilime sahip bir kaynaktan beslenmekte ve

$$I(t) = \sqrt{2} \cdot [45 \cdot \sin(\omega t - 30^\circ) + 20 \cdot \sin(3\omega t - 45^\circ) + 5 \cdot \sin(5\omega t - 20^\circ)] \text{ [A]}$$

akım çekmektedir. Devreyi analiz ederek devre parametrelerini hesaplayalım.

$$|V| = 220 \text{ [V]}$$

$$|I| = \sqrt{(45^2 + 20^2 + 5^2)} = 49,50 \text{ [A]}$$

$$P_y = 220 \cdot 45 \cdot \cos 30^\circ = 8573,65 \text{ [W]}$$

$$Q = 220 \cdot 45 \cdot \sin 30^\circ = 4950 \text{ [VAr]}$$

$$S = 220 \cdot 49,50 = 10890 \text{ [VA]}$$

$$GF = P / S = 0,7873$$

$$C_k = (45 \cdot \sin 30^\circ) / (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 220) = 325,54 \mu\text{F}$$

$$GF_{\max} = (45 \cdot \cos 30^\circ) / (\sqrt{45^2 \cdot \cos^2 30^\circ + 20^2 + 5^2}) = 0.8839$$

$$THD_i = (\sqrt{20^2 + 5^2}) / 45 = 0.458 = \% 45,8 \text{ (Kapasitör bağlanmadan önce)}$$

$$I_c = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 325,54 \cdot 10^{-6} \cdot 220 = j \cdot 22,5$$

Yük akımının aktif ve reaktif bileşenleri;

$$I_{ya} = 45 \cdot \cos 30^\circ = 38.97$$

$$I_{yr} = 45 \cdot \sin 30^\circ = j \cdot 22,5$$

Toplam kaynak akımı;

$$I_k = 38,97 - j \cdot 22,5 + j \cdot 22,5 = 38.97 \text{ [A]}$$

olarak bulunur. Bu durumda kapasitör elemanı devrede iken THDi değeri;

$$THD_i = (\sqrt{20^2 + 5^2}) / 38,97 = 0,528 = \% 52,8$$

Sonuç: Devrede reaktif güç kompanzasyonu yapıldığında güç faktörünün maksimum değerine kadar artırılabilirdi, fakat kondansatör elemanının doğası gereği devredeki toplam harmonik kirliliği artırdığı görülmüştür.

Devre parametrelerini Matlab' da hazırlanan simülasyon programında da hesaplayabiliriz. Aynı zamanda devreye bağlanan kondansatöre bağlı olarak güç faktörünün değişimini de gözleyebiliriz. Programın çalıştırılmasıyla ekranda kullanıcı arayüzü (GUI) görüntülenir. (Şekil 7.1) Bu sırada program sadece devre tipi seçmeye olanak tanır. Bunun dışındaki tüm butonlar pasiftir. Devre tipinin seçilmesiyle ekranda, hangi değişkenlerin girilmesi gerektiğini gösteren bir uyarı çıkar. (Şekil 7.2) Program uyarıda belirtilen devre değişkenlerinin haricinde değişken girilmesine izin vermez. İlgili butonlara basılmasıyla ekranda gerilim ve akım değişkenlerini girebileceğimiz pencereler açılır. Devre tipine göre değişkenlik gösteren değerlerin girilmesiyle, devre parametrelerini hesaplatan, ekrana yazdıran ve GF-C grafiğini çizdiren “değerleri hesapla” butonu aktif olur. Bu butona basıldığında istenilen değerler hesaplatılmış ve ekrana yazdırılmış olur.

PFC_Simulink

DEVRE TIPI SEÇİNİZ

Sinusoidal kaynak - non-linear yük

GERİLİM : $(2 \times (1/2)^2)^* (\sqrt{1^2 \sin^2(\omega t - Q1)} + \sqrt{3^2 \sin^2(3\omega t - Q3)} + \sqrt{5^2 \sin^2(5\omega t - Q5)} + \dots)$

AKIM : $(2 \times (1/2)^2)^* (11^2 \sin^2(\omega t - Q1) + 13^2 \sin^2(3\omega t - Q3) + 15^2 \sin^2(5\omega t - Q5) + \dots)$

EMPEDANS : R+jX

DEĞERLERİ HESAPLA

Non-sinusoidal kaynak - linear yük

Kapasite Değeri (GFmax için) :

% THDI (kond. yük) :

% THDI (kond. var) :

Maksimum Güç Faktörü (GFmax) :

Non-sinusoidal kaynak - non-linear yük

Görünen Güç (S) :

Aktif Güç (P) :

Reaktif Güç (Q) :

Güç Faktörü (GF) :

Kapasite Değeri (GFmax için) :

Minimum Kaynak Akımı (Imin) :

Maksimum Güç Faktörü (GFmax) :

