

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ KATSAYISININ DÜZELTİLMESİ

Elektrik Müh. Mustafa KAVAK

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP

İSTANBUL, 2008

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ KATSAYISININ DÜZELTİLMESİ

Elektrik Müh. Mustafa KAVAK

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. HARMONİK ÜRETEN BAŞLICA KAYNAKLAR	2
2.1 Transformatörler	7
2.1.1 Primeri ve Sekonderi Yıldız Bağlı Transformatörler	10
2.1.1.1 Primerin Yıldız Noktası Topraklanmış Transformatörler	10
2.1.1.2 Primerin Yıldız Noktası Topraklanmamış Transformatörler	10
2.1.2 Primeri Üçgen Bağlı Transformatörler	11
2.1.3 Sekonderi Üçgen Bağlı Transformatörler	11
2.2 Döner Makineler	11
2.3 Senkron Generatörler	12
2.4 Asenkron Motorlar	13
2.5 Güç Elektroniği Elemanları	15
2.6 Doğru Akım İle Enerji Nakli (HVDC)	17
2.7 Statik VAR Generatörleri	17
2.8 Ark Fırınları	17
2.9 Kesintisiz Güç Kaynakları	18
2.10 Gaz Deşarjlı Aydınlatma	19
2.11 Elektronik Balastlar	19
2.12 Fotovoltaik Sistemler	19
3. HARMONİK STANDARTLARI	20
3.1 Türkiye’de Harmonik Bozulmalarla İlgili Sınırlandırmalar	22
4. HARMONİKLERİN ZARARLI ETKİLERİ	24
4.1 Transformatör Üzerindeki Etkiler	25
4.2 Döner Makineler Üzerindeki Etkiler	26
4.3 Generatörler Ve Şebeke Gerilimi Üzerindeki Etkiler	27
4.4 Gerilim Düşümünün Artması Ve Fliker Olayı	28
4.5 Kondansatör Üniteler Üzerindeki Etkiler	28

4.6	İletim Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri	30
4.7	İletkenler Üzerindeki Etkiler	31
4.8	Yalıtıma Olan Etkiler	32
4.9	Anahtarlama Elemanları Üzerindeki Etkiler	32
4.10	Sigortalar Üzerindeki Etkiler	33
4.11	Koruma Röleleri Üzerindeki Etkiler	33
4.12	Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkileri	34
4.13	Kontrol Aygıtları Üzerindeki Etkileri	34
4.14	İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler	35
4.15	Aydınlatma Aygıtları Üzerindeki Etkiler	35
5.	HARMONİK VE GÜÇ FAKTÖRÜ	36
5.1	Lineer Yüklerde Güç Faktörü	36
5.2	Harmonik Güç Sistemlerinde Güç Faktörü	36
6.	REZONANS.....	40
6.1	Seri Rezonans	42
6.2	Paralel Rezonans	44
7.	HARMONİK FİLTRELER.....	47
7.1	Pasif Filtreler	47
7.1.1	Seri Pasif Filtreler.....	47
7.1.2	Paralel (Şönt) Pasif Filtreler.....	48
7.2	Tek Ayarlı (Bant geçiren) Filtreler.....	49
7.3	Çift Ayarlı Filtreler.....	52
7.4	Otomatik Ayarlı Filtreler.....	53
7.5	Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler.....	54
7.6	Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak.....	55
8.	GENİŞBANT AKTİF FİLTRE VE UYGULAMASI.....	59
8.1	Seçici FFT Aktif Filtre ile Geniş Bant Aktif Filtre Performans Farkları	61
8.2	Geniş bant Aktif Filtre Uygulamaları.....	62
8.3	Matlab Simülasyonu ve Grafikler	68
8.3.1	Durum 1 (Sadece Sürücüler Devrede)	70
8.3.3	Durum 2 (Sürücüler ve Kompanzasyon Devrede)	75
8.3.3	Durum 3 (Sürücüler Kompanzasyon ve Filtreleme Devrede).....	80
9.	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	84
10.	KAYNAKLAR.....	86
11.	ÖZGEÇMİŞ	87

SİMGE LİSTESİ

δ_n	n. harmonikteki akımın faz açısı
θ_n	n. harmonikteki gerilimin faz açısı
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
D	Distorsiyon gücü
S	Görünür güç
GF	Güç Faktörü
C_k	Güç faktörünü maksimum yapacak kapasite değeri

KISALTMA LİSTESİ

AC PWM	Değişken Frekanslı Sürücü
AVR	Automatic Voltage Regulator
DPF	Displacement Power Factor
ESP	Electrical Submersible Pump
FFT	Fast Fourier Transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
TEF	Telefon Etkileşim Faktörü
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu
VSD	Variable Speed Drive

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Harmonik Dalga Şekilleri	2
Şekil 2.1 Demir Çekirdekli bir Bobinin Mıknatıslanma ve Akı Karakteristiği	7
Şekil 2.2 Y/Y, Y/Δ Bağlı Transformatörlerde 3 ve 3'un Katı Harmonik Akımlarının Yönü	10
Şekil 4.1 Temel Frekans Geriliminde, İzin Verilen Maksimum Harmonik Akımı (%).....	29
Şekil 5.1 Lineer Yüklenmede Güç Faktörünü.....	36
Şekil 5.2 Harmonikli Sistemde Güç Faktörü Bileşenleri	36
Şekil 5.3 Harmonikli Kaynak - Nonlineer Yükte Kapasitelerin Güç Faktörüne Etkisi	39
Şekil 6.1 Örnek Elektrik Enerji Sisteminin Kapalı Şeması.....	40
Şekil 6.2 Örnek Elektrik Enerji Sisteminin Açık Şeması.....	41
Şekil 6.3 Seri Rezonans Devresi	42
Şekil 6.4 Paralel Rezonans Devresi.....	44
Şekil 7.1 Seri Pasif Filtre için Bir Örnek	48
Şekil 7.2 Pasif Şönt Filtre.....	48
Şekil 7.3 Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre	49
Şekil 7.4. Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi.....	50
Şekil 7.5. Çift Ayarlı Paralel Pasif Filtre	53
Şekil 7.6. Çift Ayarlı Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi.....	53
Şekil 7.7.Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler	54
Şekil 7.8. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak	55
Şekil. 8.1 Basitleştirilmiş Geniş bant Aktif Filtrenin Şekli.....	59
Şekil 8.2. Şönt Bağlı Tipik Geniş Band Aktif Filtrenin Blok Diyagramı	60
Şekil 8.3 – Petrol Platformu Tek hat Diyagramının Son Durumu	63
Şekil.8.4a - K4 ESP THDv Aktif filtreli ve Aktif Filtresiz Durumlar	67
Şekil.8.4b -K4 ESP THDi Aktif Filtreli ve Aktif Filtresiz Durumlar	67
Şekil.8.4c -K4 ESP DPF Aktif Filtreli ve Aktif Filtresiz Durumlar	68
Şekil.8.5 -Tek hat Diyagramı	68
Şekil.8.6 - Trafodaki Akım Harmonik Miktarı	68
Şekil.8.7 -Trafodaki Gerilim Harmonik Miktarı.....	69
Şekil.8.8 - Trafodaki Akım ve Gerilimin Zamana Bağlı Değişimleri.....	69
Şekil.8.9 - Trafodaki Geçen Akımın Spektrumu.....	69
Şekil.8.10 - 1.Durumdaki Simülasyon: 6 Darbeli Her İki Sürücü Devrede Filtreleme ve Kompanzasyon Devre Dışıdır.	71

Şekil.8.11 - 1. Durumda Akımın Değişimi	72
Şekil.8.12 - 1.Durumda Sırasıyla $\cos\phi$ -Aktif Güç-Gerilim ve Akımın Değişimi	73
Şekil.8.13 - 1.Durumda Akımın Spektrumu	74
Şekil.8.14 - 1.Durumda Gerilimin Spektrumu	74
Şekil.8.15 - 2.Durumdaki Simülasyon: 6 Darbeli Her İki Sürücü ve Kompanzasyon Devrede Filtreleme Devre Dışıdır.	76
Şekil.8.16 - 2. Durumda Akımın Değişimi	77
Şekil.8.17 - 2.Durumda Sırasıyla $\cos\phi$ -Aktif Güç-Gerilim ve Akımın Değişimi	78
Şekil.8.18 - 2.Durumda Akımın Spektrumu	79
Şekil.8.19 - 2.Durumda Gerilimin Spektrumu	79
Şekil.8.20 - 3.Durumda Akımın Spektrumu	80
Şekil.8.21 - 3.Durumda Gerilimin Spektrumu	80
Şekil.8.22 - 3.Durumdaki Simülasyon: 6 Darbeli Her İki Sürücü Kompanzasyon ve Filtreleme Devrededir.	81
Şekil.8.23- 3. Durumda Akımın Değişimi	82
Şekil.8.24 - 3.Durumda Sırasıyla $\cos\phi$ -Aktif Güç-Gerilim ve Akımın Değişimi	83

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Bir Dağıtım Transformatörünün Harmonik Spektrumu.....	8
Çizelge 2.2 Motorlarının Yükte Çalışması Sırasında Ölçü Bobinlerinde İndüklenen Emk' nın Dalga Biçiminin Fourier Analizi Sonucunda Elde Edilen Harmonik Katsayıları	10
Çizelge 3.1 Konutlarda IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri	20
Çizelge 3.2 Konutlarda AG-OG şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri	21
Çizelge 3.3 IEEE'nin Gerilim için Harmonik Distorsiyon Sınırları	22
Çizelge 4.1 Generatörler için negatif sıralı akün sınırlamaları	27
Çizelge 7.1. Kompanzasyon Sistemine Seri Bağlanacak Endüktanslar İçin Seçim Tablosu...	57

ÖNSÖZ

Harmoniklerin enerji sistemleri üzerinde etkileri ile harmonikleri yok etme metotlarının incelendiği bu tezde önce teorik çalışmalar yapıldı. Daha sonra Matlab paket programı kullanılarak varılan sonuçların doğruluğu kontrol edildi. Bu çalışmalarda bana yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Erdin Gökalp'a teşekkürü bir borç bilirim.

HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ KATSAYISININ DÜZELTİLMESİ

ÖZET

Lineer olmayan ekipmanların kullanımıyla elektrik dünyası biraz daha karmaşıklaşmaktadır. Birçok lineer olmayan yüklenme elektriksel problemlere neden olmaktadır (flikler, harmonikler, düşük güç faktörü) ve geleneksel çözüm yöntemleri ile giderilememektedir.

Geleneksel olan pasif filtrelemede rezonans riski hala problemdir. Ancak aktif harmonik filtreler 90 lı yılların ortalarından sonra tanıtıldı ve son birkaç yıldır benimsendi. Teknik yönden pasif L-C filtrelerine, trafo tabanlı kaydırma tekniklerine ve çok darbeli sürücülerine göre tatminkâr ancak maddi anlamda pahalı kalmasına rağmen bize uygun çözümler sunmaktadır.

Ölçüm yapılan bir fabrikada tek hat diyagramı Matlab paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Kurulan sistemin kompanzasyon ve filtreleme devrede ve devre dışı durumlarındaki ölçümleri alınmıştır. Elde edilen sonuçlar gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Harmonik, kompanzasyon, yer değiştirmiş güç faktörü, filtreleme, gerçekleştirme.

IMPROVING POWER FACTOR of HARMONIC CIRCUITS

ABSTRACT

The use of nonlinear devices has made the electrical world a lot more complex. Many of the nonlinear loads cause electrical problems such as flicker, harmonics and poor displacement power factor that conventional solutions fail to remedy.

The possibility of resonance, still a potential problem associated with passive L-C filters. Active harmonic filters were introduced in the mid-late 1990's and were adopted over the next few years as an expensive but technically viable alternative to passive L-C filters and transformer based phase shifting techniques, either via multi-pulse drives or quasi multi-pulse systems.

The factory's single line diagram is set and simulated with Matlab. It's scoped current and voltage waves form in some conditions that compensation and filters is either on or not. Obtained values are compared with real ones.

Keywords: Harmonics, compensation, displacement power factor, filtration, simulation.

HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ KATSAYISININ DÜZELTİLMESİ

1.GİRİŞ

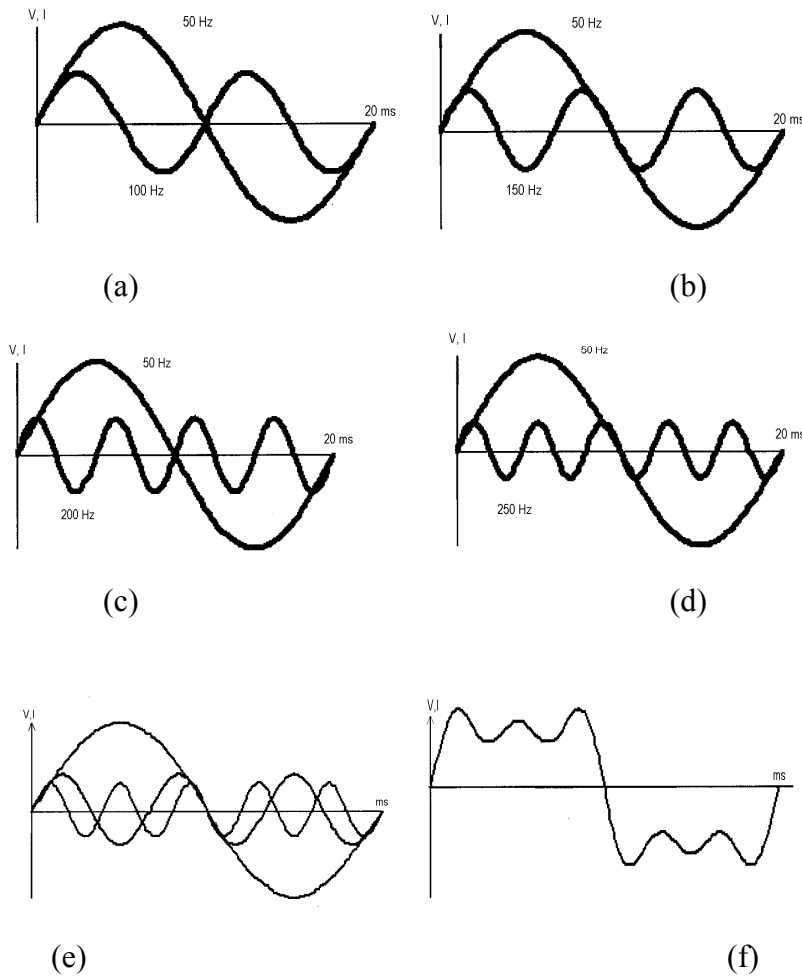
Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı aşamalarında akım ve gerilim büyüklüklerinin sinusoidal biçimli olması gereklidir. Fakat bu her zaman gerçekleşmeyebilir. Çeşitli nonlinear yükler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta sinusoidal dalgalar görülebilir.

Harmonikler genel olarak nonlinear elemanlar ile nonsinusoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan elemanlara nonlinear elemanlar denir. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması, sinüzoidal dalgaının bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinusoidal dalga olarak adlandırılır. Bu dalgalar, fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile nonsinusoidal dalgalar, frekansları farklı sinüzoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi vb. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar.

Bu tez çalışmasında güç sistemlerinde ek kayıplara, rezonansa ve düşük güç faktörüne sebep olan harmonikler incelenmiştir. Güç katsayısının yeni yönetmelikler ile daha da yukarı çekilmesiyle konu daha da önem kazanmıştır. Harmonikli devrelerin sistem üzerine olan etkilerinden bahsedilmiştir. Sistemin istenilen sinusoidal dalga şekline yaklaşması için alınması gereken önlemlerden bahsedilerek güç katsayısının düzeltilmesinde harmoniklerin etkisi Matlab ile simule edilerek incelenmiştir. Sonuçlar bir çelik üretim tesisinden alınan değerler ile karşılaştırılmıştır.

2. HARMONİK ÜRETEN BAŞLICA KAYNAKLAR

Harmonikler, genel olarak nonlinear elemanlar ile nonsinüsoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Sistemde bulunan bu elemanların etkisiyle akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte temel sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara "harmonik" adı verilir. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüsoidal dalga olarak adlandırılır. Bu dalgalar, fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile nonsinüsoidal dalgalar, frekansları farklı sinüzoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Temel dalga, harmonikli dalgalar ve bunların bileşkesi olan toplam dalgalar ile ilgili örnekler Şekil 2.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Harmonik Dalga Şekilleri

Güç sisteminde harmonik bileşenleri bulunan, gerilim ve akımın ani değerleri Fourier serisi ile frekansı temel frekans (50 Hz veya 60 Hz) ve temel frekansın tam katları olan farklı frekanslı sinüzoidal fonksiyonların toplamı biçiminde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \gamma_n) \quad (2.1)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (2.2)$$

burada v_n ve i_n , n. harmonik geriliminin ve akımının ani değerleri olup, bu eşitliklerde DC terimler basitleştirme amacıyla ihmal edilmiştir. V_n ve I_n sırasıyla, n. harmonik mertebesi için gerilim ve akımın efektif değerleridir. ω_1 , ise temel frekansa (f_1) ait açısal frekanstır. θ_n ile δ_n ise sırasıyla n. harmonik için gerilim ve akıma ait faz açısıdır.

Ani güç,

$p(t) = v(t)i(t)$ olarak ifade edilir ve $p(t)$ 'nin T periyodunda aktif gücü

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.3)$$

olarak bulunur. Yukarıdaki eşitliklerden aktif güç,

$$P = \sum_{n=1}^N V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (2.4)$$

olarak elde edilir. Farklı frekanslardaki akım ve gerilimlerin aktif güce katkısı yoktur. (Örneğin, 3. harmonik gerilimiyle 5. harmonik akımının çarpımı). Harmonikler tarafından üretilen aktif güç genellikle, temel aktif güce oranla çok küçüktür. Harmonikli gerilim ve harmonikli akımın efektif değerleri sırasıyla,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2.5)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.6)$$

olarak bulunur. Harmonikli gerilim ve akımın tepe değerlerinin (V_{mn}, I_{mn}) kullanılmasıyla efektif gerilim ve akım,

$$V = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{mn}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

$$I = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{mn}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

ifadeleri ile belirlenir. Görünür güç

$$S=VI$$

olur. Görünen gücün yaygın bir şekilde kabul edilen tanımı şu biçimdedir

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \text{ burada } D, \text{ distorsiyon gücü olup}$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.9)$$

eşitliği ile ifade edilir. Distorsiyon gücü aktif olmayan bir güç olup sinüzoidal işaretli lineer devrelerde sıfırdır. Araştırmacılar ve bilim adamları arasında distorsiyon gücü ve reaktif gücün fiziksel anlamlarında ve tanımlamalarında hala bir birliktelik söz konusu değildir.

Reaktif güç,

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (2.10)$$

•Distorsiyon (D): 50 veya 60 Hz sinüzoidal gerilim veya akım dalga biçiminde oluşan herhangi bir kötüleşme ve bozulmadır.

•Spektrum: Spektrum çeşitli harmoniklerin genliklerinin harmonik numaralarının bir fonksiyonu olarak histogram biçiminde grafik edildiği dağılımıdır.

•Toplam harmonik distorsiyonu (THD): Toplam harmonik distorsiyonu akım veya gerilim için harmonikli efektif değerlerin, esas bileşenin efektif değerine bölünmesiyle ortaya çıkan orandır. Toplam harmonik distorsiyonu harmoniklerin bütününe ait olan termal etkiyi nitelemektedir. Harmonikli bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüttür. Hem gerilim, hem de akım için verilebilir. Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu,

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \text{ ve } THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.11)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunur. Görüldüğü gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

Toplam harmonik distorsiyonunun (gerilim için) diğer ifadeleri şöyledir:

$$THD_v = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (2.12)$$

•Toplam Talep Distorsiyonu (TTD): Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$TTD = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_L} \quad (2.13)$$

Burada, I_L yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. On iki ay öncesinden başlanarak hesaplamanın yapılacağı ana kadar olan süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır. TTD kavramı IEEE ‘standard519’ uygulaması için özellikle belirtilmiştir.

•Tepe (Crest) Faktörü: Bu faktör, nonsinüsoidal akım veya gerilim tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır. Harmonik bileşenlerin en basit bir biçimde ortaya konmasını sağlayan faktör;

Tepe Faktörü=Tepe Değeri /Temel Bileşenin Efektif Değeri

Eşitliği ile hesaplanır. Sinüzoidal bir dalga için bu değer; $\sqrt{2}$ dir.

•Telefon Etkileşim Faktörü (TEF): Elektrik enerji sistemindeki harmonik akım ve gerilimlerinden kaynaklanan telefon gürültü değerinin tayin edilmesine yarayan bir büyüklüktür. TEF değeri telefon sisteminin ve insan kulağının değişik frekanslardaki gürültüye olan duyarlılığına dayalı olarak ayarlanır. Söz konusu bu büyüklük gerilim ve akım için matematiksel olarak;

$$TEF_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n V_n)^2}}{V_{ef}} \quad \text{ve} \quad TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (2.14)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Burada w_n , n. inci mertebeden harmonik frekansı için işitsel ve endüktif kuplaj etkisini hesaplara dahil eden bir katsayıdır.

Harmonik Üreten Kaynaklar:

Son 50 yıldır yapılan teorik ve uygulamalı araştırmaların sonucuna göre; harmonik kaynakları, günümüzde mevcut olan klasik harmonik kaynakları ve yeni harmonik kaynakları olarak iki grupta incelenebilir.

Klasik harmonik kaynakları:

- Elektrik makinelerindeki diş ve olukların meydana getirdiği harmonikler,
- Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler,
- Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin manyetik akı dalga şekillerindeki bozulmalar,
- Senkron makinelerinin hava aralığı döner alanının harmonikleri,
- Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları,
- Şebekedeki nonlinear yükler; doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, ark fırınları, gerilim regülâtörleri, frekans çeviriciler, v.b.
- Yeni harmonik kaynaklar:
- Motor hız kontrol düzenleri,
- Doğru akım ile enerji nakli (HVDC),
- Statik VAR generatörleri,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Gelecekte elektrikli taşıtların yaygınlaşması ve bunların akü şarj devrelerinin etkileri,
- Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemler,
- Direkt frekans çevirici ile beslenen momentli büyük hızlı küçük motorlar.

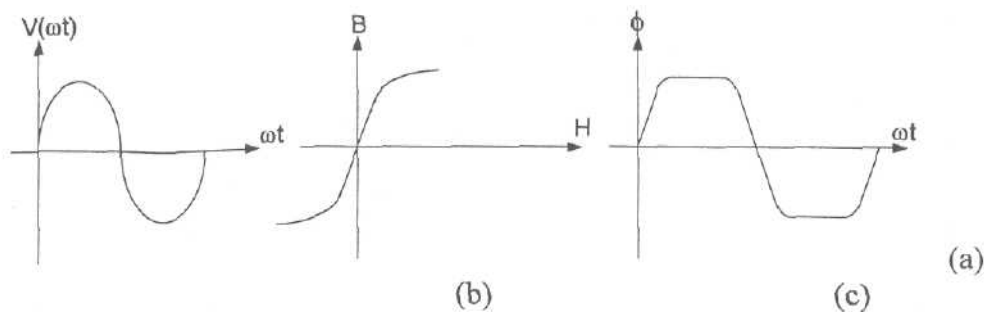
Harmonik üretilmesine neden olan en önemli elemanları ise şöyle sıralayabiliriz:

- Transformatörler
- Döner makineler

- Güç elektroniği elemanları
- Doğru akım ile enerji nakli (HVDC)
- Statik VAR generatörleri
- Ark fırınları
- Kesintisiz güç kaynakları
- Gaz deşarjlı aydınlatma
- Elektronik balastlar
- Fotovoltaik sistemler ve Bilgisayarlar

2.1 Transformatörler

Elektrik güç sistemlerinde transformatörler gibi bir demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonikler üretirler [f]. Transformatörün primer sargısına uygulanan gerilim (Şekil 2.1a) sinüzoidal değişimli olmasına rağmen mıknatıslanma eğrisindeki (Şekil 2.1b) nonlineerlik (doyma) nedeniyle bir nonsinüzoidal akı (Şekil 2.1c) ve bunun sonucunda nonsinüzoidal bir akım meydana getirecektir. Transformatörün ürettiği harmoniklerin genliğinin yüksek olmaması için transformatörler düşük yükte çalıştırılmamalı ve gerilimin nominal değerin üzerine çıkmasına müsaade edilmemelidir (Kocatepe C., 2003).



Şekil 2.1 Demir çekirdekli bir bobinin, a) Uygulanan gerilimi, b) Mıknatıslanma karakteristiği, c) Akısı

Görüldüğü gibi mıknatıslanma akımı yüksek genlikli harmonik akım bileşenleri içerir. Ancak transformatörün mıknatıslanma akımı, anma akımının %1'i seviyesindedir. Elektronik güç konverteri ve ark fırınları gibi nominal akımlarının %20'sine varan oranlarda harmonik akımları üreten diğer harmonik kaynakları ile güç transformatörleri karşılaştırılırsa, güç transformatörleri sistemde büyük harmonik kaynakları olarak dikkate alınmayabilirler. Bu

nedenle harmonik yük akış çalışmalarının bir kısmında transformatörlerin lineer devre elemanları olarak modellendiği görülmektedir. Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün olduğu göz önüne alınırsa bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir. Çizelge 2.1'de bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri transformatörün mıknatıslanma akımının yüzdesi olarak verilmiştir. Burada I_{μ} transformatörün mıknatıslanma akımı, I_n transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımdır.

