

84984

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİNEER OLMAYAN YÜKLERİN BULUNDUĞU
ALÇAK GERİLİM ŞEBEKELERİNDE NÖTR AKIMI
HARMONİKLERİNİN ANALİZİ VE
SİMÜLASYONU

Elk. Yük. Müh. İhsan DÖŞEYEN

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi: 3 Aralık 1999

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Kenan UÇKU (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK (KOÜ)

: Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN (KKÜ)

TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİZASYON MERKEZİ

İSTANBUL, 1999

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Tanıtım.....	1
1.2 Harmonikler ile İlgili Literatür İncelemesi.....	5
2. HARMONİKLERİN OLUŞUMU ve ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİNLİKLERİ.....	9
2.1 Harmoniklerle İlgili Genel Tanımlar ve Büyüklükler.....	9
2.2 Şebekedeki Harmonik Bileşenlerin Belirlenmesi.....	14
2.3 Şebekede Etkili Olan Başlıca Harmonik Kaynakları.....	15
2.4 Enerji Sistemlerinde Harmoniklerin İşletme Açısından Etkinlikleri.....	20
2.4.1 Teknik etkinlikler.....	20
2.4.2 Ekonomik etkinlikler.....	20
2.5 Harmoniklerin Modellenmesi.....	22
3. NONLİNEER YÜKLERİN BULUNDUĞU ALÇAK GERİLİM ŞEBEKESİNDE NÖTR İLETKENİNİN ANALİZİ.....	26
3.1 Nonlinear Yükler Bakımından Alçak Gerilim Şebekesinin Durumu.....	26
3.2 Alçak Gerilim Enerji Dağıtım Şebekesinde Yer Alan Harmonik Kaynakları.....	27

3.3	Nötr İletkeninin Durumu.....	33
3.3.1	Harmonikli nötr akımlarının sebep olabildiği problemler.....	37
3.4	Nötr İletkeninden Geçen Harmonikli Akımın Şebeke Üzerindeki Etkinliğinin Analizi.....	38
3.4.1	Isınma yönünden harmonikli nötr akımının etkinliği.....	40
3.4.2	Kayıplar yönünden harmonikli nötr akımının etkinliği.....	41
3.4.3	İletkenlerdeki harmonik kayıplarının ("distorsiyon" kayıplarının) temel bileşen kayıplarına oranlanmış ifadesi ve bu oranın akım THD'sine yakınlığı.....	44
4.	PSpice DESTEKLİ HARMONİK SİMÜLASYONUNA İLİŞKİN MODELLEME ve YENİ TANIMLAMALAR.....	46
4.1	Giriş.....	46
4.2	Nonlinear Yüklere Ait Akım Harmoniklerinin Sistem Kaynak Gerilimine Göre Kazanacakları Faz Açılarının Önceden Belirlenmesi.....	47
4.3	Nonlinear Yüklere Ait Akım Harmoniklerinin Yük Noktalarındaki Gerilimlere Göre Kazanacakları Genliklerinin Önceden Belirlenmesi ve Simülasyona Girecek Akım Kaynaklarının Fazör Olarak Yazılması.....	53
4.4	PSpice Destekli Simülasyon Sonuçları Doğrultusunda Dengesiz Yüklenmeye İlişkin Yeni THD Tanımlamaları.....	55
4.4.1	Faz gerilimleri için yeni THD tanımlamaları.....	56
4.4.2	Akımlar için yeni THD tanımlamaları.....	57

5.	SAYISAL UYGULAMA.....	60
5.1	Veriler.....	60
5.2	Simülasyon.....	68
5.3	Simülasyon Sonuçları.....	70
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	81
	KAYNAKLAR.....	87
	EKLER.....	93
Ek 1.1	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (50 Hz) - (Akım çözümleri).....	94
Ek 1.2	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (50 Hz) - (Gerilim çözümleri).....	101
Ek 2.1	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (150 Hz) - (Akım çözümleri).....	106
Ek 2.2	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (150 Hz) - (Gerilim çözümleri)...	113
Ek 3.1	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (250 Hz) - (Akım çözümleri).....	118
Ek 3.2	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (250 Hz) - (Gerilim çözümleri)....	125
Ek 4.1	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (350 Hz) - (Akım çözümleri).....	130
Ek 4.2	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (350 Hz) - (Gerilim çözümleri)...	137
Ek 5.1	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (450 Hz) - (Akım çözümleri).....	142
Ek 5.2	PSpice girişleri ve analiz sonuçları (450 Hz) - (Gerilim çözümleri)....	149
	ÖZGEÇMİŞ.....	154

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Nonlinear direncin yol açtığı akım distorsiyonu.....	3
Şekil 1.2	Akım distorsiyonunun farklı yüklerde farklı sebeplerden kaynaklanması.....	4
Şekil 2.1	Harmonik spektrum gösterimi: 2-boyutlu (a) ve 3-boyutlu (b) gösterim.....	10
Şekil 2.2	Harmonik histogram gösterimi.....	11
Şekil 2.3	Harmonikli durumda güçlerin grafik (vektörel) gösterimi.....	14
Şekil 2.4	Bir transformatörün mıknatıslama akımının değişimi ve harmonik spektrumu.....	17
Şekil 2.5	Bir ark fırınının (a) ergitme ve (b) tasfiye safhalarında akımın frekans spektrumu.....	18
Şekil 2.6	Fluoresan lamba devresi test sonuçları: (a) test devresi, (b) tüp gerilimi, (c) bir lamba ve kondansatörü için faz akımı, (d) nötr akımı.....	19
Şekil 2.7	Nonlinear yük içeren bir enerji dağıtım hattı (a) ve karşılık düşen tek-hat harmonik bileşen modelleri (b).....	23
Şekil 3.1	Bilgisayar vb. ve elektronik cihazlar için dc güç kaynakları. (a) Lineer güç kaynağı, (b) Anahtarlama güç kaynağı.....	29
Şekil 3.2	Kişisel bilgisayarlar için kullanılan bir anahtarlama güç kaynağının giriş akımına ait dalga biçimi.....	30
Şekil 3.3	Başlıca nonlinear yük sınıflarına ait tipik akım dalgası biçimleri....	32
Şekil 3.4	Üç fazlı dengeli nonsinüsoidal akımlar halinde nötr akımının meydana gelmesine bir örnek.....	36

Şekil 3.5	Bir alçak gerilim şebekesinde nonlinear yüklerin iki farklı bağlantısı sonucu nötr akımları: yüklerin aynı noktadan beslenmesi (a) ve yüklerin faz atlanarak -- ötelenmiş olarak -- beslenmesi (b). Nonlinear yük gösterimi (c).....	39
Şekil 3.6	Nötr iletkenindeki ek kayıp enerji tutarının yıl bazında para akış diyagramı.....	43
Şekil 4.1	(a) Bir nonlinear yükün basit gösterimi. (b) Temel bileşen akımının spektrum ve simülasyon faz açıları ve bunların birinden diğerine ötelenme miktarı (λ).....	48
Şekil 4.2	Bir distorsiyonlu dalganın harmonik faz açılarının bir referanstan başka bir referansa aktarılması hakkında.....	50
Şekil 5.1	Sayısal uygulama için seçilen örnek sistemin tek hat diyagramı.....	61
Şekil 5.2	Yük noktalarında bulunduğu kabul edilen yük tipleri.....	63
Şekil 5.3	A tipi nonlinear yükün harmonik spektrumu ve akım dalga biçimi.....	65
Şekil 5.4	B tipi nonlinear yükün harmonik spektrumu ve akım dalga biçimi.....	66
Şekil 5.5	C tipi nonlinear yükün harmonik spektrumu ve akım dalga biçimi.....	67
Şekil 5.6	PSpice simülasyonundaki devre topolojisi düğüm numaraları.....	69

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1	Yük noktalarında lineer yüklerin faz başına toplu anma değerleri.....	64
Tablo 5.2	Yük noktalarında nonlinear yüklerin faz başına toplu anma temel bileşen değerleri.....	64
Tablo 5.3	Yük noktalarında faz (faz-nötr) gerilimlerinin temel bileşen ve harmonikleri [Efektif değer, Volt].....	71
Tablo 5.4	Hat parçalarında faz ve nötr akımlarının temel bileşen ve harmonikleri [Efektif değer, Amper]	72
Tablo 5.5	Yük noktalarında toplam yük akımlarının temel bileşen ve harmonikleri [Efektif değer, Amper]	73
Tablo 5.6	Hat parçalarında faz ve nötr iletkenlerinde akımların efektif değerleri [A].....	74
Tablo 5.7	Hat parçalarında nötr akımının en büyük faz akımına ve ortalama faz akımına oranları.....	74
Tablo 5.8	Hat parçalarında iletken harmonik (distorsiyon) kayıplarının temel bileşen kayıplarına oranı.....	74
Tablo 5.9	Yük noktalarındaki faz-nötr gerilimleri ile toplam yük akımlarına ait temel bileşenlerin efektif değerleri ve faz açıları.....	75
Tablo 5.10	Yük noktalarında herbir fazda çekilen toplam temel bileşen aktif güçleri [kW], (lineer + nonlinear).....	75
Tablo 5.11	Yük noktalarında toplam yük akımlarının efektif değerleri [A].....	76
Tablo 5.12	Yük noktalarında R-S-T faz gerilimi THD'leri [%].....	76

Tablo 5.13	Yük noktalarında aritmetik faz ortalaması gerilim THD'leri [%].....	76
Tablo 5.14	Yük noktalarında faz başına temel bileşen tüketim aktif güçlerine göre ağırlıklı ortalama olarak gerilim THD'leri [%].....	77
Tablo 5.15	Yük noktalarında faz gerilimleri temel bileşenlerine göre ağırlıklı ortalama olarak gerilim THD'leri [%].....	77
Tablo 5.16	Yük noktalarında faz girişlerinde yük akımı THD'leri [%].....	77
Tablo 5.17	Yük noktalarında aritmetik faz ortalaması yük akımı THD'leri [%].....	78
Tablo 5.18	Yük noktalarında faz başına temel bileşen tüketim aktif güçlerine göre ağırlıklı ortalama olarak yük akımı THD'leri [%].....	78
Tablo 5.19	Yük noktalarında toplam yük akımları efektif değerlerine göre ağırlıklı ortalama olarak yük akımı THD'leri [%].....	78
Tablo 5.20	Hat parçalarında faz ve nötr iletkenlerindeki akım THD'leri [%].....	79
Tablo 5.21	Hat parçalarında üç fazın aritmetik ortalaması olarak akım THD'leri [%].....	79

ÖZET

Modern güç elektroniği uygulamalarının son yıllardaki hızlanan yayılışı sonucu, elektrik dağıtım şebekelerindeki lineer olmayan yükler dikkat çekici oranlarda artmıştır. Lineer olmayan yüklerin şebekeyi akım ve gerilim harmonikleri ile "kirlettiği", bunun da şebeke elemanları ve tüketici donanımlarına çeşitli istenmeyen etkilerinin olduğu bilinmektedir.

Burada lineer ve lineer olmayan yükler ihtiva eden alçak gerilim dağıtım şebekelerine yönelik PSpice destekli bir harmonik analizi sunulmaktadır. Esas olarak nötr akımı incelenmiş, faz büyüklükleri gereğince ele alınmıştır. Harmonik akımların dengesiz üç fazlı sistem simülasyonunu mümkün kılacak modelleme ve dönüşüm bağıntıları ortaya konulmuştur. Ayrıca, hem gerilim hem akım dengesizliklerinin bulunabildiği harmonikli alçak gerilim şebekeleri için bir dizi yeni THD tanımlaması önerilmiştir.

Sayısal uygulama bulguları, özellikle bilgisayar/bilgi-işlem türünden ortamların ağırlıklı olacağı sistem bölümlerinde, nötr iletkeni için çarpıcı büyüklükte -- faz akımlarını da iyice aşabilecek -- akım yüklerine işaret etmektedir. Dolayısıyla, şebekede lineer olmayan yüklerin süregelen çoğalışı dikkate alınır, bazı yabancı literatürde bildirilen bu problemin yakında ülkemizde de ciddiyetle ortaya çıkması beklenmelidir. Buradan, nötr iletkeninin kesit tayiniyle ilgili kuralların gözden geçirilmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu konu belli bir tesis için ele alınırken, tabiatıyla aktif ve pasif filtre çözümleri gibi diğer seçeneklerin de, nötr iletkeninin kesitini arttırmak -- meselâ nötr için herbiri faz iletkeniyle aynı kesitte paralel iki iletken kullanmak -- seçeneğiyle kıyaslanması gerekecektir.

Önerilen tanımlamalar doğrultusunda, örnek sistem için çeşitli gerilim ve akım THD'leri hesaplanmıştır.

Kayda değer diğer bir sonuç, üç fazlı sistemlerin dengesiz-hal harmonik analizlerini sağlayabilen bir bilgisayar programı elde yoksa, PSpice gibi bir programın kısmî desteğiyle orta karar bir şebeke için yine de analiz yapılabileceğinin anlaşılmış olmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Harmonikler, lineer olmayan yük, alçak gerilim şebekeleri, nötr akımı, dengesiz yüklenme.

ABSTRACT

With the accelerating spread of modern power electronics applications in recent years, nonlinear loads on electrical power distribution systems have increased in conspicuous proportions. Nonlinear loads are known to “pollute” the network with current and voltage harmonics, producing a variety of objectionable effects upon network components and consumers’ equipment.

Presented herein is a harmonic analysis with PSpice backup, intended for low voltage distribution systems containing linear and nonlinear loads. The focus is essentially on the neutral current, the phase quantities being considered accordingly. Modelling and conversion relations are put forward to make unbalanced three-phase simulation of harmonic currents possible. In addition, a number of new THD definitions are proposed for harmonics-infested low voltage systems where both voltage and current unbalances may prevail.

Findings from a numerical sample system point to strikingly high current burdens for the neutral conductor, which may run well in excess of the phase currents, especially in system sections where computer and data-processing etc environments would predominate. Therefore, in view of the ongoing spread of nonlinear loads on the network, this problem, already cited in some foreign literature, should be seen as seriously impending in this country, too. Hence a need arises to review the rules governing the sizing of the neutral conductor. However, when taking up this issue for a particular installation, it would of course also be necessary to compare other options like active and passive filter solutions with the option of increasing the neutral conductor size, e.g. by using two conductors in parallel, each equal in size to the phase conductor.

Based on the definitions proposed, various voltage and current THDs are computed for the sample system.

Another conclusion worthy of note is the ascertainment that if a computer programme capable of unbalanced-mode harmonic analyses of three-phase systems is not on hand, analysis of a system of moderate dimensions can still be accomplished with partial backup from a programme such as PSpice.

Keywords: Harmonics, nonlinear load, low voltage distribution systems, neutral current, unbalanced loading.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Tanıtım

Son yıllarda elektrik enerjisi mühendisliğinde enerji kalitesi konusu artan bir önem kazanmış, üzerinde gittikçe daha çok çalışılır hale gelmiştir. Aslında enerji kalitesi ile ilgili olarak, gerilim, akım ve frekans açısından çeşitli kriterler söz konusudur. Akım veya gerilimin büyüklüğünde, frekansında veya dalga şeklinde akla gelebilecek herhangi bir biçimde normalden veya saflıktan uzaklaşma, bir enerji kalitesi problemi demektir. Fakat bunların içinde enerji kalitesi konusunun büyük önem kazanmasına yol açmakta başta geleni, akım ve gerilimin dalga biçimlerinde görülen bozulmalar (distorsiyona uğramalar), yani periyodik olmakla birlikte sinüsoidal değişimden uzaklaşmalardır.