UYARI

Gerilim ve akım değişkenlerini giriniz

OK

1

0.8

0.6

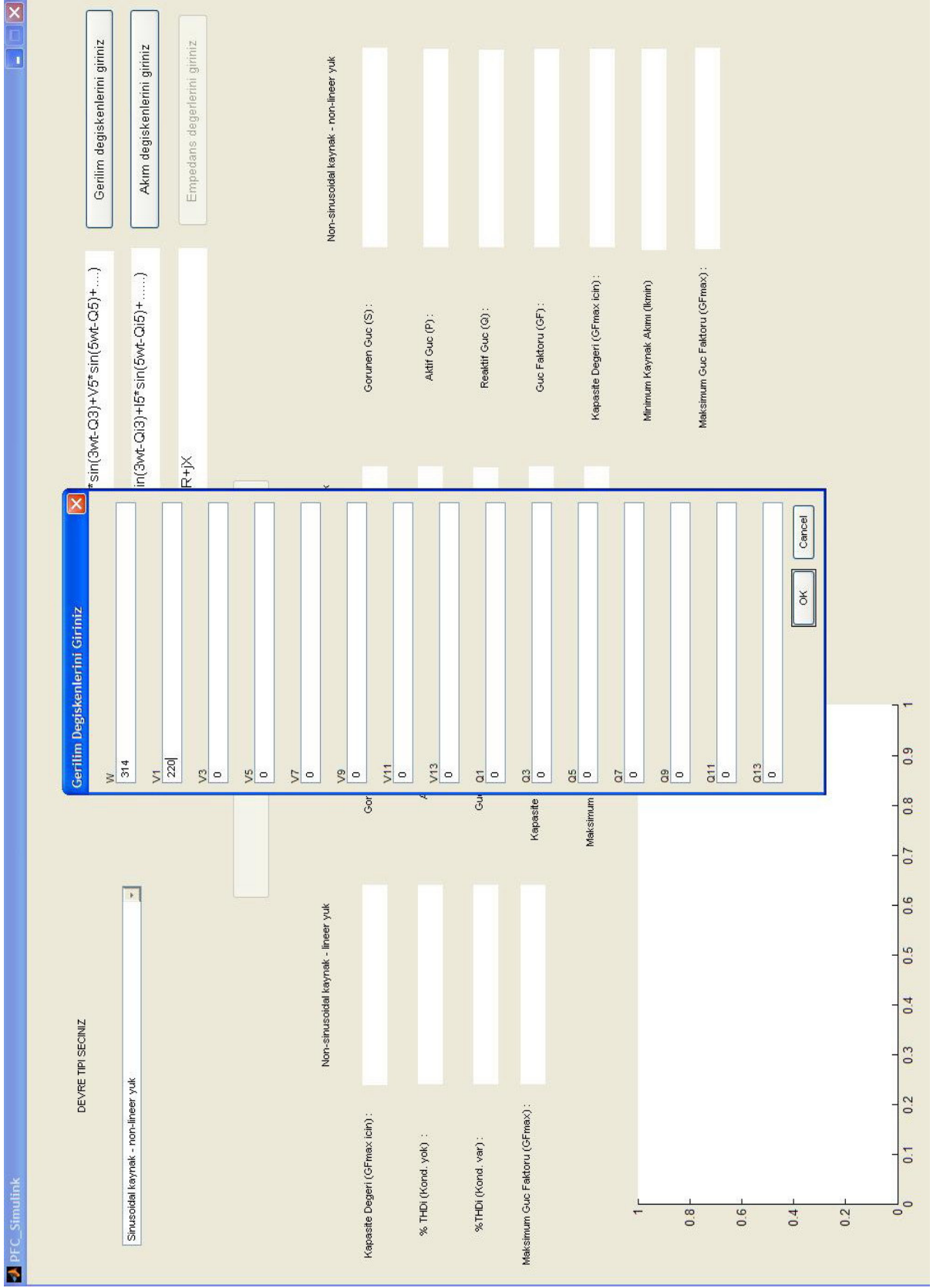
0.4

0.2

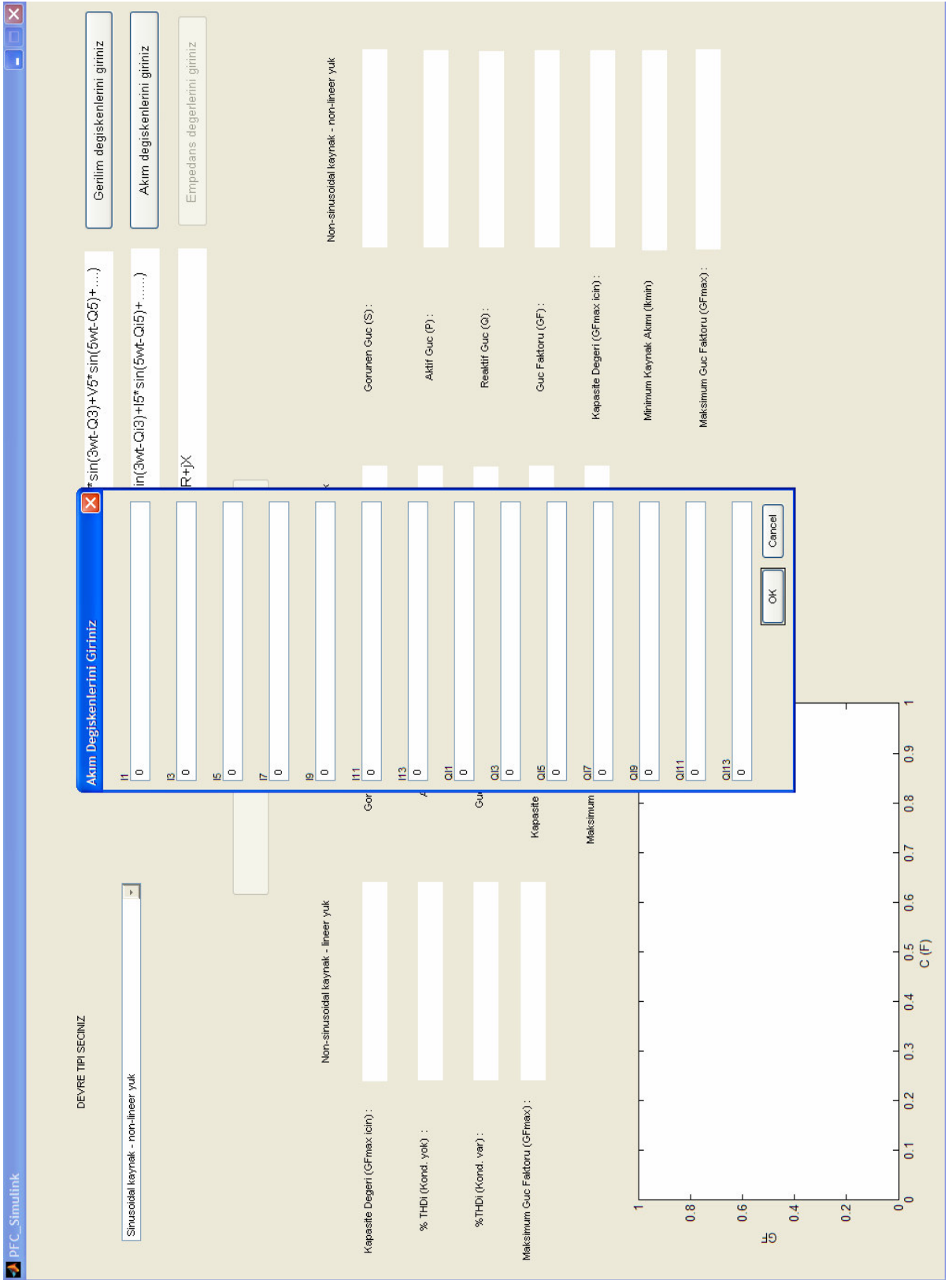