Çizelge 2.1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu

Harmonik Derecesi (n)	$(\%) \frac{I_n}{I_{\mu}}$
3	50
5	20
7	5
9	2.6

Güç transformatörleri mıknatıslanma eğrisinin lineer olduğu bölgede çalışmak üzere dizayn edilir. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda gerilimin yükselmesi sebebiyle manyetik çekirdek aşırı uyarılır ve çalışma mıknatıslanma eğrisinin lineer olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda transformatör harmonik üretir ve tablo 2.1 'de gösterildiği gibi özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkin olur.

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüsoidal akımlar çeken yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen 'K-Faktörü' tanımlanmıştır. K-Faktörü de anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür. Bu faktör,

$$K - Faktörü = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2 \quad (2.15)$$

olarak tanımlanır . Bu bağıntıda n. Harmonik mertebesi, I_n ise baz değer olarak transformatörün anma akımının alınması ile hesaplanan n. Harmonik akım bileşeninin per-unit değeridir. K-Faktörü anma gücü 500 kVA'ın altındaki transformatörler için tanımlanmıştır.

Enerji sisteminde nüvesi bulunan bobinlerin, nüvesi doyuma ulaştığında harmoniklere yol açarlar. Bu tür elemanların başında güç sistemindeki en önemli elemanlardan transformatörler gelir. Bunların harmonik üretme özelliği, nüvenin mıknatıslanma

karakteristiğinin lineer olmamasından, yani transformatörün nüvesinin doymasından kaynaklanmaktadır. Nüvenin $B = f(H)$ eğrisine mıknatıslanma eğrisi denir. Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiği belli bir bölgeden sonra lineer özelliğe sahip olmadığından, uygulanan sinüzoidal gerilim sonucu sinüzoidal akım ve akı oluşmamaktadır.

$V(t) = V_m \sin \omega t$ biçiminde sinüzoidal şebeke geriliminin uygulanması halinde uyarma akısı $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$ şeklinde yine sinüzoidal bir akı üretilecektir.

Transformatörler, normal işletme şartlarında sinüzoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüzoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvenin daha çok doymasına ve harmonik akımları seviyesinin hızla artmasına sebep olabilmektedir.

Mıknatıslanma akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır, çünkü o saatlerde sistemdeki yük az olduğundan gerilim yükselmekte ve aşırı uyarma meydana gelmektedir. Aşırı uyarmayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olurlar.

Güç sisteminde generatör, hat ve transformatörden meydana gelen sistemde harmonik akımları, generatörün reaktansı, transformatörün primer reaktansı ve hattın reaktansı üzerinden geçerek harmonikli gerilim düşümü meydana getirir. Generatörde sinüs şeklinde elektromotor üretildiği halde çıkış uçlarında gerilimin şekli bozulabilir.

Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu koşullara bağlıdır;

- ◆ Transformatörün bağlantı grubu,
- ◆ Primerin yıldız bağlı olması halinde, yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması,
- ◆ Transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısı.

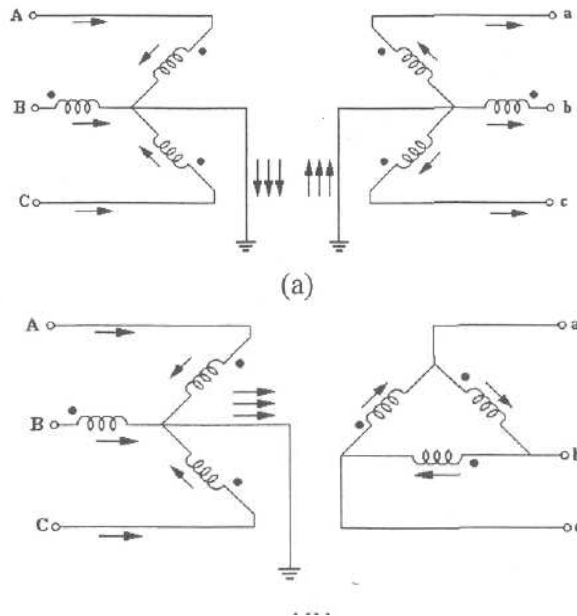
2.1.1 Primeri ve sekonderi yıldız bağlı transformatörler:

2.1.1.1 Primerin yıldız noktası topraklanmış transformatörler:

Transformatörün yıldız noktasının topraklanması halinde; her üç faza ait dengeli temel bileşen akımlarının toplamının sıfır olması sebebiyle nötr iletkeninden geçen akım sıfır olur. Ancak bu durum üç ve üçün katı harmonik bileşenleri için geçerli değildir. Şekil 2.2'de gösterildiği

gibi her üç fazın üç ve üçün katı harmonik akım bileşenlerinin birbirine eşit olması nedeniyle, bir fazdan geçen üç ve üçün katı harmonik akımının üç katı nötr iletkeninden geçer ve nötr iletkeni bu akım nedeniyle aşırı ısınabilir. Bu nedenle nötr iletkeninin kesitinin belirlenmesinde 3. harmonik akımının da göz önüne alınması gereklidir.

Üç ve üçün katı harmonik bileşenlerin dışındaki diğer harmonik bileşenler (5., 7., 11., 13., ...) aralarındaki 120° 'lik faz farkı nedeniyle yıldız noktasında toplanarak sıfır edecektir. Bu durumda, her bir faz sargısında endüktif gerilim sinüs şeklindedir. Akı sinüzoidal ve mıknatıslanma akımı nonsinüzoidal olacaktır



Şekil 2.2 (a) Yıldız/yıldız bağlı ve (b) yıldız/üçgen bağlı transformatörlerde üç ve üçün katı harmonik akımlarının yönü

Görüldüğü gibi, Transformatörün yıldız-topraklı / yıldız-topraklı bağlı olması halinde üç ve üçün katı harmonikler şebekeye geçer.

2.1.1.2 Primerin yıldız noktası topraklanmamış transformatörler:

Yıldız noktası topraklı olmadığı için, 3 ve 3'ün katı harmonikler, şebekeye geçemez 5., 7., 11., 13. harmonik akımlarının yıldız noktasında toplamı sıfır olur.

Akının sinüs olması için mıknatıslanma akımının 3. harmoniklerini ihtiva etmesi gerekir. Fakat bu bağlantı grubunda 3. ve 3'ün katı harmonikler akamadıklarından mıknatıslanma akımı 3. harmoniksiz olur. Tepesi basık bir akı karşılık düşer ki bu da 3. harmoniği baskın bir akıdır. Bu 3. harmonikli akılar, transformatörde zorunlu mıknatıslanmaya yol açar.

2.1.2 Primeri üçgen bağlı transformatörler:

Sinüzoidal beslenen her sargı bağımsız gibidir. Faz sargılarındaki mıknatıslanma akımlarında 3. ve 3'ün katı harmonikler meydana gelir. Bunlar üçgen sargıdan dışarı çıkamazlar. Bu yüzden mıknatıslanma akımı için şebekeden 3 ve 3'ün katı harmonikler çekilmezler. Fakat 1., 5., 7.,... harmonikler çekilir ve magnetik akı 3. ve 3'ün katı harmonikleri içermez.

2.1.3 Sekonderi üçgen bağlı transformatörler

Transformatörün sekonderi üçgen bağlı ise Şekil 2.2'de gösterildiği gibi üçgen bağlantının her bir düğümünde akım toplamının sıfır olması nedeniyle şebekeye üç ve üçün katı harmonik akımları geçmez. Bu özellikten yararlanarak şebekenin üç ve üçün katı harmoniklerden etkilenmesini önlemek için transformatörün yıldız/üçgen (nonlineer yük tarafının yıldız ve şebeke tarafının üçgen) bağlı olması tavsiye edilir.

Transformatörler;

- primeri ve sekonderi nasıl bağlanırsa bağlansın,
- primer ve sekonderin yıldız noktası nötre bağlansın veya bağlanmasın,
- çekirdek tipi nasıl olursa olsun

şebekelerden 1,5,7,11,13 harmoniklerini daima çekerler.

Şebekelerde 3. ve 3'ün katı harmonikleri önlemek için, primer yıldız topraklanmaz ve/veya sargılardan biri üçgen bağlanır.

Nonlineer yük dengesiz ise transformatör bağlantısı ne olursa olsun üç ve üçün katı harmonik akımları dengesizlik sebebiyle şebekeye geçer (Kocatepe C., 2005).

2.2 Döner Makineler

Bir döner makinenin oluşturduğu harmonikler, ilke olarak makinenin stator ve rotorundaki olukların neden olduğu manyetik relüktanstaki değişimlerle ilgilidir. Döner makinelerin harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni; Alan şekli ve ana devreler ile kaçak yollardaki doymalardır. Günümüzdeki ileri tasarım teknikleri (oluk ve kutup geometrisi, sargı yapısı) ile döner makinelerdeki harmonik etkinliği en aza indirilmiştir. Döner makineler içerisinde en önemli harmonik üreticisi senkron generatörlerdir.

2.3 Senkron Generatörler

En doğal harmonik üreticileri senkron generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından,

ana devrenin doyuma ulaşması, kaçak akımlar, sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Döner makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir.

Generatörlerde hava aralığındaki manyetik akının durumu, indüklenen emk ya aynen etki ettiğinden, emk 'nın sinüzoidal olması için akı dağılımını yapılabildiği kadar sinüzoidal yapmak gerekir. Bunun için sargıların dağıtılması, sargı adımının kesirli olması, bir kutup altında bir faza ait oluk sayısının kesirli olması ve bunlara benzer faktörler yanında, endüvi-çıkıntılı kutup yüzeyi arasındaki akı dağılımının sinüzoidal yapılması, indüklenen gerilimin sinüzoidal olmasını sağlar.

Hava aralığındaki manyetik akının sinüzoidal yapılabilmesi, çıkıntılı kutuplu generatörlerde kutup yüzeyinin kavisli yapılması ile sağlanır. Buradaki kutup ile stator arasındaki hava aralığı kutbun her yerinde aynı değildir. Kutup ekseninde hava aralığı, kutup kenarlarına göre daha azdır. Buna göre manyetik akı kutup ekseninde en fazla olup kutup kenarlarına doğru gidildikçe eğrisel şekilde azalır. Bu durumda akı dağılışı sinüzoidal'e yaklaştığından indüklenen emk 'da daha düzgün bir sinüs dalgası verir.

Generatörlerin bağlantı şekilleri de harmonikler için belirleyici özellikler taşır:

Generatör sargısı yıldız bağlı ise; 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerinde bulunmazlar.

Yıldız bağlı bir generatöre üç fazlı simetrik bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatör yıldız noktasına bağlanmaz ise; 3 ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.

Generatör sargısı üçgen bağlı ise; bu sargılarda 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur.

Bu sebeplerden dolayı, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Fakat generatörün 4 iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa, zigzag bağlı bir bobinde oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3'ün katları harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmak suretiyle bloke edilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun dizayn edilerek 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak

mümkündür.

2.4 Asenkron motorlar

Asenkron makinenin çalışması bir döner alan varlığına dayandığından bu döner alanın oluşturulması için asenkron motorun statorunun açılmış olan oluklarına sargılar yerleştirilmiştir. Oluklara sarılan bu sargının iletken dağılımı sinüs formunda yapılamadığından, Amper-sarım dağılımı da sinüs formunda olmamaktadır. Sargılara sinüzoidal gerilim uygulandığında her bir faz sargısından geçen akım, akı ve Amper-sarım ifadesi sinüzoidal olmadığı için harmonikler içerir. Bu harmoniklere, "hava aralığı" veya "uzay" harmonikleri adı verilir. Meydana gelen hava aralığı harmonikleri, temel dalga ile birlikte asenkron motoru etkiler. Çünkü frekansları farklı olan bu harmonikler devre parametrelerini değiştirmekte ve bunlara bağlı kayıpların farklı olmasına neden olmaktadır. Ayrıca hava aralığında stator sargısına bağlı olarak meydana gelen yüksek harmonikler zararlı döndürme momenti ve kuvvetlerin meydana gelmesine yol açarlar. Bu durum özellikle sincap kafesli asenkron motora yol vermede oldukça önemlidir.

Farklı stator sargılı asenkron motorların hava aralığında meydana gelen dalga şeklinin analizi ile ilgili yapılan bir deneysel çalışma aşağıda verilmiştir. Hava aralığında oluşacak dalga şeklinin yalnız stator sargılarına bağlı olarak değişip değişmediğini incelemek için deneyde kullanılan üç motorda da aynı rotor ve kapaklar kullanılmıştır. Böylece stator sargısına bağlı değişimler incelenmiştir.

Deneysel çalışmada aynı güçteki ve tipteki üç asenkron motora şu sargılar uygulanmıştır: 1. motora; bir tabakalı iki katlı farklı genişlikteki bobinlerden oluşmuş sargı. 2. motora; bir tabakalı bir katlı farklı genişlikteki bobinlerden oluşmuş dağıtılmış bileşik sargı. 3. motorda; iki tabakalı çap (tam) adımlı sargıdır. Ayrıca deney motorlarında hava aralığındaki elektromotor kuvvetini (emk) ölçebilmek için motorlara uygulanan sargıların simetriği olan ölçü bobinleri sarılmıştır. Çalışmada diğer etkileri ortadan kaldırmak için üç motorla yapılan deneyde aynı rotor ve kapaklar kullanılmıştır. Ayrıca deney anında şebekedeki gerilimin ve frekansın değişimlerini önlemek için gerilim doğru akım tarafından tahrik edilen generatörden alınmıştır. Doğru akım motorunun beslemesi de bir servo regülatörden yapılarak generatördeki gerilimin ve frekansın sabit olması sağlanmıştır.

Deneysel çalışma anında motorlar fuko freni ile 5,5 Nm ile yüklenmiş durumda ölçü bobinlerinde indüklenen gerilimin dalga şekli bir osiloskop ile alınarak bilgisayara aktarılmıştır. Bu dalga şekillerinden, farklı stator sargılı asenkron motorların hava

aralığındaki dalga şekillerinin farklı olduğu görülmüştür. Farklı olan bu dalga şekillerinin üst harmoniklerin genliğinin ve yönünün bulunabilmesi için dalga biçimlerine Fourier analizi uygulanmıştır. Yapılan fourier analizi sonucunda elde edilen üst harmonik katsayıları Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Bu tablo incelendiğinde hava aralığında oluşan yüksek harmoniklerin üç asenkron motorda da farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca bu harmonik katsayılarının işaretleri incelendiğinde tüm motorlarda 1. ve 3. harmonik katsayılarının pozitif değerde olduğu görülmektedir. Diğer üst harmonik katsayıları deney motorlarında farklılık göstermektedir. Harmonik katsayıları pozitif olan dalgalar temel dalga ile aynı yönde dönmekte, negatif olan dalgalar ise temel dalgaya göre ters yönde dönmektedir. Bu durumda hava aralığındaki dalga şeklinin sinüs formunun bozulmasına neden olmaktadır.

Çizelge 2.2 Deney Motorlarının Yükte Çalışması Sırasında Ölçü Bobinlerinde İndüklenen Emk' nın Dalga Biçiminin Fourier Analizi Sonucunda Elde Edilen Harmonik Katsayıları

Harmonik Frekans (Hz)	Harmonik Katsayıları (* 0,001)		
	1. motor	2. motor	3. motor
50	22.576	25.003	24.893
150	0.0659	0.0633	0.0524
250	-0.0052	-0.0175	-0.0054
350	-0.004	-0.0145	0.0006
450	-0.0004	-0.0029	0.0087
550	-0.0039	-0.0127	-0.0087
650	0.0217	-0.002	0.0082
750	-0.0232	0.0211	0.0146
850	-0.0179	-0.006	-0.0139
950	-0.0051	0.0031	-0.0009
1050	0.0071	-0.0007	0.0002
1150	0.0004	-0.0013	0.0002

Hava aralığında oluşan dalga şeklinin sinüs formunda olmaması, rotor devresinde indüklenen gerilimin dalga şeklinin bozuk olmasına neden olmaktadır. Bu durum, döndürme momentini ve kuvvetini olumsuz yönde etkilemekte ve motorun ısınmasına neden olmaktadır. Çünkü her üst harmoniğin kendine özgü bir döndürme momenti ve kuvveti vardır. Bu döndürme moment ve kuvveti ana döndürme ve moment ve kuvveti ile aynı yönde olduğunda desteklemekte, tersi olduğunda ise zayıflatmaktadır (Sucu M., 2003).

Bunlar dikkate alındığında; bir tabakalı bir katlı farklı genişlikteki bobinlerden oluşmuş dağıtılmış bileşik sargı tipinin, hava aralığında meydana getirdiği döndürme momenti ve

kuvvetinin en iyi olduğu ve ikinci sırada iki tabakalı çap (adım) adımlı sargı tipinin yer aldığı ve bir tabakalı iki katlı farklı genişlikteki bobinlerden oluşmuş sargı tipinin ise diğerk sargı tiplerine göre düşük değerde olduğu yapılan deneysel çalışma ve analiz sonunda bulunmuştur (Adak S., 2002).

2.5 Güç Elektroniğı Elemanları

Çeşitli güç elektroniğı elemanları küçük uygulamalardan büyük endüstriyel uygulamalara kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Yüksek alışma verimine ve istenilen çalışma durumlarına sahip olmaları nedeni ile geniş kullanım alanı bulmuşlardır.

Televizyon alıcıları, bilgisayarlar ve diğerk elektronik uygulamaları kapsayan küçük güçlü tek fazlı elektronik güç dönüştürücülerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

Üç fazlı güç elektroniğı elemanları ise geniş bir kullanım ve tasarım alanına sahiptirler. Başlıca güç dönüşüm grupları şunlardır:

- ◆ Doğrultma,
- ◆ Frekans kontrolü,
- ◆ Gerilim kontrolü,
- ◆ Evirme,
- ◆ Diğerk uygulamalar.

Sanayide enerji iletimine kadar her alanda yaygın olarak kullanılan çeviriciler, alternatif akımı doğru akıma dönüştüren (doğrultucular=redresör) veya doğru akımı alternatif akıma dönüştüren (eviriciler=inverterler) elemanlar olarak tanımlanır. Bunların içinde güç sisteminde en çok kullanılan grup, doğrultucu grubudur. Doğrultucuların güç sisteminde başlıca kullanım alanları; yüksek doğru gerilimle iletim (HVDC), doğru akım motorlarının beslenmesi ve kimyasal süreçlerdir.

Çeşitli darbe sayılarına sahip doğrultucular bulunmaktadır. 6 ve 12 darbeli doğrultucular en yaygın olanlarıdır. Küçük güçlü uygulamalarda 3 darbeli, daha güçlü uygulamalarda ise 18 ve daha büyük darbeli doğrultucular kullanım alanı bulmaktadır. Darbe sayısının seçimi ekonomik koşullara da bağılıdır.

Frekans ve gerilim kontrolü grubu, senkron ile indüksiyon motorların ve benzeri yüklerin farklı frekans ve gerilimlerde beslenmesi amacıyla kullanılır. Böylece motorların tüm yük seviyelerinde daha verimli çalışması sağlanır.

Yarı iletken elemanlar, çalışma karakteristiğinin non lineerliğinden kaynaklanan harmonikler üretirler.

Transformatörlerden sonra ana harmonik kaynağı günümüzde hat komütasyonlu konverterlerdir. Belirli şartlarda, alternatif akım ile enerji iletimine göre daha ekonomik iletim sağlayan doğru akım enerji iletim sistemleri (HVDC) ile akü, fotovoltaik sistemler ve bazı endüstriyel donanımlar hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler.

Örneğin yarım dalga kontrollü bir doğrultucu devresinde sinüzoidal dalga tristörlerin tetikleme açısına (α) bağlı olarak belirli bir p açısından kesildiğinde devrede nonsinüsoidal dalga meydana gelmektedir.

Bir konverterin meydana getirdiği harmonikler, konvertörlerin tristör sayısına (darbe sayısına) bağlı olarak ifade edilebilir. Örneğin; 6 darbeleri bir konverterin akımı aşağıdaki gibidir;

$$I_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots$$

Burada görüldüğü gibi harmonik akımların genliği harmonik frekansı ile ters orantılıdır. Harmonik derecesi ne kadar yüksekse harmonik akımların genliği o kadar düşmektedir. Konverterlerde darbe sayısı $P = 6, 12, 18$ ve 36 ' dır. Buna bağlı olarak meydana gelen harmonik bileşenlerin frekansları şu şekilde ifade edilebilir;

$$n = kp + 1$$

n : harmonik mertebesi

p : çeviricinin darbe sayısı

k : pozitif bir tamsayı (1, 2, 3,.....)' dır.

2.6 Doğru Akım İle Enerji Nakli (HVDC)

1960'lı yıllardan başlayarak, yarı iletken teknolojisinin de gelişmesiyle, doğru akım ile enerji nakli (HVDC-High Voltage Direct Current) gündemdedir. Kararlılık probleminin olmaması ve farklı frekanslı iki noktanın birleştirme olanağının olması, doğru akımla enerji iletimini tercih edilir yapmaktadır. Bu teknikte alternatif-doğru ve doğru-alternatif çeviricileri

kullanılmaktadır. Alternatif olarak üretilen gerilim doğrultulmakta ve enerji nakil hattını beslemekte, hattın ucunda tekrar alternatifte çevrilerek tüketiciye iletilmektedir.

Doğru akım enerji iletim hatlarında hat başında ve sonunda yer alan büyük güçlü çevriciler (doğrultucu ve evirici bloklar) yan iletken elemanlardan oluştuklarından, birer harmonik kaynağı olmaktadır (Sucu M., 2003).

2.7 Statik VAR Generatörleri

Statik VAR generatörleri; alternatif akım kısıyıcısı ile akımı değiştiren bir reaktör, paralel bağlı kondansatörler, kumanda ve kontrol elemanlarından oluşur. Bu sistemlerin çalışma özelliği gerekli reaktif gücü en hızlı bir şekilde ve her faz için ayrı ayrı verebilmesidir. Çünkü geleneksel kompanzasyon düzenleri ile çok hızlı değişen reaktif güç ihtiyacı karşılanamaz. Örneğin; ark fırınlarında fırının çektiği reaktif gücün değişimi çok hızlı olduğundan normal mekanik cihazlarla kompanzasyon gücünü karşılamak mümkün olmaz. Fakat yan iletken elemanların sağladığı imkânlar sayesinde reaktör elemanlarını ark fırınının çalışması gerektiği hızda devreye sokup çıkarmak mümkündür. Bunun için tristörlerden yararlanılır. Bu iş için kullanılan tristörler, yan iletken anahtarlama elemanları olduklarından doğal harmonik kaynaklandır (Adak S., 2002).

2.8 Ark Fırınları

Ark fırınları, geniş spektrumlu harmonikler içeren yüklerin önemli bir örneğidir. Ark fırını bulunan işletmeler için harmonik oluşum nedeni olarak ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri verilir.

Ark fırının aktif direnci sabit değildir. Bir yarı periyodun başlangıcında direnç büyüktür, bundan sonra bir minimum değere düşer ve yarı periyodun sonuna doğru tekrar yükselir. Bu yüzden akım tam bir sinüs şeklinde değildir ve birçok harmonikler içerir. Ergitme aşamasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda eridikten sonra yani ark sakinleşince harmonik azalır.

Ark fırınlarının çalışma şartlarındaki bu değişimlerden dolayı güç sisteminden çektikleri akımlarda gelişigüzel olur. Bunun sonucu olarak, şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formundan uzaklaşır. Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, şebekeye harmonikli bileşenlerin verilmesi anlamına gelir.

Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi, ark fırını sisteme bir harmonik generatörü gibi etki eder. Ark fırınına paralel bağlı devrelerde, şartların gerçekleşmesi halinde

rezonans olayları baş gösterebilir. Bugün ark fırınlarının düşük güç katsayısı ile çalıştırılması tercih edilir. Bu yüzden fırın daha büyük bir reaktif güç çeker. Bunu kompanze etmek için büyük güçlü kondansatör bataryası kullanılır. Böylece şebekenin rezonans frekansı düşer (Sucu M., 2003).

2.9 Kesintisiz Güç Kaynakları

Gerilim dalgalanmasının ve kesintisinin yol açtığı zararlardan kurtulmak için bilgisayarlar, hastaneler, hava alanları v.b. diğer önemli yerlerde kullanılan kesintisiz güç kaynakları; alternatif gerilimin doğru gerilime çevrilerek depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevrilerek tüketiciye iletilmesi esasına göre çalışır.

Kesintisiz güç kaynaklarında evirici, ara devre gerilimi olan doğrultucu çıkış gerilimini, evirmek suretiyle istenen genlik ve frekansta dalgalı gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin Fourier Serisinin açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde harmonikler oluşturacaklardır.

Kesintisiz güç kaynaklarında harmonikler; evirici tipine, evirici çıkışını elde etmek için kullanılan modülasyon tipine, mikroişlemci kontrollü olup olmadığına v.b. etkenler bağlı olarak değişmektedir.

Bir güç elektroniği düzeni olan kesintisiz güç kaynakları, esas olarak şebeke geriliminin uygulandığı bir doğrultucu, doğrultucu çıkışında paralel olarak uygulanmış olan akü düzeni ile, doğrultulmuş gerilimi dalgalı gerilime dönüştürerek, yüke veren evirici düzenini içerir. Bu temel elemanlar yanında, elde edilip yüke verilecek sinüzoidal gerilimin istenilen özelliklerde olmasını sağlamak, güvenilir bir çalışma elde etmek üzere yardımcı düzenlerde vardır. Kesintisiz güç kaynaklarında doğrultucu ve evirici devreleri, uygun geri beslemelerle kapalı çevrim kontrollü çalıştırılırlar. Bundan dolayı çıkış gerilimleri çok kararlıdır, yükten etkilenmez.