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı ile ilgili tasarım ve analizlerde temel alınan başlıca kabullerden biri, bilindiği gibi, gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüsoidal olduğudur. Nitekim kaynak noktalarında, yani elektrik santrallerinde generatör uçlarında, gerilimin sinüs biçiminin çok iyi olduğu söylenebilir ve bozulma oranı (distorsiyon) genellikle % 1'in çok altındadır (Dugan, McGranaghan, Beaty, 1996), çünkü senkron generatörlerde yapılabilen stator sargısı tertiplerleri, kutup geometrisi düzenlemeleri vb. sayesinde bu durum sağlanabilmektedir. Fakat yüklere doğru gidildiğinde dalga şeklinde artan bir biçimde bozulma görülmektedir. Son yıllarda bazı işletme problemlerine yol açan bu durum, önemli bir ölçüde, bilhassa 1970'li yıllardan itibaren elektrik enerjisi sektöründe kullanımı çok yaygınlaşmış olan yarıiletken elemanlı cihaz ve sistemlerden kaynaklanmaktadır. Bunların içinde, endüstride kullanılan her türlü kontrol sistemleri, doğru akımla enerji iletimi (hvdc) teçhizatı, bilgi işlem ve büro otomasyonu

besleme sistemleri ve benzeri elektronik uygulamaları örnek gösterilebilir. Ayrıca doymuş demir nüveli elemanların da bu durumda önemli payı vardır. Bunlara da aydınlatma balastları ve transformatörler vb. örnek gösterilebilir.

Periyodik özelliği korumakla birlikte sinüsodal biçimden uzaklaşmış dalgalar (nonsinüsoidal dalgalar), bilindiği gibi, kararlı hal şartlarında, J. Fourier tarafından ortaya konulmuş seriye açıldığında, genlik, frekans ve faz açısı bakımından birbirinden farklı sinüsodal dalgaların toplamı olarak ifade edilebilmektedir. Teorik olarak bu sinüsoidal dalgalar, nonsinüsoidal ana dalganın bileşenleri olup, bunlardan ana dalga ile aynı frekansta olanı “temel dalga” veya “temel bileşen” ve bu frekansın tam sayı katlarındaki frekanslarda olanları da “harmonikler” adını almaktadır.

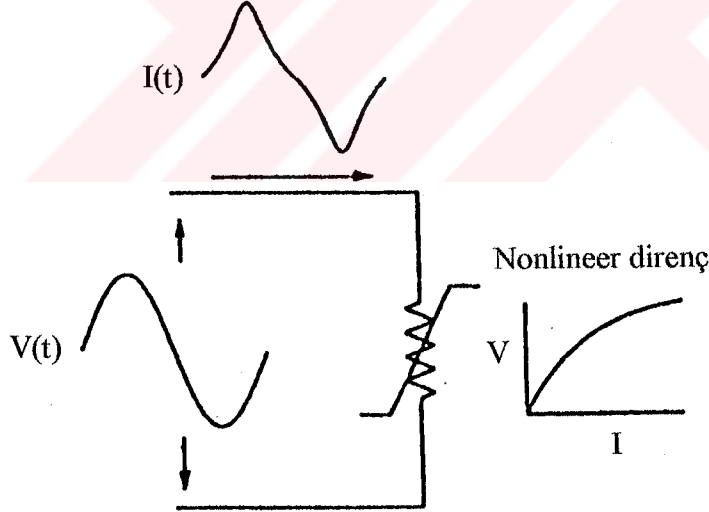
Üzerine uygulanan alternatif gerilim tam olarak sinüsoidal olsa bile çektiği akımın dalga şekli distorsiyonlu (nonsinüsoidal) olan türden yükler, “nonlineer yükler” (lineer olmayan yükler) olarak bilinir. Lineer yüklerde (ki direnç, endüktas ve kapasitans tipi elemanların bir veya birkaçından meydana gelebilir) akım uygulanan gerilimle orantılı olarak değişir ve sinüsodial bir gerilim için akım da sinüsoidal olur, çünkü empedans – dirençli halde belli bir sıcaklık için – gerilimin değişimine bakmaksızın sabit kalır, yani akım-gerilim bağıntısı lineerdir. Nonlineer yükler ise, lineer yüklerden şöylece farklıdır:

- Bu yüklerin rezistif, endüktif ve kapasitif karakteristikleri, uygulanan alternatif gerilimin periyodunun kapsadığı gerilim değişimi bölgesi boyunca sabit kalmayıp değişim gösterir.
- Dolayısıyla yük akımının değişimi, ani gerilimin değişimine orantılı biçimde bağlı değildir (Nonlineer yüklerin çoğunda gerilimin herbir

yarım dalgasının tepe bölgesine rastlayan nisbeten kısa bir zaman bölgesi içinde akım akar, bunun sonucunda da akım dalgası çoğu zaman kesintili bir görünüştür).

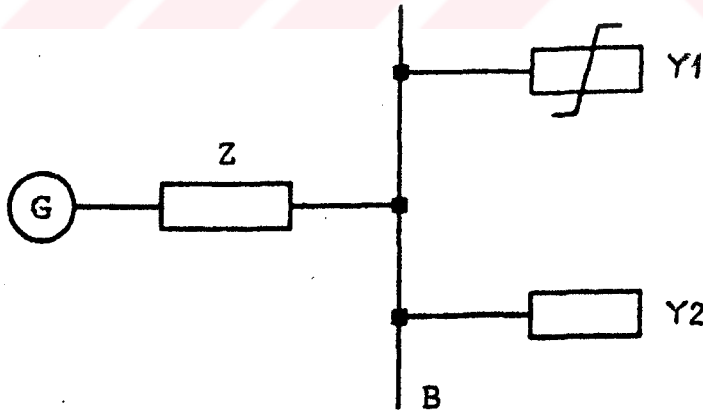
- Bu yüzden nonlinear yük akımları, uygulanan gerilim saf sinüs dalgası biçiminde olsa bile, nonsinüsoidaldir. Yani bu akımların içinde harmonikler söz konusudur.

Nonlinear yüklerin enerji sisteminde yol açtığı bu “harmonik distorsiyon”, Şekil 1.1’de nonlinear bir dirence sinüsoidal bir gerilimin uygulanması hali ile ilke olarak temsil edilmiştir. Bu örnekte gerilimin küçük bir artışına karşılık akımda büyük bir artışın gerçekleştiği ve akım dalgasının gerilime göre başka bir şekil aldığı gözlenmektedir.



Şekil 1.1 Nonlinear direncin yol açtığı akım distorsiyonu.

Nonlineer yüklerden kaynaklanan akım harmoniklerinin hatlar üzerinde yol açtığı gerilim düşümleri yüzünden, sistem içinde gerilim dalgasında da bozulmalar olur. Dolayısıyla, ana kaynakta gerilim saf sinüsoidal bile olsa, bu duruma maruz kalan lineer yükler de nonsinüsoidal akımlar taşımak durumunda kalır. Nonlineer yüklerin elektrik sistemi içindeki etkilerinin ne kadar geniş olabileceğinin bir göstergesi olan bu durum, Şekil 1.2’de ilke olarak temsil edilmiştir. Burada Y1 nonlineer yükü ile Y2 lineer yükü aynı B barasına bağlı olup, G generatörü sinüsoidal gerilim üretmektedir. Y1’in özelliği gereği, çektiği akım, distorsiyonlu, yani nonsinüsoidaldir. Bu akımın – veya teorik olarak harmoniklerinin – sistemin Z “kaynak empedansı” üzerinde yaptığı gerilim düşümlerinden ötürü B barasının gerilimi distorsiyona uğramakta ve böylece hem Y1, hem de Y2 yüküne nonsinüsoidal gerilim uygulanmakta, bunun sonucunda da lineer bir yük olmasına rağmen Y2 yükü de nonsinüsoidal akım taşımak durumunda kalmaktadır. Başka bir deyişle, Y2’ye uygulanan gerilim harmonikleri bu yükün de harmonikli akımlar çekmesine yol açmaktadır.



Şekil 1.2 Akım distorsiyonunun farklı yüklerde farklı sebeplerden kaynaklanması.

Y1: nonlineer yük, Y2: lineer yük, Z: sistemin kaynak empedansı, G: “sinüsoidal” generatör.

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı ile ilgili analizlerde kullanılan eşdeğer devreler için sinüsoidal akım ve gerilimler temel alındığına göre, sistemde harmoniklerin bulunması halinde harmonik sayısı kadar eşdeğer devreye gerek duyulması söz konusu olacaktır. (Burada sistemin kendisinin lineer olduğu ve böylece “Toplamsallık Teoremi”nin uygulanabileceği kabul edilmiştir.) Harmoniklerin böylece anlaşılan analizi zorlaştırıcı etkisinin yanısıra, sistem elemanları üzerinde pek çok olumsuz etkilerinden söz edilebilir. Bu olumsuz etkilerin doğru olarak belirlenmesi, bunlara çareler bulunması, analitik çözüm yolları, ölçme teknikleri, modelleme, simülasyon vb. ile ilgili çalışmaları yansıtan uluslararası konferansların 1980’li yıllardan itibaren periyodik olarak düzenlenmekte oluşu, konunun önemini göstermektedir.

Bu çalışmada, harmonik distorsiyonun kaynaklandığı nonlineer yüklerin elektrik enerji sistemi elemanları üzerine olan etkileri genel olarak ele alındıktan sonra, inceleme, üç fazlı dört telli alçak gerilim sisteminde nötr iletkeninin maruz kaldığı etkiler üzerine yoğunlaştırılmış, ortaya konulan bağıntılar ve yapılan sayısal uygulamalardan elde edilen bulgular ışığında sonuçlar irdelenmiş ve gerekli öneriler belirtilmiştir.

1.2 Harmonikler ile İlgili Literatür İncelemesi

Nonsinüsoidal akım ve gerilim dalga biçimlerinin elektrik sistemi elemanları üzerindeki etkilerinin araştırılması yüzyılın başlarına, hatta daha öncesine kadar uzanmaktadır. Distorsiyona uğrayıp sinüs biçiminden ayrılan dalgaların içinde saklı diyebileceğimiz harmoniklerin büyüklüğü, çeşitliliği ve sistem elemanları üzerine olan etkileri, yıllar içinde artarak süregelmiştir. Bu süre içinde harmonikleri ve etkilerini araştırmaya yönelik teorik ve deneysel çeşitli yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Bu

yaklaşımlarla yapılan araştırmalar, harmoniklere yol açan kaynaklar, harmonik analizine yönelik matematiksel tanım ve çözümleme teknikleri, harmoniklerin olumsuz etkileri, harmonik tolerans sınırları, harmoniklerin yok edilmesi/zayıflatılması, harmonik analizine yönelik sayısal metodlar ve teknikler vb. konular üzerine yoğunlaştırılmıştır.

İlk defa 1886'da Great Barrington/Massachusetts'te ilk alternatif akım elektrik sisteminin hizmete girişinin ardından enerji sistemi harmoniklerinin farkına varılmış ve incelemesi yapılmıştır (Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 1964). Alternatif akımın ortaya çıktığı o ilk yıllardan itibaren, doğrultucular, transformatörler, doyma olayı ve generatörler incelenirken, bunların aynı zamanda birer harmonik kaynağı olduğu ortaya konulmuştur. Yarıiletkenli veya cıva buharlı doğrultucuların kullanılmadığı o ilk yıllarda doğrultma işlemi motor-generatör grupları ile yapılmakta idi. Bu alanda Steinmetz'in enerji sistemi harmonikleri konusundaki araştırmaları ilgi çekicidir. Birinci Dünya Savaşı yıllarında Steinmetz'in yaptığı çalışmalar (Steinmetz, 1916 ve 1917), transformatörlerdeki doyma ve histerezis olaylarından kaynaklanan dalga bozulmalarını ortaya çıkarmıştır. Burada dalga biçiminin kare veya üçgen olması ile sinüsoidal olması çeşitli yönlerden karşılaştırılmış ve enerji sistemleri için en uygun dalga biçiminin sinüsoidal dalga olduğu gösterilmiştir. Ayrıca generatörlerin oluklu yapılarından ve oluklara dağıtılmış sargılarından ötürü ortaya çıkan gerilim harmonikleri üzerinde de durulmuş ve yıldız-üçgen bağlı transformatörlerdeki akım/gerilim harmonikleri de incelenmiştir. Simetrik Bileşenler Yöntemi'nin ve Fourier Analizi'nin çok yaygın olarak kullanılmadığı o dönemde Steinmetz'in araştırmaları çok önemli ve değerliydi.

İkinci Dünya Savaşı'nın bitiminden sonra doğrultucu devrelerinin kullanımının yaygınlaşması, bu elemanların ateşleme açısı ve komütasyon açısı gibi parametrelere bağlı olarak akım harmoniklerinin incelenmesini gerektirmiştir (Christensen vd., 1944; Schmidt, 1953). Ayrıca sinüsoidal alternatif akımla yapılan enerji iletimi dışında kullanılan yüksek gerilimle doğru akım (hvdc) enerji iletim sistemlerinde oluşan harmoniklerin incelenmesi (Kimbark, 1971) ile deşarj lâmbalarının yol açtığı harmoniklerin etkinliklerinden (Weymouth, 1971; Herrick, 1980) söz edilebilir.

Transformatörlerin demir nüvesinin doyması sonucu olarak şekillenen lineer olmayan mıknatıslama akımlarının harmonik analizi kapsamında incelenmesi (Szabados ve Lee, 1981) ve kendi başına lineer olmayan yük empedansı ile ark fırınlarının analizi (Sundberg, 1976; Dugan, 1980), yapılmış olan diğer çalışmalar arasındadır.

Harmoniklerin etkinliğini araştırmaya yönelik çalışmalar, başlangıçta haberleşme devrelerindeki bozulmaları incelemekteydi. Sonraki yıllarda harmoniklerin enerji sistemleri (ve sistem elemanları) üzerindeki etkinlikleri de dikkate alınmaya başladı (IEEE Standards Board, 1976; Linders, 1979). Bu çerçevede, harmoniklerin, röleler ve diğer koruyucu elemanlar, ölçü aletleri vb. cihazlar üzerindeki bozucu etkileri de araştırılmıştır (Baggott, 1974; Emanuel vd., 1981). Harmonik analiziyle ilgili olarak geliştirilen ilk bilgisayar destekli çözümleme tekniği, doğru akımla enerji iletimi (hvdc) problemlerine yöneliktir (Hingorani vd., 1968; Hay ve Hingorani, 1970; Htsui ve Shepherd, 1971; Williams ve Smith, 1973; El-Serefi ve Shehata, 1976; Coi vd., 1980). Bu yöntemde, çeviriciler ideal anahtar ile modellenmektedir ve sistemi karakterize eden nonlinear diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülmektedir. Ancak, bu yöntemde tüm sistem elemanlarının ayrıntılı bir biçimde

modellenmesinin gerekmesi ve çözüm süresinin uzunluğu gibi bazı zorluklar bulunmaktadır.

1970'li yıllardan itibaren enerji sistemleri, hatların T ve π eşdeğer devreleri ve bağımsız kaynaklarla modellenmeye başlanmıştır (Owen ve McGranaghan, 1980; McGranaghan vd., 1981; Pileggi vd., 1981; Johnson vd., 1982; Densem vd., 1984; Balser ve Feltes, 1985; Sharma ve Fleming, 1986). Lineerleştirilmiş modellemeye dayanan bu teknik, sistemin empedans veya admitans matrisinin doğrudan çözümüne dayanır. Harmonik kaynakları, ideal gerilim ya da akım kaynaklarıyla gösterilir. Yapılan varsayımlar arasında, gerilimlerin dengeli ve sinüsoidal olduğu ve farklı harmonik diziler arasında herhangi bir bağıın olmadığı da bulunmaktadır.

Bir diğer harmonik analizi yöntemi, nonlinear frekans domen analizidir. Bu yöntemde, nonlinear yüklerin, gerilim ve akımların Fourier eşdeğerleri göz önüne alınır. Güç akışı için de Newton-Raphson Yöntemi kullanılır (Xia ve Heydt, 1982; Heydt vd., 1983). Bu yöntem, ideal akım ve gerilim kaynaklarıyla modellemeyi esas alan diğer tekniklere göre duyarlıdır. Buna karşılık, geleneksel güç akışı problemlerine göre iterasyon fazlalığı dikkat çekicidir. Son olarak harmoniklerin oluşturduğu harmonik görünen güç, eşdeğer güç katsayısı gibi tanımları veren ve Devreler Teorisi bakış açısı içinde çeşitli çözümleme teknikleri sunan araştırmalar da mevcuttur (IEEE, 1979; Shepherd ve Zand, 1979; Dugan vd., 1996).