0

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

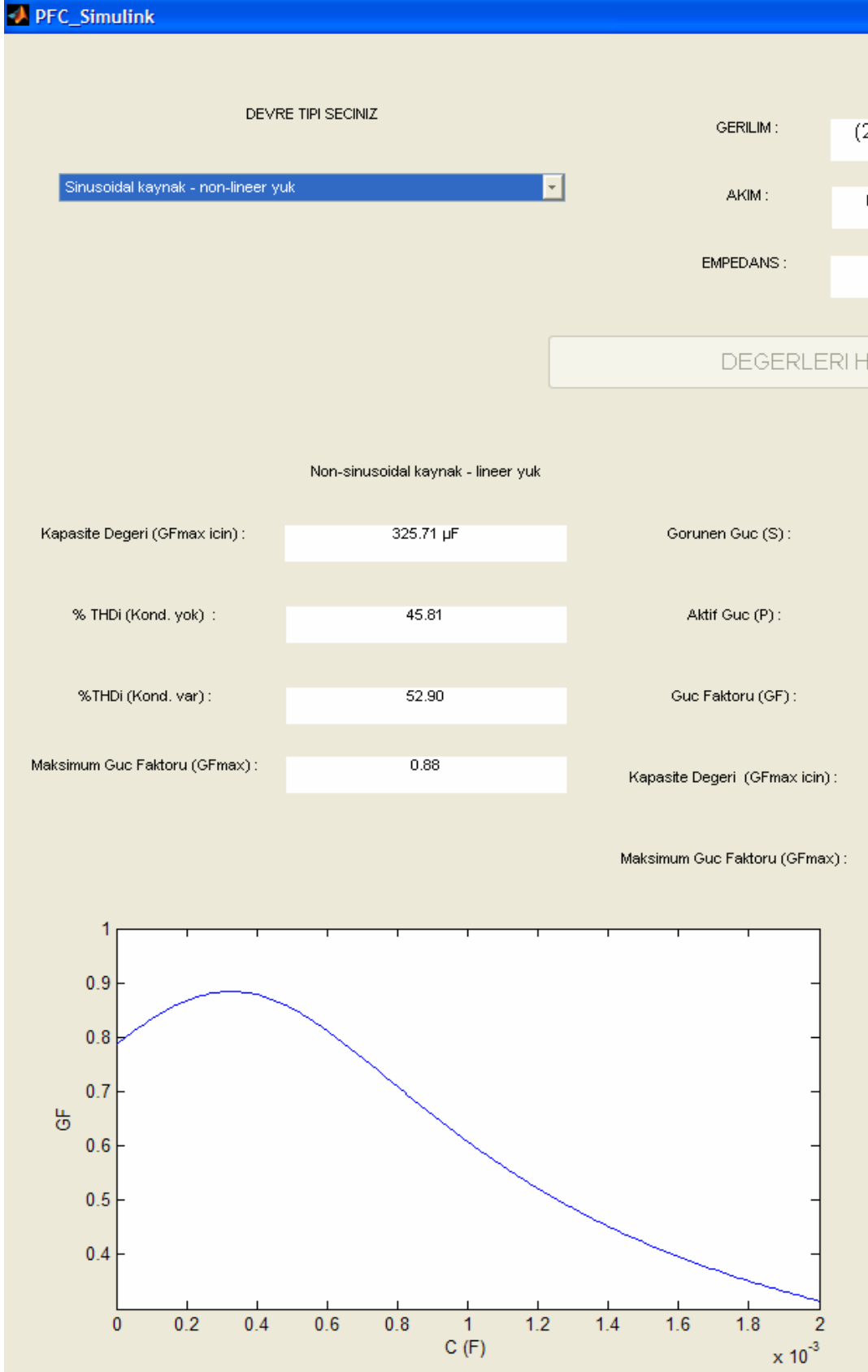
Şekil 7.2 Simülátöre ait çalışma adımları