2.10 Gaz Deşarjlı Aydınlatma

Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, örneğin flüoresan, cıva, ark, neon v.b. ve yüksek basınçlı sodyum lambalar şebekeden harmonikler içeren akımların çekilmesine neden olurlar. Bu tür aydınlatma elemanları özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilen

harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup akım geçişi esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Ev ve işyerlerinde yaygın olarak kullanılan flüoresan lambalar balastlarından ve gaz deşarjlarından kaynaklanan harmonik bileşenlerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

2.11 Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her safhasına daha belirgin bir biçimde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan elektronik balastlarda harmonik üreticisidirler. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastlar eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok denecek kadar azdır.

2.12 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler harmonik üretme bakımından genel olarak konverterlerden kaynaklanan harmonik etkinliğine sahiptirler. Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konverterleri kullanırlar. Dolayısıyla dönüşüm esnasında yarı iletken elemanların sebep olduğu harmonikler söz konusu olmaktadır (Sucu M., 2003).

3. HARMONİK STANDARTLARI

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla bazı ülkeler, nonlinear yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmışlar ve harmonik standartlarını oluşturmuşlardır.

Harmonik standartları, harmonikler için sınırlama getirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519–1992 no lu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000–3–2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlinear yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları belirtmektedirler.

IEC–555, elektronik ev aletleri donanımı ile ilgili harmonik standartları içerir. Bu standartta, cihazların sınıflandırılmasına göre akım harmoniklerinin kabul edilebilir seviyesi verilmiştir.

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) harmonik sınırlamasını çeşitli yükler için sınıflandırmış ve bunlara ait tablolarda sınır değerleri vermiştir. IEC 61000–2–2 konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir (Çizelge 3.1).

Avrupa standartları EN 50160'da alçak gerilim ve orta gerilime ait gerilim harmoniklerinin sınır değerleri verilmiştir, bu değerler alçak gerilim şebekesi için Çizelge 3.1a'da, orta gerilim şebekesi için Çizelge 3.2b'de görülmektedir (Başman F., 2006).

Çizelge 3.1 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3* ün katı Harmonikler	
n	%v _n	n	%v _n	n	%v _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥29	k				

Çizelge 3.2 Konutlarla ilgili (a) alçak ve (b) orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri

(a)

Alçak Gerilim Şebekesi (≤ 1 kV)					
Tek		Çift		3 ve 3'ün katı	
Harmonikler		Harmonikler		Harmonikler	
n	%v_n	n	%v_n	n	%v_n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6....24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

(b)

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

IEEE'nin harmonik sınır standartları Çizelge 3.3'da verilmiştir. Bu tablolarda; I_K , sistemin kısa devre akımını, I_L , yüke ait maksimum talep akımını, TTD ise toplam talep distorsiyonunun değerini göstermektedir (TTD değeri, temel bileşen akımının yerine I_L

akımının kullanılmış olması hali dışında THD değeri ile aynıdır).

Çizelge 3.3 IEEE'nin Gerilim için Harmonik Distorsiyon Sınırları

Bara gerilimi(U_n)	Tekil harmonik	(Toplam Harmonik
$U_n < 69\text{kV}$	3.0	5.0
$69 < U_n < 161\text{kV}$	1.5	2.5
$U_n > 161\text{kV}$	1.0	1.5

Transformatör akımındaki harmonikler IEEE C 57.1200 - 1987 tarafından % 5 olarak sınırlandırılmıştır.

3.1 Türkiye'de Harmonik Bozulmalarla İlgili Sınırlandırmalar

Ülkemiz açısından harmonik standart değerlerine bakıldığında bu konuda EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) tarafından hazırlanan ve 19 Şubat 2003 tarihli ve 25025 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan "**Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği**"nin 52d. Maddesinde harmoniklerle ilgili olarak aşağıdaki hükümler getirilmiştir:

Madde 52

d) Harmonik bozulma:

Dağıtım şirketi ve kullanıcı, ilgili standartlarda belirtilen harmonik sınır değerlerine uymakla yükümlüdür. Dağıtım şirketinin harmonik bozulmaya ilişkin performansları harmonik bozulma göstergeleri aracılığıyla ölçülür.

Harmonik bozulmaya neden olan kullanıcıya, dağıtım şirketi tarafından durumun düzeltilmesi için otuz iş gününden az olmamak üzere süre tanınır. Bu süre içinde kullanıcı tarafından kusurlu durumun ortadan kaldırılamaması durumunda, iki gün öncesinden ihbar edilmek kaydı ile kullanıcının bağlantısı kesilir.

Toplam harmonik bozulmaya ilişkin hizmet kalitesinin sağlanabilmesi için, ölçülen toplam harmonik bozulmanın, ölçüm süresinin % 5'inden daha uzun bir süre içinde % 8'den daha yüksek olmaması gerekir. Harmonik bozulmaya ilişkin bu şartın ihlal edilmesi durumunda, dağıtım şirketi hakkında Kanunun 11 inci maddesi hükümleri çerçevesinde işlem yapılır.

Harmonik seviyesini ölçen cihazın hangi harmonik seviyeye kadar ölçüm yapacağı özellikle IGBT teknolojisi kurulmuş harmonikli devrelerde daha da önem kazanmaktadır. Bilindiği üzere

IGBT devrelerinde harmonik seviyesi 50. harmoniğin üzerinde baskındır. Bu nedenle yapılan ölçümlerde bunların görülmesi ancak daha özel cihazlar ile yapılabilir. Aksi takdirde THD değerleri gerçek değerlerden daha küçük çıkacaktır.

4. HARMONİKLERİN ZARARLI ETKİLERİ

- Kondansatör gruplarının yalıtkanlıklarının bozulmasına veya kondansatörün aşırı yükten dolayı kötü çalışmasına,
- Taşıyıcı güç sistemleri ve dalga kontrolünde parazite, yük kontrolü, ölçme uzaktan anahtarlama yapan sistemlerin kötü çalışmasına,
- Asenkron ve senkron makinelerde aşırı ısınmaya ve bundan dolayı kayıplara,
- Rezonans nedeniyle sistemde aşırı gerilim ve aşırı akımlara,
- Sistemde oluşturduğu aşırı gerilimden dolayı, kullanılan iletkenlerin yalıtkanlıklarının bozulmasına,
- İletişim sistemlerinde parazite,
- Endüksiyon prensibine göre çalışan Ölçü aletlerinde hatalara,
- İşaret parazitlerine ve rölelerin kötü çalışmasına (özellikle mikroişlemci kontrollü sistemlerin kötü çalışmasına),
- Yaygın olarak kullanılan motor denetleyicilerinde ve güç istasyonu uyarım sistemlerinde parazite,
- Asenkron ve senkron makinelerde mekaniksel titreşime,
- Sıfır gerilim geçişine veya tetiklemeye dayanan ateşleme devrelerinin kararsız çalışmasına neden olur.”
- Motorlar ve diğer aparatlarda fazladan ses,
- Kompanzasyon kapasitörleri ve kablo kapasitesinin varlığı, bozulmaya sebep olan yükten uzak bir noktada bile, şebekede gerilim artışlarına neden olan seri ve paralel rezonanslara yol açabilmektedir.

Yukarıdakiler kadar, ara-harmonikler de şebekeyi karıştırabilir, alt-harmonik düzeyleri titreşime yol açabilir. Harmonik gerilim kapsamını tavsiye edilen düzeylerde tutmak için günümüzde kullanılan ana çözümler;

Yüksek darbeli doğrultma (süzgeç, konvertörler v.s.) kullanımı, Özel frekanslara ayarlanan ya da bant-geçiren tipi pasif filtreler, Aktif filtre ve koşullandırıcılar (Arrilaga,J., 1985).

Doğal olarak bu etkiler, harmonik kaynaklara, bunların güç sistemlerinde yerleşimlerine ve harmoniklerin yayılımını yükselten şebeke karakteristiklerine bağlıdır.

4.1 Transformatörler Üzerindeki Etkiler

Transformatörlerde harmoniklerin etkileri iki kısımda incelenebilir.

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.

Gerilim harmoniklerinin etkileri:

- Dielektrik zorlanmasının artması,
- Haberleşme devrelerine elektrostatik etkiler yapması,
- Transformatörün endüktansı ile transformatöre bağlı bir tüketicinin kapasitansı arasında rezonans meydana getirebilmesi (Kocatepe, C., 2005).
- Harmonik frekanslarının karesiyle orantılı olan iletkenlerdeki girdap akımı kayıplarının toplamı;

$$W_E = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n \cdot I_n}{I_1} \right)^2 \quad (4.1)$$

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;

$$P_{\text{çekirdek}} = (k_1, f + k_2, f^2) V^2 \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ilk terim histerezis kaybı ve ikinci terim çekirdekteki girdap akımı kaybıdır.

Diğer bir etki de üçlü-N harmoniklerle ilgilidir. Üçlü-N harmonikleri üçgen sargıya geldiklerinde hepsi aynı fazda oldukları için sargı içinde dolanırlar, etkin bir şekilde absorbe olmuşlardır ve besleme devresine ulaşmazlar. Bu nedenle, üçgen sargılı transformatörler izole özellikli transformatörler olarak yararlıdır. Ancak üçlü-N özelliği taşımayan diğer tüm harmonikler için durum farklıdır, bunlar devreye yayılırlar. Transformatörlerin anma değerlerinin belirlenmesinde, sirkülasyon akımlarının dikkate alınması gerekir (Kocatepe, C., 2005).

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 daha düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemli olabilmektedir. Transformatör ve generatörler, aşın ısınmadan dolayı anma değerlerinin %70'ine ulaştıklarında devre dışı kalabilirler.

4.2 Döner Makineler Üzerindeki Etkiler

Harmonik akım ve gerilimlerin döner makinalar üzerindeki birincil etkisi, diğer elemanlarda olduğu gibi harmonik frekanslarındaki demir ve bakır kayıpları nedeniyle ısınmadaki artıştır. Ayrıca harmonik bileşenler, makina 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 (Özen, N., 2004).

4.3 Generatörler Ve Şebeke Gerilimi Üzerindeki Etkiler

Bilindiği gibi endüktif reaktans, frekansla orantılı olarak artar. Bu nedenle temel harmonikteki değeri X_L olan endüktif bir reaktans, harmonik derecesi n olan bir akım karşısında;

$$\bullet X_{Ln} = n \cdot X_L \quad (4.3)$$

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 getirirler, (jeneratörde endüklenen gerilim sinüs şeklinde olmasına rağmen, bu nedenle generatör uçlarındaki gerilimin ve şebeke geriliminin şekli bozulur .

Çizelge 4.1 Generatörler için negatif sıralı akün sınırlamaları (Özen, N., 2004).

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

4.4 Gerilim Düşümünün Artması Ve Fliker Olayı

Harmonik akımlarının frekansları, normal şebeke frekansı 50 Hz 'in n katlarına eşit olduğundan, bu akımlar karşısında generatör, transformatör ve hat reaktansları üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri de n ile orantılı olarak artar. Bu gerilim düşümlerinin frekansları n ile orantılı olduğundan, bunların normal gerilim ile birleşmesi sonucunda gerilim şekli bozulur.

Örneğin ark ocakları gibi, olayların hızlı değiştiği yerlerde, harmonik akımların yol açtıkları gerilim düşümleri de zamana bağlı olarak hızlı değiştiğinden, şebeke geriliminde 2-15 Hz mertebesinde titreşimler baş gösterir; buna fliker olayı denir. Bu olay yakında bulunan tesislerdeki cihazlara ve aydınlatma tüketicilerine olumsuz olarak etki yapar. Özellikle akkor telli lambalarda ışığın titreşimine yol açar; bu da gözleri çok rahatsız eder.

4.5 Kondansatör Üniteleri Üzerindeki Etkiler

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;

$$\bullet \quad f_r = \sqrt{Q_s / Q_c} \quad (4.4)$$

şeklinde bulunabilir. Burada;

f_r = Rezonansın oluştuğu harmonik derecesi

Q_s = Oluşan kısa devre gücü (kVA)

Q_c = Kondansatör grubunun gücü (kVAr)

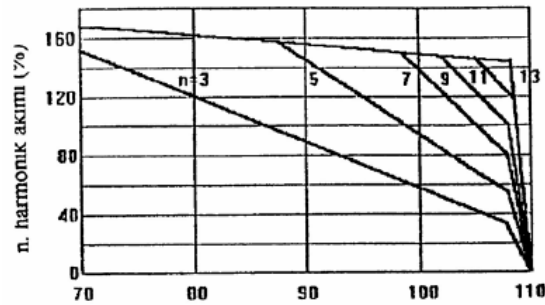
- Birçok düşük gerilim kuruluşlarında, aşağıdaki kurallar izlenmektedir;
- Eğer harmoniğin yük üzerine oluşturduğu kVA cinsinden etkisi, transformatörün gücünün (kVA) %10'undan küçükse, kondansatörler rezonanstan endişelenmeden kullanılabilir.

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

Ayrıca harmonik bileşenler, kondansatörlerde ısınmaya ve yalıtım zorlanmalarına neden olmaktadır. ANSI/IEEE 18-1980 standardı, kondansatörlerde gerilim, akım ve reaktif güçlerin maksimum kabul edilebilir harmonik sınırlarını vermektedir. Bu standart gösterir ki, içerisinde harmonik bulunduğu durumda kondansatörler aşağıdaki sınırlarda sürekli çalışabilir.

- nominal etkin gerilimin %110'u
- nominal tepe geriliminin %120'si
- nominal etkin akımın % 180'i
- nominal reaktif gücün % 135'i

Bir harmonik oluştuğunda (sık sık karşılaşılan durumlara benzer) Şekil 4.1'de verilen ANSI/IEEE 18'de temel gerilimde verilen her sınırlama için, izin verilen maksimum harmonik akımı saptanmıştır.



Şekil 4.1 Temel frekans gerilimi (%)

Temel frekans geriliminde, izin verilen maksimum harmonik akımı (Özen, N., 2004).

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

- $X_m = X_c / n$ (4.5)

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

- $I_n = w_n \cdot C \cdot U_n = n \cdot w \cdot C \cdot U_n$ (4.6)

ve üçü;

- $I_n = w_n \cdot C \cdot U_n = n \cdot w \cdot C \cdot U_n$

değerini alır. Burada $w = w_1$ temel harmoniğin dairesel frekansıdır. Kondansatörün uçlarındaki gerilimin etkin değeri;

- $U_c = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}$ (4.7)

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

- $I_c = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$ (4.8)

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.

4.6 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.

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n$$

Burada I_n n. Harmonik akımın 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 gerilmeleri artırır. Bu etki kablonun yararlı ömrünü kısalttığı gibi, arıza sayısındaki artışlara da neden olur 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.

4.7 İletkenler Üzerindeki Etkiler

Harmonik akımlarının iletkenlerde ısınmaya neden olduğu iki durum söz konusudur. Birinci durum literatürde deri olayı(skin effect) ve yakınlık etkisi (proximity effect) olarak adlandırılan etkilerdir. Akım iletkenin dışına doğru yoğunlaştığında iletkenin direnci büyür. Bu olaya deri olayı denir ve frekansla birlikte artar. Yaklaşım etkisi ise iletkenin içindeki akım dağılımının komşu iletkenlerde akan akımın yarattığı magnetik alanlar tarafından etkilenmesi olayıdır. İkinci 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 birbirlerini 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.

4.8 Yalıtıma Olan Etkiler

Sinüs şeklindeki gerilim eğrisine eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu şeklindeki sivri, çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri, örneğin gerilim rezonansı gibi hallerde makina ve transformatör sargılarının izolasyonu ve kondansatörlerin dielektrik maddesi için büyük bir tehlike oluştururlar ve bazen izolasyonda delinmeye yol açabilirler. Buna karşılık mesnet, askı ve geçiş 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.

4.9 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 4.3'deki akım şekliyle gösterilmiştir. Burada altı darbeli bir çevirici köprüsünün karakteristiği görülmektedir Şekil 4.3.a'da çevirici bağlantısı nedeniyle sıfır akım geçişi uzatılmıştır. Bununla birlikte Şekil 4.3.b'de sıfır akım geçişinde di/dt , çevirici bağlantısının kare dalga karakteristikleri nedeniyle çok yüksektir.

Devre kesicisinin 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. Benzer problemler devre kesicileri.

Yük kesme aygıtları gibi benzer akını kesme aygıtlarında oluşabilmektedir. Havalı kesiciler harmonik akımlara daha az duyarlıdır.

Kesme işlemi için anahtarlama aygıtlarına gereken harmonik akımların seviyelerinde endüstri tarafından belirlenmiş standartlar yoktur. Bütün kesme testleri nominal besleme frekansında denenmiştir (Kocatepe,C., 2005).

4.10 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 miktardaki hatalarda harmonikler, minimum erime zamanlarını bilir.

4.11 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;

Daha büyük tepe değerleriyle yavaş çalışmak yerine daha küçük tepe değerleriyle hızlı çalışma eğilimi gösterirler. Statik röle çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlenir.

Aşırı gerilim ve aşırı akım rölelerinin çalışma karakteristikleri değişir. Harmonik bileşene bağlı olarak rölelerin çalışma momentlerinin yönü değişebilir. Çalışma zamanları, ölçülen büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak oldukça büyük bir farklılık gösterebilir. Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem de ayar gerisi çalışma gösterebilir. Fark röleleri yüksek hızda çalışmayabilir. Genelde rölelerin alışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Olağandışı durumlar dışında röle çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri % 10-20 civarındaki seviyelerdir.

4.12 Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkileri

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 çalışmalarında hataya neden olabilmektedir.

Modern etkin değer voltmetreleri ve amperetreleri dalga 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.

Test sonuçları göstermektedir ki, modern voltmetre ve amperetrelerin sinüs biçimli olmayan alanı ve gerilimlerden kaynaklı hataları %0,2 'den az olmaktadır.

Endüksiyon diskli elektrik sayaçları en yaygın kullanılan enerji ölçerlerdir. 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 biçimli olmayan akım ve gerilimlerin yoğun olarak bulunduğu ortamlarda endüksiyon diskli elektrikli sayaçların kullanımından kaçınmak gerekir. Çünkü hatalı ölçümler yapmak dışında 400–1000 Hz aralığındaki mekanik rezonanstaki kaynaklanan arızalar da olasıdır.

4.13 Kontrol Aygıtları Üzerindeki Etkileri

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.

4.14 İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler

Çok yüksek dereceli harmonikler, genliklerinin küçük olması nedeniyle kuvvetli akım tesislerinde zararsız oldukları halde, haberleşme tesislerine 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.

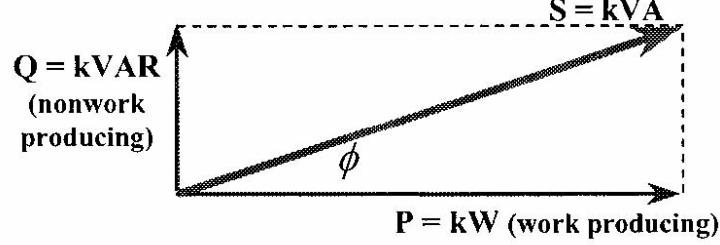
4.15 Aydınlatma Aygıtları Üzerindeki Etkiler

Akkor flamanlı lambalarda harmonikler, lambanın ömrünü kısaltır. Çünkü lambanın ömrü, çalışma gerilim seviyesine duyarlıdır. Eğer çalışma gerilimi, harmonik bozulma nedeniyle normal etkin gerilime oranla yüksekse, flamanın daha çok ısınmasına ve lamba ömrünün kısılmasına neden olacaktır. Koufman sürekli çalışmada, eğer etkin gerilim sürekli arttırılırsa, lamba ömrünün % 47 azalacağını açıklamıştır. Deşarjlı aydınlatmada, harmoniklerin, duyulabilir gürültüden başka bilinen bir etkisi yoktur.

5. HARMONİK VE GÜÇ FAKTÖRÜ

5.1 Lineer Yüklerde Güç faktörü:

Aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere sadece lineer yüklenmelerde güç faktörü akım ve gerilimin ilişkisi ile ilintilidir.



Şekil 5.1 Lineer Yüklenmede Güç Faktörünü

$$\text{Güç Faktörü, } \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{kW}{kVA} \quad (5.1)$$

$$\text{Görünür Güç, } S(kVA) = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{kW^2 + kVA^2} \quad (5.2)$$

P: Aktif Güç (kullanılır güç ,kW)

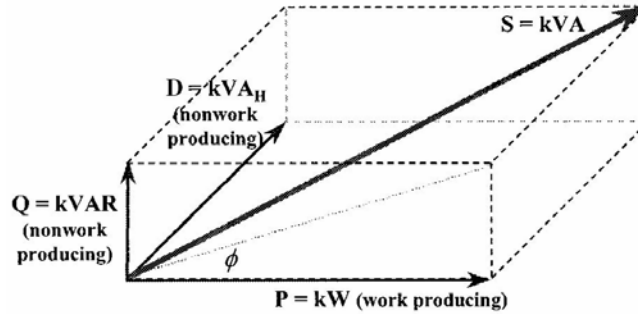
S: Görünür Güç (kVA)

Q:Reaktif Güç (Üretilen kullanılamayan güç;(kVAr)

5.2 Harmonikli Güç Sisteminde Güç Faktörü:

Güç sistemlerinde önemli 2 adet güç faktörü vardır; yer değiştirmiş güç faktörü (displacement power factor) ve gerçek güç faktörü. Gerçek güç faktörü temel bileşen ve harmonik bileşenlerin miktarı ile ölçülür. (Ian E., 2007)

Şekil 5.2 Harmonikli Sistemde Güç Faktörü Bileşenleri



Şekile göre;

$$\text{Güç Faktörü, } \cos \varphi = \frac{P}{S} \neq \frac{kW}{kVA} \quad (5.3)$$

$$\text{Görünür Güç, } S(kVA) = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \sqrt{kW^2 + kVAr^2 + kVAr_d^2} \quad (5.4)$$

Aktif Güç (P) şu ifade kullanılarak hesaplanabilir:

$$P = \sum_{h=0}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h = P_0 + P_1 + \sum_{h=2}^{\infty} P_h \quad (5.5)$$

φ_h : n. Harmonikteki gerilim ve akım arasındaki açı

Buna benzer olarak Q da şöyle ifade edilebilir:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_{Hrms} I_{Hrms} \sin \varphi_h = Q_1 + \sum_{h=2}^{\infty} Q_h \quad (5.6)$$

φ_h : n. Harmonikteki gerilim ve akım arasındaki açı

P_0 : Aktif Güçteki DC içerik

P_1 / Q_1 : Aktif/Reaktif Güç (temel bileşen)

P_n / Q_n : Aktif/Reaktif Güç (n. harmonikteki bileşen)

Görünür Güç aşağıdaki formüllerde de gösterilebilir;

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (5.7)$$

$$= \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{Hrms}^2 I_{Hrms}^2} \quad (5.8)$$

$$= V_{1rms} I_{1rms} \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (5.9)$$

$$= S_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (5.10)$$

S_1 : Temel bileşendeki görünür güçtür.

Şekil 5.2 de görüldüğü gibi görünür güç S, aktif güç (P), reaktif güç(Q) ve bozulmuş güç (D) yi içerir.

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad (5.11)$$

Aşağıda detaylandırıldığı üzere güç faktörü aktif gücün görünür güce oranıdır. Eğer sistem lineer olmayan yük çekiyorsa,

$$\text{Güç Faktörü } \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{THD_I^2}} \cos \varphi_{disp} \cdot \cos \varphi_{dist} \quad (5.12)$$

$$\text{Yer değiştirmiş Güç Faktörü: } \cos \varphi_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (5.13)$$

$$\text{Bozulma Güç Faktörü: } \cos \varphi_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{THD_I^2}} = \frac{V_{1rms}}{V_{rms}} \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} = \frac{S_1}{S} \quad (5.14)$$

Not: birçok AC PWM sürücü üreticisi tüm yüklerde yüksek güç katsayısı diyerek ürünleri satarlar. Ancak bu bahsi geçen güç faktörü gerçek güç katsayısı değil sadece yer değiştirmiş güç katsayısı olabilir.

ÖRNEK:

Yapılan ölçüm sonucu gerilimi:

$$v = \sqrt{2} [210 \sin(\omega t + 63^\circ) + 40 \sin(3\omega t - 50) + 15 \sin(5\omega t + 45^\circ) + 5 \sin(7\omega t - 60)] V$$

olarak elde edilen bir baraya bağlı nonlineer yükün güç kompanzasyonu yapılacaktır. Yapılan ölçümlere ait yük akımı:

$$i = \sqrt{2} [30 \sin(\omega t + 13^\circ) + 10 \sin(3\omega t - 18) + 4,98 \sin(5\omega t + 15^\circ) + 2 \sin(7\omega t - 45)] A$$

olarak tespit edilmiştir. Bu devre için görünür gücü, reaktif gücü ve aktif gücü bularak, güç faktörünü maksimum yapan kapasite değerini belirleyelim (f:50 Hz).