2. HARMONİKLERİN OLUŞUMU ve ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİNLİKLERİ

2.1 Harmoniklerle İlgili Genel Tanımlar ve Büyüklükler

Sinüsoidal olmayan bir işaretin (dalga'nın) sinüsoidal bileşenler cinsinden ifade edilebileceği ve ayrıştırılmış olan bileşenlerin toplamının orijinal dalgaya karşılık düşeceği, J. Fourier tarafından gösterilmiş bulunmaktadır. Bu durumda sinüsoidal olmayan bir $f(x)$ fonksiyonu

$$f(x) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nx + B_n \sin nx) \quad (2.1)$$

şeklinde yazılabilir. A_0 katsayısı pratikte sıfır alınabilir, çünkü karşılaşılan çoğu dalga biçiminde dalga'nın pozitif ve negatif alternansları simetriktir. A_n ve B_n katsayıları ise T periyodu boyunca $f(x)$ fonksiyonunun integrasyonundan elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} A_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos nx \cdot dx \\ B_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin nx \cdot dx \end{aligned} \right\} (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.2)$$

$n=1$ olan yani "1" indisli terim "dalga'nın temel bileşeni" adını alır; diğer bileşenler ise "harmonikleri" meydana getirmektedir.

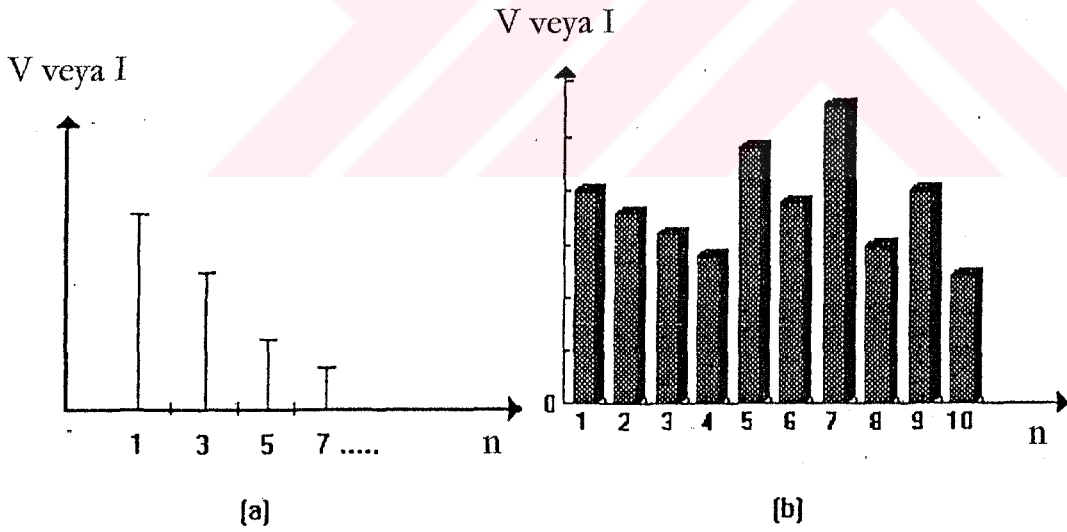
$n=1$ için frekans (aynı zamanda şebeke frekansıdır) $f_1=50\text{Hz}$ ise, harmonik bileşenlerin frekansları arasında

$$f_n = n \cdot f_1 = n \cdot 50 \quad (2.3)$$

bağıntısı vardır.

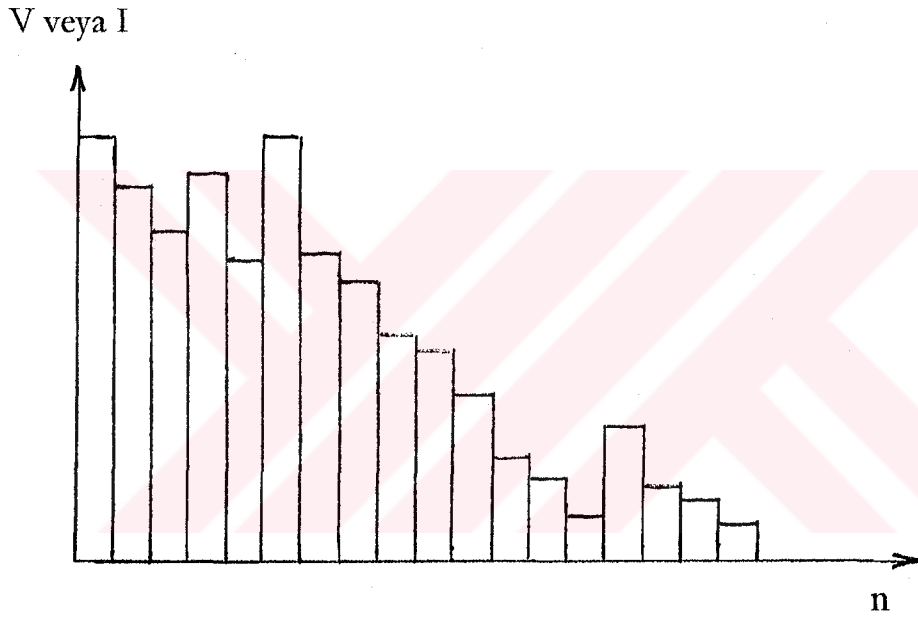
Uygulamadaki akım ve gerilim dalgalarının harmonik analizi sonucunda; harmonik bileşenlerin “genlikleri”nin, harmonik mertebesi arttıkça azaldığı, “faz açıları” için ise bu tip bir genel kuralın verilemeyeceği söylenebilir. Ayrıca (2.1) ifadesinde tanımlanan A_0 katsayısı, gerek akım gerekse gerilim için sıfır değerini alır ($I_0=0$; $V_0=0$). Ve uygulamadaki alternatif gerilim ve akımda pozitif ve negatif alternanslar simetrik olduğu için, çift mertebeli harmonikler söz konusu değildir $\{n = 1, 3, 5, 7, \dots\}$.

Ampermetre ve voltmetrelerin efektif değer ölçtüğü, ayrıca harmonik analizörlerinin de genlik değerlerini verdiği göz önünde bulundurularak, harmonik bileşenlerin efektif değerleriyle işlem yapmak yerinde olur. Bir akım veya gerilim dalgasının (harmonik) bileşenleri, sırasıyla $I(I_1, I_3, I_5, \dots)$ ve $V(V_1, V_3, V_5, \dots)$ olarak biliniyorsa, bu bilgilerin tanıtımı için şu yollar izlenebilir:



Şekil 2.1 Harmonik spektrum gösterimi: 2-boyutlu (a) ve 3-boyutlu (b) gösterim.

- “Harmonik spektrumu” gösterimi kullanılabilir. Yatay eksen harmonik mertebesini verirken dikey eksen harmonik genliğini verir. Bu gösterim 2-boyutlu olabileceği gibi 3-boyutlu da olabilir (Şekil 2.1).
- “Harmonik histogram” gösterimi kullanılabilir (Şekil 2.2). Bu metod harmonik mertebesinin çok olduğu (mesela $n=50$ gibi) hallerde, yatay eksenin daraltılması durumunda tercih edilebilir.



Şekil 2.2 Harmonik histogram gösterimi.

- “Harmonik Tablo (çizelge)” gösterimi kullanılabilir. Tüm harmoniklerin topluca gösterilmesi, özellikle veri girişinin yapılmasında ve çıktıların topluca değerlendirilmesinde yardımcı olur.
- Nonlineer yükün uç denklemi ($v-i$ karakteristiği) ile harmoniklerin bir arada gösterimi mümkün olabilir. Örnek olarak, deşarj tüpü cinsinden yükler için.

$$f = a + e^b(1-b) \quad (2.4)$$

şeklinde (ampirik) bir uç denklemi tarif edilmek suretiyle, a ve b katsayılarının aldıkları değerlere bağımlı olarak harmoniklerin dökümü verilebilir (DigSILENT Data Systems, Integrated Electrical Engineering Program, Version 9.1). Ancak bu metod pek pratik değildir. Harmonik ölçmeleri sonucu harmoniklerin genlikleri doğrudan alınırken, elde edilmesi – özel yükler dışında – çok zor olan uç denkleminin ayrıca uygulanması fazla kullanılan bir yol değildir.

Akım veya gerilim harmoniklerinin değeri, fiziksel boyutlarında (Amper veya Volt) verilebileceği gibi, temel bileşen referans alınarak da verilebilir. Harmoniklerin sinüsoidal temel dalgaya göre etkilerinin araştırılması hedeflendiğinden, karşılaştırmada kolaylık sağlamak üzere “temel bileşene oranlama” daha sık kullanılır. Böylece harmonik bileşenler (%) veya per-unit (p.u.) olarak belirtilirler.

$V(V_1, V_3, V_5, \dots)$ ve $I(I_1, I_3, I_5, \dots)$ efektif bileşenlerinden meydana gelen V gerilim ve I akım dalgası için

$$\left. \begin{aligned} V &= \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots} \\ I &= \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

ifadeleri geçerlidir.

Temel bileşen (I_1 veya V_1) dışındaki harmonik bileşenlerin bir bütün olarak göz önüne alınması gerekir. (2.5) ifadesinde temel bileşenin ayrıştırılması ile bu yapılabilir. Harmoniklerin sistemi ne ölçüde etkilediğini göstermek üzere, ayrıştırılan harmonik bileşenler kümesi temel bileşene oranlanır. Bu oranlama, harmonik analizlerinde ve

uluslararası standartlarda çok kullanılan “Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD -- Total Harmonic Distortion)” kavramı ile tarif edilir. Akım ve gerilim için Toplam Harmonik Distorsiyonu ifadeleri

$$\left. \begin{aligned} \text{THD}_i &= \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} \\ \text{THD}_v &= \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + \dots}}{V_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

şeklinde dir. Sinüsoidal harmonik bileşenler ihtiva etmeyen dalgalar için, pay sıfır değerini alacağından $\text{THD} = 0$ olacağı açıktır.

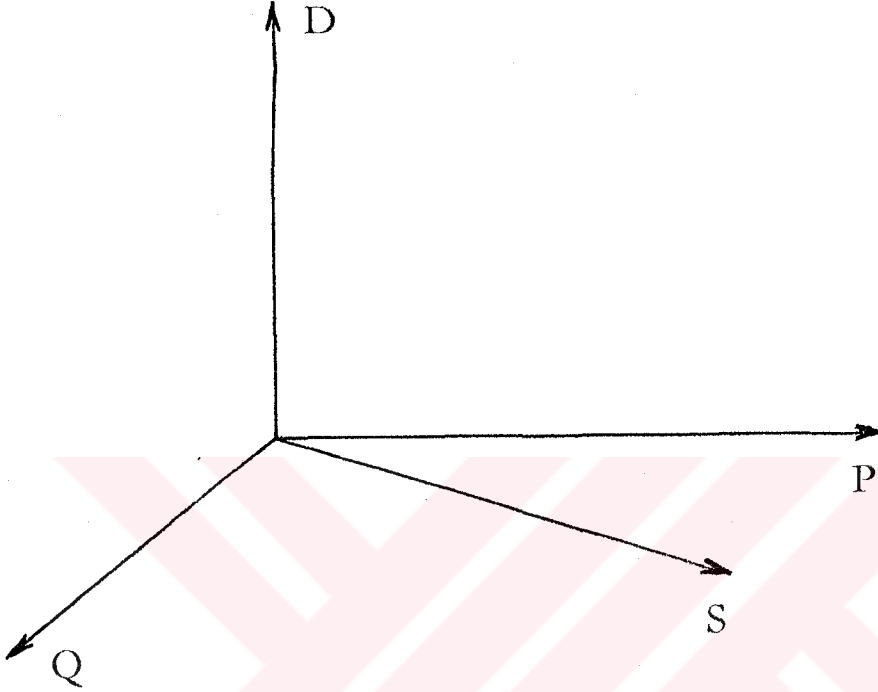
Harmonikli durumla ilgili güç ifadeleri, sinüsoidal durumdaki aktif, reaktif ve görünen güç tariflerinden hareketle yazılabilir. Aktif güç tüketici tarafından fiziksel olarak kullanılan güç olup, bu da temel bileşene karşılık düşer; harmonikli bileşenlere karşılık düşen aktif güç bulunmamaktadır.

Reaktif gücün tanıtımı konusunda çeşitli yaklaşımlar halâ söz konusudur (Dugan vd., 1996). Genel kabul, D ile gösterilen bir “distorsiyon gücü”nün tarif edilmesidir. Burada Q gücü her bir frekanstaki reaktif güçlerin toplamını ihtiva eder. D ise farklı frekanslardaki bütün akım ve gerilimlerin çapraz çarpımlarının toplamı olmaktadır; ortalama değeri sıfırdır. P, Q, S ve D arasındaki bağıntılar

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.7)$$

$$Q = \sum_k V_k I_k \sin \theta_k \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir; burada Q 'nın içinde yalnızca temel bileşene ait Q_1 gücünün reaktif güç kompanzasyonu bakımından önemi vardır.



Şekil 2.3. Harmonikli durumda güçlerin grafik (vektörel) gösterimi.

2.2 Şebekedeki Harmonik Bileşenlerin Belirlenmesi

Harmoniklerin belirlenmesi için kullanılan başlıca yöntemler kronolojik sırada aşağıda verilmiştir.

Analitik Yöntem : Temeli J. Fourier tarafından verilen açılıma dayanır. Eğer incelenecek dalganın zamana göre değişimi (veya tanım denklemi) biliniyorsa, klasik integraller alınarak A_n ve B_n katsayıları hesap edilebilir. (İntegrasyon için geliştirilmiş simülasyon programlarından yararlanılmaktadır.)

Grafik Yöntem: İncelencek dalganın zamana göre değişimi denklem şeklinde değil de osilogram çıkışı olarak belli ise, bu durumda dalgayı küçük dilimlere ayırştırmak ve bu dilimlere ilişkin katsayıların toplamını almak gerekir (P. Thomson ve J. Fischer yöntemleri). El ile yapıldığında uzun zaman alan ve ölçeğe yansıtmadaki zorlukları nedeniyle hata payları yüksek olan bu teknik, günümüzde bilgisayar destekli analizler yardımıyla rahatlıkla kullanılmaktadır.

lme Yöntemi: Dalga analizörü yardımıyla alçak gerilimli elektrik şebekelerinin yanısıra yüksek gerilimli şebekelerde de harmoniklerin doğrudan ölçülmesi mümkün olmaktadır (McGranaghan vd., 1981). Günümüzde harmonik ölçümü çoğu kez şebekelerin alçak gerilim tarafından “harmonik analizörleri” yardımıyla yapılmaktadır. Yaygın kullanılan dijital (pens tipi) l aletleri, harmoniklerin tüm mertebelerini anlık olarak tesbit edebilmektedir.