Şekil 7.3 Arayüz ekranında gerilim değişkenleri penceresi

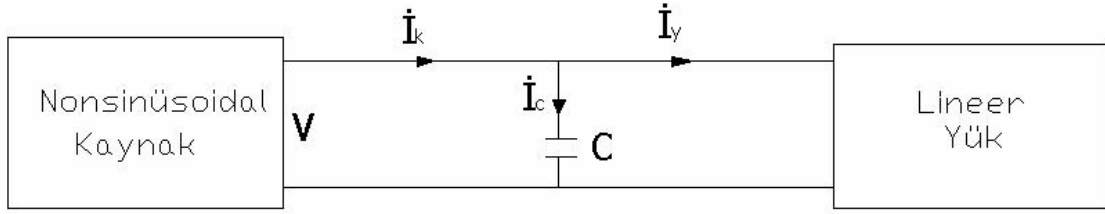


Şekil 7.4 Arayüz ekranında akım değişkenleri penceresi



Şekil 7.5 1. devre tipine ait devre parametrelerini gösteren arayüz

7.2. Nonsinüsoidal Kaynak ve Lineer Yükten Oluşan Devreler



Şekil 7.6 Nonsinüsoidal kaynak ve lineer yüke sahip devrenin paralel kompanzasyonu

Şekildeki sisteme bağlı lineer yükün direnç ve endüktans bileşenlerinden oluştuğu (devrenin endüktif karakterde olduğu) kabul edilirse devrenin analizi şu şekilde yapılabilir. Kaynak akımının ani değeri vektörel olarak;

$$\dot{I}_K = \dot{I}_Y + \dot{I}_C$$

olup burada,

$$\dot{I}_Y = \sqrt{2} \cdot \sum_1^n I_{Yn} \cdot \sin(n \cdot \omega t + \alpha_n - \Psi_{Yn}) \quad (7.13)$$

$$\dot{I}_C = \sqrt{2} \cdot \sum_1^n V_n \cdot n \cdot \omega \cdot C \cdot \sin\left(n \cdot \omega t + \alpha_n + \frac{\pi}{2}\right) \quad (7.14)$$

n : Harmonik mertebesi

V_n : n. harmonik gerilim bileşeninin rms değeri

α_n : n. harmonik gerilim bileşeninin faz açısı

Ψ_{Yn} : n. harmonik gerilime ait bileşenin faz açısının, n. harmonik akıma ait bileşenin faz açısından farkı

Görünür güç ifadesi:

$$S_k^2 = V^2 \cdot I_k^2 = \left(\sum_1^n V_n^2 \right) \cdot \left(\sum_1^n I_{kn}^2 \right) \quad (7.15)$$

ve güç faktörü

$$GF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot \cos \Psi_{Yn}}{\sqrt{\left(\sum_1^n V_n^2 \right) \cdot \left(\sum_1^n I_{kn}^2 \right)}} \quad (7.16)$$

olarak verilir. Burada;

I_{Yn} : n. harmonik akım bileşeninin rms değeri

I_{kn} : kondansatöre ait n. harmonik akım bileşeni ile yüke ait n. harmonik akım bileşeninin toplamı

Formülden de anlaşılacağı gibi güç faktörünün maksimum olabilmesi için kaynak akımı I_k minimum olmalıdır. W. Shepherd ve P. Zand tarafından, güç faktörünün maksimum olabilmesi için kullanılması gereken kondansatör elemanının değeri $dI_k / dI_c = 0$ ifadesi kullanılarak;

$$C_k = \frac{\sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot n \cdot \sin \Psi_{Yn}}{\omega \cdot \sum_1^n V_n^2 \cdot n^2} \quad (7.17)$$

olarak verilmiştir. Bu değer yerine yazılmasıyla minimum kaynak akımı değeri I_{kmin} ve maksimum güç faktörü değeri GF_{max} elde edilmiş olur. Minimum kaynak akımı ifadesi;

$$I_{k \min}^2 = \sum_1^n \left[\left(\frac{V_n \cdot n \cdot \sum_1^n V_n \cdot n \cdot I_{Yn} \cdot \sin \Psi_{Yn}}{\sum_1^n V_n^2 \cdot n^2} - I_{Yn} \cdot \sin \Psi_{Yn} \right)^2 + I_{Yn}^2 \cdot \cos^2 \Psi_{Yn} \right] \quad (7.18)$$

ve maksimum güç faktörü ifadesi;

$$GF_{\max} = \frac{\sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot \cos \Psi_{Yn}}{\sqrt{\sum_1^n V_n^2 \left\{ \sum_1^n \left[\left(\frac{V_n \cdot n \cdot \sum_1^n V_n \cdot n \cdot I_{Yn} \cdot \sin \Psi_{Yn}}{\sum_1^n V_n^2 \cdot n^2} - I_{Yn} \cdot \sin \Psi_{Yn} \right)^2 + I_{Yn}^2 \cdot \cos^2 \Psi_{Yn} \right] \right\}}} \quad (7.19)$$

formülleriyle verilir.

Sayısal Uygulama-2

Empedans değeri $Z = 3 + j.4 \text{ } [\Omega]$ olan lineer bir yük gerilim değeri