ÇÖZÜM:

Gerilim ve akımın efektif değerleri:

$$V = \sqrt{210^2 + 40^2 + 15^2 + 5^2} = 214.2595 [V]$$

$$I = \sqrt{30^2 + 10^2 + 4,98^2 + 2^2} = 32.0749 [A]$$

olarak bulunur. Buradan aktif, reaktif ve görünür güç sırasıyla,

$$P = 4.4631 \cdot 10^3 \text{ W}$$

$$Q = 4.6488 \cdot 10^3 \text{ VAR}$$

$S = 6.8756 \cdot 10^3 \text{ VA}$ olarak hesaplanır. Güç faktörünün kompanzasyon önceki değeri;

$GF = 0,6491$ olarak bulunur. GF'nin maksimum olabilmesi için gereken kapasite değeri ise

$$C_k = \frac{\sum_1^{n1} V_{n1} I_{Yn1} n_1 \sin \Psi_{Yn1}}{\omega \left(\sum_1^{n1} V_{n1}^2 n_1^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 n_2^2 \right)} \text{ eşitliğinden;}$$

$$C_k = 212,31 [\mu F] \text{ bulunur.}$$

$$I_{k \min}^2 = \sum_1^{n1} (V_{n1}^2 n_1^2 \omega^2 C_s^2 + I_{Yn1}^2 - 2V_{n1} I_{Yn1} \omega C_s \sin \Psi_{Yn1}) + \sum_1^{n2} (V_{n2}^2 n_2^2 \omega^2 C_s^2) + \sum_1^{n3} I_{Yn3}^2$$

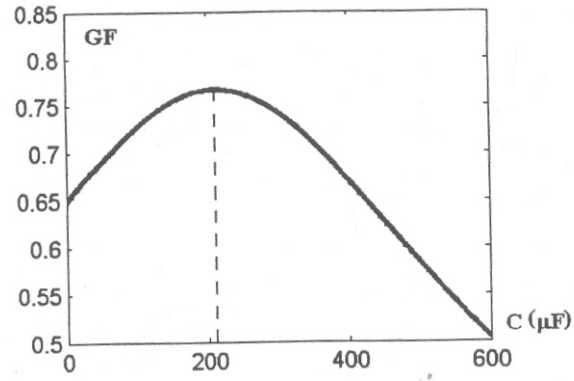
eşitliğinden $I_{k \min} = 27.167 [A]$ olarak bulunur.

$$GF_{\max} = \frac{\sum_1^{n1} V_{n1} I_{Yn1} \cos \Psi_{Yn1}}{\sqrt{\left(\sum_1^{n1} V_{n1}^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \right) \cdot I_{k \min}^2}} \text{ eşitliğinden;}$$

$$GF_{\max} = 0,766 \text{ olarak bulunur.}$$

Yukarıda örnekte görüldüğü üzere bozulma gücünü (D) azaltır isek gerçek güç katsayısı da buna bağlı olarak yükselecektir. Harmoniklerin aktif ya da reaktif azalması gerçek güç katsayısını iyileştirecektir. Ancak bu yeterli iyileştirmeyi sağlamayacağından dolayı

harmoniklerin de sistemde yok edilmeleri ya da makul deęerlere dūřurūlmeleri gerekmektedir.

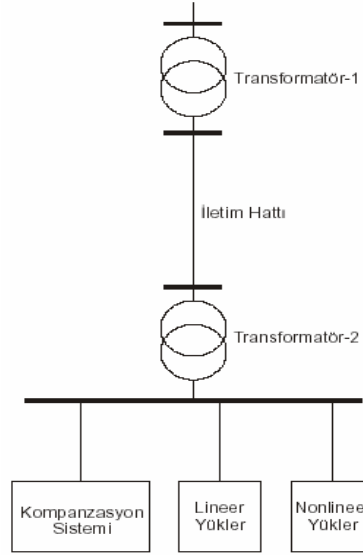


řekil 5.3 Harmonikli Kaynak ve Nonlineer yūk durumunda kapasitelerin gūē faktōrūne etkisi (Kocatepe C., 2005).

6. REZONANS

Harmoniklerin şebeke ve sistem üzerinde yaptığı en büyük etkilerden birisi rezonans olaylarına sebebiyet vermesidir. Rezonans; şebekeden çekilen akımın endüktif ve kapasitif etkiden kurtulup tamamen omik yük etkisi altında kalmasıdır. Bir başka deyişle sistemdeki kapasitif ve endüktif yüklerin eşitlenmesiyle devrede tamamen omik yükün etkili olmasıdır. Bu olayın gerçekleşmesi sistemden maksimum akım akmasına neden olmaktadır.

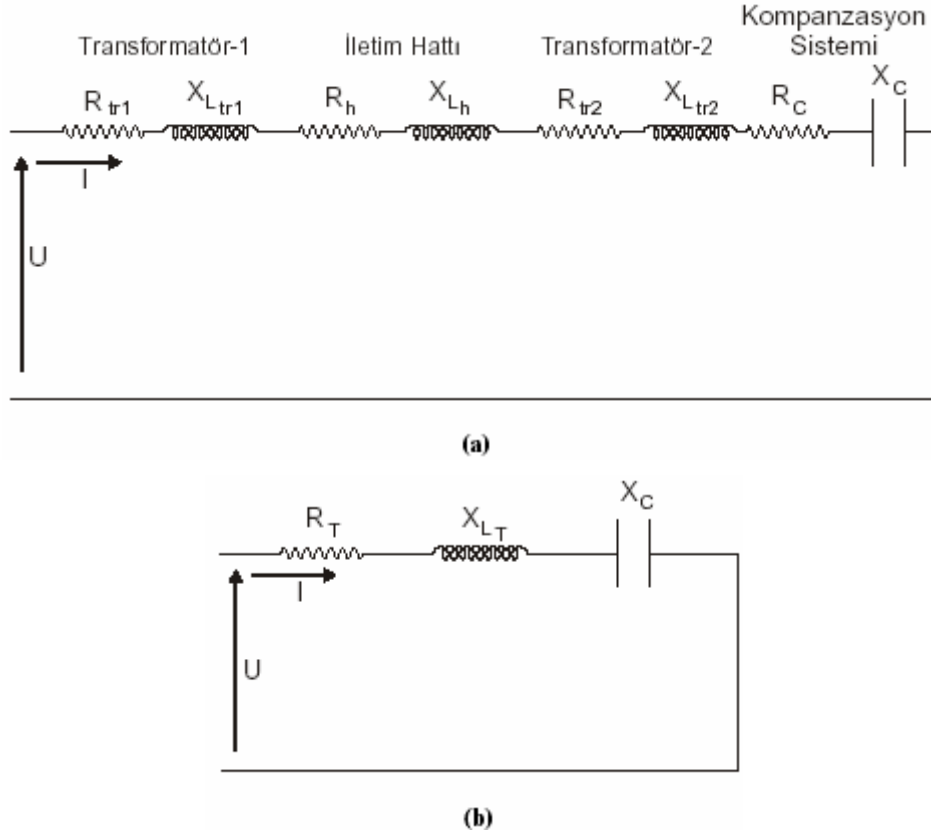
Elektrik enerji sistemlerinde iki farklı rezonans durumu söz konusudur; paralel ve seri rezonans. Bu iki rezonans durumunun da sistemde hangi noktalarda meydana gelebileceği Şekil 6.1’da kapalı şeması, Şekil 6.2’de açık şeması verilen sistem üzerinde anlatılacaktır.



Şekil 6.1. Örnek Elektrik Enerji Sisteminin Kapalı Şeması (Sucu M., 2003).

6.1 Seri Rezonans

Seri rezonans R , L , C elemanlarının birbirine seri bağlı olduğu sistemlerde görülmektedir. Buna örnek, şekil 6.2’de verilen sistem üzerinde gösterilmiştir. Örnek sisteme göre seri rezonans durumu; transformatör-1, iletim hattı, transformatör-2 ve kompanzasyon sistemi üzerindeki yolda meydana gelebilmektedir. Bu durum şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Seri Rezonans Devresi

Bu sistemde,

$$R_T = R_{tr1} + R_h + R_{tr2} + R_C \quad (6.1)$$

$$X_T = jX_{tr1} + jL_h + L_{tr2} \quad (6.2)$$

dir. Burada,

R_T : Seri rezonansın oluştuğu yolun toplam omik direnci (Ω),

R_{Tr1} : Transformatör-1’in omik direnci (Ω),

R_h : İletim hattının omik direnci (Ω),

R_{Tr2} : Transformatör-2’nin omik direnci (Ω),

R_C : Kompanzasyon sisteminin omik direnci (Ω),

X_{L_T} : *Seri* rezonansın oluştuğu yolun toplam endüktif reaktansı (Ω),

$X_{L_{r1}}$: Transformatör-1'in endüktif reaktansı (Ω),

X_{L_h} : İletim hattının endüktif reaktansı (Ω),

$X_{L_{r2}}$: Transformatör-2'nin endüktif reaktansı (Ω),

X_c : Kompanzasyon sisteminin kapasitif reaktansıdır (Ω).

Seri rezonans devresindeki elemanlar üzerindeki gerilim düşümleri;

$$U_{R_T} = I \cdot R_T \quad (6.3)$$

$$U_{X_{L_T}} = I \cdot jX_{L_T} \quad (6.4)$$

$$U_{X_C} = I \cdot (-jX_{L_T}) \quad (6.5)$$

olur. Burada;

U_{R_T} :Toplam omik direnç üzerinde düşen gerilim (V),

$U_{X_{L_T}}$:Toplam endüktif reaktans üzerinde düşen gerilim (V),

U_{X_C} :Toplam kapasitif reaktans üzerinde düşen gerilim (V),

I : *Devreden* geçen toplam akımdır (A).

Toplam devre gerilimi ise;

$$U = U_{R_T} + U_{X_{L_T}} + U_{X_C} = I \cdot R_T + I \cdot jX_{L_T} + I \cdot (-jX_C) = I(R_T + jX_{L_T} - jX_C) \quad (6.6)$$

dir. Bu durumda devrenin toplam empedansı ve akımı;

$$Z = R_T + jX_{L_T} - jX_C \quad (6.7)$$

olur. Rezonans durumunda;

$$X_{L_T} = X_C \Rightarrow 2\pi f_s L_T = \frac{1}{2\pi f_s C} \quad (6.8)$$

dir. Buradan seri rezonans için rezonans frekansı;

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C}}$$

olur. Burada,

f_s : Sistemin rezonans frekansı (Hz),

L_T : Devrenin toplam endüktansı (H),

C: Kompanzasyon sisteminin kapasitansıdır (F).

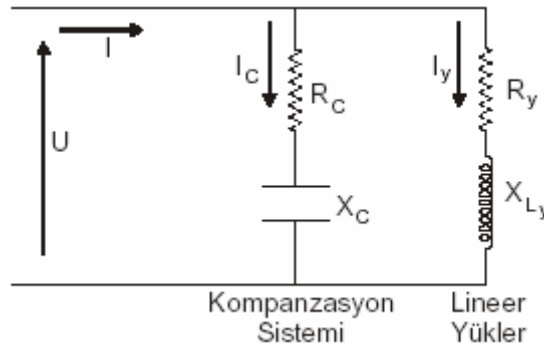
Rezonans durumunda devrenin toplam empedansı ve akımı ise,

$$Z = R_T \quad \text{ve} \quad I = \frac{U}{R_T} \quad \text{olur.} \quad (6.9)$$

$R_T < R_T + j(X_{L_T} - X_C)$ olduğundan rezonans durumunda devreden geçen akım değerinde artış olacaktır. Kuvvetli akım tesislerinde, omik direnç değerinin endüktif reaktans değerine göre hayli küçük olması nedeni ile; rezonans durumundaki bu akım artışı daha da büyük olacaktır. Artan bu akım, bobin sargılarının izolasyonunu ve kondansatörleri çok zorlar.

6.2 Paralel Rezonans

Paralel rezonans olur. Toplam devre akımı ise; L , C elemanlarının birbirine paralel bağlı olduğu sistemlerde görülmektedir. Buna örnek, şekil 6.2'de verilen sistem üzerinde gösterilmiştir. Örnek sisteme göre paralel rezonans durumu; kompanzasyon sistemi ve sistemdeki lineer yükler arasında meydana gelebilmektedir. Bu durum şekil 6.4'da verilmiştir.



Şekil 6.4. Paralel Rezonans Devresi (Sucu M., 2003).

şekildeki devrenin kol akımlarını yazacak olursak;

$$I_C = \frac{U}{R_C - jX_C} \quad (6.10)$$

$$I_y = \frac{U}{R_y - jX_{L_y}} \quad (6.11)$$

olur. Toplam devre akımı ise;

$$I = I_C + I_y = \frac{U}{R_C - jX_C} + \frac{U}{R_y - jX_{L_y}} = U \left(\frac{1}{R_C - jX_C} + \frac{1}{R_y - jX_{L_y}} \right) \quad (6.12)$$

olur. Burada,

I_C : Kompanzasyon sisteminin çektiği toplam akım (A),

I_y : Yükün çektiği toplam akım (A),

R_y : Lineer yüklerin toplam omik direnci (Ω),

X_{L_y} : Lineer yüklerin toplam endüktif reaktansıdır (Ω).

Devrenin empedansı ve admitansı ise;

$$Z = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_C - jX_C} \right)} + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_y + jX_{L_y}} \right)} \quad (6.13)$$

$$\gamma = \left(\frac{1}{R_C - jX_C} + \frac{1}{R_y + jX_{L_y}} \right) \quad (6.14)$$

dir. Burada admitans üzerinde gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$\gamma = \left(\frac{R_C - jX_C}{R_C^2 - jX_C^2} + \frac{R_y + jX_{L_y}}{R_y^2 + jX_{L_y}^2} \right) \quad (6.15)$$

$$= \frac{R_C}{R_C^2 + X_C^2} + j \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} + \frac{R_y}{R_y^2 + X_{L_y}^2} - j \frac{X_{L_y}}{R_y^2 + X_{L_y}^2} = \quad (6.16)$$

$$= \left(\frac{R_C}{R_C^2 + X_C^2} + \frac{R_y}{R_y^2 + X_{L_y}^2} \right) + j \left(\frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} - \frac{X_{L_y}}{R_y^2 + X_{L_y}^2} \right) \quad (6.17)$$

sistemin admitansı Denklem yukarıdaki gibi olur. Buna göre düzenlenmiş hali ile sistemin toplam akımı;

$$I = U \cdot \gamma = U \left[\left(\frac{R_C}{R_C^2 + X_C^2} + \frac{R_y}{R_y^2 + X_{L_y}^2} \right) + j \left(\frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} - \frac{X_{L_y}}{R_y^2 + X_{L_y}^2} \right) \right] \quad (6.18)$$

olur. Rezonansın tanımına göre karmaşık ifadenin imajiner kısmının sıfır olması gerektiğinden, şekil 6.4'daki paralel devrenin rezonansa gelebilmesi için;

$$\frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} = \frac{X_{L_y}}{R_y^2 + X_{L_y}^2} \quad (6.19)$$

koşulunun sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{1/2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot C}{R_C^2 + (1/2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot C)^2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot L_y}{R_y^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot L_y)^2} \quad (6.20)$$

'den bulunabilir. Gerekli düzenlemeler yapılırsa sistemin paralel rezonans frekansı;

$$f_p = \frac{2}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_y^2 C - L}{R_C^2 C - L}} \quad (6.21)$$

olur. Burada;

Z: Sistemin toplam empedansı (Ω),

Y: Sistemin toplam admitansı (S),

C: Kompanzasyon sisteminin kapasitansı (F),

L_y: Lineer yüklerin endüktansı (H),

f_p: Paralel rezonans frekansıdır (Hz).

Şekil 6.4'daki sistem rezonansa geldiğinde, yani Denklem IV.29'daki eşitlik sağlandığında sistemin toplam akımı;

$$I = U \left(\frac{R_C}{R_C^2 + X_C^2} + \frac{R_y}{R_y^2 + X_{L_y}^2} \right) \quad (6.22)$$

şeklini alır. Yani sistemin çektiği toplam akım düşer. Bu durumda sistemin gücü sabit kalmak isteyeceğinden sistemdeki gerilim yükselir. Bu artan gerilim ise, sistem yalıtımının zorlanmasına ve kompanzasyon sisteminde zararlara yol açar.

7 HARMONİK FİLTRELERİ

Harmoniklerin oluşturduğu zararlı etkileri engelleyebilmek için tasarım sırasında alınabilecek tedbirler yeterli değildir. Tasarım sırasında alınabilecek tedbirlere ilaveten harmonik akımlarının şebekeye geçmesini engellemekte harmonikleri engellemenin bir diğer yöntemidir. Bunun için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır. Elektrik enerji sistemine yerleştirilen ve istenilen harmonik akımlarının süzülmesini sağlayan bu devrelere “Harmonik Filtresi” denir.

Harmonik filtrelerinin amacı akım veya gerilimdeki harmonik mertebelerinin etkilerini azaltmaktır. 2 çeşit harmonik filtresi mevcuttur. Bunlar; Pasif filtre ve Aktif filtredir.

7.1 PASİF FİLTRELER

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok etmek için tasarlanan, kondansatör (C), endüktans (L) bazı ve durumlarda direnç (R) elemanlarından oluşan devrelerdir.

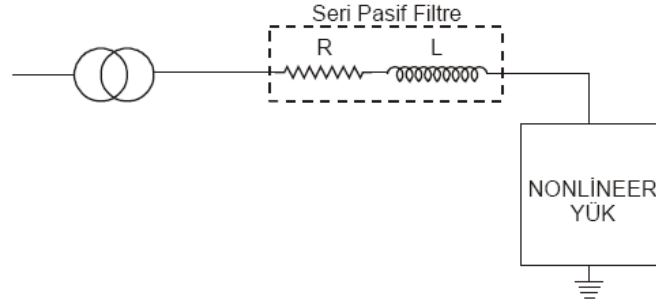
Pasif filtreler, seri pasif filtreler ve paralel (şönt) pasif filtreler olmak üzere kendi içerisinde ikiye ayrılır. Ayrıca uygulamada çok karşılaşılan bir diğer pasif filtre türü de sistemde bulunan kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamaktır.

7.1.1 Seri Pasif Filtreler

Seri filtreler adından da anlaşılacağı gibi, kaynak ile harmonik üreten eleman arasına seri olarak bağlanan endüktans (L) elemanından oluşmaktadır. Seri bağlanan bu empedans,
$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (7.1)$$

formülüne göre harmonik frekanslarına yüksek empedans göstererek onların geçişlerini engeller. Temel frekansta ise düşük empedans gösterirler. Seri filtre uygulamasına örnek bir devre Şekil 7.1’de verilmiştir.

Seri filtreler uygulamada; AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin önlerinde kullanılır. Seri filtrelerinin uygulanmasındaki zorluk; tüm yük akımı filtre üzerinden geçmekte, tam hat gerilimleri için yalıtılması gerekmekte ve hatta gerilim düşümüne sebep vermesidir.

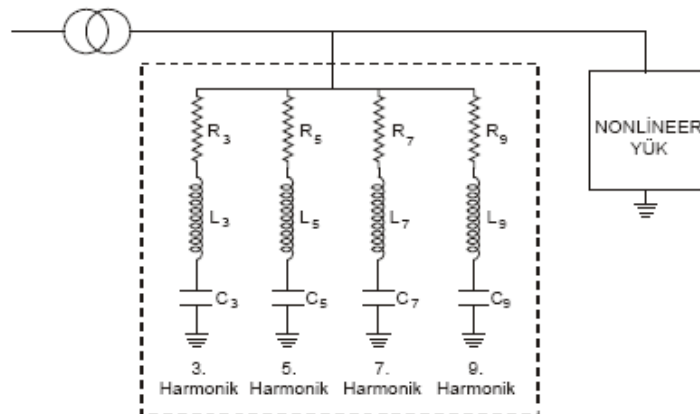


Şekil 7.1 Seri Pasif Filtre için Bir Örnek

7.1.2 Paralel (Şönt) Pasif Filtreler

Paralel (şönt) pasif filtreler, harmonik kaynağı ile şebeke arasına kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı durumlarda direnç (R) elemanlarının paralel olarak bağlanmasından oluşan devrelerdir.

Paralel pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik frekansı için rezonansa gelecek L, C değerleri hesaplayarak bu devreyi güç sistemine bağlamaktır. Her bir harmonik frekansı için ayrı rezonans kolları oluşturularak bu kolların güç sistemine bağlanması gerekmektedir. Ancak bu işlem en etkin yani genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Her harmonik bileşeni için ayrı bir rezonans kolu oluşturmak optimum bir çözüm olmayacağından sadece genlik değeri yüksek harmonik frekansları için rezonans kolu oluşturulmalı, genliği yüksek olmayan harmonik frekansları için ise bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterli olacaktır. [29] Pasif filtre için örnek bir devre (Tek ayarlı paralel pasif filtre) Şekil 7.2’de görülmektedir.



Şekil 7.2.PASİF ŞÖNT FİLTRE (Sucu M., 2003).

Paralel (Şönt) Pasif Filtre

Burada;

R_n : n . harmonik mertebesi için rezonansa getirilen kapasite ve endüktans elemanının iç direnci (Ω),

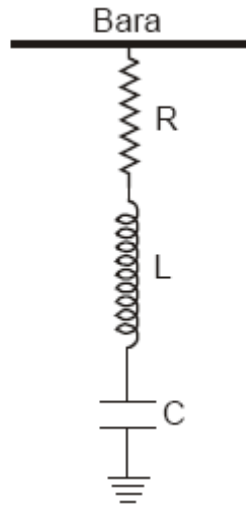
X_{Ln} : n . harmonik mertebesi için kapasite elemanı ile rezonansa sokulan endüktans (Ω), X_c : n . harmonik mertebesi için endüktans elemanı ile rezonansa sokulan kapasitanstır(Ω).

Şönt filtrelerin kullanılmasının en büyük sakıncası, güç sistemiyle paralel rezonansa girebilmesidir. Bu yüzden güç sistemine paralel pasif filtre uygulanmadan önce sistemin ayrıntılı bir analizinin yapılması gerekmektedir. 4 farklı paralel pasif filtre çeşidi vardır;

- Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler,
- Çift ayarlı filtreler,
- Otomatik ayarlı filtreler,
- Yüksek geçiren sönümlü filtreler.

7.2 Tek Ayarlı (Bant Geçiren) Filtreler

Tek ayarlı(bant geçiren) filtreler, tek bir frekanstaki harmonik akımı için bir kısa devre yol oluşturarak bu akımın hattan saptırılmasını sağlar. [29] Tek ayarlı filtreler seri R -L -C devresinden meydana gelir. Tek ayarlı filtre örneği Şekil 7.3’de görülmektedir.



Şekil 7.3. Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre (Sucu M., 2003).

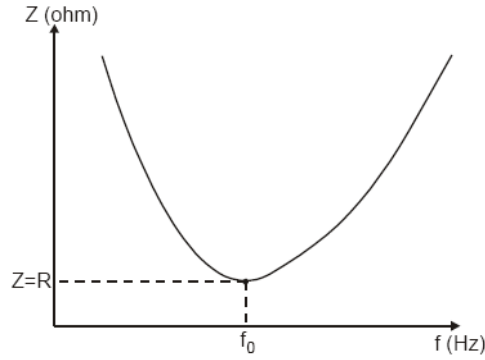
Tek ayarlı filtrenin, temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarındaki filtre empedansı,

$$Z_T = R + j(X_L - X_C) = R + j(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C}) \quad (7.2)$$

şeklindedir. Bu filtrenin çalışma prensibi, istenen harmonik frekansında filtrenin rezonansa gelerek $X_L = X_C$ şartının sağlanmasıdır. Bu durumda filtre empedansı(ayarlandığı harmonik frekansındaki empedansı),

$$Z_{TO} = R \quad (7.3)$$

olur. Yani filtre ayarlanan frekans için minimum empedans değerini gösterir ve ayarlanan frekanstaki harmonik toprağa akar. Tek ayarlı filtrenin frekans-empedans ilişkisi Şekil 7.4’de görülmektedir.



Şekil 7.4. Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi (Sucu M., 2003).

Burada,

Z_T : Temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarında tek ayarlı filtrenin empedansı (Ω),

R : Tek ayarlı filtredeki endüktans ve kapasitansın iç direnci (Ω),

X_L : Tek ayarlı filtrenin endüktif reaktansı (Ω),

X_C : Tek ayarlı filtrenin kapasitif reaktansı (Ω),

f_n : n. harmonikte ki frekans (Hz),

L : Tek ayarlı filtrenin endüktansı (H),

C : Tek ayarlı filtrenin kapasitansı (F),

Z_{T0} : Tek ayarlı filtrenin istenen harmonikte rezonansa gelmesi sonucu oluşan empedans (Ω),

f_0 : Tek ayarlı filtrenin ayarlandığı harmonik frekansı, yani rezonans frekansıdır (Hz).

Tek ayarlı filtre seri rezonans ilkesine göre çalıştığı için bu filtrelerde $X_L = X_C$ şartı

aranmaktadır. Bu X_L ve X_C değerleri sisteme uygun seçilmelidir. Tek ayarlı filtreler sisteme uygulandığında filtredeki kapasite, sistemin temel frekansı ve ayarlanan harmonik frekansı dışındaki frekanslarda sistemde kompanzasyon etkisi göstereceğinden filtre hesaplanırken, filtrede kullanılacak kapasite değeri sistemin kompanzasyon ihtiyacını karşılayacak değerde belirlenmeli ve daha sonra bu değerle rezonansa gelecek endüktans değeri hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmelidir. (Sucu M., 2003).

Öncelikle sistemin reaktif güç ihtiyacı belirlenmelidir. Bunu için,

$$Q = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (*)$$

formülünden yararlanılır. Burada,

Q: Sistemin istenilen güç faktörü değerine ulaşabilmesi için sisteme bağlanması gereken kondansatörün gücü (Var),

P: Sistemin toplam aktif gücü (W),

$\tan \varphi_1$: Sistemin kompanzasyon yapılmadan önceki güç aşısının tanjantı,

$\tan \varphi_2$: Sistemde kompanzasyon uygulandıktan sonraki elde edilmek istenen güç aşısının tanjantıdır.

Denklem (*)'den hesaplanan kompanzasyon gücünden sonra,

$$X_{CT} = \frac{U^2}{Q} \quad (7.4)$$

formülünden sisteme bağlanması gereken kondansatörün kapasitif reaktansı belirlenmelidir. Burada,

X_{CT} : Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri (Ω),

U: Sistemin çalışma gerilimidir (V).

Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri hesaplandıktan sonra bu değer; sistemdeki etkin harmonik mertebelerine göre ayrı ayrı ayarlanan tek ayarlı filtreler, üzerlerinden akacak akımlara göre orantılı olarak dağıtılmalıdır. Daha sonra her filtre kademesi için bilinen X_C değerine karşılık gelen X_L değeri filtrenin ayarlandığı harmonik frekansına göre hesap edilerek sisteme monte edilmelidir.

Tek ayarlı filtreye ait hesap örneği ve simülasyon çalışması son bölümde verilmiştir. Tek

ayarlı filtrelerin olumlu özellikleri şunlardır:

- Eğer istenerek eklenmiş bir direnç yoksa kayıplar çok azdır.
- Ayarlanan harmonik frekansı için harmonik akımına sıfıra yakın bir empedans gösterir.
- Filtre edilecek birden fazla harmonik akımı için birden fazla filtre paralel kullanılabilir.

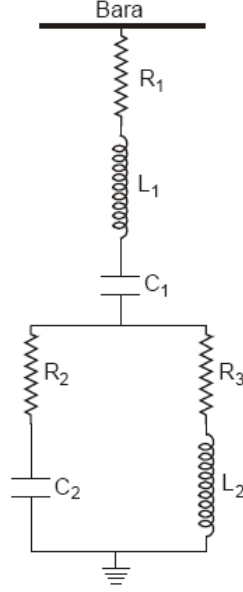
Tek ayarlı filtrelerin olumsuz yanları ise

- Hassas yapılan hesaplamalarından dolayı filtreyi oluşturan elemanların değerinde zamanla oluşan değişmelere karşı oldukça duyarlı olmasıdır. Bu durum ilave kondansatör ve direnç değerleri ile giderilebilir. Tek ayarlı filtreler sadece gücü sabit olan nonlinear yüklü sistemlerde kullanılabilir. Çünkü üzerlerindeki kapasite değerleri değişken olmadığından sistemdeki endüktif yükler kalktığından kondansatörler devrede kalmaya devam edeceğinden bu durumda aşırı kompanzasyon oluşabilir. Veya nonlinear yüklerden bir kısmı devreden çıktığında, örneğin sistemdeki 5. harmoniğin büyük bir kısmını oluşturan yük devreden çıktığında 5. harmoniği süzen tek ayarlı filtre kolu sistemde kalacağından bu kol enerji kaybına yol açacaktır. Bu yüzden bu filtreler sabit nonlinear yüklerin bulunduğu sistemlerde kullanılmalıdır. Sabit yük devreden çıktığında tek ayarlı filtrelerde devreden çıkarılmalıdır.

7.3 Çift Ayarlı Filtreler

Çift ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı iki adet tek ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı ile aynıdır. Çift ayarlı filtre iki farklı harmoniği elimine edebilir. Çift ayarlı filtre Şekil 7.5’de gösterilmiştir.

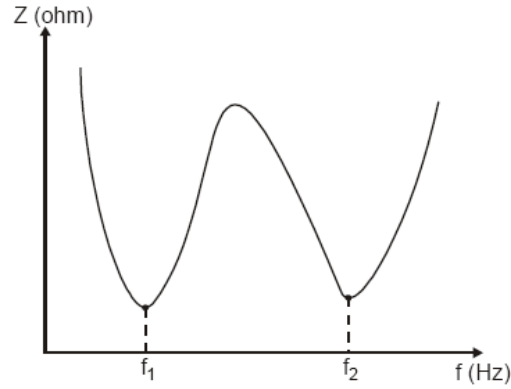
Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının az olması bu filtrelerin en önemli özelliğidir.



Şekil 7.5. Çift Ayarlı Paralel Pasif Filtre (Sucu M., 2003).

Çift ayarlı filtrelerin frekans-empedans ilişkisi Şekil 7.6'da verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki Çift ayarlı filtrenin iki farklı rezonans noktası vardır (iki adet tek ayarlı filtrenin birleşiminden meydana gelmesinden dolayı).

Üç ve dört ayarlı filtrelerde tasarlamak mümkündür, ancak bunlar ayar zorluklarından dolayı kullanılmazlar.



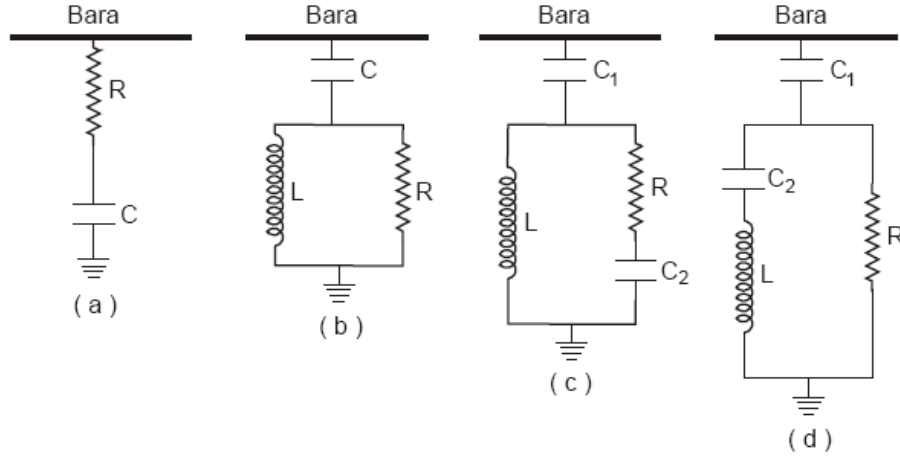
Şekil 7.6. Çift Ayarlı Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi (Sucu M., 2003).

7.4 Otomatik Ayarlı Filtreler

Bu filtrelerin ayarlanabilir olması, hem kapasitenin hem de endüktansın otomatik olarak ayarlanması ile gerçekleştirilebilir. Bu ayarın sınırlarını %5 gibi bir değerdir. Bu filtreler, reaktif gücü ölçen ve bu gücün işaretine ve büyüklüğüne göre L ve C değerlerini kontrol eden bir kontrol sisteminden oluşmaktadır.

7.5 Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

Yüksek geçiren filtreler, belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans gösteren filtrelerdir. Bu filtrelerin tek ayarlı filtreler ile birlikte kullanılması uygundur. Tek ayarlı filtreler yüksek genlik değerine sahip düşük harmonik frekanslarını her harmonik için farklı paralel kollarla süzerken, yüksek geçiren filtreler genlik değeri düşük yüksek harmonik frekanslarını tek bir paralel kol yardımı ile süzerler. 4 farklı çeşit yüksek geçiren filtre mevcuttur, bunların birbirlerine göre çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Yüksek geçiren filtre çeşitleri Şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7.7. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler (a) Birinci Derece, (b) İkinci Derece, (c) üçüncü Derece, (d) C Tipi

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; büyük bir kondansatör gücü gerektirdiğinden ve temel frekansta aşırı bir kayba sebep olduğundan tercih edilmezler.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; en iyi filtreleme performansına sahip olan filtredir. Fakat Üçüncü dereceden filtre ile karşılaştırıldığında daha yüksek temel frekans kayıplarına sahiptir.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; ikinci dereceye göre en büyük avantajı, C_2 kondansatöründen dolayı temel frekansta empedansının artmasına karşılık bu frekansta kayıpları önemli ölçüde azaltılmış olmasıdır.

C tipi yüksek geçiren sönümlü filtre; bu filtrenin filtreleme performansı, ikinci ve üçüncü derecen filtrelerin filtreleme performansı arasındadır. Temel avantajı, C_2 ve L seri olarak bağlandığından temel frekansta kayıplarının düşük olmasıdır. Bu tip filtreler, temel frekanstaki sapmalar ve elemanların değerlerinin zamanla değişmelerine karşı oldukça hassastır.

Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde elemanların seçimi tek ayarlı filtrelerdeki gibi yapılır. Ancak, yüksek geçiren sönümlü filtrelerdeki direnç değerini hesaplayabilmek için kalite faktörü adında bir eşitliğin tanımlanması gerekmektedir. Bu eşitlik,

$$K = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (7.5)$$

şeklindedir. Burada;

K: Kalite faktörü (0,5 ile 2 arasında sabit bir katsayı),

R: Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılacak direnç değeri (Ω),

X_L : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan endüktif reaktans değeri (Ω),

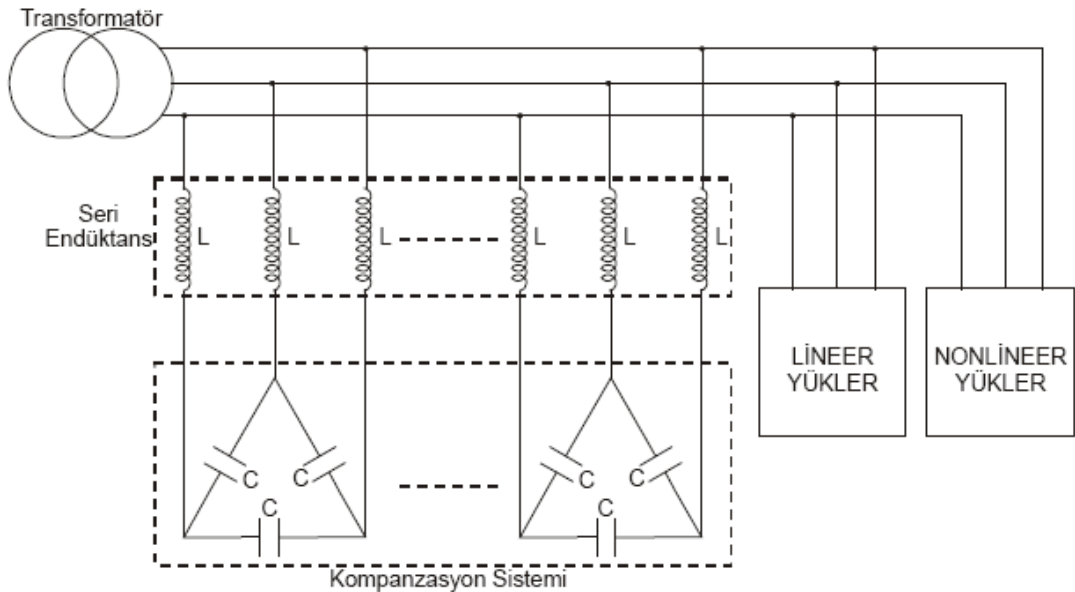
X_C : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan kapasitif reaktans değeridir (Ω).

Yüksek geçiren bir filtrenin frekans-empedans ilişkisi Şekil V.8’de verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki filtre belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans göstererek yüksek mertebeli harmoniklerin sistemden uzaklaşmasını sağlamaktadır.

7.6 Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak

Bu yöntem harmonikleri önlemede en etkisiz yöntemlerden biridir. Ancak en ucuz ve en kullanışlı olanıdır. Bu yöntemin prensip şeması Şekil 7.8’da verilmiştir.

Transformatör



Şekil 7.8. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak (Sucu M., 2003).

Harmoniklerin, elektrik enerji sistemlerindeki gözle görülen en büyük etkisi kompanzasyon sistemleri üzerinde meydana gelmektedir. Harmonikler kondansatörlerin kapasitesinde değişmelere yol açmakta ve ömürlerini azaltmaktadır. Bu etkileri azaltabilmenin en pratik ve en ekonomik yolu kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamaktır. Böylece, harmonikli akımlara karşı seri endüktans sayesinde yüksek empedans gösterilerek kompanzasyon sistemine geçmesi önlenmekte ve bu seri endüktansla kompanzasyon sisteminin kapasitansı bir filtre görevi görerek harmoniklerin etkinliğini azaltmaktadır.

Bu sistemler tesis edilirken seçilecek olan endüktanslara, her firmanın kendi endüktansları için hazırladığı tablolara bakılarak karar verilmektedir. Bu seçim için bazı kriterler vardır. Bunların en önemlisi p faktörüne karar vermektir. Bu faktör;

$$P = \frac{X_L}{X_C} \quad (7.6)$$

eşitliğinden belirlenmektedir. Burada;

X_L : Kompanzasyona seri bağlanacak olan endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansı (Ω),

X_C : Kompanzasyon sisteminin temel frekanstaki kapasitif reaktansıdır (Ω).

P faktörü sistemde etkin olan harmonik derecesine göre seçilmelidir.

Örneğin;

sistemde 3. harmonik baskın ise bu sistemi 189 Hz de rezonansa getirecek (endüktans ve kompanzasyon sistemi arasındaki seri rezonans) p değeri %7 olan endüktanslar seçilmelidir, sistemde 5. harmonik baskın ise bu sistemi 210 Hz de rezonansa getirecek p değeri %5,67 olan endüktanslar seçilmelidir. Bundan maksat, örneğin 3. harmoniği baskın olan sistemde sistemi 3. harmoniğin frekansı olan 150 Hz de rezonansa getirirsek bu durumda 3. harmoniğin bütün genliği kompanzasyon sistemine akacaktır, buda kompanzasyon sistemine zarar verecektir. Bu yüzden sistem, sistemde mevcut olan baskın harmoniğin frekansına yakın frekanslarda rezonansa getirilmekte ve böylece sistemde baskın olan harmoniğin genliği önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu, baskın olmayan diğer harmonik mertebeleri üzerinde de etki göstereceğinden sistemdeki THD seviyesi önemli ölçüde düşecektir.

Yukarıda bahsedilen, 3. harmonik için 189 Hz, 5. harmonik için 210 Hz değerleri zamanla

uygulamadan kazanılan tecrübelerden elde edilmiş verilerdir.

Çizelge 7.1’de Hilkar Elektroteknik Ltd. Şti.’den alınan kompanzasyon sistemi için endüktans seçim tablosu verilmiştir.

Kompanzasyon sistemine seri bağlanan endüktanslar, kompanzasyon uçlarındaki gerilimin bir miktar yükselmesine sebep olmaktadır. Bunun sebebi, kompanzasyon sisteminden akan akım sınırlandırıldığından azaldığı için uçlarındaki gerilim yükselecektir (gücün sabit kalmak istemesinden dolayı). Bu yüzden sistem için seçilen kapasitanslar şebeke geriliminden daha büyük gerilimlere dayanıklı olmalıdır. Bu;

$$U_C = \frac{U}{1 - p} \quad (7.7)$$

ile hesaplanabilir. Burada; U_C : Kapasitans gerilimi (V), U : Şebeke gerilimi (V), p : Denklem de tanımlanan sabit değer.

Çizelge 7.1. Kompanzasyon Sistemine Seri Bağlanacak Endüktanslar İçin Seçim Tablosu

Kondansatör Gücü (kVAR) 50 Hz.			Kondansatör Kapasitesi (µF)	Bobinin Endüktansı (mH)		Nominal Akım (A)	Reaktörün Gücü (W)
400 V	440 V	525 V		p=%5,67	p=%7		
5	6	9,6	3x33	6,12	7,66	7,65	50
10	12	17,2	3x66	3,06	3,84	15,3	65
15	18	25,8	3x89	2,04	2,56	23	76
20	24	34,4	3x133	1,53	1,92	30,6	100
25	30,2	43	3x166	1,22	1,53	38	130
30	36,3	51	3x186	1,02	1,28	46	140
40	48,4	68	3x266	0,76	0,96	61	150
50	60,5	86	3x333	0,61	0,77	76,5	160

Şebeke gerilimi 400 V olan bir sistemde p değeri %5,67 olan bir endüktanslar seçilmişse, bu durumda kapasitansların gerilimi 425 V seçilmelidir. Ancak, 425 V ’da çalışabilecek şekilde seçilen kapasitanslar üzerlerinde yazılı olan reaktif gücü bu gerilim altında verebilirler. Eğer kapasitanslar daha düşük gerilim ile çalışırlar ise yeni güçleri, ile hesaplanmalıdır. Burada;
 Q_1 : Kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi altında üreteceği reaktif güç (VAR),
 Q_2 : Gerilimin değişmesi sonucunda kompanzasyon sisteminin üreteceği reaktif güç (VAR),
 U_1 : Kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi (V),

U_2 : Değişen gerilimin değeridir (V).

Ayrıca, kompanzasyon sistemi seri bağlı reaktörlerin tükettiği

$$Q_2 = \left(\frac{U_2}{U_1} \right) \cdot Q_1 \quad (7.8)$$

reaktif güç kadar daha az reaktif güç sisteme verecektir. Burada;

Q_L : Seri endüktansların tükettiği reaktif güç (VQr),

I : Seri endüktans üzerinden akan akım (A),

X_L : Seri endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansıdır (Ω).

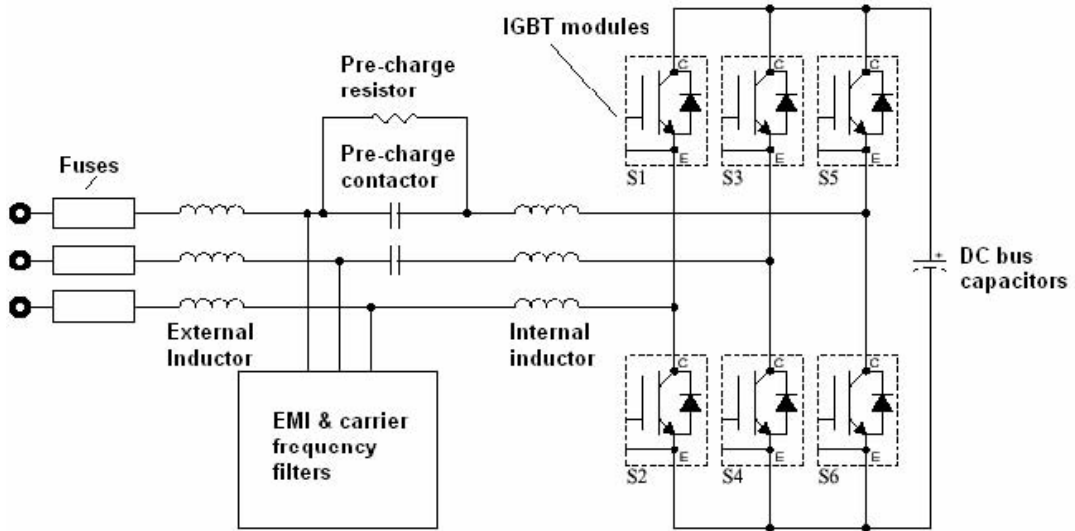
8. GENİŞBANT AKTİF FİLTRE ve UYGULAMASI

Lineer olmayan ekipmanların kullanımıyla elektrik dünyası biraz daha karmaşıklaşmaktadır. Birçok lineer olmayan yüklenme elektriksel problemlere neden olmaktadır (flikler harmonikler ve düşük güç faktörü geleneksel çözüm yöntemleri ile giderilememektedir).

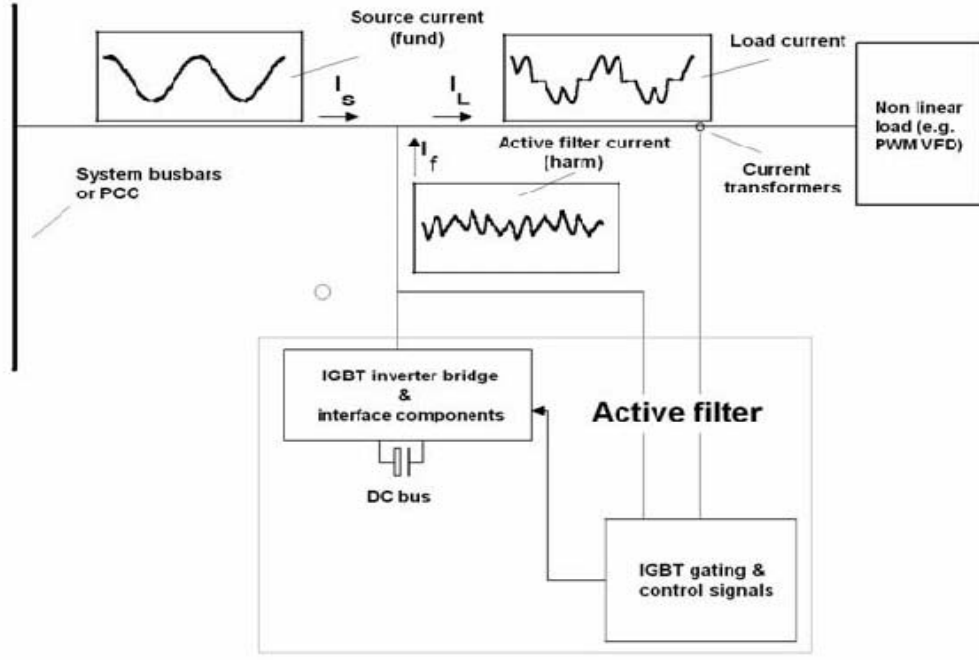
Aktif harmonik filtreleri problemlere ve şaşırtıcı çözümleri ile yeni bir perspektif getirmiştir. Burada iki adet temel lojik dizayn vardır. Sadece bir tanesi uygulamalarda süratli etkin kontrolü sağlamaktadır.

Aktif harmonik filtreler 90 lı yılların ortalarından sonra tanıtıldı ve son birkaç yıldır benimsendi. Teknik yönden pasif L-C filtrelerine, trafo tabanlı kaydırma tekniklerine ve çok darbeleri sürücülerine göre tatminkâr ancak maddi anlamda pahalı kalmasına rağmen bize uygun çözümler sunmaktadır.

Rezonans oluşma ihtimali pasif filtreler halen problemdir. Aktif filtreler AC PWM (değişken frekanslı sürücüler) güç dönüştürme teknolojileri gibi karışıktırlar. (bakınız Şekil 8.1. ve 8.2.).



Şekil. 8.1 Basitleştirilmiş Genişbant Aktif Filtrenin Şekli (Evans I., 2007).



Şekil 8.2. Şönt Bağlı Tipik Geniş Bant Aktif Filtrenin Blok Diyagramı (Evans I., 2007).

Aktif filtreler pahalı olabilir. Ancak aktif filtre tipine ve kurulu sisteme bağlı olarak tatminkâr performans sağlarlar, toplam akım bozulmalarını (THDi) %5 in altına indirebilirler.

Bugün aktif filtreler sistemlerin esas ihtiyaçları üzerinde pek düşünülmeden tüm uygulamalarda kullanılmaktadır. Aktif filtreyi anlamamış, onun neyi yapıp neyi yapamayacağını bilmeyen danışmanlar ya da kişiler için uygulamalarda kullanabilecekleri kolay çözümdür. Onlar için aktif filtre tüm güç sistemlerindeki harmonik ve güç faktörü hastalıklarında kullanıma hazır çözümdür.

Bir diğer konu da aktif filtre lineer olmayan yüke bağlanması durumunda ne olacağının anlaşılamamasıdır. Aktif filtrenin %1in altındaki düşük empedans değerinden dolayı harmonik akımlarının büyük kısmı trafo ya da jeneratöre göre aktif filtreye doğru akacaktır. Bu yüzden harmonikli ölçülen akıma göre değil devre akımının geçeceği temel alınarak tasarlanmalıdır. Aktif filtre kurulduğu zaman harmonik akımı ve bununla ilişkili olarak (THDv) toplam harmonik gerilimi artışlarının belirli limitlerde tutulması için önlem alınmalıdır. Bu önlemler lineer olmayan yüklenmelerde yetersiz reaktansı karşılamak için ek AC hat reaktansı içerebilir.

Aktif filtreler aynı zamanda reaktif akım kompanzasyonunu sağlamaktadır. Yer değiştirmiş güç faktörünü gerçek ve doğru güç faktörüne getirirler.

Başarının derecesi büyük ölçüde şu üç faktörle belirlenir. Birincisi uygulama ve ne beklendiğidir. (Bunlar karakteristik olmayan harmonikler ve/veya inter-harmoniklerin

davranışı ya da silikon kontrollü doğrultucunun çentiklerin azaltması gibi). İkincisi aktif filtrenin güç sistemine dahil edildiğinde yükseltici trafoya olan mesafeleri çok uzun ise gerilim bozulması problem olabilir. Sonuncusu ise kullanılan aktif filtrenin tipi dolayısıyla cevap verme sürati özellikle çok sayıda yük olması ve bu nonlinear yüklerin dinamik olması sebebiyle aşırı önem kazanmaktadır. Bundan sonraki bölümde iki farklı tipe ayrılacaktır.

8.1 SEÇİCİ FFT AKTİF FİLTRE ile GENİŞ BANT AKTİF FİLTRE PERFORMANS FARKLARI

Aktif filtrelerdeki bu temel iki lojik yürütme tipi analog ve dijitaldir. Her ikisi de yük akımlarını akım trafoları yardımıyla ölçmektedir. Bu lojik farklılıkların performans olarak nasıl sonuçlar getireceğini inceleyelim.

Birçok lojik sistem her bir harmonik için tepe değerini faz açılarını FFT (fast fourier transform) ile hesaplamaktadır. Bu analog akımın dijitale dönüşümü için 3 adet devreye ihtiyaç vardır. Sonra operatörün seçimlerine göre enjekte edilecek akım hesaplanmaktadır. Son adımda ise bu dijital bilgi tekrar analog bilgiye dönüştürülerek akım enjekte edilir. Bu süreç her bir hesaplama için 40 mili saniye sürede tamamlanmaktadır.

Bazı FFT ürünleri 15–20 adet harmonik ölçümü iptal edilerek 50. harmoniğe kadar ölçebilmektedir. Bu harmonik filtrenin performans kapasitesini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle 5% toplam harmonik akımından farklı değerler elde edilecektir.