2.3 şebekede Etkili Olan Başlıca Harmonik Kaynakları

Harmonik kaynaklarını, günümüzde bilinenler ve gelecekte ortaya çıkabilecek olanlar şeklinde ayırmak mümkündür (IEEE, 1983). Günümüzde bilinen harmonik kaynakları şunlardır:

- Dönen makinaların gerilim biçimlerinin sinüsten ayrılması,
- Senkron makinalarda hava aralığı relüktansının değişken olması,
- Ani yük değişimleri nedeniyle senkron makinada akı eğrisinin sinüsten ayrılması,
- Senkron makinalarda hava aralığındaki akının sinüsoidal olmayan dağılımı,
- Transformatörlerin mıknatıslama akımları,

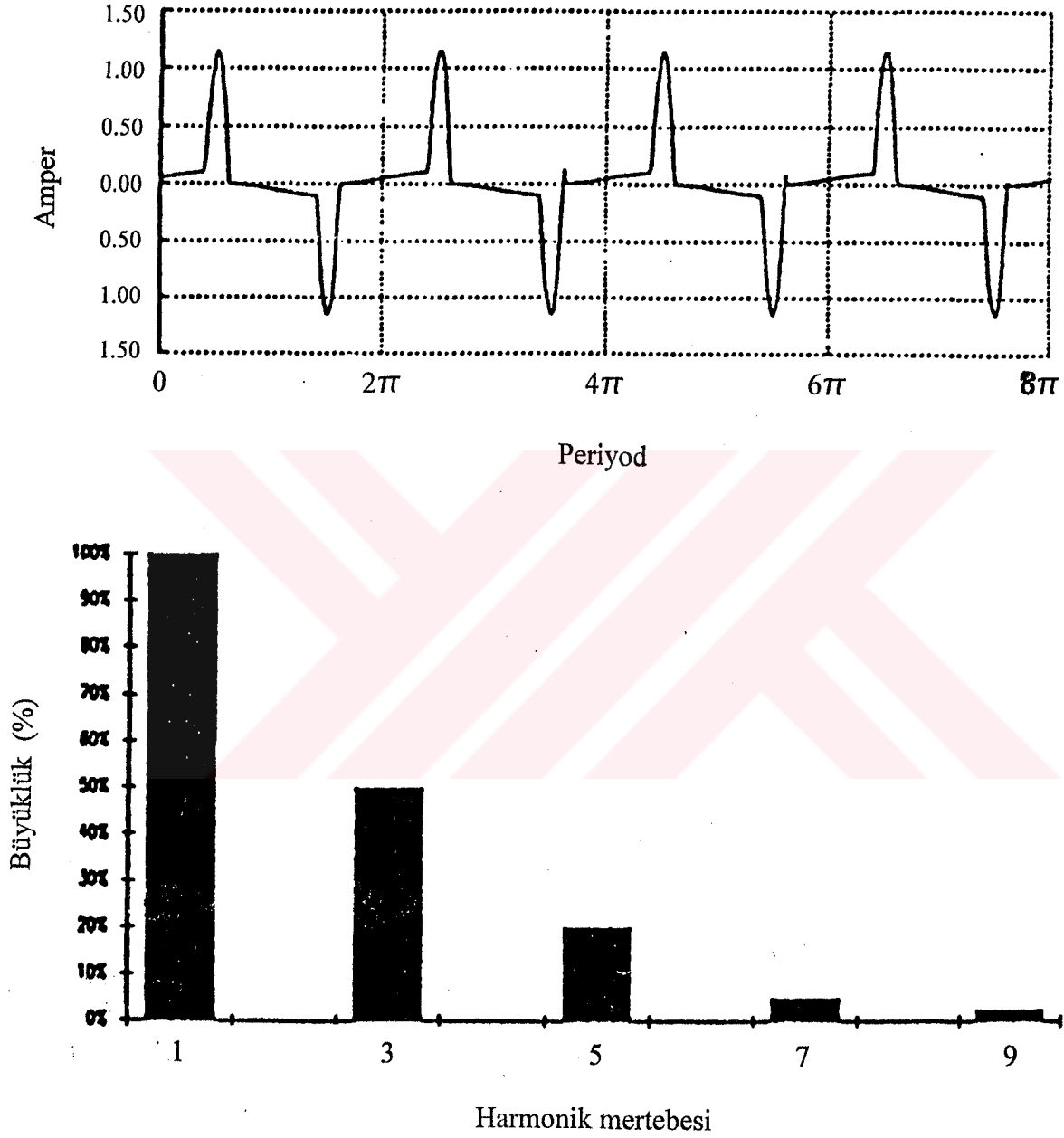
- Doğrultucular, eviriciler, kaynak makinaları, ark fırınları, gerilim kontrol düzenleri, frekans çeviriciler gibi yükler,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Floresan lâmbalar (endüktif balastlar ve elektronik balastlar),
- Büro/ofis makinaları ve donanımı,
- Statik VAR kompanzasyonu,
- Doğru akımla enerji taşıma (hvdc).

Gelecekte ise,

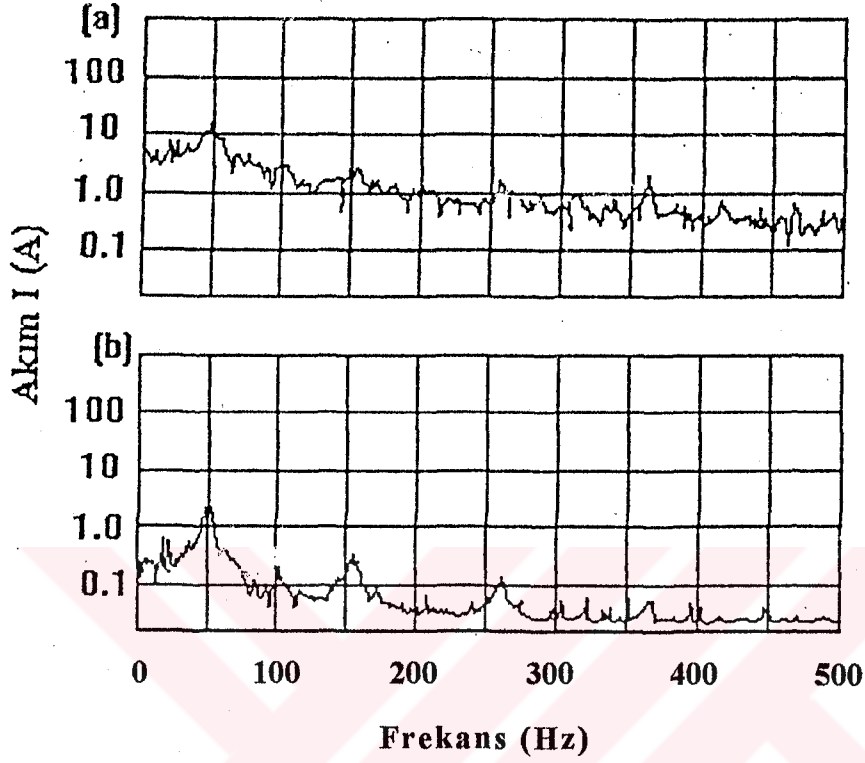
- Elektrik enerjisini doldurulan bataryası üzerinden sağlayan kara taşıtlarının yaygınlaşması,
- Güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi santrallerinin gelişip yaygınlaşarak ulusal enerji sistemine bağlanmaları,
- Şarj bataryaları ve yakıt pilleri gibi enerji dönüştürme sistemlerinin yaygınlaşması,
- Büyük fırınlar için darbe modüleli ısıtma elemanlarının yayılması

sayılabilir.

Şekil 2.4'te bir transformatörün mıknatıslama akımının değişimi (Dugan vd., 1996), Şekil 2.5'te bir ark fırınının ergitme ve tasfiye aşamalarında frekans dağılımları (Arrillaga vd., 1985) ve Şekil 2.6'da da bir floresan lâmba devresi ile ilgili test sonuçları (Arrillaga vd., 1985) gösterilmiştir.

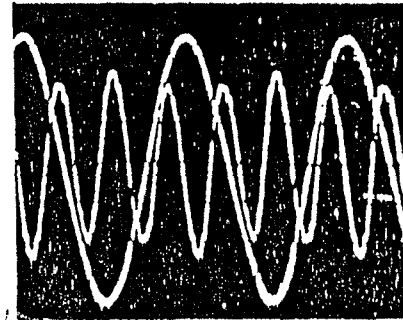
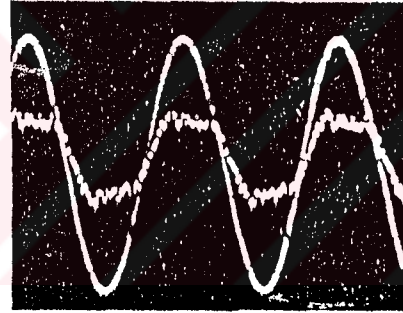
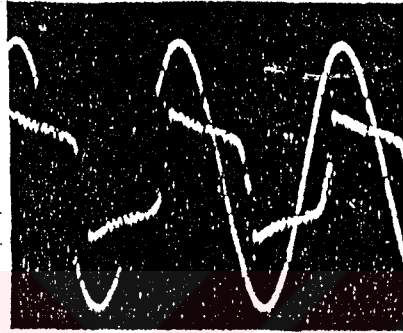
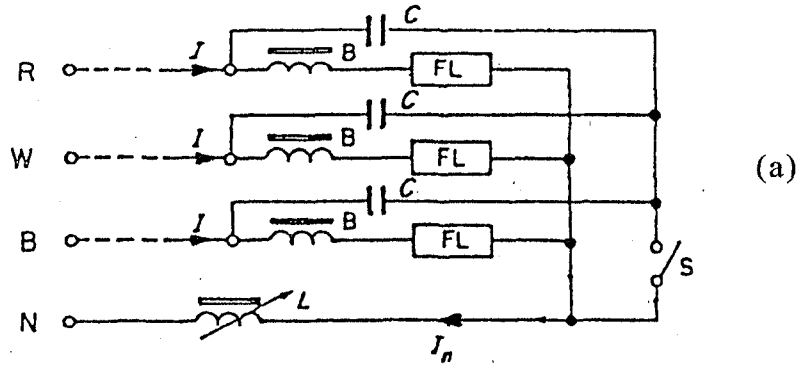


Şekil 2.4 Bir transformatörün mıknatıslama akımının değişimi ve harmonik spektrumu (Dugan vd., 1996).



Şekil 2.5 Bir ark fırınının (a) ergitme ve (b) tasfiye safhalarında akımın frekans spektrumu (Arrillaga vd., 1985).

Bu değişimlerden, işaretlerin sinüs dalgası biçiminden saptığı, dolayısıyla yukarıda sayılan bütün elemanların birer harmonik kaynağı şeklinde davrandığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.6 Fluoresan lamba devresi test sonuçları: (a) test devresi, (b) tüp gerilimi, (c) bir lamba ve kondansatörü için faz akımı, (d) nötr akımı (Arrillaga vd., 1985).

2.4 Enerji Sistemlerinde Harmoniklerin İşletme Açısından Etkinlikleri

2.4.1 Teknik etkinlikler

Bu etkileri şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma sebebiyle kompanzasyon tesislerinin zarar görmesi
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü vb. yerlerde çalışma bozuklukları
- Elektrik motorlarında aşırı ısınma
- Şebekede rezonans olayları, rezonansın sebep olduğu aşırı gerilimler ve akımlar
- Kablo izolâsyonlarında delinme
- Haberleşme devrelerinde parazitler
- Endüksiyon tipi sayaçlarda kayıt hataları
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımları vb.

2.4.2. Ekonomik etkinlikler

Direnci R olan faz iletkeninden geçen akımın ani değeri

$$i(t) = \sum_{i=1}^v i_i(t) \quad (2.9)$$

ve efektif değeri (2.5) bağıntısı gereği

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + \dots + I_v^2} \quad (2.10)$$

olacaktır. i 'yinci harmonik için temel bileşene göre

$$\alpha_i = \frac{I_i}{I_1} \quad (i = 1, 3, 5, \dots, v) \quad (2.11)$$

şeklinde bir “akım harmoniği oranı” tanımlanacak olursa, üç fazlı sistemde oluşacak toplam I^2R kaybı

$$P_k = 3RI^2 = 3RI^2 \left(1 + \sum_{i=3}^v \alpha_i^2\right) \quad (2.12)$$

olarak bulunur. Burada direncin sabit olduğu kabul edilmiş, deri etkisi dikkate alınmamıştır.

(2.12) ifadesi hava hatları/yer altı kablosu iletkenlerinde ortaya çıkacak olan “ek harmonik kayıplar”ın yanısıra, transformatörlerdeki ek kayıpları da tanımlamaktadır. R hat direnci yerine transformatörün toplam eşdeğer sargı direnci konulursa ek kayıp bulunabilir. Veya transformatörün etiketinde yazılı bakır kayıplarının (P_{Cu}) sinüsoidal yük (temel bileşen akım) için tanımlandığı dikkate alınarak harmonikli haldeki bakır kayıpları (P_{Cu}')

$$P_{Cu}' = P_{Cu} (1 + \alpha_3^2 + \alpha_5^2 + \dots) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir.

Benzer şekilde gerilimin ani değeri

$$v(t) = \sum_{i=1}^{\Psi} v_i(t) \quad (2.14)$$

ve efektif değeri

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + \dots + V_\psi^2} \quad (2.15)$$

olacaktır. i 'yinci gerilim harmoniği için de

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_1} \quad (i = 1, 3, 5, \dots, \psi) \quad (2.16)$$

şeklinde bir “gerilim harmoniği oranı” tanımlanacak olursa, magnetik çekirdekli bir elemanda (motor, transformatör vb.) meydana gelecek demir kayıpları

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= CV^2 = C(V_1^2 + V_3^2 + \dots + V_\psi^2) \\ &= CV_1^2(1 + \sum_{i=3}^{\psi} \beta_i^2) \end{aligned} \quad (2.17)$$

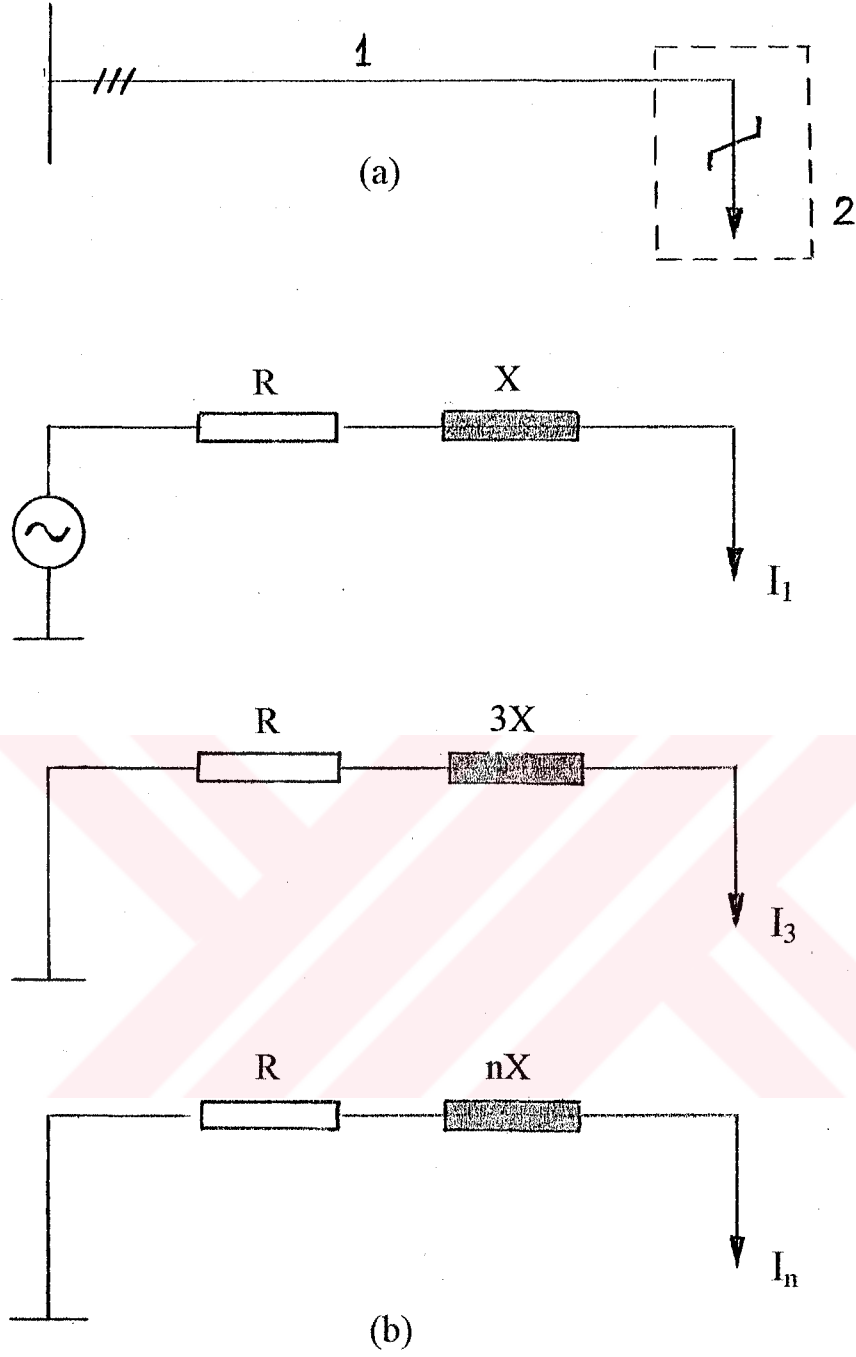
şeklinde hesap edilecektir. C , makinanın yapısı ile ilgili bir sabittir.