$V(t) = \sqrt{2} \cdot (220 \cdot \sin(\omega t) + 120 \cdot \sin(3\omega t) + 40 \cdot \sin(7\omega t)) \text{ } [V]$ olan harmonikli bir baraya bağlanmıştır. Devre parametrelerini hesaplayalım;

$$|V| = \sqrt{(220^2 + 120^2 + 40^2)} = 253,77 \text{ } [V]$$

$$Z_1 = 3 + j.4 = 5 \angle 53,13^\circ \text{ } [\Omega]$$

$$I_1 = 44 \angle -53,13^\circ \text{ } [A]$$

$$Z_3 = 3 + j.12 = 12,37 \angle 75,96^\circ \text{ } [\Omega]$$

$$I_3 = 9,7 \angle -75,96^\circ \text{ } [A]$$

$$Z_7 = 3 + j.28 = 28,16 \angle 83,88^\circ \text{ } [\Omega]$$

$$I_7 = 1,42 \angle -83,88^\circ \text{ } [A]$$

$$I_{II} = 45,07 \text{ [A]}$$

$$S = 253,77 \cdot 45,07 = 11437,41 \text{ [VA]}$$

$$P = 6097,47 \text{ [W]}$$

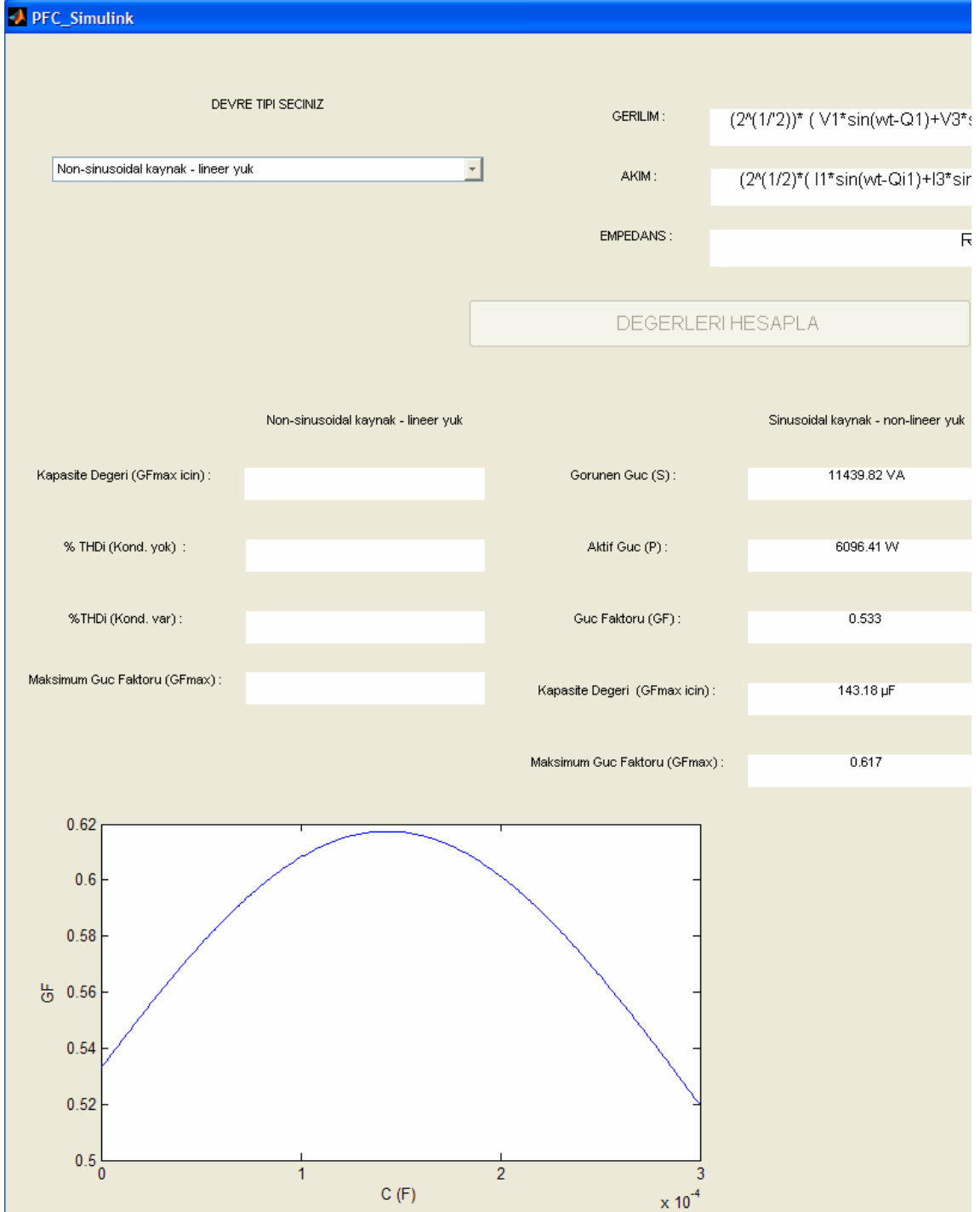
$$GF = 6097,47 / 11437,41 = 0,533$$

$$C_k = 142,94 \text{ }\mu\text{F}$$

$$I_{kmin} = 38,94 \text{ [A]}$$

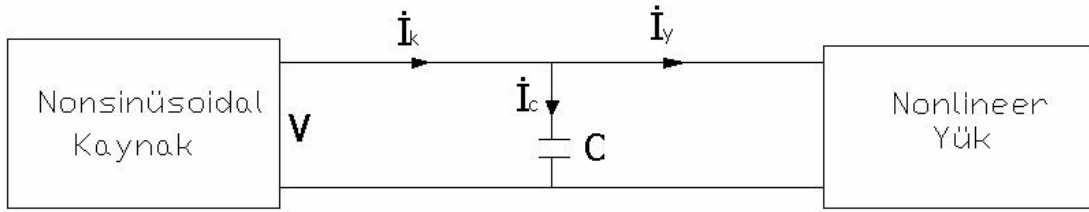
$$GF_{max} = 6097,47 / (253,77 \cdot 38,94) = 0,617$$

Devreyi bir de simülâtör yardımıyla analiz edelim.