Analog metodta akım trafosundan gelen veriden temel frekans içeriği filtre ile ayrılır ve geriye kalan eğrinin tersi AC devreye enjekte edilir. Bu gerçek zamanlı uygulama süreci $\frac{1}{2}$ -1 periyotta <16 milisaniyede tamamlanır. Lojik her harmonik seviyesi için ayrı ölçüm yapmaya çalışmaz. Lojik tamamını görür ve devreye akım enjekte eder. Bu ölçüm şekli geniş bant lojik sistem olarak adlandırılır.

Geniş bant lojiğin ek bir faydası da inter harmonikleri de yok etmesidir. Gürültüleri azaltmak için ters gürültü üretmeye üreterek tüm gürültüleri yok ediliyor. Geniş bant lojik FFT lojiğe kıyasla harmonik seviyesini daha aşağı seviyelere daha kısa sürede getirebilmektedir.

Sonuçta; geniş bant lojiğin bir ek özelliği de ani akım desteğidir. Geniş bant lojik yük değişimlerini 40 mikro saniyede tespit eder ve 100 mikro saniye içinde reaktif akım ihtiyacını karşılamak için akım enjekte eder. Bu şimdiki örneklerde kanıt olacaktır.

8.2 GENİŞBANT AKTİF FİLTRE UYGULAMASI

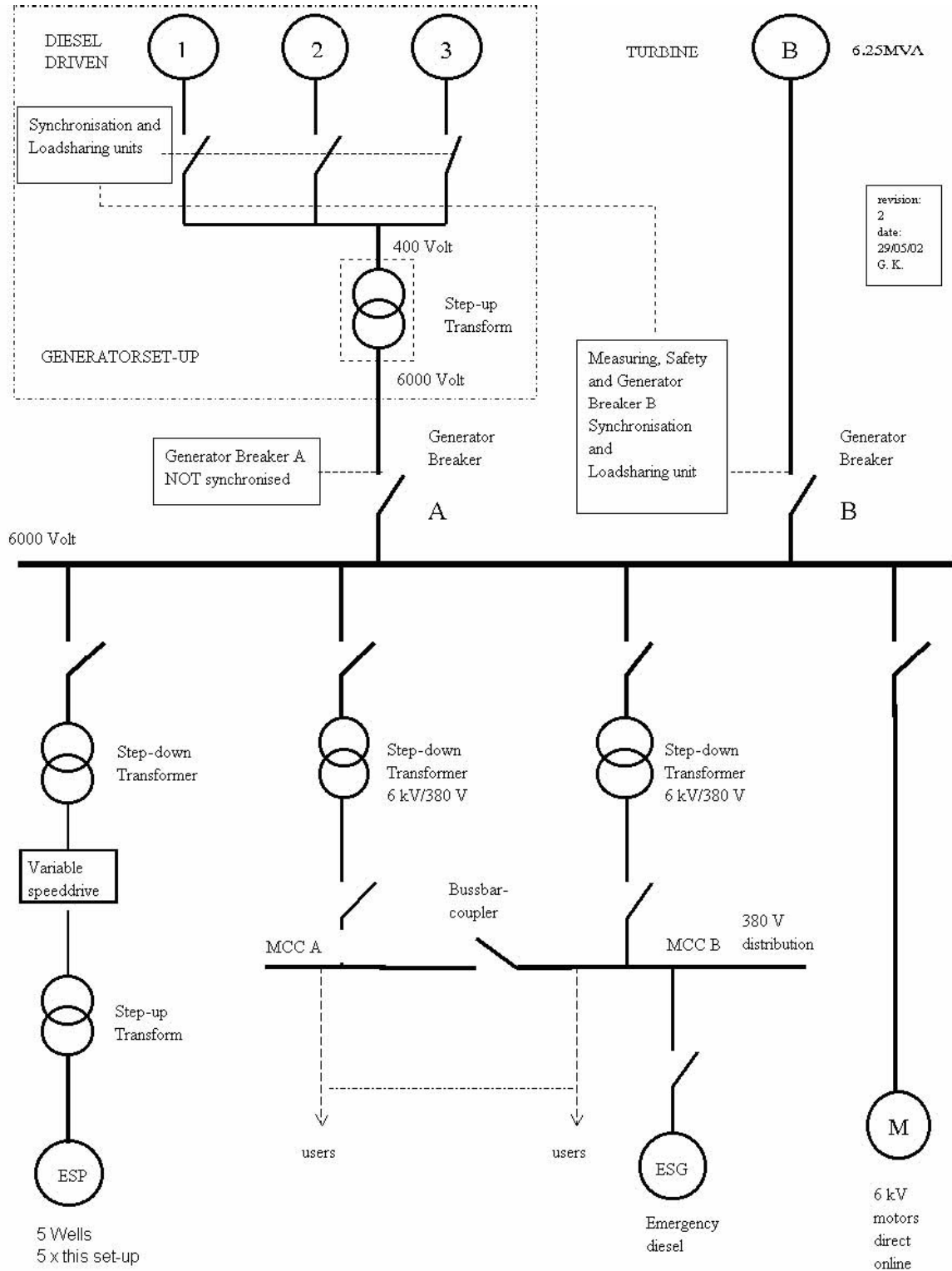
Aktif filtre tipi seçiminin hayatı öneminden yukarıda bahsedildi. Şimdi gerçek bir uygulama örneğini inceleyelim.

Hollanda Petrol Platformu; Yerdeğiştirmiş Güç Faktörü ve Harmonik Kontrol :

Hollanda'nın deniz kıyısında petrol platformunun operatörü kuvvet azaltımına başladıklarında birçok operasyonel problemle karşılaşmıştır. Platform yaklaşık 20 yıldır işletilmektedir. 2002 senesinde yaklaşık günlük üretim miktarı 2000 varildir. (Evans I., 2007)

İlk konfigürasyon 2 adet 6.25 MVA lık paralel gaz türbinli jeneratörü içermektedir. Yükler dalgıç tipi 5 adet 6kV 600kW pompadan (ESP), 2 adet 6kV 700kW tahliye pompasından, 400kW 6kV su enjeksiyon pompasından ve aydınlatma lojman ihtiyaçları ve ofise için 800 kVA lık yükler mevcuttur. Tahliye ve su enjeksiyon pompaları direk olarak 6kV AC hattına bağlıdır. Aydınlatma ve lojman ve ofise yükleri tek fazlı olup 380 V dur. 5 adet dalgıç pompa ise 480VAC değişken hızlı (variable speed drives) (VSD) ile sürülmekte ve sürücü için 6.6kV/480V trafo kullanılmaktadır. Bu sürücü 16 yıl önce pompa etkinliğini artırmak için kurulmuştur.

Platformda jeneratörlerden birisi, 3 adet pompa, su enjeksiyon pompası ve tahliye pompası çıkartılmıştır. Geriye kalan tahliye pompası 6kv 700kW dan 300kW 380V a düşürülmüştür. Bu sonuçta 3MVA lık yükü 6.25 MVA lık bir tane jeneratör beslemeye başlamıştır. (bakınız Şekil 8.3). (Evans I., 2007)



Şekil 8.3 – Petrol Platformu Tekhat Diagramının Sahadaki Kapasite Azaltımından Sonraki Durumu

Değişiklik yapıldıktan sonra aydınlatma sisteminde sürekli fliker oluşmaya, tınlaşımaya neden olan mekanik rezonans problemi ve kapasite düşürülmesinden dolayı finansal kayıplar ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu problemler pompalardan bir ya da her ikisi birlikte çalışmaya başladığında ortaya çıkmaktadır. (Evans I., 2007)

Not: Tınlaşım (shiver): Mekanik rezonans mekanik yapının frekansı ile çakıştığı zaman titreşimdir.

Site analizi gerçekleştirilmiştir. Jeneratörün yüklenmesi 3MVA olup bu değer jeneratör gücünün %50 sinden de azdır. Şu bilinmektedir ki; jeneratör yüklenmeye göre gereğinden fazladır ve dairesel dönüş problemleri oluşmaktadır. Gerilim salınımları 30Hz olarak ölçülmüştür.

İlk olarak jeneratörün otomatik gerilim regülâtörü (AVR) araştırılmıştır. Regülâtörün regülâsyonu sağlayamadığına ve jeneratörde bundan dolayı kararsızlık meydana geldiği düşünülmüyordu. Yeni teknoloji AVR konulmuştur. Ancak tüm çabalara rağmen geliştirilmiş AVR ile de jeneratörün durumu düzeltilememiştir. Mekanik rezonans ve fliker AVR değişimine rağmen devam etmektedir.

Dalgıç pompalarının giriş güçleri kontrol edilmiştir. K8 ve K4 için sırasıyla 9% ve 11% THD(v) ölçülmüştür. THD(i) ise 29% ve 30% 'dır. Yer değiştirmiş güç faktörü (DPF) sırasıyla K8 ve K4 un SCR ile kontrol edilmesinden dolayı 0,84 ve 0,85 olarak ölçüldü. Bu sonuçlar açık olarak 6kV hattında yüksek harmonik bozulmalar olduğunu işaret etmektedir.

Jeneratör üreticileri AVR nin regülâsyonu THD(v) nin %10–15 arasında kalması ve yer değiştirmiş güç faktörünün (DPF) orta yüklenme de 0,75 olması durumunda sağlayabildiğini söylemişlerdir. (tam yüklenme de 0,8)

AVR, bu iki parametrenin birisi veya ikisi de birden sınırları aştığında dolayı hat gerilimini korumaya çabalıyordu. İlk reaksiyon hat gerilimindeki salınımlar oluyordu. Yüklerin hat gerilimdeki değişikliklere cevabı da toplam kVA yı karşılamak için farklı akım akışları ile oluyor.

Bu sebeple AVR daha fazla caba sarf ediyor. Bu noktada gerilim ve akım salınımları döner yüklenmelerde mekanik rezonansa sebep oluyor. Mekanik rezonans mekanik yapının frekansı ile çakıştığı zaman titreşime neden olmaktadır.

Gerilim dalgalanmalarını azaltmak için THDv düşürülmeli veya DPF yükseltilmelidir veya her ikisine ayrı ayrı bağlıdır. Yüklenme durumuna göre bu her iki parametrenin iyileştirilmesiyle gerilim salınımları dolayısıyla mekanik rezonans ile fliker problemi de kalmayacaktır. Kazara site operatörü 6kV motorlardan birisinin başlamasında veya VSD nin yavaşlamasında 1 ile 2 hertz arasında fliker ile rezonansın derhal durduğunu fark etmiştir.

ÇÖZÜM: Bunun için en iyi çözüm reaktif akım kontrolü ile (DPF yi iyileştirmek için) harmonik düzeltmenin (THDv yi azaltmak) kombine olarak uygulanmasıdır. Bu amaç jeneratörün az yüklenmesi ve dolayısıyla AVR nin dizayn şartlarının altında kullanılması ve harmoniklerin sınırlandırılmasıdır. Çeşitli yöntemlerden birisi pasif filtreyi inceleyelim.

Pasif L-C filtresi başlarda düşünülmüştür, sistemdeki uyumluluk ve aydınlatmadaki aşırı reaktif akım ve rezonans olasılığından ötürü ciddi olarak takip edilmemiş vazgeçilmiştir.

Aktif geniş bant filtreler aktif filtrenin yüklenmelerde reaktif ve harmonik akım ihtiyaçlarında gerekli miktarı kesin olarak enjekte etmesinden dolayı düşünülmüştür. Aktif filtre AC hattında yüklenmedeki gerekli harmonik akımı ve reaktif güç ihtiyacını kesin belirler. (Mesela temel olmayan bileşenleri harmonik kademelerinden ayırmaz). Jeneratör reaktif ve harmonik akım yüklenmelerinden kurtarılmıştır. Bu gerçekten uygulamaların gerektirdiği bir çözümdür.

ESP K8 in harmonik ölçümleri 268 A (rms) harmonik akım olduğunu ve 180 A(rms) reaktif akımın mevcut olduğunu gösterdi. DPF nin 0,95 e düzeltilmesi için jeneratörün uygun bir operasyona ihtiyacı vardır. 0,95 DPF için 73 amper reaktif akım gereklidir. AF için rms olarak bu akımları toplarsak AF nin ihtiyaç duyacağı akım kapasitesinin 278 amper olacağını buluruz (Evans I., 2007).

K4 ESP de 248 amper harmonik akım ve 222 amper reaktif akım ölçülmüştür. 0,95 DPF yi sağlamak için gerekli olan reaktif akım ise 123 amperdir. Bu rms toplamaları 248A harmonik ve 123 amper reaktif akım için 277 amperdir.

Her ESP driveleri için 300 amper geniş bant filtre kurulur. Ek olarak 3%hat reaktörleri AC konverterlerin önüne konulur. Hat reaktörlerinin amacı her tristörü yüksek frekanstan (20khz) korumaktır. Sürücülerden düşük empedanslı aktif filtreden harmonikli akımların akmasını engeller ve doğrultucunun tristöründeki gerilim çentiklerini azaltır.

Düşük empedanslı kaynaklar harmonik akımlar için yüklenmelerde daha fazla harmonik akım akışına sebep olacaktır. Bu akım aktif filtrenin kapasitesini aşabilir ve istenilen sonuçların elde edilmesini engelleyebilir.

SONUÇLAR: K4 ESP için (Şekil 7.12a,b,c) de THD inin seviyesi 30% den 7% ye, THDv ise 11,6% dan 5% e düşmüştür. Buna ek olarak DPF değeri 0,85 den 0,96 ya çıkarılmıştır.

Benzer ölçümler K8 ESP sinde gözlenmiştir. THDi 29% seviyesinden 7% nin de altına düşürülmüştür. THDv ise 9% seviyesinden 4% e gerilemiştir. Bir de DPF değeri 0,86 dan 0,94 e yükseltilmiştir.

Görüldüğü üzere sonuçlar etkileyicidir. Artık fliker problemi de mekanik rezonans da yoktur. Operatör sonuçlardan memnundur.

Aynı derecede bu değişiklikler operatörün ESP sürücülerinin hızını 2 hertz kadar çıkartmasına izin vermiştir. Bu pek fazla gelmeyebilir ama günlük ünite 2000 dolarlık bir kazanç

sağlanmış olur. Bu işin bedeli 2 adet 300 amper aktif filtre ve 2 adet 3% hat reaktörü yaklaşık 150.000 \$ dir. Operatör bu paranın 75–80 gün sonra geri kazanacağı için halinden memnun.

Beklenenin aksine, platform kapatılmamıştır ve iki adet olan ESP beşe yükseltildi ve üretim finansal getiri ile santralin çalıştırılma şansı arttı. Bu müşteriye bağlı olarak 2 adet geniş band 300 A aktif filtre uygulanabilir. Gerçekten her yeni 600kW ESP için 300A aktif filtreye gerek olmadığı halde bütçe ayırdılar. İlk orijinal aktif filtreler hem reaktif akım ihtiyacını hem de harmonik akımı azaltmak için yeterliydi. (Evans I., 2007).

Denizdeki platformlar üzerlerindeki jeneratörler ile eşsiz elektrik sistemine sahiptir. Yükler genelde AC ve DC motor olup jeneratörün harmonik yüklenmesine sebep olur. Bu yüklerden bazıları tristör doğrultmasını kullanır. Bu da jeneratörün reaktif akım ihtiyacına katkıda bulunur. Her ikisi de jeneratörlü kullanılması açısından zararlı olabilir.

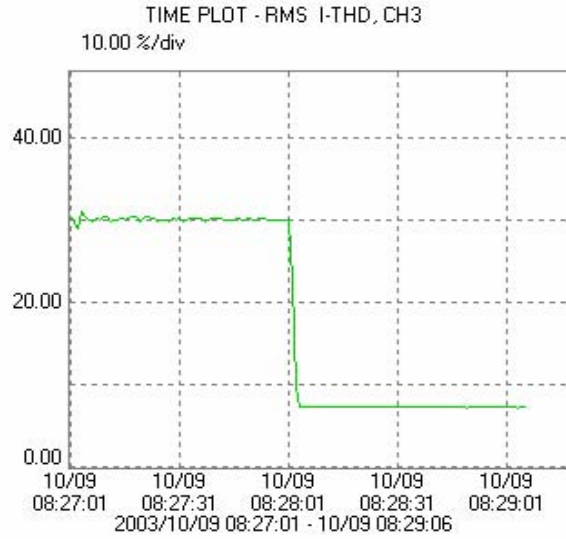
Aktif harmonik filtre harmonikleri ve DPF yi düzeltmek için birçok avantaj sunar. Aktif filtre tüm non lineer yüklerde harmonikleri azaltmak için kullanılabilir. Ancak kullanılan harmonik filtrenin tipi çalışma hızı ve tüm harmonik kademeleri için uygulanabildiği oldukça önemlidir.

Aktif filtreler geri ve ileri DPF için kullanılabilir. Aktif filtre sadece harmonik ve DPF için gerekli akımı enjekte eder. Çoğu aktif filtre elektrik sistemine zarar vermeden DPF yi düzeltmek için programlanabilir. Olası bir aksaklık durumunda tehlikeyi azaltmak için aktif filtre devreye paralel bağlanır. Böylece yükler çalışmaya devam eder. Genelde aktif filtreler diğer çözümlere göre daha küçük yer tutarlar. Ayrıca aktif filtreler daha başka bir yere tekrar monte edilebilirler.

Geniş bant aktif filtreler jeneratörün görevini doğru yapabilmesi için DPF ve harmonik problemlerini çözer. Fliker ortadan kalkar. Harmonikler ve DPF iyileştirilir. Mekanik rezonans ve platform yapısındaki olaylar artık yinelemez. Operatörün öğrendiği üzere aktif filtreler planlanan üretimi gerçekleştirerek sitemin parasını hızlı şekilde amorti eder. Burada aktif filtre optimum çözümü sunar.



Şekil.8.4a - K4 ESP THDv aktif filtreli ve aktif filtresiz durumlar



Şekil.8.4b -K4 ESP THDi aktif filtreli ve aktif filtresiz durumlar

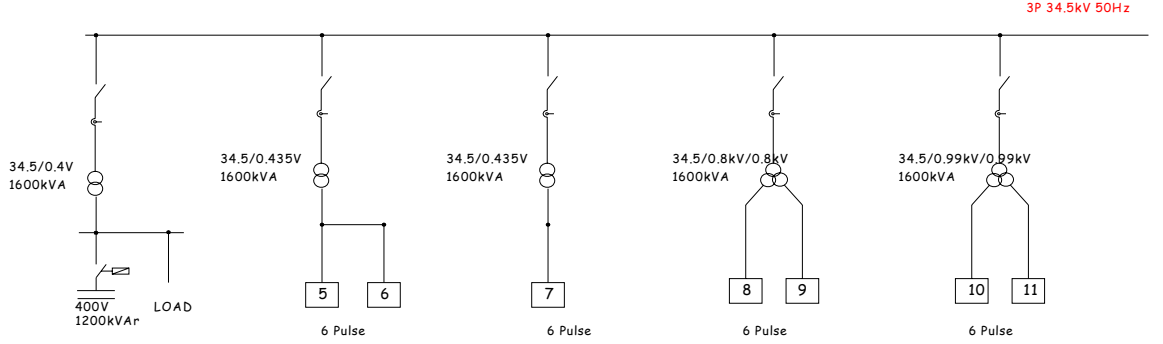


Şekil.8.4c -K4 ESP DPF Aktif Filtreli ve Aktif Filtresiz Durumlar

8.3 MATLAB SIMULASYONU ve GRAFİKLERİ

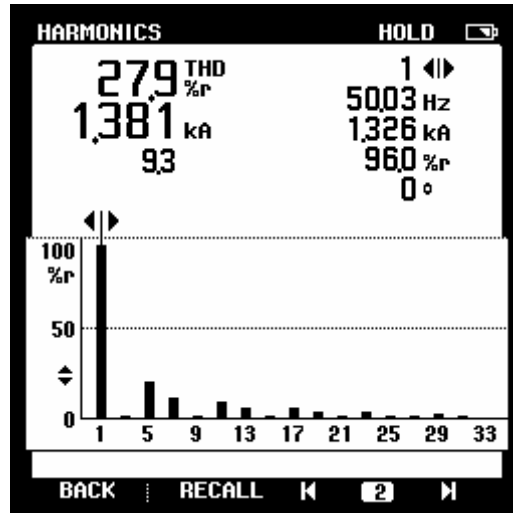
Önceki bölümlerde açıklamaya çalıştığımız harmonik problemini gerçek uygulamalardan alınmış simülasyon değerleri ile mukayese ederek açıklamaya çalışalım.

Yurtiçindeki bir fabrikanın tekhat diagramı aşağıda gösterilmiştir.

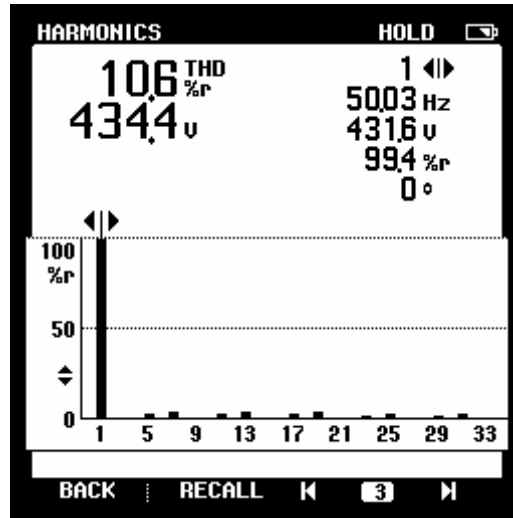


Şekil.8.5 -Tekhat Diagramı

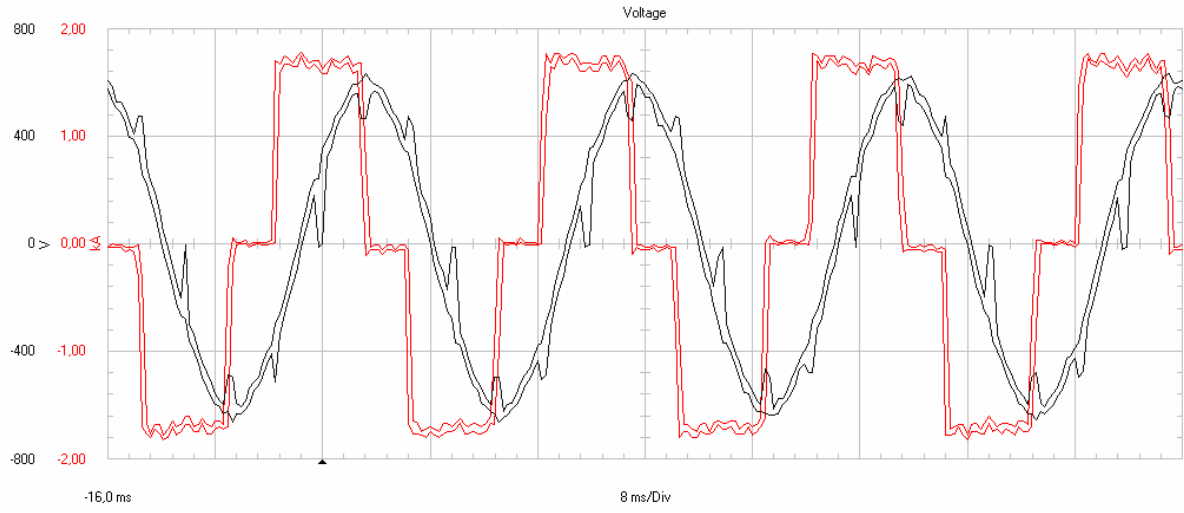
Tekhat diagramında görüldüğü üzere fabrikanın genel ihtiyaçları karşılamak için 1600kVA lık trafosu ve buna ait 1200kVAr lık kompanzasyon bataryası mevcuttur. Onun dışındaki dört adet trafo çeşitli darbeleri sürücüleri beslemektedir. Matlab paket programında simülasyonu gerçekleştirdiğimiz kısım 5ve 6 numaralı sürücülerin bulunduğu kısımdır.



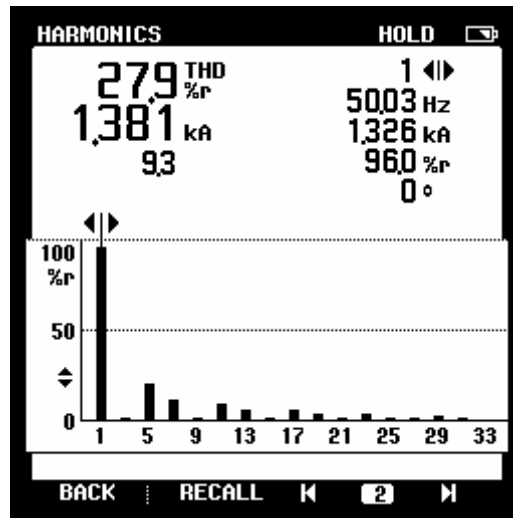
Şekil.8.6 - Trafodaki Akım Harmonik Miktarı*



Şekil.8.7 -5 Trafodaki Gerilim Harmonik Miktarı*



Şekil.8.8 - Trafodaki Akım ve Gerilimin Zamana Bağlı Değişimleri*



Şekil.8.9 - Trafodaki Geçen Akımın Spektrumu*

*Tüm ölçümler Fluke 43B enerji analizör cihazı ile alınmıştır.