2.5 Harmoniklerin Modellenmesi

Şekil 2.7’de nonlinear yük içeren basit bir enerji dağıtım hattının modellenmesi göz önüne alınmıştır.

Bu modelleme yapılırken aşağıdaki kabuller geçerlidir:

- Besleme gerilimleri dengeli ve sinüsoidaldir.
- Yük akımları dengelidir.
- Hattın omik direnci ve reaktansı lineer özelliktedir.



$$I(I_1, I_3, I_5, \dots, I_n)$$

Şekil 2.7 Nonlineer yük içeren bir enerji dağıtım hattı (a) ve karşılık düşen tek-hat harmonik bileşen modelleri (b).

1: Enerji dağıtım hattı

R: Hattın omik direnci

2: Nonlineer yük

X: Hattın reaktansı

- Faz iletkenleri arasındaki karşılıklı kuplaj etkisi ihmal edilebilir.
- Bütün şönt (kaçak) kapasiteler ve dirençler de ihmal edilebilecek mertebededir.
- Uç gerilimlerdeki harmonik bileşenler dikkate alınmamıştır.
- Deri etkisi ihmal edilmiştir.

Bu durumda n'inci harmonikle ilgili devre denklemi

$$\underline{E}_n = 0 = \underline{Z}_n \underline{I}_n + \underline{V}_n \quad (n=1, 3, 5, \dots) \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir. E hat başı (besleme), V ise hat sonu gerilimidir. Hattın empedansı ise

$$\underline{Z}_n = R + jnX \quad (2.19)$$

olacaktır.

Enerji sistemlerinde gerilim değıştirci transformatörlerin bulunması sonucu “Harmonik Yük Akışı” analizleri yapılır; dağıtım tesislerinde ise, meselâ 400 V’luk alçak gerilim çıkışından itibaren incelenecek şebekelerde, “Harmonik Akım Dağılımı” daha pratiktir. Enerji sistemleri parametre bakımından lineer özellikte olduklarından, herbir harmonik için “Kirchoff’un Akımlar ve Gerilimler Kanunları” ile “Toplamsallık Teoremi” daima geçerlidir. Sistemin topolojisi değışse de (radyal, ring, dalbudak, gözlü şebeke gibi) duruma göre yazılacak devre denklemleri uygulanabilir.

Faz akımlarının dengesiz olması ve alçak gerilim tesisinde nötr iletkeninin bulunması halinde, (2.18) ifadesine ilâveten nötr iletkeni için de denklem yazmak gerekir. Birden fazla yük içeren (d tane yük düğüm-

uç noktası olan) bir tesiste, nötr akımı parça parça göz önüne alınabilir. Toplamsallık teoremi yardımıyla n'inci harmonik için en büyük nötr akımının değeri

$$I_{\text{nötr}_n} = \sum_{k=1}^d I_{\text{nötr}_{n,k}} \quad (2.20)$$

olacaktır.



3. NONLİNEER YÜKLERİN BULUNDUĞU ALÇAK GERİLİM ŞEBEKESİNDE NÖTR İLETKENİNİN ANALİZİ

3.1 Nonlineer Yükler Bakımından Alçak Gerilim Şebekesinin Durumu

Yarıiletken teknolojisine dayalı modern güç elektroniği elemanlarının geliştirilmesi sayesinde güç dönüştürücüleri alanında büyük değişimler gerçekleşmiştir. Bipolar jonksiyonlu transistörler (BJT), metal-oksit yarıiletkenli alan etkili transistörler (MOSFET), yalıtılmış kapılı bipolar transistörler (IGBT) ve MOS kontrollü tristörler (MCT) bu elamanlardandır (Mohan vd., 1989). Bu yeni ve yüksek verim sağlayan teknoloji sayesinde enerji kayıplarında, cihaz boyut ve ağırlıklarında ve maliyetlerde çarpıcı azalmalar mümkün olmaktadır. Günümüzde bu teknolojiye birçok alanda artışı süren bir talep vardır. Bu alanlara şunlar örnek gösterilebilir:

- Mikroimalât teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde önemli gelişmelerin ve hızla artan bir kullanım yaygınlaşmasının görülmekte olduğu bilgisayar ve bilgi-işlem sistemleri, haberleşme sistemleri ve televizyon vb. elektronik aygıtlar için ihtiyaç duyulan regülasyonlu besleme cihazları ve çoğu zaman kesintisiz güç kaynakları,
- Proses kontrolunda kompresörler ve pompalar gibi makineler için gereken hız kontrollu motor besleme sistemleri,
- Fabrika otomasyonunda robotlar vb. için gerekli servo tahrik sistemleri,
- Klima ve mekan ısıtma sistemlerinde kullanılan hız kontrollu, kapasite modülasyonlu ısı pompaları,
- Floresan ve diğer deşarjlı aydınlatma sistemleri,
- Endüksiyonla ısıtma.

Bu örneklerin hepsi, eski teknolojinin çeşitli problem ve noksanlıklarına çareler getirdiğinin gözlemlenmesi sonucu olarak modern güç elektroniğinin rağbette olan uygulamalarıdır. Ancak, modern güç elektroniğinin de başka sistem problemlerine yol açtığına farkedilmesi fazla gecikmemiştir. Çünkü modern güç kontrol yöntemlerinin uygulamaya girmesi ve nonlinear karakterli yüklerin toplam sistem yükü içindeki oranının artışı ile birlikte, elektrik enerji sisteminin harmonik akımlarla aşırı bir “kirlenme” yoluna girdiği gözlenmiştir. Yukarıda örnek verilen uygulamaların çok önemli bir kısmı ise, enerji sisteminin alçak gerilim bölümlerindedir. Dolayısıyla günümüzde alçak gerilim enerji dağıtım sistemleri önemli ölçüde harmonik kirlenmesine açık durumdadır.

3.2 Alçak Gerilim Enerji Dağıtım Şebekesinde Yer Alan Harmonik Kaynakları

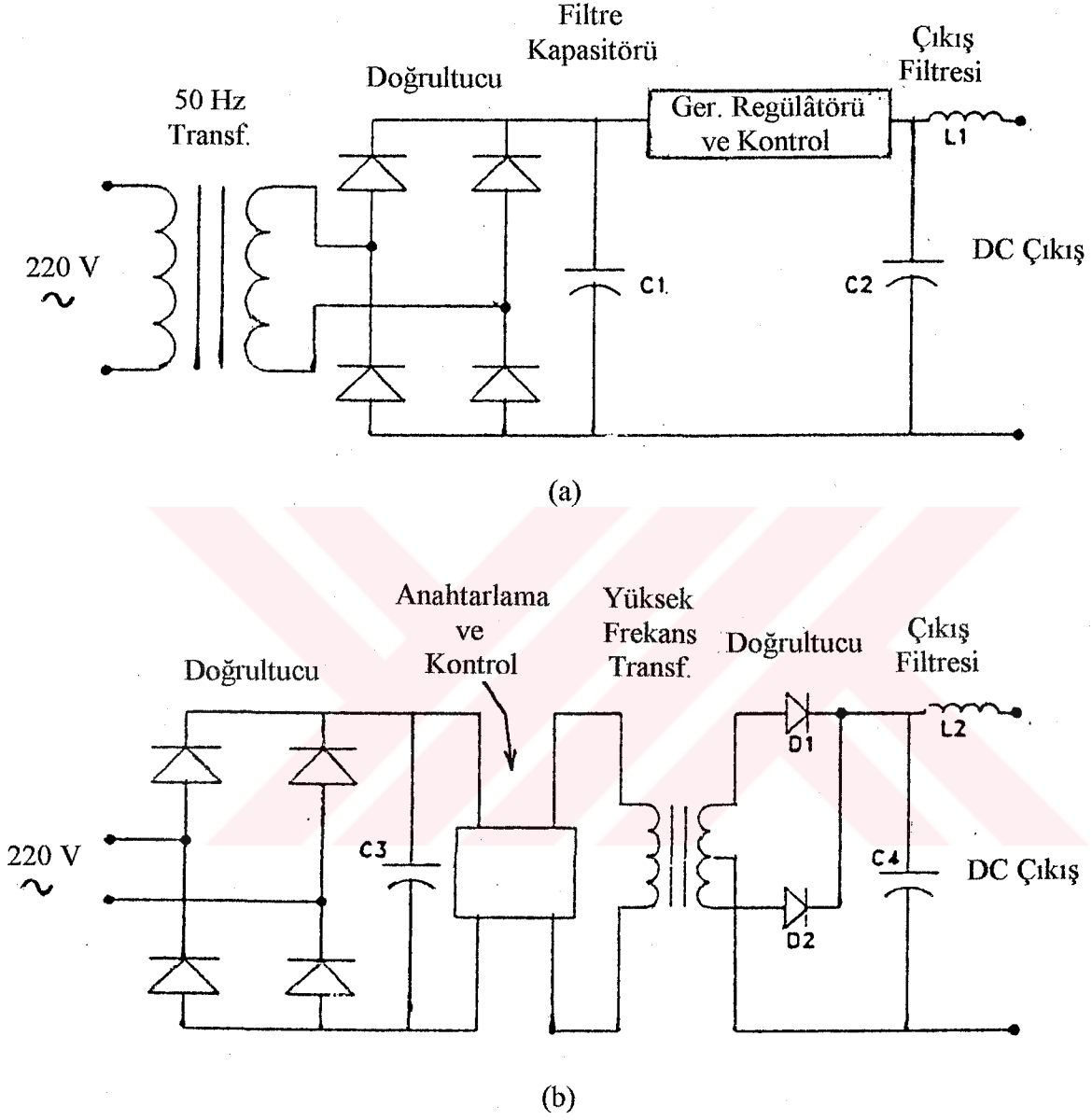
Yukarıda sözü geçen uygulamalar çerçevesinde, alçak gerilim sistemlerinde yer alan başlıca harmonik kaynakları olarak şunlardan söz edilebilir:

- Anahtarlama güç kaynakları,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Fan, pompa, klima cihazı, asansör, takım tezgahı vb'nin tahrik motorları için kullanılan yarıiletken temelli hız kontrollü besleme donanımları,
- Çeşitli amaçlar için yarıiletken temelli güç dönüştürücüleri,
- Floresan ve diğer deşarjlı aydınlatma donanımlarında kullanılan demir nüveli endüktif balastlar ve elektronik balastlar.

Yarıiletken “yongalar” (“chip”ler) kullanan modern elektronik cihazlar için genellikle 3 volt ile 15 volt arasında bir dc güç kaynağı gerekli olur. Yakın geçmişteki yıllara kadar bu gerilimi elde etmek için bir indirici transformatör, doğrultucu köprüsü, filtre ve gerilim regülatöründen oluşan alışılmış tip besleme üniteleri kullanılmıştır (Şekil 3.1(a)). Doğrultucudan elde edilen doğru akım C1 ve C2 kondansatörleri ve L1 şok bobini ile süzülerek düzgün bir çıkış gerilimi elde edilir. Girişteki transformatörün endüktansının, çekilen akımın dalga şeklindeki bozulmaları önleyici etkisi vardır. Böylece giriş akımının harmonik içeriği düşük kaldığından, bu cihazlar lineer güç kaynakları olarak bilinir (Dugan vd., 1996). 50 Hz’te çalışan transformatör ve filtre bölümündeki demir çekirdekli bobin, ağır, verimsiz ve pahalıdır.

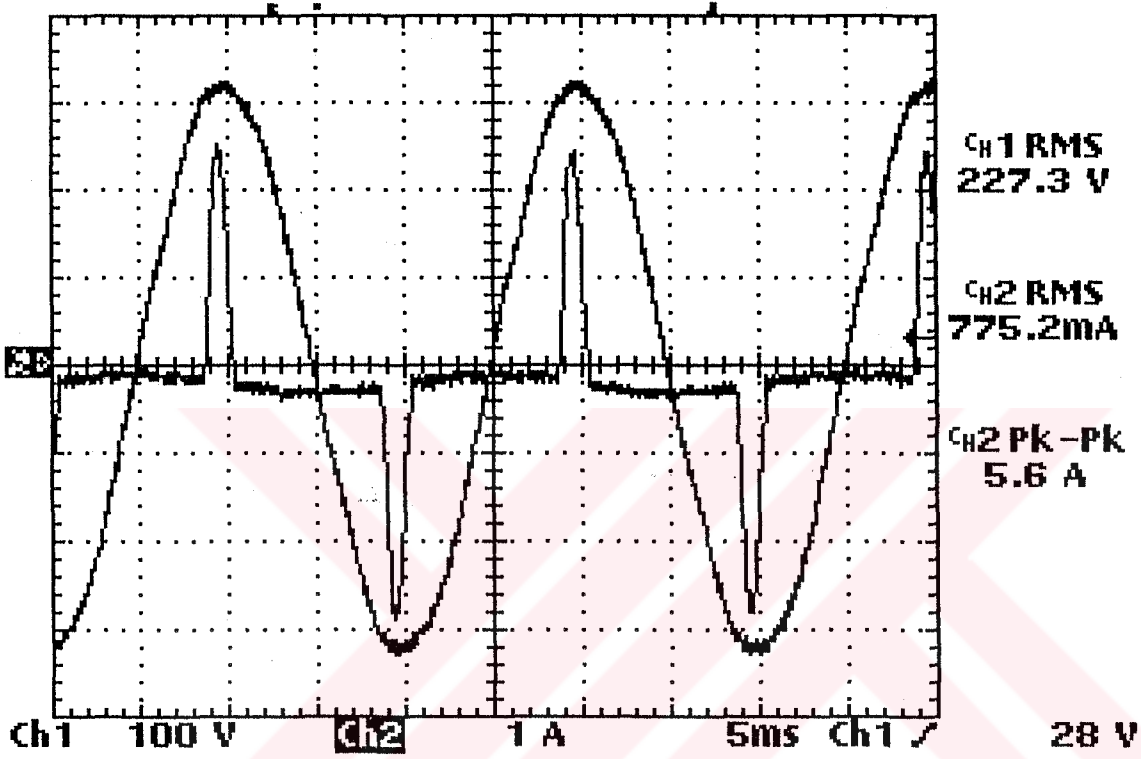
Şekil 3.1(b)’de prensip şeması görülen modern teknolojili anahtarlama güç kaynaklarında ise, girişteki transformatör elimine edilmiş olup, doğrultucu diyot köprüsü doğrudan doğruya 220 voltluk giriştedir. Bu dc gerilim, anahtarlama devresi üzerinden 10-100 kHz mertebesinde yüksek frekanslı ac gerilime dönüştürülür. Bu gerilim yüksek frekanslı indirici transformatörden geçirilerek çıkışta yeniden doğrultulur. Yüksek frekans sayesinde buradaki transformatör ve demir çekirdekli filtre bobini, lineer güç kaynağındakine nazaran daha küçük boyutlu, daha hafif ve daha verimlidir.

Bilgisayarlar, yazıcılar, kopyalama makinaları ve diğer birçok tek faz beslemeli elektronik donanımda bugün artık anahtarlama güç kaynakları kullanılmaktadır. Bu kaynakların kullanımı, floresan aydınlatmada elektronik balastlar için de yaygınlaşmaktadır.



Şekil 3.1 Bilgisayar vb. ve elektronik cihazlar için dc güç kaynakları.
 (a) Lineer güç kaynağı, (b) Anahtarlama güç kaynağı.

Anahtarlamaalı güç kaynaklarında giriş akımının dalga biçimi, Şekil 3.1(b)'deki C3 kondansatörünün herbir yarım periyotta yeniden şarj oluşundan ötürü çok kısa darbeler şeklindedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kişisel bilgisayarlar için kullanılan bir anahtarlamaalı güç kaynağının giriş akımına ait dalga biçimi (Sinüsoidal dalga, cihazın uçlarına uygulanan gerilimi göstermektedir), (Tunçmatik San. ve Tic. Ltd. Ş., 1997).

Enerji dağıtım şebekelerinde halen kullanımı yaygınlaşmakta olan nonlineer yükler, akım dalgası biçimlerine göre, başlıca üç sınıfta toplanabilmektedir (Emanuel vd., 1995). Bu sınıflar aşağıda A, B, C ile adlandırılmıştır. Şekil 3.3'te bu sınıflara ait tipik akım dalgası biçimleri görülmektedir.