Şekil 7.7 2. devre tipine ait devre parametrelerini gösteren arayüz

7.3. Nonsinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yükten Oluşan Devreler



Şekil 7.8 Nonsinüsoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip devrenin paralel kompanzasyonu

Şekildeki devrenin parametrelerini bulmak üzere analizini yapalım:

$$P_k = \sum_1^{n1} V_{n1} \cdot I_{n1} \cdot \cos \Psi_{yn1} \quad (7.20)$$

$$Q_k = \sum_1^{n1} V_{n1} \cdot I_{n1} \cdot \sin \Psi_{yn1} \quad (7.21)$$

$$S_k^2 = V^2 \cdot I_k^2 = \sum_1^{n1} V_{n1}^2 \cdot \sum_1^{n1} I_{n1}^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \cdot \sum_1^{n2} (V_{n2} \cdot n_2 \cdot \omega \cdot C)^2 + \sum_1^{n1} V_{n1}^2 \cdot \sum_1^{n2} (V_{n2} \cdot n_2 \cdot \omega \cdot C)^2 + \sum_1^{n1} V_{n1}^2 \cdot \sum_1^{n3} I_{yn3}^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \cdot \sum_1^{n1} I_{n1}^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \cdot \sum_1^{n3} I_{yn3}^2 \quad (7.22)$$

Burada, n1 hem akım hem de gerilimde bulunan harmonik bileşenlerini, n2 sadece gerilimde bulunan harmonik bileşenlerini ve n3 sadece akımda bulunan harmonik bileşenlerini göstermektedir. Devrenin güç faktörü;

$$GF = \frac{P_k}{V \cdot I_k} \quad (7.23)$$

olup maksimum güç faktörünü sağlayacak kapasite değeri için W. Shepherd ve P. Zand tarafından,

$$\frac{d(GF)}{dC} = \frac{d(S_k)}{dC} = \frac{dI_k}{dC} = 0 \quad (7.24)$$

yaklaşımı ile;

$$C_k = \frac{\sum_1^{n1} V_{n1} \cdot I_{yn1} \cdot n_1 \cdot \sin \Psi_{yn1}}{\omega \left(\sum_1^{n1} V_{n1}^2 \cdot n_1^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \cdot n_2^2 \right)} \quad (7.25)$$

olarak bulunmuştur. Bu Ck değerini kullanarak minimum kaynak akımını ve minimum görünür gücü belirleyebiliriz:

$$I_{k \min}^2 = \sum_1^{n1} (V_{n1}^2 \cdot n_1^2 \cdot \omega^2 \cdot C_s^2 + I_{yn1}^2 - 2V_{n1} \cdot I_{yn1} \cdot n_1 \cdot \omega \cdot C_s \cdot \sin \Psi_{yn1}) + \sum_1^{n2} (V_{n2} \cdot n_2 \cdot \omega \cdot C_s)^2 + \sum_1^{n3} I_{yn3}^2 \quad (7.26)$$

$$S_{k \min}^2 = V^2 \cdot I_{k \min}^2 = \left(\sum_1^{n1} V_{n1}^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \right) \left[\sum_1^{n1} (V_{n1}^2 \cdot n_1^2 \cdot \omega^2 \cdot C_s^2 + I_{yn1}^2 - 2V_{n1} \cdot I_{yn1} \cdot n_1 \cdot \omega \cdot C_s \cdot \sin \Psi_{yn1}) + \sum_1^{n2} (V_{n2} \cdot n_2 \cdot \omega \cdot C_s)^2 + \sum_1^{n3} I_{yn3}^2 \right] \quad (7.27)$$

güç faktörünün maksimum değeri;

$$GF_{\max} = \frac{\sum_1^{n1} V_{n1} \cdot I_{yn1} \cdot \cos \Psi_{yn1}}{\sqrt{\left(\sum_1^{n1} V_{n1}^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \right) \cdot I_{k \min}^2}} \quad (7.28)$$

olarak bulunmuştur.

Sayısal Uygulama-3

Zamana bağlı akım ve gerilim ifadeleri;

$$V(t) = \sqrt{2} \cdot (230 \cdot \sin(\omega t + 53^\circ) + 50 \cdot \sin(5\omega t - 30^\circ) + 20 \cdot \sin(7\omega t - 45^\circ)) \quad [\text{V}]$$

$$I(t) = \sqrt{2} \cdot (40 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ) + 20 \cdot \sin(3\omega t - 20^\circ) + 5 \cdot \sin(7\omega t - 37^\circ)) \quad [\text{A}]$$

olan devreyi analiz edelim.