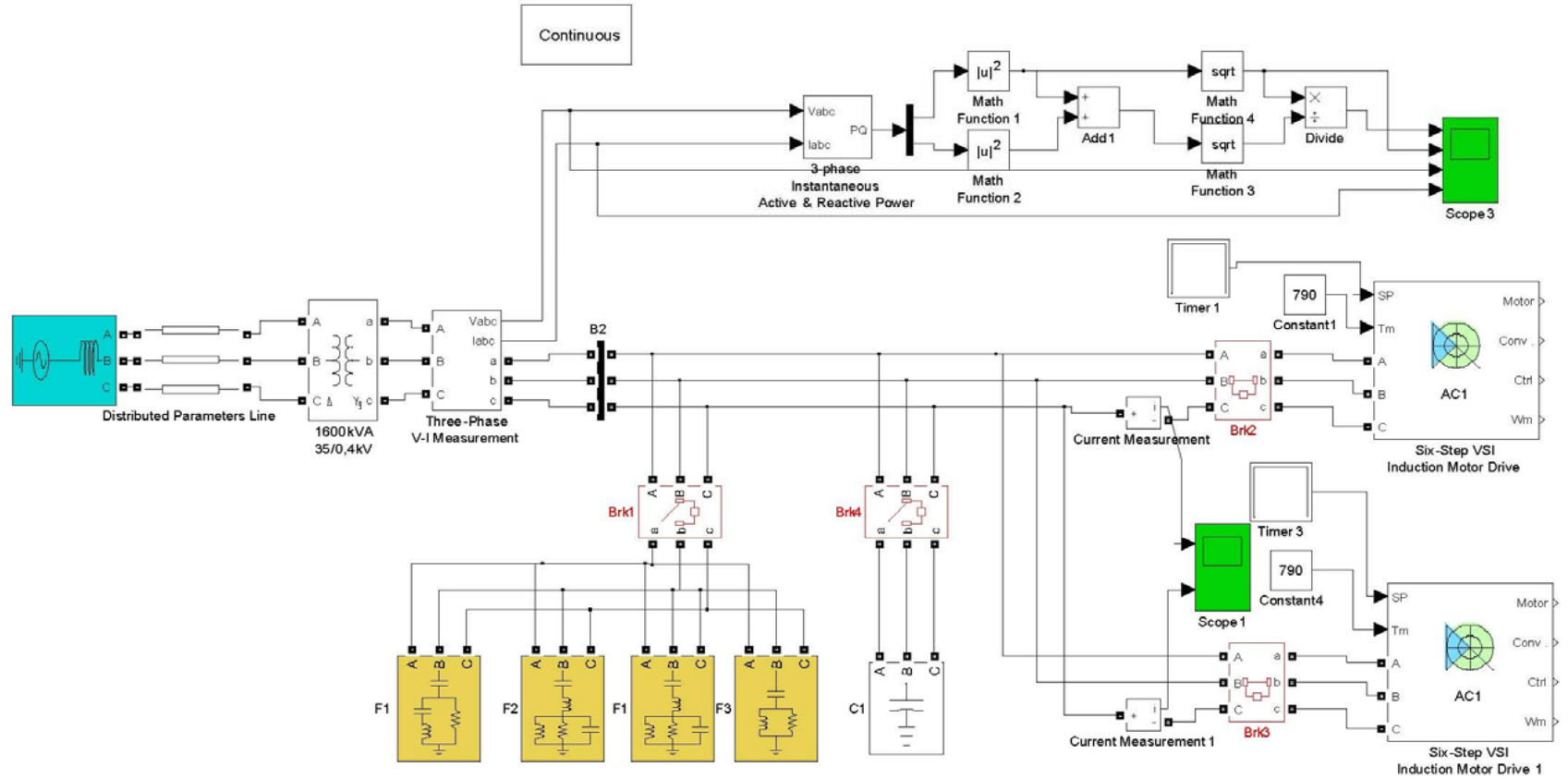
Simulasyonda kullanılan elemanlar şunlardır.

- Orta gerilim (35kV) kaynağı
- 20km lik hat reaktansı
- ΔY 35/0.4kV 1600 kVA Trafo
- 600kVAr lık Kompanzasyon bataryası
- Altı Darbeli AC Asenkron Motor Sürücüsü 500kVA
- Kesiciler ve Multimetre' dir.

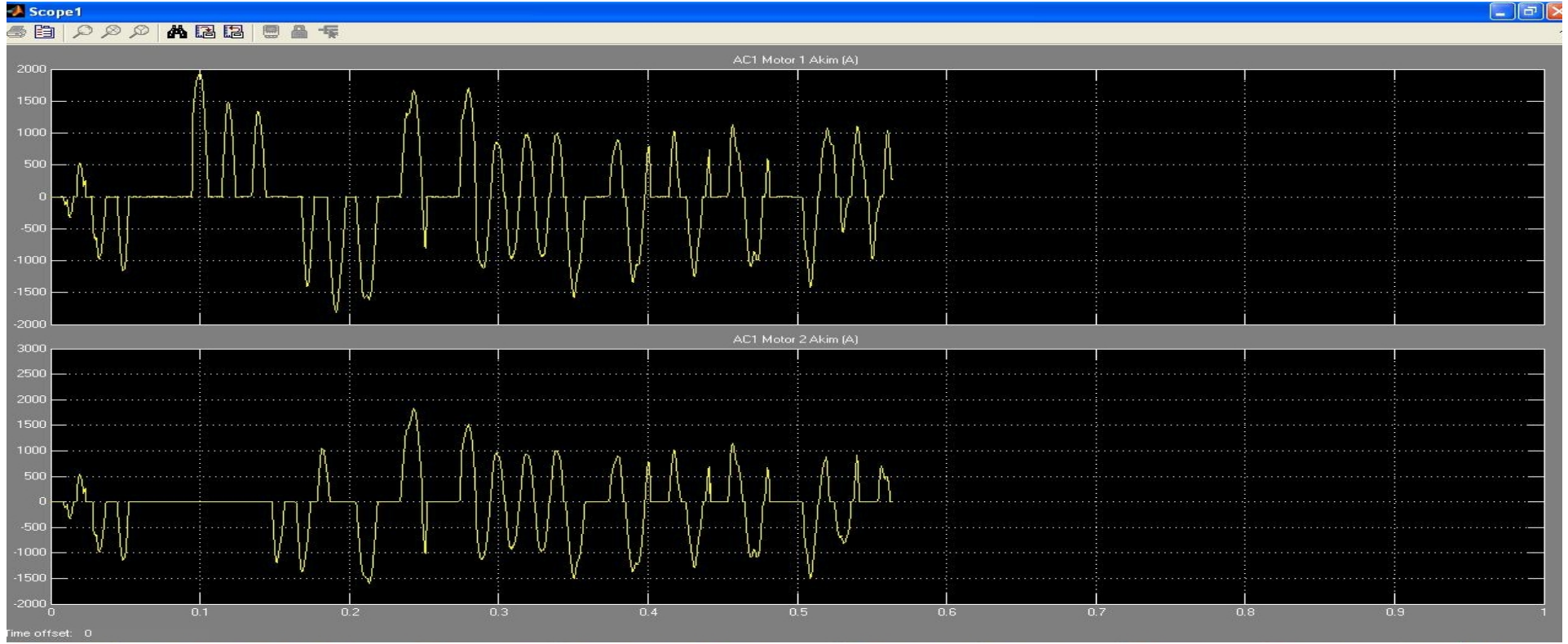
Matlab'ta hazırlamış olduğumuz dosyayı 3 durum için inceledik. İlk durumda iki sürücü de devrededir. Kompanzasyon ve harmonik filtreleme devre dışıdır.

8.3.1 DURUM 1 (SADECE AC SÜRÜCÜLER DEVREDE)

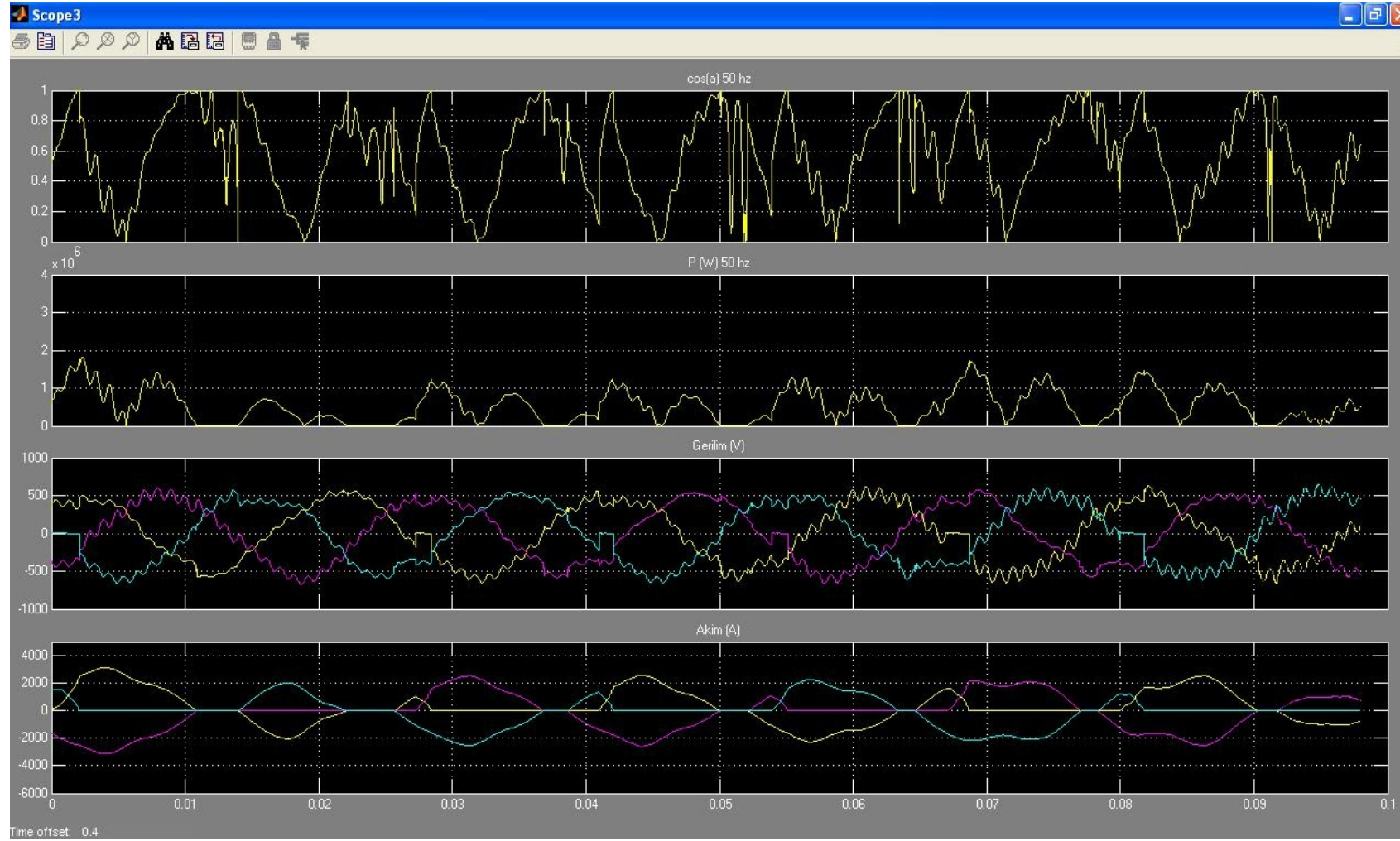
Matlab'ta hazırlamış olduğumuz dosyayı 3 durum için inceledik. İlk durumda iki sürücü de devrededir. Kompanzasyon ve harmonik filtreleme devre dışıdır.



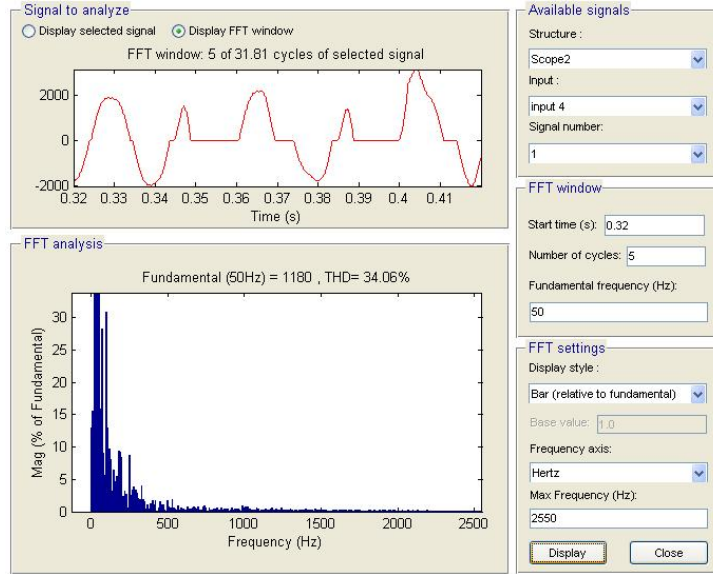
Şekil 8.10 - 1.Durumdaki Simülasyon: 6 Darbeli Her İki Sürücü Devrede Filtreleme ve Kompanzasyon Devre Dışdır.



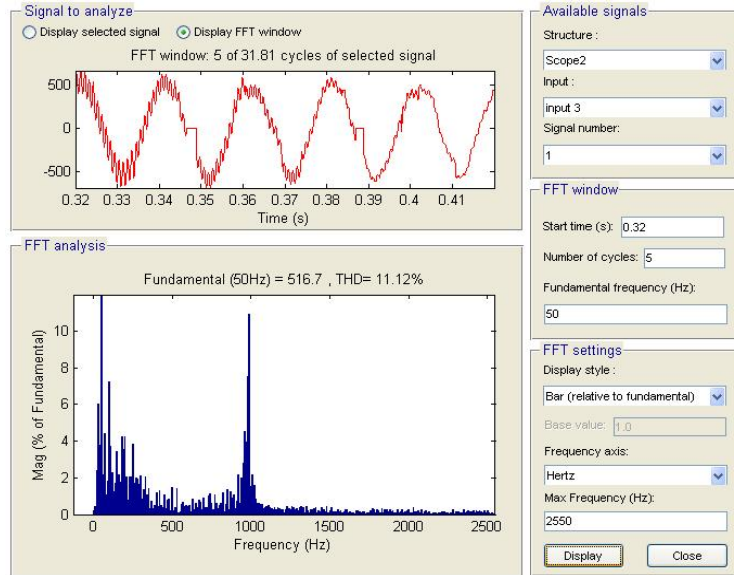
Şekil 8.11 - 1.Durum: 6 Darbeli Her İki Sürücünün Akım Değişimi



Şekil 8.12 - 1.Durum: Sırasıyla $\cos\phi$ -Aktif Güç-Gerilim ve Akımın Değişimi



Şekil.8.13 – Durum1 Akımın Spektrumu



Şekil.8.14 –Durum 1 Gerilimin Spektrumu

Şekil.8.13 da görüldüğü üzere her iki 500kVA lık sürücü devrede iken gerilim harmoniği %11.12, akım harmoniği ise %34.06 olarak ölçülmüştür. Bu değerlere göre gerilimin gerçek değeri;

$$V_{gerçek} = \sqrt{(\%THD_V * V_n)^2 + V_1^2} \text{ formülünden;} \quad (8.1)$$

$$V_{gerçek} = 519.8 / \sqrt{2} V \text{ olarak bulunur.}$$

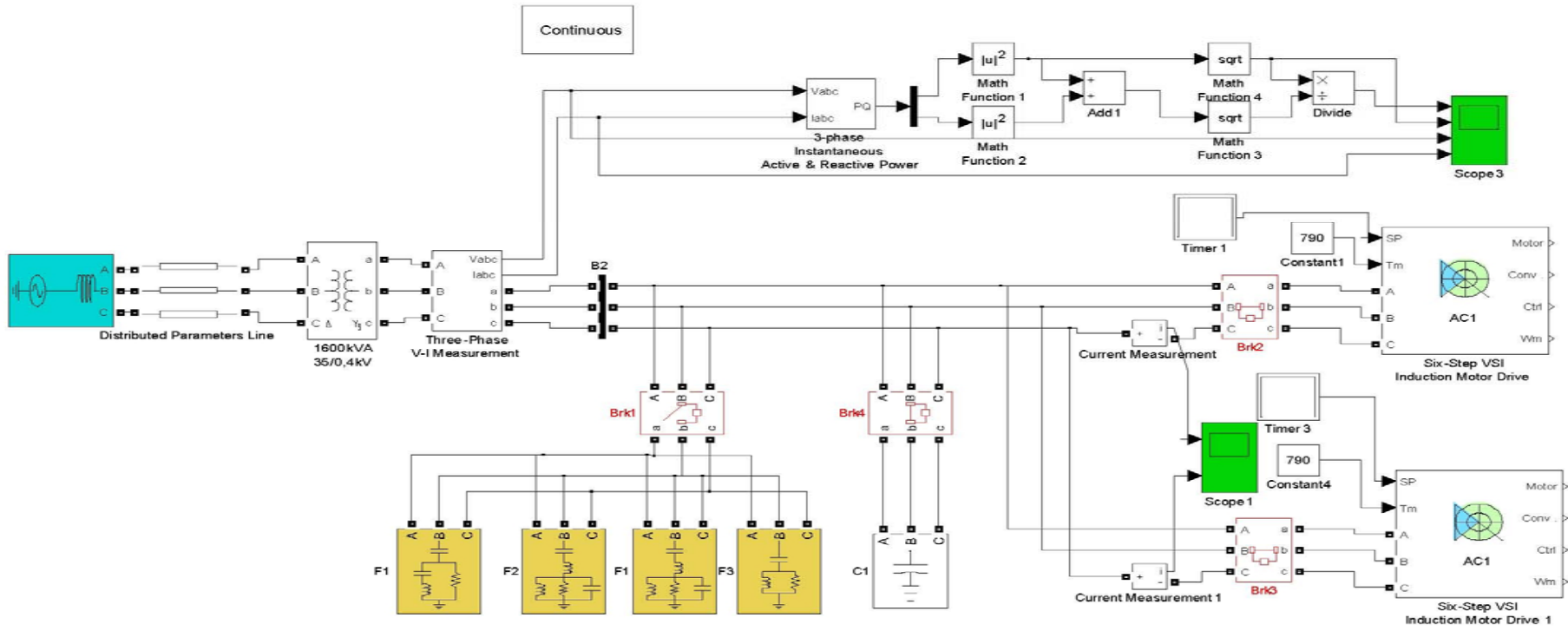
$$I_{gerçek} = \sqrt{(\%THD_I * I_n)^2 + I_1^2} \text{ formülünden;} \quad (8.2)$$

$$I_{gerçek} = 1246.7 / \sqrt{2} A \text{ olarak bulunur.}$$

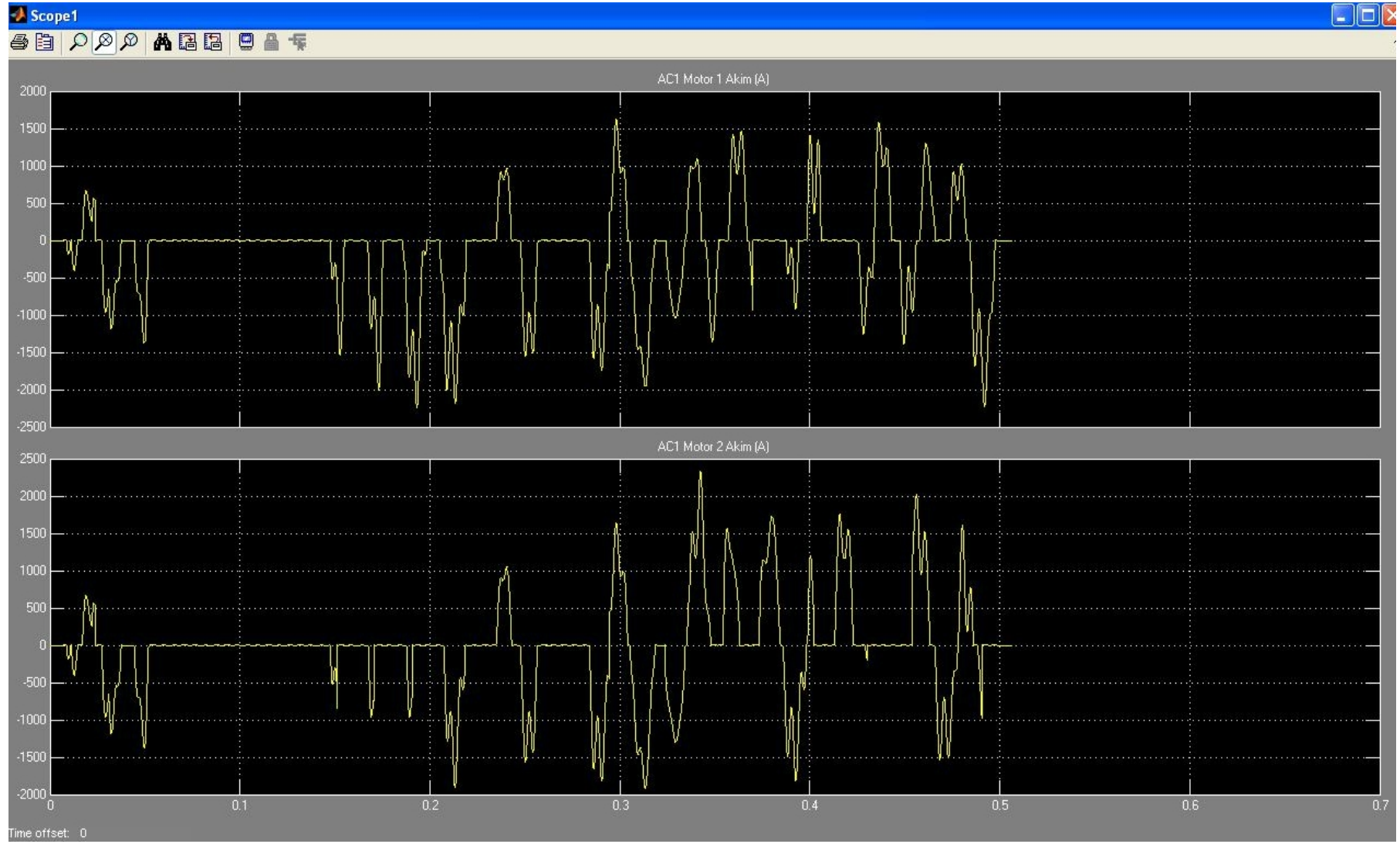
Görüldüğü gibi nominal değerlerden daha fazlası sistemden geçmektedir. Özellikle sürücülerin olduğu devrelerdeki harmonik beklentisi darbe sayısının 1 fazlası ve 1 eksiği olan değerdeki harmonikte fazladır. Yani THD değeri 6 darbeli bir sürücü için 5 ve 7. harmoniklerde yoğunlaşmaktadır.

8.3.2 DURUM 2 (SÜRÜCÜLER VE KOMPANZASYON DEVREDE)

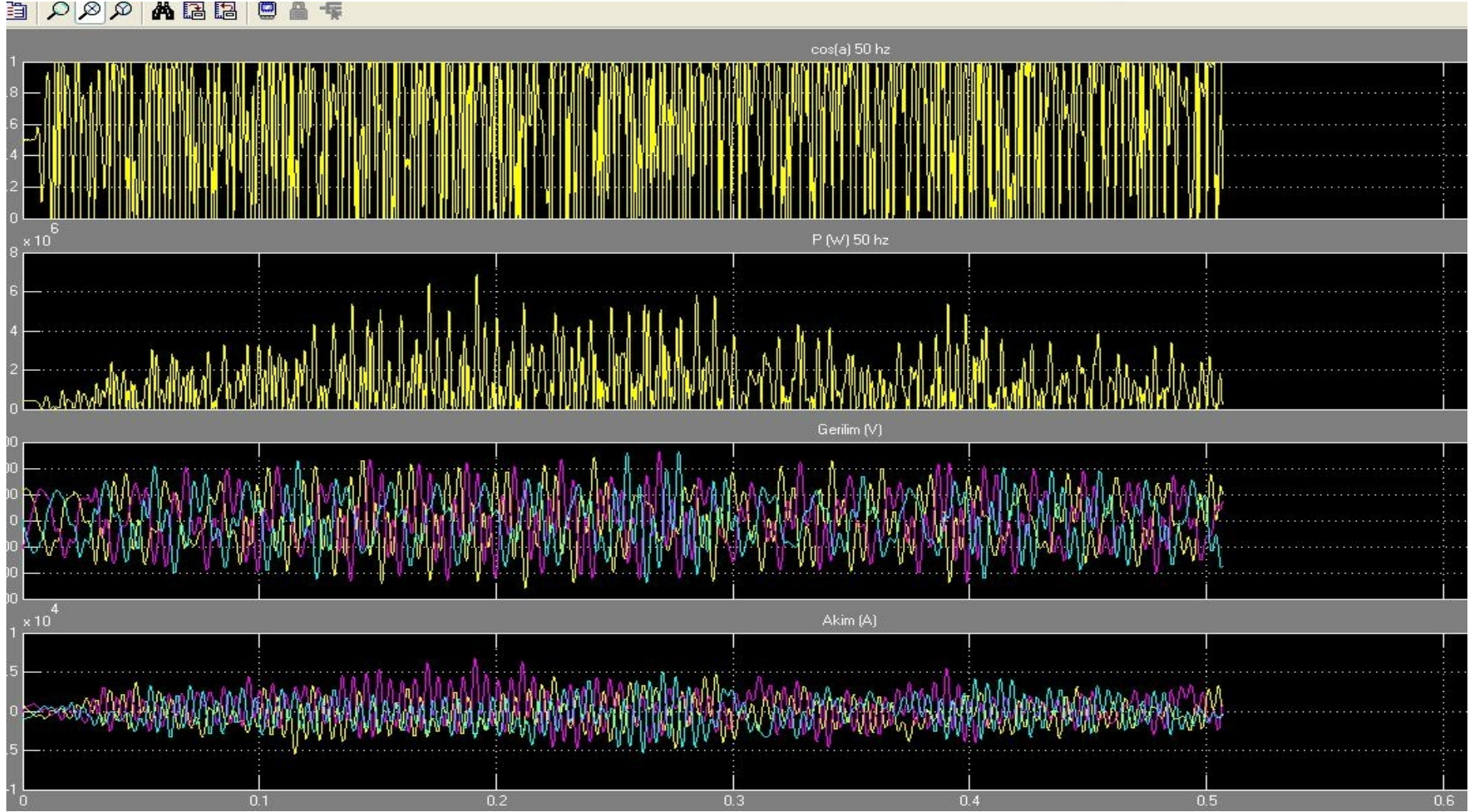
Her iki sürücü ve 600 kVAr lık kapasite devrede, filtrelerin kapalı olduğu simulasyon devresi aşağıdadır.