Sınıf A

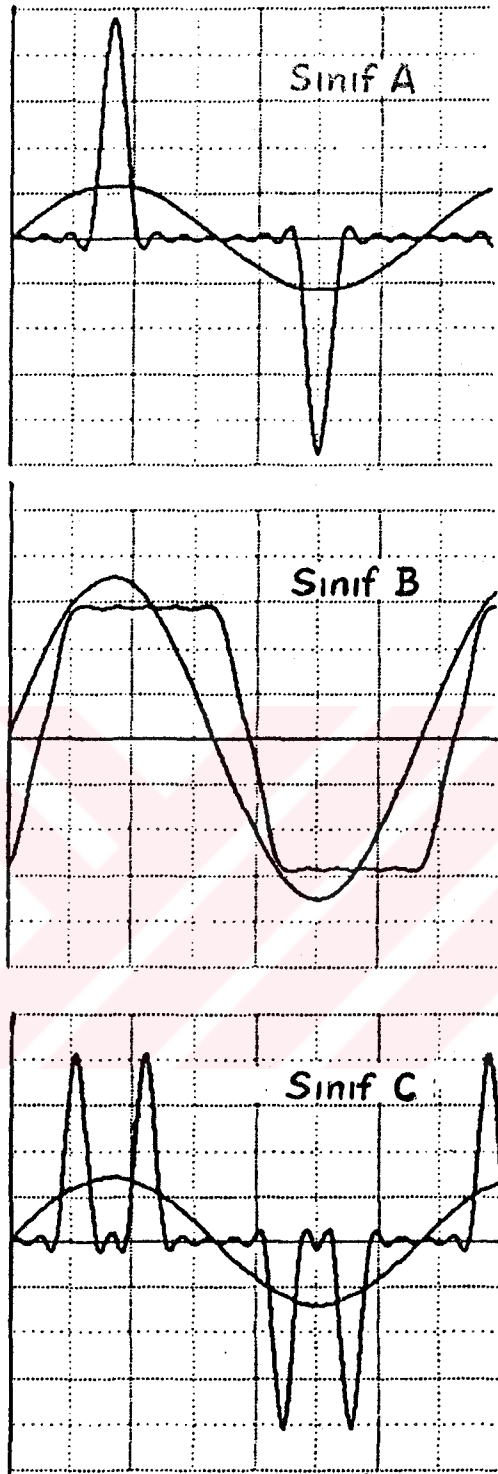
Bilgisayarlar (Şekil 3.2), televizyonlar, elektrikli taşıma aracı batarya şarj cihazları, tek fazlı hız kontrollu motor sürücüleri ile elektronik balastların bir kategorisi bu sınıf yüklere girmektedir. Akım dalgasındaki darbe genişliğine bağlı olarak, *akım toplam harmonik distorsiyonu* % 40 ile % 140 arasında veya daha yüksek olabilir.

Sınıf B

Trapez veya yaklaşık kare biçimindeki bu dalga biçimi, şu tip yüklere özgüdür: floresan aydınlatma (Şekil 2.6), dc tarafında büyük değerde düzeltici endüktans bulunan tek fazlı doğrultucular, bazı batarya şarj cihazları, hız kontrollu dc seri motor sürücüleri, özel filtreli elektronik balastlar ve akım kaynağı tipi inverterler.

Sınıf C

Yarım periyod başına çift tepeli bu akım dalgası biçimi, hız kontrollu 3 fazlı ac motor sürücüleri için tipiktir. *Akım toplam harmonik distorsiyonu* % 100'lere kadar çıkabilir, fakat üçüncü harmoniğin zayıflığı (veya yokluğu) halinde ve girişte reaktans kullanımı ile % 60 veya daha aşağıya inebilir.



Şekil 3.3. Başlıca nonlineer yük sınıflarına ait tipik akım dalgası biçimleri (Emanuel vd., 1995). (Sinüsoidal dalgalar, uygulanan gerilime aittir.)

3.3 Nötr İletkeninin Durumu

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan alçak gerilim sistemi, “üç fazlı dört telli”, yani üç adet faz ve bir nötr hattından meydana gelen sistemdir. Böylece, büyüklük ve tiplerine göre üç fazlı ve tek fazlı olabilen alçak gerilimli yüklerin aynı sistemde yer alması mümkün olur. Enerjinin alçak gerilimli alıcı elemanlara ulaşmasını sağlayan bu sistem, endüstriyel tesislerde, ticari kompleks ve binalarda ve yerleşim bölgelerinde dağıtım şebekesi olarak yer almaktadır.

Alçak gerilimli enerji dağıtım sisteminin tasarım ve tesis aşamasında tek fazlı yüklerin kW, çalışma rejimi vb. bakımından üç faz arasında dengeli dağıtılmasına özen gösterilir. Üç fazlı yükler ise, yapıları gereği zaten dengelidir. Böylece normal işletme şartlarında nötr iletkenindeki akımın küçük değerlerde olması ve örnek olarak faz akımının % 20’si dolayını geçmemesi beklenir. Fakat nonlinear yüklerin toplam yük içindeki oranının artışına bağlı olarak, sistemde bu ideal şartların artık hüküm sürmediği durumlar olabilmektedir. Özellikle bilgisayar donanımlarının yoğun olduğu sistemlerde çarpıcı nötr akımı seviyeleri gözlemlenir hale gelmiştir. ABD’de bilgisayar ve bilgi-işlem ortamının ağırlıklı olduğu 146 mahal üzerinde yapılan bir tarama, bu mahallerin % 22.6’sında nötr iletkenindeki akımın, ortalama faz akımının % 100’ünü aştığını ortaya çıkarmıştır (Gruzs, 1990).

Sadece lineer yüklerin bulunduğu varsayılan bir sistemde, bu yüklerin fazlara dengeli dağılmış olması halinde faz akımlarının toplamı sıfır olduğundan, nötrde akım bulunmaz; ancak fazlarda yük dengesizliği varsa nötrden akım akabilir. Fakat sistemde nonlinear yükler de varsa nötrde daima akım bulunur ve bunların fazlara dengeli dağıtılması ile nötr akımı

yok olmaz. Durum genel haliyle aşağıdaki gibi açıklanabilir (Not: "3'ün katları" deyiminden "3'ün tek katları" anlaşılmalıdır, çünkü enerji sistemindeki alternatif gerilim ve akım dalgalarında çift sayı mertebeli harmonikler söz konusu değildir [Bkz: Sayfa 10]):

- (a) Üç fazlı nonlinear yüklerin 3. ve 3'ün katları mertebelerdeki akım harmonikleri, herbir yük için üç faz iletkenlerinde aynı faza (yani homopoler duruma) düşerek toplamda çakıştıklarından, faz büyüklüklerinin 3'er misli akımlar olarak nötr iletkenine yığılırlar. Sadece yükler arasında olabilecek spektrum açısı farkları ve şebeke empedanslarındaki gerilim düşümleri, bu 3'er misli büyüklükteki harmoniklerin nötr iletkeninde tam üst üste düşmelerini (yani global toplamalarının tam aritmetik toplamalar olmasını) engelleyebilir. Aynı ayrı yük noktalarının üçer fazında dengeli çalışma halinde bulunan eş karakterli tek fazlı nonlinear yükler için de aynı durum geçerlidir (Fakat bunların üç fazda dengeli çalışmada olmamaları halinde, spektrum "data"ları kısmi yüklerde genellikle değişmiş bulunacağından (IEEE Standard 519-1992), 3. ve 3'ün katı mertebeli harmonikler bakımından durumları daha ziyade (b)'deki gibi de olabilecektir.).
- (b) Üç faza dağıtılmış farklı karakterlerde tek fazlı nonlinear yüklerin 3. ve 3'ün katı mertebeli akım harmonikleri, özellikle spektrum açısı farkları yüzünden çakışma durumundan oldukça ayrılabilmelerine rağmen gene de hatırı sayılır bileşmeler halinde nötr iletkenine yığılırlar.
- (c) (a)'da belirtilen nonlinear yüklerin temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonik akımları, üç faza dengeli dağıldıklarından, toplamda sıfır olur ve dolayısıyla bunların nötr akımına katkıları olmaz.
- (d) (b)'de sözü geçen ve zaten spektrum farkları yüzünden dengeli olamayan farklı karakterli tek fazlı nonlinear yüklere ve (a)'da

parantez içinde belirtildiği gibi fazlar arasında dengeli çalışmayan eş karakterli tek fazlı nonlinear yüklere ait akımların temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonikleri ise, üç fazın toplamında sıfır olmadıklarından, fazör toplamaları halinde nötr akımına katılırlar.

- (e) Üç fazlı lineer yüklerden nötr akımı kaynaklanamaz. Ancak, tek fazlı lineer yükler, gerek kuruluştan gelen ve gerekse çalışma rejimlerine ve eşzamanlılık durumlarına göre değişen fazlar arası dengesizlikleri oranında nötr akımına temel bileşen katkısında bulunurlar. Bu katkı zaman zaman hatırı sayılır bir ölçüde olabilir.

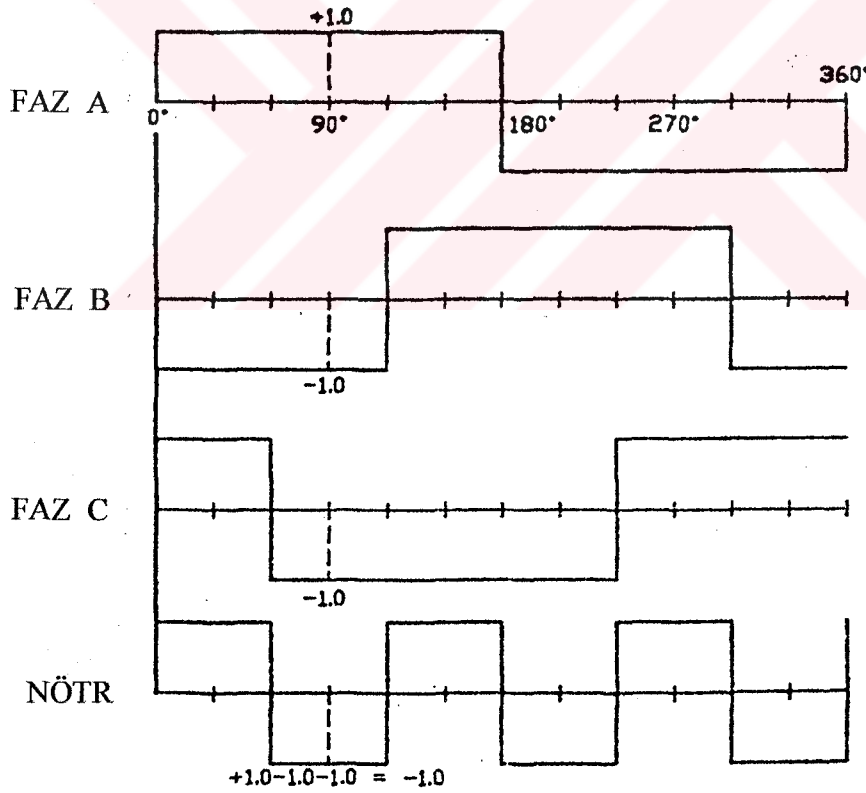
Özetle, 3. ve 3'ün katları mertebelerdeki harmonikler, fazlara ister dengeli, ister dengesiz dağılmış olsunlar, nötr iletkeninde ağırlıklı olarak bulunurlar; bu bulunuş, faz değerlerinin aritmetik toplamına eşit veya ona yakın büyüklüklerde olur. Temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonikler ise sadece dengesiz olmaları halinde nötr akımında mevcut olurlar.

Şekil 2.6 ve Şekil 3.4'te 3 fazlı nonsinüoidal akımların dengeli olmaları halinde bile toplamalarının sıfır olmayıp 3. ve 3'ün katı mertebeli harmoniklerden meydana gelen nötr akımlarına sebep oluşlarının örnekleri görülmektedir (Yani yukarıda (a)'da belirtilen nonlinear yüklerin durumu). Şekil 2.6'daki nötr akımının hemen hemen tamamen 3. harmonikten ibaret olduğu görülüyor. Şekil 3.4'teki nötr akımında ise 3. harmoniğe ilâveten 3'ün katı mertebeli harmoniklerin de farkedilir derecede mevcut oluşu, nötr akımının sinüs değişiminden uzak dalga şeklinden bellidir.

Dolayısıyla, lineer olmayan yüklerin de bulunduğu üç fazlı dört iletkenli alçak gerilim dağıtım sistemlerinde – bilhassa da yüklerin çalışma rejimleri ve aralarındaki eşzamanlılık derecesi bakımından önemli farklılık ve değişimlerin olabildiği tesislerde – tedbir alınmadığı takdirde

nötr iletkeninde ciddi aşırı akımların beklenebileceği, gerçekten ortaya çıkmaktadır.

Literatürde, faz-nötr beslemeli bilgi işlem ve elektronik ofis donanımının ağırlıklı olduğu mahallerde faz akımının 1.73 katına kadar mertebede nötr akımlarına rastlandığının saptandığı bazı araştırmaları açıklayan ve nötr hattı olarak faz iletkenine eşit kesitte çift iletken kullanılmasını tavsiye eden kaynaklara da rastlanmaktadır (Computers and Business Equipment Manufacturers' Association {CBEMA}, 1988; Grusz, 1990). Nötr iletkeninin faz iletkenleri ile aynı kesitte olduğu hallerde, faz akımının 1.73 katı değerinde bir nötr akımı, nötr iletkeninde, faz iletkenlerindeki ısınmanın $(1.73)^2=3$ katı mertebede bir ısınmaya yol açacaktır.



Şekil 3.4 Üç fazlı dengeli nonsinüsoidal akımlar halinde nötr akımının meydana gelmesine bir örnek (Gruzs, 1990).

3.3.1 Harmonikli nötr akımlarının sebep olabildiği problemler

Harmoniklerin Altbölüm 2.4'te değinilen etkilerinin dışında, harmonikli nötr akımlarının yol açabileceği şu problemlerden söz edilebilir.

- Nötr iletkeninde aşırı ısınmalar ve bununla bağlantılı ilave enerji kayıpları meydana gelecektir.
- Nonlineer yüklerin yol açtığı harmonik yönünden zengin nötr akımları çoğunlukla “tepe değeri/efektif değer” oranı yüksek olan akımlar olduğundan, harmonik frekanslardaki şebeke empedansları üzerinde bunların yapacağı gerilim düşümleri, şebekede gerilim dalgalarını “basık tepeli” olacak biçimde bozacaktır. Bu gerilim distorsiyonu da, motor vb. elektromagnetik elemanlarda ek ısınmalara yol açacaktır.
- Nötr iletkenindeki 3. ve 3'ün tek katı mertebeli harmonik akımlar üç fazlı sistemde homopolar özellikte olduklarından, bunlar üçgen/yıldız bağlı dağıtım transformatörlerinin giriş hat akımlarına yansımayıp üçgen bağlı primer sargılarda aynı mertebeli harmonik sirkülasyon akımlarının dolaşmasına sebep olur. Bu ise, bir yandan transformatörlerde ilave bir ısınma ve diğer yandan primer devredeki aşırı akım cihazlarının gerçek durumu algılayamaması demektir.
- Elektriksel gürültünün bir çeşidi, nötr-toprak arası gerilim farkı niteliğinde olanıdır. Yüksek harmonikli nötr akımlarında, nötr iletkeninin harmonik frekanslardaki empedansı üzerinde önemli gerilim düşümleri ortaya çıkabilir. Bunlar, yüklerin bağlantı noktalarına nötr-toprak arası elektriksel gürültü olarak yansır. Bu ise bilgisayarlar, programlanabilir kontrolörler gibi hassas elektronik cihazların çalışmasını bozabilir (Gruzs, 1990; Dugan vd., 1996).
- Anahtarlama vb. güç kaynaklarında giriş tarafı kondansatörünün tam dolması gerilimin tepe değerine bağlı olduğundan, yukarıda sözü geçen “basık tepeli” gerilim dalgası bu güç kaynaklarına düşük gerilim gibi görünecektir (Gruzs, 1990).