$$|V| = \sqrt{(230^2 + 50^2 + 20^2)} = 236,22 \quad [\text{V}]$$

$$|I| = \sqrt{(40^2 + 20^2 + 5^2)} = 45 \quad [\text{A}]$$

$$P = 8567,13 \quad [\text{W}]$$

$$Q = 3581,09 \quad [\text{VAr}]$$

$$S = 10738,96 \quad [\text{VA}]$$

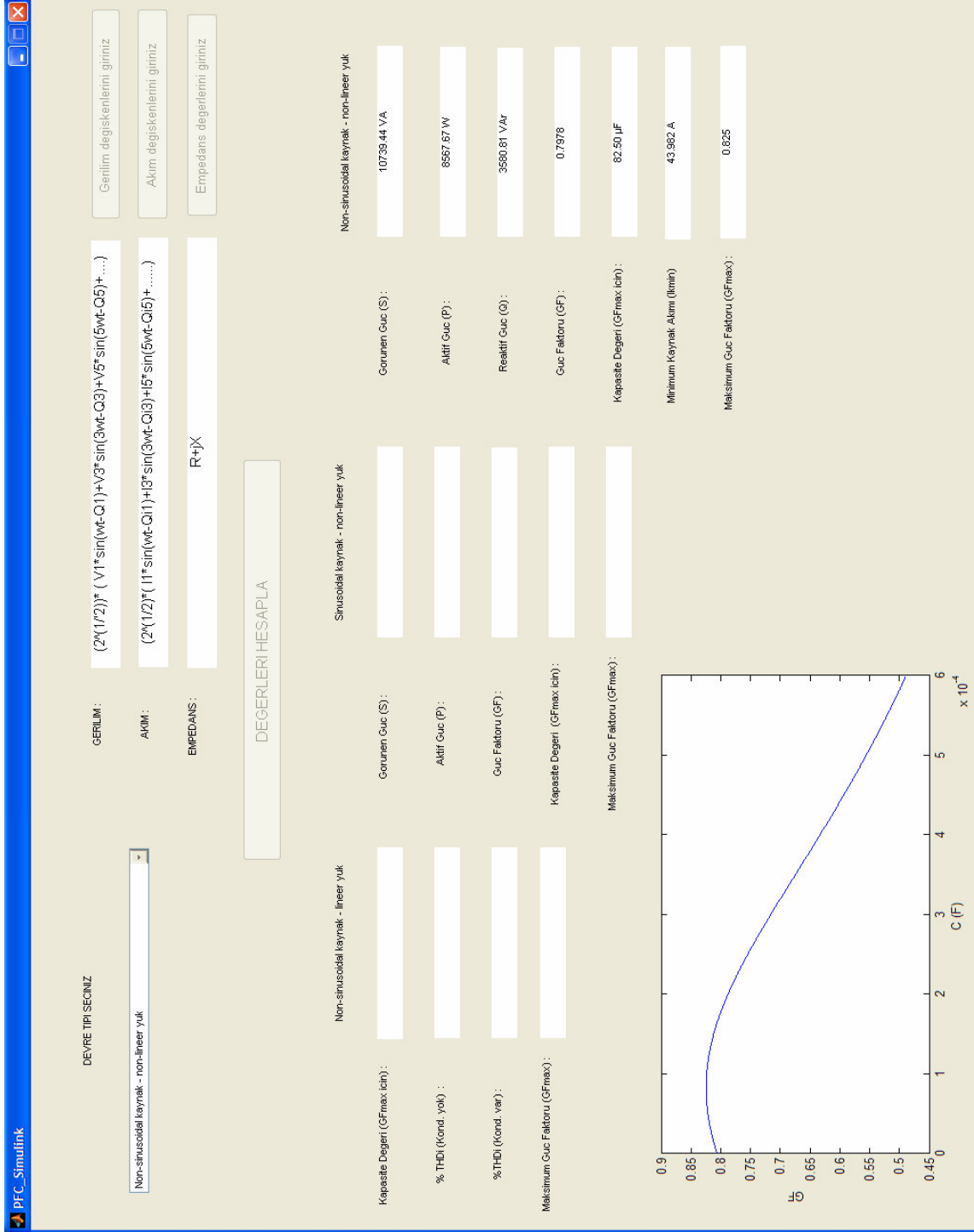
$$GF = 0,7977$$

$$C_k = 82,43 \quad \mu\text{F}$$

$$I_{k \min} = 43,917 \quad [\text{A}]$$

$$GF_{\max} = 0,8237$$

Sonuçları matlab simülink kullanarak da bulabiliriz.



Şekil 7.9 3. devre tipine ait devre parametrelerini gösteren arayüz

8. SONUÇLAR

Akım ve gerilimleri arasındaki ilişkisi lineer olmayan (nonlinear) elemanlar tarafından üretilen harmonikler, devrede dolaşan akım ve gerilimin dalga şeklini bozarlar. Nonlinear olma durumu genellikle cihazların elektrik ve manyetik devrelerindeki lineersizlik sonucu ortaya çıkar. İşletme araçlarının zarar görmesine hatta devre dışı kalmalarına neden olan harmonikler, tesislerde ek kayıplara, ısınmalara ve rezonanslara neden olabilirler.

Harmoniklerin bulunmadığı enerji sistemlerinde (kaynağın sinüsoidal ve yükün lineer olma durumu) güç faktörünün düzeltilmesi, harmoniklerin bulunduğu devrelere oranla daha kolay yapılabilmektedir. Fakat harmonikli devrelerde güç faktörü düzeltilmesi işlemi ek analizler gerektiren nispeten daha karmaşık bir işlemdir. Yine harmoniklerin bulunmadığı devrelerde $\cos \phi$ niceliği güç faktörüne eşit iken, harmonikli devrelerde birbirinden farklı kavramlardır.

Harmonikli devrelerde güç kompanzasyonu yapılırken, yüke paralel kondansatör elemanının bağlanmasıyla, devrenin güç faktörü belirli bir değere kadar yükseltilebilir. Harmonik kaynaklı distorsiyon gücü, güç faktörünü bu değerden sonra sınırlandırmakta ve bağlanan kondansatör değerinin artan değerleri için güç faktörü artmayıp bir yerden sonra azalmaya başlamaktadır. Ayrıca kondansatör elemanının bağlanması, devredeki toplam harmonik distorsiyonunu artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, güç faktörünün düzeltilmesine ilişkin çalışmalardan biri olan, minimum optimal kapasiteli kondansatör elemanı kullanılarak güç faktörünün iyileştirilmesiyle ilgili, Matlab' da bir program geliştirilmiş ve sayısal uygulama örnekleriyle sonuçlar desteklenip program tanıtılmıştır. Olası devre tipleriyle ilgili, yapılan simülasyon sonuçlarına göre aşağıdaki yargılara varılabilir:

1. Güç kompanzasyonu yapılacak olan sistemde harmonik kirliliğin bulunup bulunmadığı mutlaka araştırılmalıdır. Aksi halde kompanzasyon optimize edilemez.
2. Harmoniklerin bulunmadığı devrelerde güç faktörü, $\cos \phi$ değerine eşittir.
3. Harmonikli devrelerde yüke paralel bağlanan kondansatör elemanı ile yapılan reaktif güç kompanzasyonunda, güç faktörü ancak belirli bir değere kadar artırılabilir. Burada harmoniklerden kaynaklanan distorsiyon gücü güç faktörünü sınırlandırmaktadır. Eğer güç faktörünü daha da artırmak gerekiyorsa harmoniklerin yok edilmesi şarttır.
4. Sistemde optimum kapasite değeri mutlaka belirlenmelidir. Bu ön çalışma gereksiz yere kondansatör kullanmayı önleyerek ekonomik bir çözüm için ilk koşul olacaktır.
5. Sinüsoidal beslemeli, nonlinear yükte yüklenmiş devrelerde distorsiyon gücünün büyük bir değer almasından dolayı güç faktörünün bir değerine çıkarılması için sadece kapasite elemanı

yeterli olmamaktadır. Güç faktörünü bire yakın değerlere getirebilmek için harmoniklerin filtre edilmesi gerekmektedir.

6. Hem akım hem de gerilime ait harmoniklerin bulunduğu, nonsinüsoidal beslemeli ve nonlineer yükle yüklenmiş devrelerde, yalnızca şönt kompanzasyon yapılarak güç faktörünün 1 değerine çıkarılması çok zordur. Bu tip devrelerde uygun bir filtre kullanılarak devrede güç faktörü iyileştirilmesi yapmak gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Adak, S., Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonunun Azaltılması, (2003), İstanbul

Balcells, J., Elektrik Enerjisinin Kaliteli ve Akılcı Kullanımı

Balcı, M. Erhan, Kılıç, Ö., Hocaoğlu, M. Hakan, Harmonik Üreten Yüklere Ait Yaygın Olarak Kullanılan Modellerin Gerçek Bir Sisteme Uygulanması, 1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, (2005)

Basu, S., Bollen, H. J., A Novel Common Power Factor Correction Scheme for Homes and Offices, IEEE 0885-8977, (2005)

Collombet, C., Lupin, J. M., Schonek, J., Şebekelerdeki Harmonik Bozulmalar ve İyileştirilmesi, ETMD, No:152, (1999)

Ergun, D., Harmonikli Ortamda Kompanzasyon, 1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, (2005)

ETMD, EMC: Elektromanyetik Uyumluluk, Endüstriyel Şebekelerin Elektromanyetik Uyumluluğu, No:149

Ferracci, Ph., Güç Kalitesi, No: 199, ETMD

İlze, Y., Harmonikli Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi, (2004), İstanbul

Karakaş, A., Harmonikli Güç Sistemlerinde Güç Faktörü Düzeltilmesi, (2000), İstanbul

Karakaş, A., Kocatepe, C., Baysal, M., Çakır, H., Harmonikli Sistemlerde Filtre Uygulamasının Karşılaştırılması, 1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 2005

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

Krishnan, R., Diamantidis, D., and Lee, S., Motion Control System Research Group, Impact of Power Factor Correction on Low Power Inverter-Fed Induction Motor Drive System, IEEE 0-7803-2730-6/95, (1995)

Lee, K. C., Cho, B. H., Low Cost Power Correction (PFC) Converter Using Delay Control, IEEE 0-7803-3823-5/97, (1997)

Matsuo, M., Matsui, K., Yamamoto, I., Ueda, F., A Comparison of various DC-DC Converters and Their Application to Power Factor Correction, IEEE 0-7803-6456-2/00, (2000)

Oliveira, L. C. O., Neto, M. C. B., Souza, J. B., Using Matlab-Simuling for Simulating Load Compensation in Four-Wire Electrical Power Systems, IEEE 0-7803-8775-9/04, (2004)

Sangsun, K., Enjeti, N., A Modular Single Phase Power Factor Correction Scheme With a Harmonic Filtering Function, IEEE 0278-0046/03, (2003)

Shwehdi, M. H., Sultan, M. R., Pover Factor Correction Capacitors; Essentials and Cautions, IEEE 0-7803-6420-1/00, (2000)

Topaloğlu, K., Enerji Kalitesi ve Harmonik Sorunları, EMO, (2003)

Tse, C. K., Chow, M. H., L., A Theoretical Examination Of The Circuit Requirements of Power Factor Correction, IEEE 0-7803-4489-8/98, (1998)

Tipsuwanporn, V., Tarasantisuk, C., Phanphairoje, S., A Matlab/Simulink Tool for Converters Teaching- A Power Factor Correction Approach, IEEE, (2002)

Tuncay, N., Enerji Kalitesi ve Harmoniklerin Oluşum Nedenleri, Hesaplanması, Ölçümü, Önlemler, EMO, (2000)

Yimin Jiang, Fred C. Lee, Guichao Hua, Wei Tang, Virginia Power Electronics Center, A Novel Single-Phase Power Factor Correction Scheme, Virginia Power Electronics Centre, IEEE 0-7803-0982-0/93, (1993)

Zhang, W., Feng, G., Liu, Y-F, Wu, B., A Digital Power Factor Correction (PFC) Control Strategy Optimized for DSP, IEEE 0885-8993/04, (2004)

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	07.08.1978	
Doğum yeri	Malatya	
Lise	1993-1996	İzmit Mimar Sinan Lisesi
Lisans	1998-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurumlar

2003-2004	Gersan Elektrik A.Ş.
2004-2005	EMS Robotik LTD. ŞTİ.
2006-Devam ediyor	SYS Robot Teknolojileri LTD. ŞTİ.