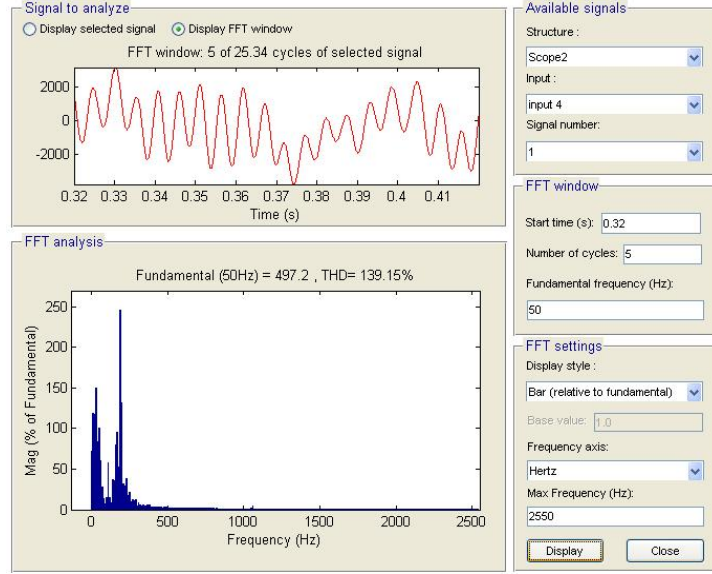
Şekil 8.15 - 2.Durum: 6 Darbeli Her İki Sürücü ve Kompanzasyon Devrede Filtreleme Devre Dışıdır.



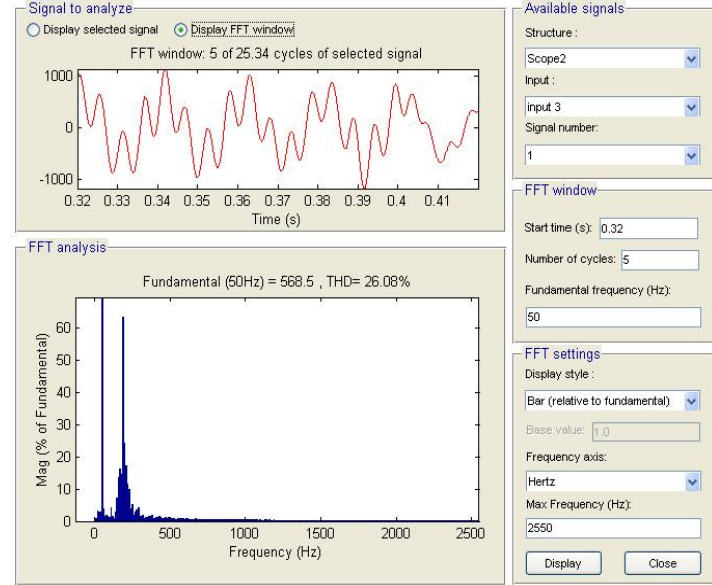
Şekil 8.16 – 2.Durum: 6 Darbeli Her İki Sürücünün Akım Değişim



Şekil 8.17 - 2.Durum: Sırasıyla $\cos\phi$ -Aktif Güç-Gerilim ve Akımın Değişimi



Şekil.8.18 – Durum 2 Kompanzasyonlu Haldeki Akımın Spektrumu



Şekil.8.19 – Kompanzasyonlu Haldeki Gerilimin Spektrumu

Şekil 8.18 ve 8.19 deki grafiklerde görüldüğü üzere harmonik miktarında oldukça fazla artış gözlenirken 50 hz deki akım değerinde düşüş gerçekleşmiştir. Bunu söyle açıklayabiliriz: Sistemdeki yerdeğiştirmiş güç katsayısı düzeltilmiştir. Ancak gerçek güç katsayısı harmonikler yok edilmeden düzeltilmeyecektir. Bu durum 5. bölümde daha geniş olarak açıklanmıştır. Harmoniklerin artmasının sebebi sistemdeki reaktasın frekansa göre değişken olması ile açıklanabilir.

$$V_{gerçek} = \sqrt{(\%THD_V * V_n)^2 + V_1^2} \text{ formülünden;}$$

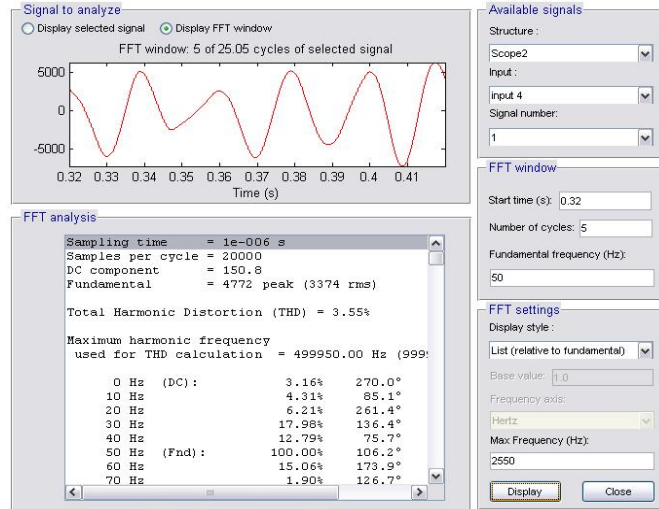
$$V_{gerçek} = 587.51 / \sqrt{2} V \text{ olarak bulunur.}$$

$$I_{gerçek} = \sqrt{(\%THD_I * I_n)^2 + I_1^2} \text{ formülünden;}$$

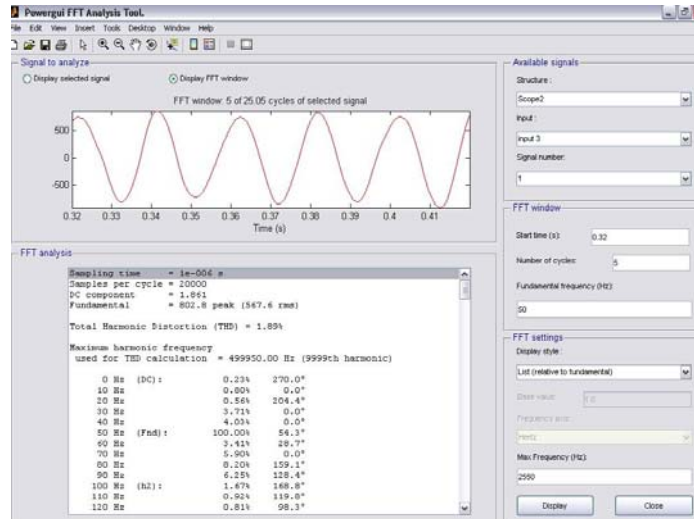
$I_{gerçek} = 852 / \sqrt{2} A$ olarak bulunur.

8.3.3 DURUM 3 (FİLTRELER VE KOMPANZASYON DEVREDE)

Her iki sürücü, kompanzasyon ve pasif filtrelerin devrede olduğu durumda:

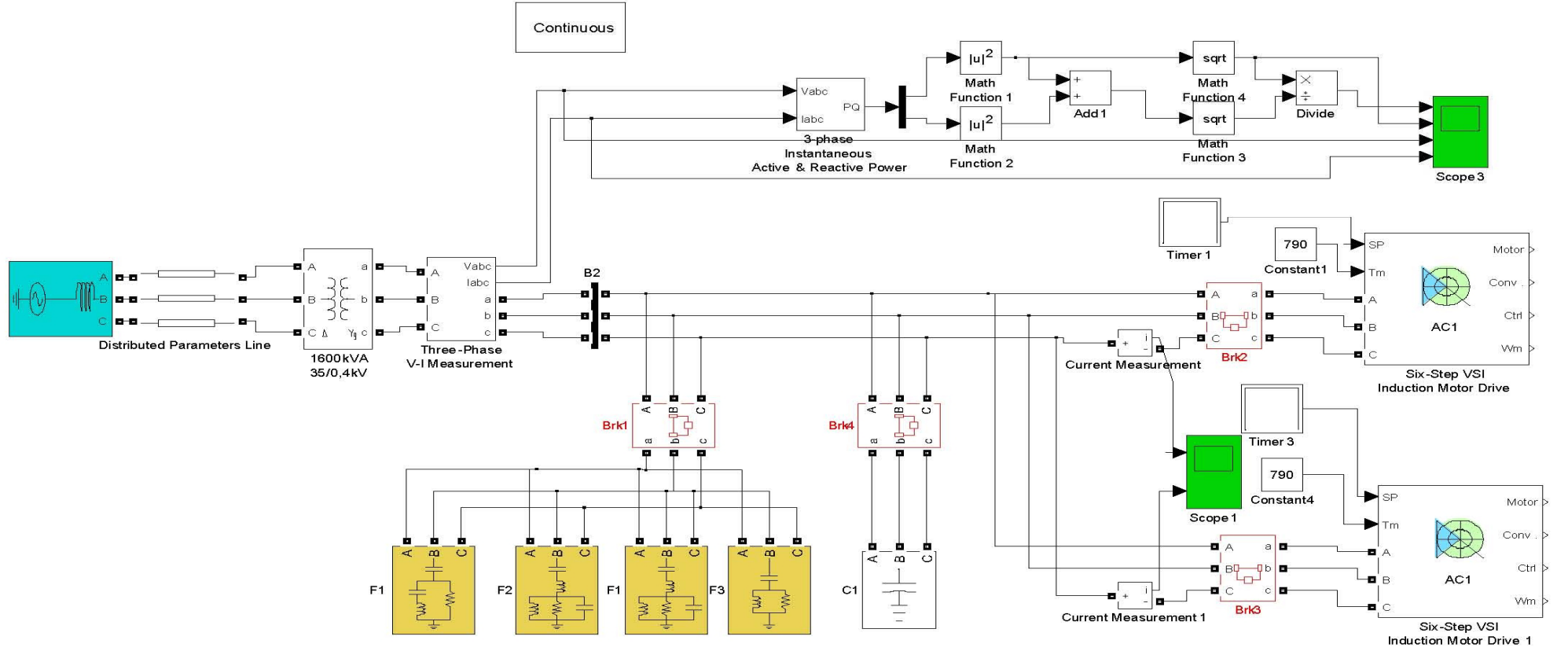


Şekil.8.20 – Kompanzasyon ve Filtrenin Devrede Olduğu Haldeki Gerilimin Spektrumu

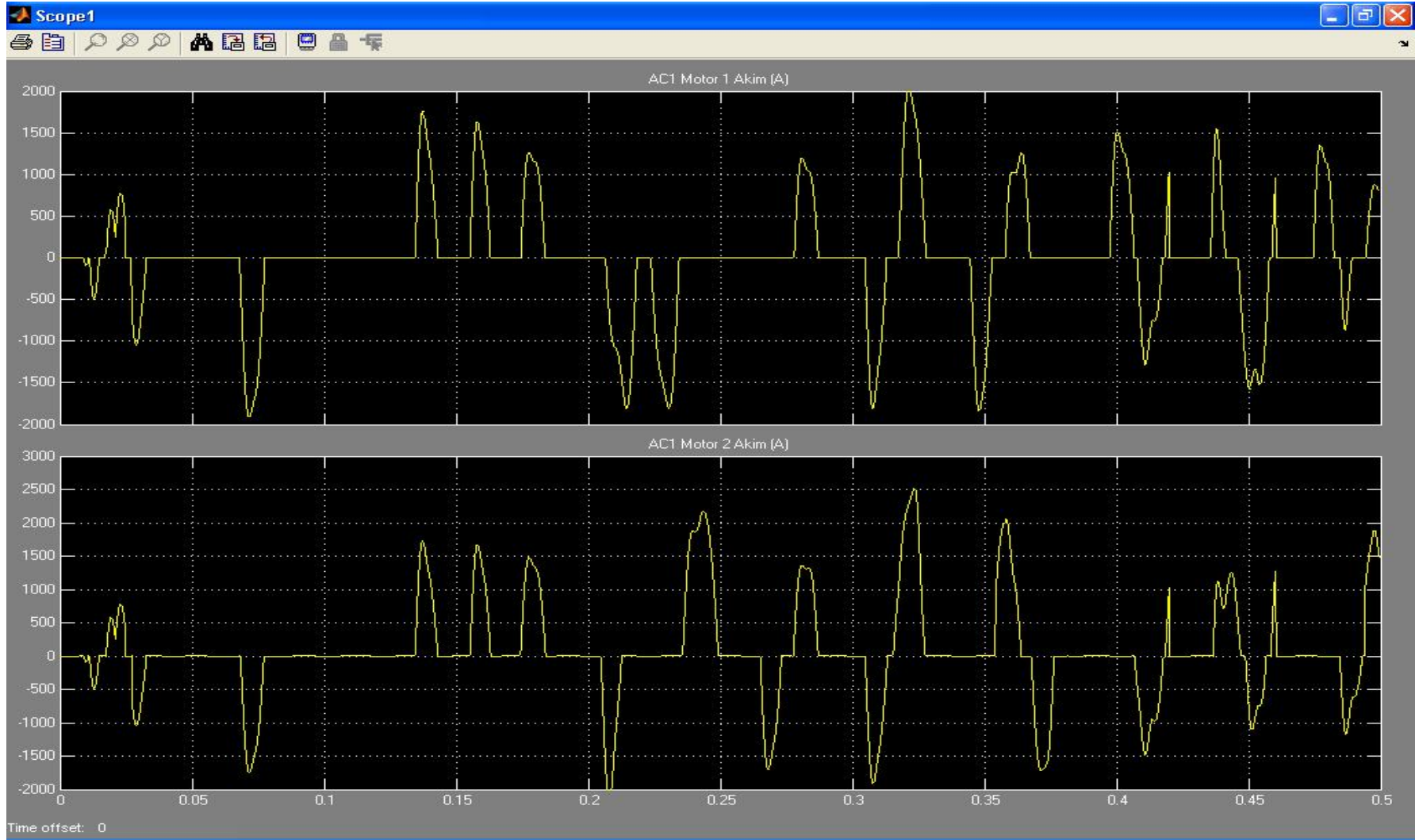


Şekil.8.21 – Filtre ve Kompanzasyonun Devrede Olduğu Halde Gerilimin Spektrumu

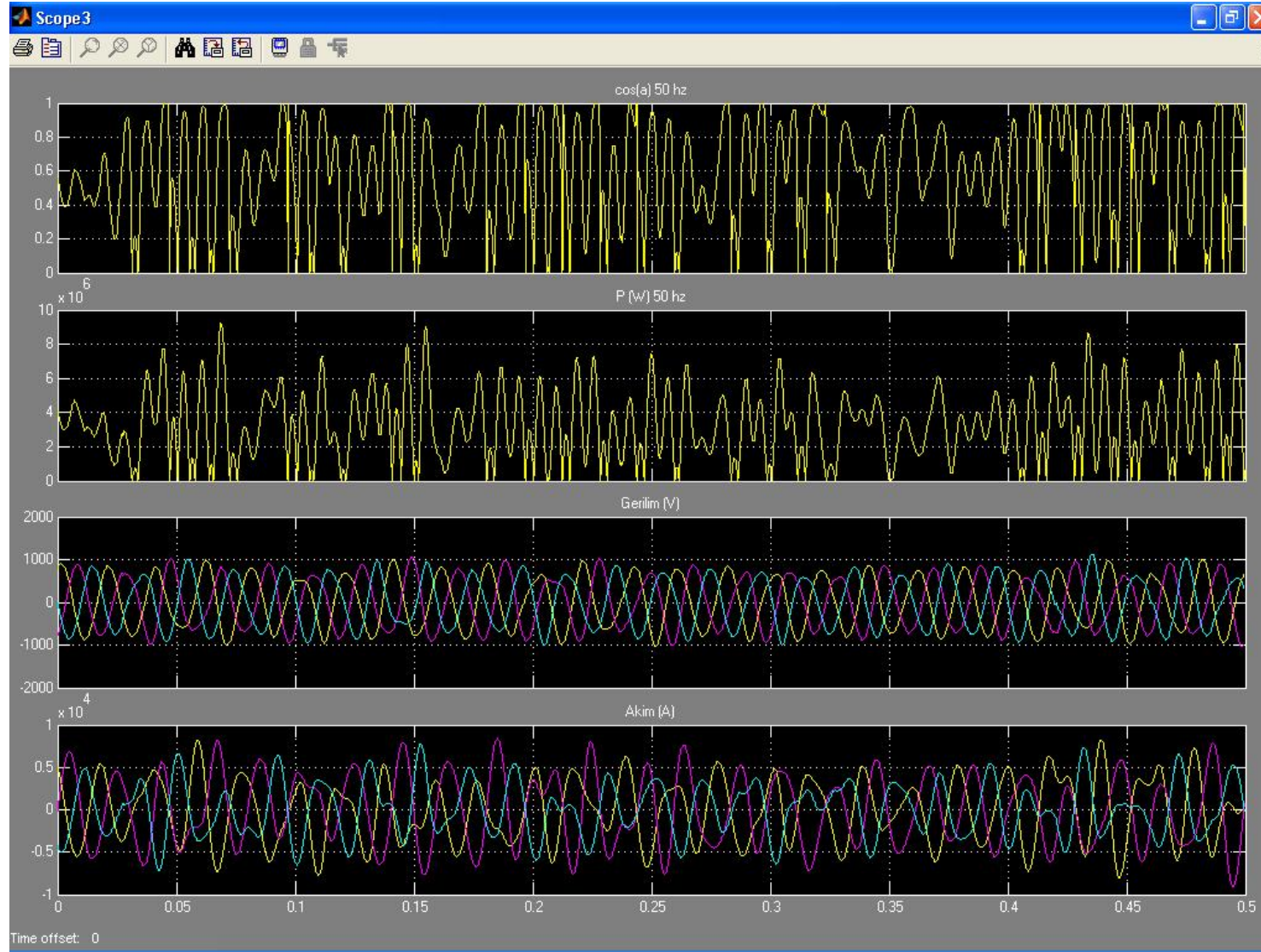
Görüldüğü gibi sistemdeki harmonikler pasif filtreli kompanzasyon ile birlikte iken makul seviyelere indirgenebilmiştir. Ancak sistemdeki hızlı yük değişimlerinin olması ile pasif filtreleme ile de çözüm yetersiz kalabilir. Bu durumda öncelikle sistemin iyi bir analizinin yapılması gerekir. Sistemi her an takip edip milisaniyelerde gerekli olan reaktif enerjiyi devreye basabilen aktif filtre (analog lojik kontrollü olan) bu durumda maliyetli olmasına karşın sistemde istenilen değerlerin elde edilmesinde iyi bir çözümdür.



Şekil 8.22 - 3.Durum: 6 Darbeli Her İki Sürücü Kompanzasyon ve Filtreleme Devrededir.



Şekil 8.23 - 3.Durum: 6 Darbeli Her İki Sürücünün Akım Değişim



Şekil 8.17 - 3.Durum: Sırasıyla $\cos\phi$ -Aktif Güç-Gerilim ve Akım Değişimi

9.SONUÇLAR

- Enerjinin kalitesini önemli ölçüde etkileyen ve sistemde bulunan birçok olumsuz etkiye neden olan harmoniklerin etkilerinin giderilmesi için öncelikle tespit edilmesi gerekmektedir. Ölçümlerin sağlıklı olabilmesi için analizörün bağlanacağı noktalar önceden

tek hat diyagramında belirlenmelidir. Etkin bir filtrelemenin sağlanabilmesi için yükün değişiminin de iyi analiz edilmesi gereklidir. Pek çok durumda aktif filtrelemeye göre daha ucuz olan pasif filtreleme ve hat reaktansı kullanmak problemleri büyük ölçüde çözecektir. Ancak hızlı yük değişimlerinde geniş bant aktif filtre sistem için uygun bir çözüm sunabilir.

- Kompanzasyon; yükün ihtiyacı olan reaktif gücün, uzaktaki bir noktadan sağlanması yerine yüke mümkün olduğunca yakın bir yerde üretilmesidir. Çoğu endüstriyel yükler endüktif güç katsayısına sahiptirler, reaktif güç çekerler. Bundan dolayı yük akımları, yükün gerektirdiği aktif akımdan daha büyüktür. Bu, sadece bu büyük akımı taşıyacak kablo kapasitesini büyütmeyle kalmaz, aynı zamanda besleme kablosu üzerinde joule kayıplarının da daha fazla olmasına neden olur. Enerji dönüşümünde, sadece aktif güç mekanik, ısı ve ışık enerjisi şekline dönüştürülebilir. Reaktif güç ise endüksiyon prensibi ile çalışan generatör, motor ve transformatör gibi tüm makinalarda elektromagnetik alan oluşumunu sağlar.

- Kompanzasyon sistemden çekilen akımın düşmesine neden olur ancak bu durum devrenin harmoniksiz olduğu durumda geçerlidir. Harmonikli bir devrede harmonik akım kaynağından bakıldığında trafo empedansı ile kompanzasyon bataryalarının empedansı paralel devre oluşturduğu görülür. Kompanzasyon devrede iken herhangi bir frekansta devre empedansı sonsuz olur. Bu durum rezonans durumudur ve gerilimin aşırı artmasına ve bataryanın zarar görmesine sebep olur. Harmonikli işletmelerde kompanzasyon sistemi rezonans riski oluşturduğu için devre dışı bırakılıp filtre düzeni kullanılmalıdır.

- Kompanzasyon yapılan harmonikli devrelerde kVAr değeri artırılırken güç katsayısı (yer değiştirmiş güç katsayısı) önce artar sonra tekrar küçülmeye başlar. Bunun düzeltilmesi distorsiyon gücünün azaltılabilmesi ile mümkün olacaktır. Aksi durumda görünür güç bileşeni olan distorsiyon güç gerçek güç katsayısının 1 e yaklaşmasını imkansız kılacaktır.

- Yapılan simülasyon devresinde görüldüğü gibi sistemdeki harmonik oranı kompanzasyonun olmadığı durumda akım için %34.06 gerilim için %11.12 olarak ölçülmüştür. Ancak kompanzasyon devreye alındığında sistemdeki harmonik oranı %139 gibi çok yüksek seviyeye çıkmaktadır. Gerilim harmoniği ise %26 mertebesinde. Değerlerden

anlaşılacağı üzere harmoniklerin bulunduğu sistemlerde filtresiz kompanzasyon durumunda harmonik değerler daha tehlikeli olmaktadır.

- Harmonikli devrelerde en çok karşılaşılan problemler nominal değerlerin aşılmasından ötürü sistemde bulunan kesicilerin açması, nötr iletkeninden geçen akımın fazla olması sebebiyle aşırı ısınması ve kondansatör bataryalarının kullanılamayacak duruma gelmesidir. En çok harmoniklerden etkilenen diğer bir ekipman da elektronik kartlardır.

- Transformatörler, dönüştürücüler ile birlikte en önemli harmonik kaynaklardır. Anma gerilimin üzerindeki gerilime maruz kaldıklarında çekirdek doyması sebebiyle mıknatıslanma akımı harmonik bileşenler içermektedir. Mıknatıslanma akımındaki harmonik bileşenler büyük bir transformatör kısa devre empedansı gördüklerinde beslenme geriliminde harmoniklere neden olurlar. Harmonik bileşen içeren beslenme gerilimi tekrar mıknatıslama akımına etki eder ve harmonik seviye büyütülür. Güç sistemlerinde etkili bir gerilim kontrolü ile bu seviye kabul edilebilir seviyelere indirgenebilir.

KAYNAKLAR

- Argın,M., 2000, Güç Sistem Harmonik Filtreleri, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Adak,S., 2002, Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonun Azaltılması”, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi , İstanbul .
- Arrilaga, J., B., 1985, Power System Harmonic.
- Başman, F., 2006, Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmonik ve Filtreleme Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Evans I., 2006 Temmuz, Seminer Notları.
- Evans I., 2007, American Bureau of Shipping Guidance Notes for Control of Harmonics in Electrical Power Systems.
- Evans Ian; Johnson J. R., Practical Aspects of Applying Broadband Active Filters on Four Applications, IEEE PaperNo.178.
- Kocatepe, C., 2005, ”Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi.
- Özcan, İ.C., 2006, Endüstriyel Tesislerde Harmonik Sorunları ve Çözümleri Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sucu,M., Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellemesi ve Simülasyonu, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003).
- Ekiz, A, 2003, Power System Harmonics and Compensation in Plants, Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ayhan, B., 2008, Enerji Kalitesi ve Harmonikler WIN' 08 Seminer Notları, İstanbul.
- Arrilaga, J., B., 1985, Power System Harmonic.

İNTERNET KAYNAKLARI

<http://www.mathworks.com>, MATLAB, (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 31.03.1982

Doğum yeri Diyarbakır

Lise 1996-2000 Isparta Gazi Süper Lisesi

Lisans 2000-2005 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elk Tesisleri Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2005-2007 Aktif Elektrik Mühendislik Ltd Şti.

2007-Devam ediyor ESD Elektrik Sistemleri Dizayn Ltd. Şti.