3.4 Nötr İletkeninden Geçen Harmonikli Akımın Şebeke Üzerindeki Etkinliğinin Analizi

Bu çalışmada üzerinde durulan nötr iletkeninden geçen harmonik akım bileşenleri şebekeyi

- Nötr iletkeninin ısınması yönünden,
- Nötr iletkeninde ek I^2R kayıplarına yol açılması bakımından

olumsuz yönde etkileyecektir.

"d" adet düğüm (yük bağlantı) noktası bulunan bir alçak gerilim şebekesinde, "harmonik akım dağılımı" analizi yapıldıktan sonra,

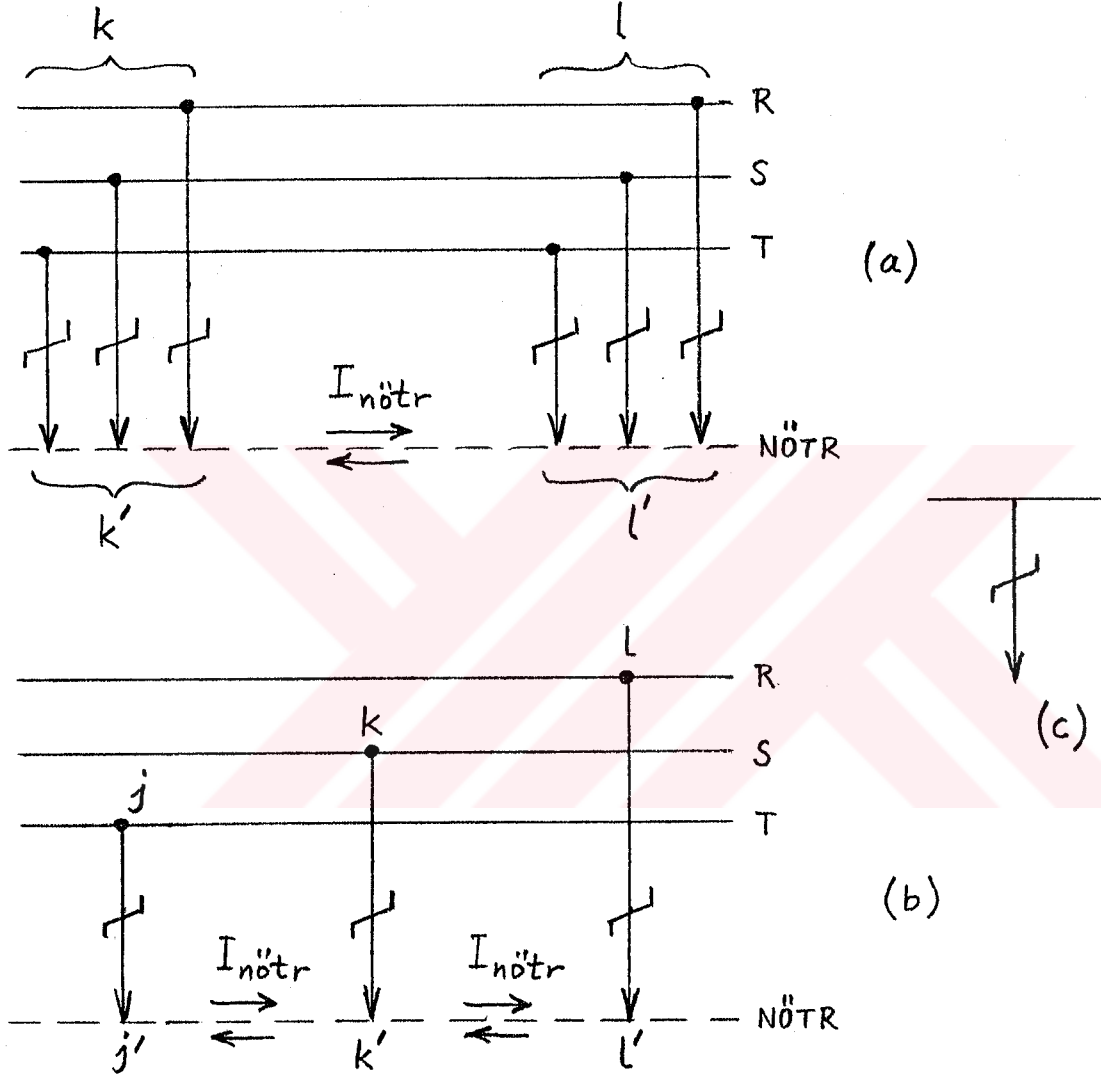
- (Tüm düğümler arasındaki) herbir faz iletkeni parçasından geçen akımların harmonik bileşenleri,
- Şebeke boyunca – tüm düğümlerin görüntüleri arasındaki – nötr iletkeni parçalarından geçen akımların harmonik bileşenleri

elde edilecektir (Şekil 3.5).

Şekil 3.5'teki nötr akımının yönü, beslenme noktasının sayısı, hattın topolojisi, hat yüklerinin (faz güçlerinin) değerleri gibi parametrelere bağlı olarak soldan sağa veya sağdan sola olabilir. Tek taraftan beslenen radyal ve dalbudak şebekelerde nötr akımı (dolayısıyla harmonik bileşenler) için "tek" yön söz konusu iken, iki taraftan beslenen radyal şebekeler ile ring ve gözlü şebekelerde "farklı" yönler ortaya çıkabilir.

Şekil 3.5'ten görüldüğü gibi, harmonikli nötr akımının etkinliğinin araştırılması çerçevesinde, (b) deki düzende (a) daki düzene göre 2 kat daha fazla "nötr parçası" dikkate alınacaktır. Her nötr parçasından farklı

harmonik bileşenler akacağı için, gerek “ısınma”, gerekse “ek kayıplar” bakımından yapılacak incelemelerde, ortaya konulacak bağıntılar “d” adet düğüm noktasını içine alacaktır.



Şekil 3.5 Bir alçak gerilim şebekesinde nonlinear yüklerin iki farklı bağlantısı sonucu nötr akımları: yüklerin aynı noktadan beslenmesi (a) ve yüklerin faz atlanarak – ötelenmiş olarak – beslenmesi (b). Nonlinear yük gösterimi (c). (j', k' ve l', görüntü noktalarıdır.)

3.4.1 Isınma yönünden harmonikli nötr akımının etkinliği

Bir alçak gerilim şebekesinde nötr akımının ısınma yönünden etkinliği şunlara göre ele alınmak durumundadır:

- Harmonik bileşenlerin akım yoğunluğu,
- Harmonik bileşenlerden en büyük olanının temel bileşene oranının mertebesi,
- Maksimum harmonik mertebesi,
- Nonlineer yüklerin günlük yüklenme programı (saatlik, tam yük, yarım yük, % 20 aşırı yük vb.),
- Nonlineer yüklerin şebekede yerleşim biçimi (Şekil 3.1(a) veya (b)'deki düzenleme),
- Yükler arasındaki mesafeler (k-l veya j-k-l aralıkları),
- Besleme noktalarının sayısı,
- Nötr iletkeninin malzemesi ve yapım özelliği,
- Nötr iletkeninin şebeke boyunca kesitinin değişimi (Uygulamada, besleme noktasından itibaren gittikçe küçülen, böylece malzemeden maliyet minimizasyonu sağlayan kademeli kesit kullanmak yerine çoğunlukla sabit kesit yaklaşımı tercih edilmektedir).

Bir alçak gerilim şebekesinde nötr iletkenindeki harmonik bileşenlerin yol açtığı aşırı ısınma iki şekilde ortaya konulabilir:

- Harmonik akım dağılımı sonunda, k'-l' veya j'-k'-l' arasındaki akımlar içindeki en büyük harmonik distorsiyon akımı belirlenir. Bu akım, nötr akımının temel bileşen dışındaki harmonik bileşenlerini ihtiva eder:

$$I_{n\ddot{o}tr,h} = \left\{ \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} \right\}_{n\ddot{o}tr} \quad (3.1)$$

Bu akımın temel bileşene nazaran yol açtığı ek ısınma, “iletken ısınma çizelgesinden” görülebilir. Veya analitik olarak

$$\text{Bağıl Isınma} = \frac{\{I_1^2 + I_h^2\}_{n\text{ötr}}}{I_{n\text{ötr},1}^2} \quad (3.2)$$

değeri yazılabilir.

- Diğer taraftan, harmoniklerin ısınma üzerindeki etkileri akım yoğunluğu vasıtasıyla de gösterilebilir; şöyle ki:

$$J_{n\text{ötr}} = \frac{I_{n\text{ötr},1}}{q} \quad (\text{A/mm}^2) \quad (3.3)$$

$$J'_{n\text{ötr}} = \frac{\{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots\}_{n\text{ötr}}^{1/2}}{q} \quad (\text{A/mm}^2) \quad (3.4)$$

ifadeleri kullanılarak "ısınma $\Leftrightarrow$ akım yoğunluğu" ilişkisinden ($J'_{n\text{ötr}} > J_{n\text{ötr}}$ olduğundan) ısınma artışı kolaylıkla görülebilir.

3.4.2 Kayıplar yönünden harmonikli nötr akımının etkinliği

Enerji sistemi üzerinde yer alan harmonikli yükler, faz iletkenlerinde olduğu kadar nötr iletkeni üzerinde de ek $I^2 R$ kayıplarına yol açar. Nötr iletkeninde ortaya çıkan ek kayıplar

$$\Delta P_{n\text{ötr}} = \{R_{n\text{ötr}} I_{n\text{ötr},h}^2\} \quad (\text{tüm } k' - l' \text{ veya } j' - k' - l' \text{ parçaları için}) \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Ek kayıplar, teknik yönden Altbölüm 3.4.1'de ifade edilen “ek ısınma”ya yol açtığı kadar, “ek enerji maliyeti”ne (“ek değişken maliyet”e) de yol açmaktadır. Ek kayıpların ekonomik etkinliği,

- saatlik işletme süresi,
- elektrik idaresinin enerji satış tarifiesi (TL/kWh),
- satış tarifesinde yıl boyunca yapılan fiyat ayarlamaları

gibi faktörlere bağlıdır.

Günlük yüklenme eğrisinin ayrı ayrı sabit ek nötr kayıp güçleriyle çalışılan "g" tane dilimden meydana geldiği kabulü ile ve "t_d" dilim içi saat sayısını göstermek üzere, günlük ek (harmonik) nötr kayıp enerjisi

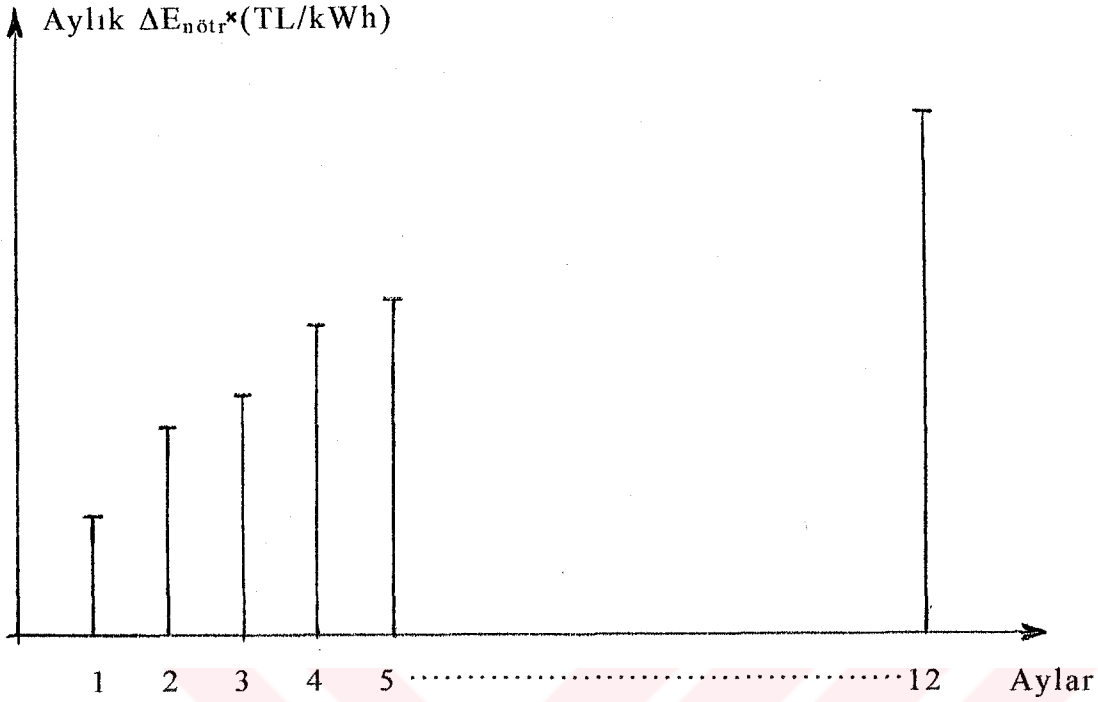
$$\Delta E_{\text{nötr}} = \sum_{d=1}^g t_d (\Delta P_{\text{nötr}})_d \quad (d = 1, 2, 3, \dots, g) \quad (3.6)$$

olacaktır. Yüklerin günlük yüklenme programının bilindiği ve değişmediği kabul edilecek olursa, (3.6) ifadesinden aylık ek kayıp enerji miktarı da bulunabilir. (TL/kWh) enerji tarifesinin aylık olarak değişmesi sebebiyle aylık kayıp enerji miktarının baz alınması düşünülmüştür. Şekil 3.6'da nötr iletkeninde meydana gelen ek kayıp enerji maliyetinin yıllık tutarı, “Para Akış Diyagramı” üzerinde gösterilmiştir.

1. aydan itibaren 12. ayın sonuna kadar nötr iletkeninde ortaya çıkan Toplam Kayıp Enerji Maliyeti (TKEM),

$$\text{TKEM} = \sum_{m=1}^{12} (\text{TL/kWh})_m \cdot \{ \Delta E_{\text{nötr}} \}_m \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 3.6 Nötr iletkenindeki ek kayıp enerji tutarının yıl bazında para akış diyagramı. (TL/kWh enerji tarifiesi enflasyonist ortamda 1. ayda minimum, 12. ayda maksimumdur. Ancak işletmenin yüklenme programı veya üretim programı yıl içinde değişebileceğinden her ayın “ $\Delta E_{n\ddot{o}tr}$ ” değeri farklı olabilir.)

Kayıp olan enerjiye karşılık düşen paranın (işletme açısından) zaman değeri de göz önüne alınırsa, her ayın ortalama/geçerli faiz oranı i_m olmak üzere (3.7) ifadesi şöyle yazılabilir:

$$\begin{aligned}
 TKEM' = & (TL/kWh)_1 \{ \Delta E_{n\ddot{o}tr} \}_1 (1+i_1) (1+i_2) (1+i_3) \cdots (1+i_{11}) + \\
 & (TL/kWh)_2 \{ \Delta E_{n\ddot{o}tr} \}_2 (1+i_2) (1+i_3) \cdots (1+i_{11}) + \\
 & \cdots + \\
 & (TL/kWh)_{11} \{ \Delta E_{n\ddot{o}tr} \}_{11} (1+i_{11}) + \\
 & (TL/kWh)_{12} \{ \Delta E_{n\ddot{o}tr} \}_{12}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Veya aylık faiz oranının yıl boyunca i sabit değerinde olduğu kabulüyle

$$TKEM'' = \sum_{m=1}^{12} (TL/kWh)_m \{\Delta E_{n\ddot{o}tr}\}_m (1+i)^{12-m} \quad (3.9)$$

ifade edilebilir.

3.4.3 İletkenlerdeki harmonik kayıplarının ("*distorsiyon*" kayıplarının) temel bileşen kayıplarına oranlanmış ifadesi ve bu oranın akım THD'sine yakınlığı

Bu oran, akımın harmonik bileşenlerinin harmoniksiz ideal duruma göre hangi oranda ek kayıplara yolaştığını göstermesi bakımından önemli bir kriterdir. Bu oranın -- deri etkisinin ihmal halinde -- akım THD'sinin karesine eşit olacağı açıktır:

$$RI_h^2 / RI_1^2 \approx (THD_I)^2 \quad (3.10)$$

Harmonikli şartlarda faz iletkenlerinin yüklenme durumunu yansıtmak bakımından pek önemli göstergeler olan akım THD'si ile ona yakın değerlerdeki bu kayıplar oranı, nötr iletkeni için tutarlı kriterler olamaz. Çünkü bu iki kriterin payda (yani belirleyici) büyüklüğü olan temel bileşen akımının nötr iletkeninde bulunup bulunmaması veya ne kadar bulunacağı, üç fazın temel bileşen bakımından dengesizlik derecesine bağlıdır. Aynı durum 5., 7., 11., 13. vb harmonikler için de geçerlidir. Buna karşılık 3. ve 3'ün katı mertebeli harmonikler ise, fazlara ister dengeli, isterse dengesiz olarak dağılıyor olsunlar, faz değerlerinin aritmetik toplamı dolayında büyüklüklerde olmak üzere, nötr akımında ağırlıklı ve devamlı olarak bulunurlar (Alt bölüm 3.3).

Dolayısıyla nötr iletkeni için gerek akım THD'si ve gerekse RI_h^2/RI_1^2 kayıplar oranı, harmonik yoğunluğunun miktarını yansıtmayan rastgele ve daha ziyade yüksek değerler alacak ve hele faz temel bileşenlerinin dengeli hale yaklaşmalarında "sonsuz" dolayına ulaşan değerler alabilecektir. Hatta, yukarı değerlerin daha az harmonik yoğunluklarına, aşağı değerlerin de yüksek yoğunluklara rastladığı tersine durumlar da olabilecektir.

(Yukarıdaki yorum, üç faz+nötr dörtlüsünün dışında tek fazlı yüklere uzanan faz-nötr çiftlerini kapsamaz. Şebekenin -- daha ziyade tüketiciler tarafındaki -- küçük bir yüzdesi olan bu tek fazlı dallar boyunca, söz konusu iki kriter tabiatıyla faz ve nötr iletkenleri için eş değerde olur).

(Sadece iki faza ortak durumda kalabilecek nötr iletkeni parçaları için ise şunlar söylenebilir: İki fazın eş karakterli yüklerle eşit olarak yüklendiğinin düşünüleceği bir hipotetik halde: (•) temel bileşenler ile 5., 7., 11., 13. vb harmoniklerin bileşkeleri, 120°'lik faz farklarının sonucu, aynen faz değerlerine eşit olur; (•) 3. ve 3'ün katı mertebeli harmoniklerin bileşkeleri ise, homopoler özellik sonucu, faz değerlerinin ikişer katına (aritmetik toplamlarına) eşit olur. Yani nötr iletkeninin akım yükü, faz akımını, 3. ve 3'ün katı mertebeli harmoniklerin toplamı kadar aşmış olur. Pratikteki durum da, aşağı yukarı buna benzeyecektir. Fakat, nötr iletkeninin sadece iki faza ortak duruma girmesi hali, sistem için genelleştirilebilecek bir hal olamaz ve ancak bir fazın tek başına devre dışı olabileceği uç kısımlarda normal dışı geçici -- meselâ arıza gibi -- durumlar için akla gelebilir. Dolayısıyla de bu hal, akım THD'si ve buradaki kayıplar oranı ile ilgili olarak değil, daha ziyade nötr iletkeni için kesit belirlenmesi ile ilgili olarak dikkate alınacak hususlardan biri olabilir.)

4. PSpice DESTEKLİ HARMONİK SİMÜLASYONUNA İLİŞKİN MODELLEME ve YENİ TANIMLAMALAR

4.1 Giriş

Enerji sistemlerinin harmonik analizinde kullanılan teknikler, gerektirdikleri veri ayrıntıları, modelleme karmaşıklığı, problem formülasyonu ve çözüm algoritmaları bakımından çeşitlilik göstermektedir. Önemli olan, eldeki verilere elverişli bir teknik seçmektir. Bazı harmonik problemleri, birkaç metodun bir kombinasyonunu gerektirebilir. Alçak gerilim şebekelerinde besleme noktası dışında transformatörler bulunmadığından, "harmonik yük (güç) akışı" yerine, "harmonik akım dağılımı"nın yapılması çoğu kez tercih edilmektedir. En basit ve en sık kullanılan metod, "frekans taraması" metodudur (IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, (1996), "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks. Part I:"). Sözü geçen "frekans taraması" tekniğinde yapılan, nf_1 frekansında

$$[Y_n][V_n] = [I_n] \quad (4.1)$$

şebeke denklemini çözmektir; yani her bir harmonik frekansı için işlem tekrarlanır. Burada $[I_n]$, nonlinear yükler tarafından sisteme "enjekte" edilen harmonik akımlar vektörünü gösterir. $[V_n]$ ise çözülecek olan düğüm noktaları gerilimleri vektörüdür.

Nitekim harmonik analiz tekniklerinin genel bir özelliği, nonlinear yüklerin aslında şebekeden çekmekte oldukları distorsiyonlu akımın harmoniklerini, aynı noktalara yerleştirilmiş birer akım kaynağı tarafından sisteme akıtılan

("enjekte" edilen) akımlar olarak temsil etmektir. Çünkü bu analizlerde temel kabul olarak enerji sisteminin kaynak gerilimi tam sinüsoidal sayıldığından (ki pratikteki duruma yeterince uygun olan da budur) sistem kaynağında bu akım harmoniklerinin ilgili yüklere akmasına yol açabilecek emk harmoniklerinin mevcudiyeti söz konusu değildir. Bunun aksine bir simülasyon ise geçerli olamaz.

Yukarıdaki (4.1) denkleminin harmonikler için çözümünden önce sistemin temel bileşen çözümü söz konusudur.

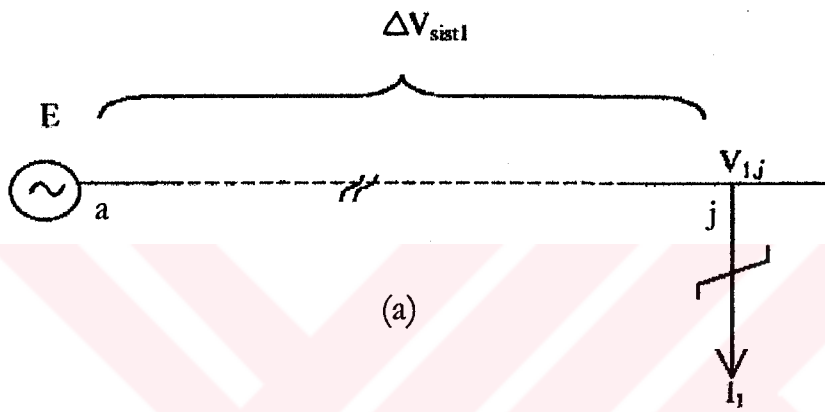
Ticari harmonik analiz programları çoğunlukla dengeli, yani tek faz eşdeğer devre ile temsil edilebilen, sistem konfigürasyonlarına yöneliktir. Bu çalışmada ele alınan alçak gerilim sistemi sayısal uygulama örneği ise, ister istemez, pratik ölçülere göre akla yakın saydığımız bir yük dengesizliği ile düzenlenmiştir. Dengesiz yüklü sistemlerin harmonik analizine uygun bir bilgisayar programının teminindeki güçlük göz önüne alınarak, uygun modelleme yapılmış ve simülasyonda PSpice programı (Tuinenga, 1986) kullanılmıştır.

4.2. Nonlineer Yüklere Ait Akım Harmoniklerinin Sistem Kaynak Gerilimine Göre Kazanacakları Faz Açılarının Önceden Belirlenmesi

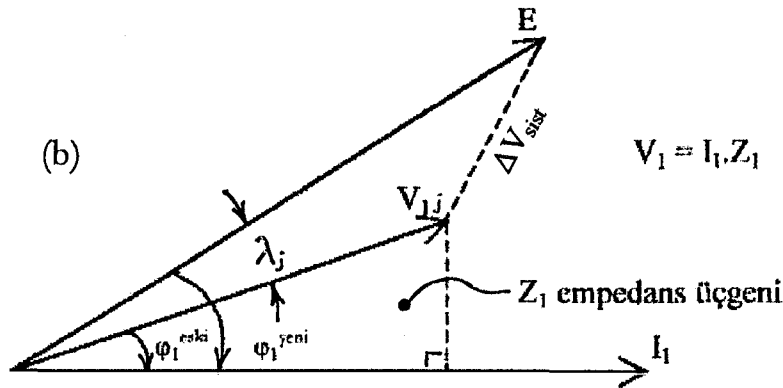
Bu, harmonikleri temsil edecek akım kaynaklarının simülasyon içindeki faz açılarının belirlenmesi demektir. Bunun için her bir nonlineer elemanın faz açılı harmonik spektrumunun elde olması gerekir ve bu faz açıları mutlaka elemanın uçlarına uygulanan gerilime göre verilmiş olmalıdır. Yapılacak iş, ilke

olarak, harmonik spektrumunun bir faz açısı referansından başka bir faz açısı referansına aktarılmasıdır.

Şekil 4.1.'de bir nonlinear elemana ait temel bileşen akımının, uç gerilimi referansına göre verilen spektrumda φ_1^{eski} gibi bir faz açısına sahip iken, simülasyona dahil edilince φ_1^{yeni} gibi bir faz açısını kazanışı görülmektedir.



- E : Kaynak gerilimi (50 Hz).
 ΔV_{sist1} : a-j arası sistem gerilim düşümü temel bileşeni
 V_{1j} : Nonlinear eleman uç gerilimi.
 I_1 : Nonlinear eleman temel bileşen akımı.



Şekil 4.1 (a) Bir nonlinear yükün basit gösterimi.
 (b) Temel bileşen akımının spektrum ve simülasyon faz açıları ve bunların birinden diğerine ötelenme miktarı (λ).

Şekil 4.2.'de aynı durum, akımın harmoniklerini de kapsamak üzere dalga şekilleri üzerinde genelleştirilmiştir. Buradaki semboller, söz konusu simülasyon için şu anlamları taşır:

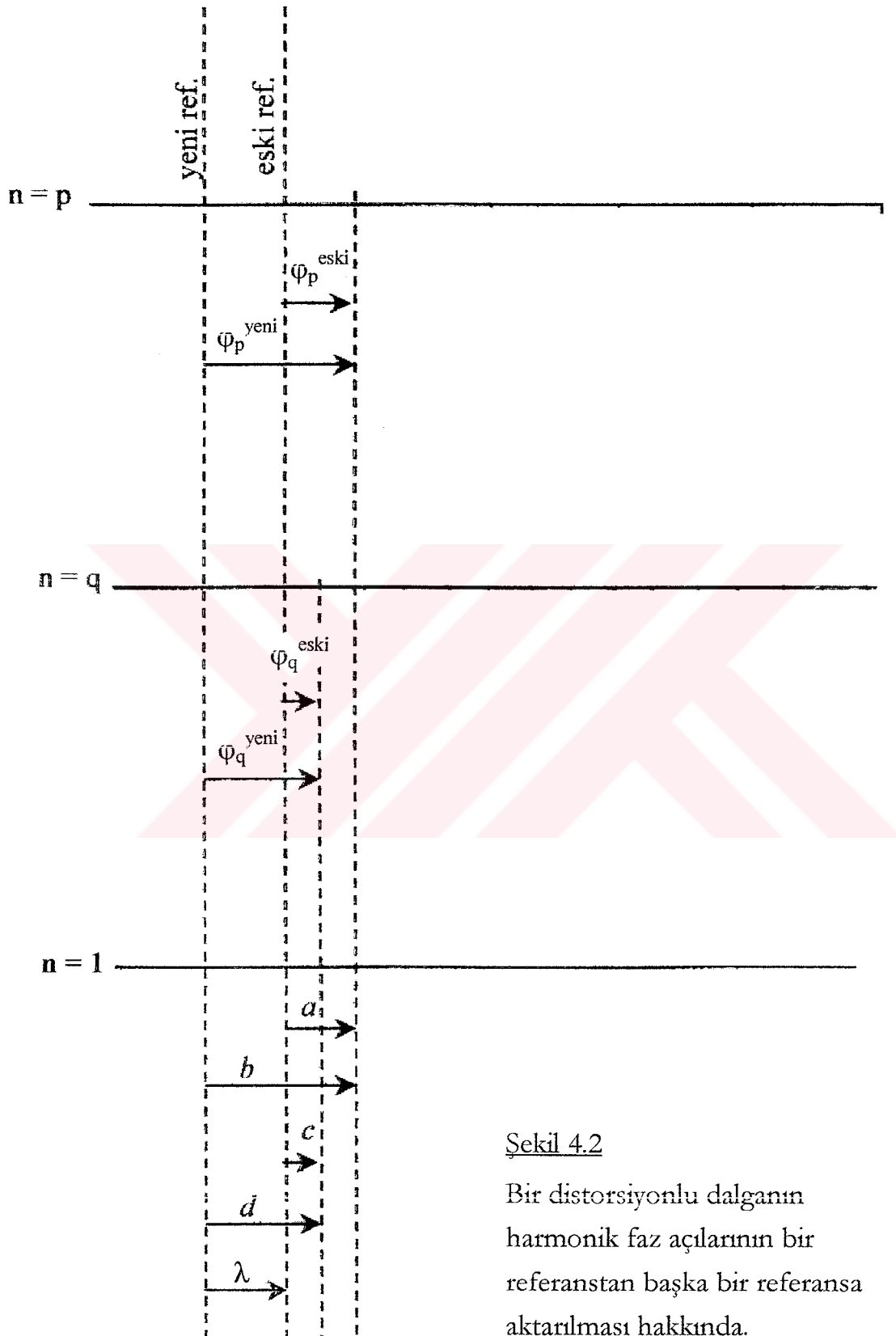
"eski ref." : Nonlineer elemanın uçlarına uygulanan 50 Hz'lik sinüsoidal gerilimin sinüs sıfırı (Elemanın mevcut harmonik spektrumunun dayandığı faz açıları referansı).

$\varphi_p^{\text{eski}}, \varphi_q^{\text{eski}}$: Aynı nonlinear elemana ait p'yinci ve q'yuncu akım harmoniklerinin mevcut spektrumdaki faz açıları (herbiri kendi açı ölçeğinde olmak üzere).

"yeni ref." : Simülasyonda uygulanan sistem kaynak geriliminin sinüs sıfırı (Simülasyon sonucunda sistem üzerinde temel bileşen ve harmonikler olarak elde edilen bütün kompleks akım ve gerilimler için faz açıları referansı).

$\varphi_p^{\text{yeni}}, \varphi_q^{\text{yeni}}$: Sözü geçen p'yinci ve q'yuncu harmoniklerin simülasyona girince kazanacakları yeni faz açıları (Yani bu harmonikleri "enjeksiyon" akımları olarak temsil edecek olan akım kaynaklarının faz açıları -- herbiri kendi açı ölçeğinde olmak üzere).

a, b, c, d : Sırasıyla $\varphi_p^{\text{eski}}, \varphi_p^{\text{yeni}}, \varphi_q^{\text{eski}}, \varphi_q^{\text{yeni}}$ açılarının temel bileşen (n=1) ölçeğindeki değerleri.



Şekil 4.2

Bir distorsiyonlu dalganın harmonik faz açılarının bir referanstan başka bir referansa aktarılması hakkında.

λ : Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere, ele alınan nonlineer elemanın uçlarında simülasyon şartlarında okunan temel bileşen geriliminin faz açısı. (Yani akım kaynaklarının faz açılarını belirlemek üzere spektrumdaki harmonik faz açlarına temel bileşen ölçeğinde uygulanacak ötelenme miktarı).

Bu tanımlamalar doğrultusunda aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p^{\text{eski}}/p &= a, & \varphi_p^{\text{yeni}}/p &= b \\ \varphi_q^{\text{eski}}/q &= c, & \varphi_q^{\text{yeni}}/q &= d \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$(b - a) = (d - c) = \lambda \quad (4.3)$$

$$(\varphi_p^{\text{yeni}} - \varphi_p^{\text{eski}})/p = (\varphi_q^{\text{yeni}} - \varphi_q^{\text{eski}})/q = \lambda . \quad (4.4)$$

O halde,

$$\left. \begin{aligned} (\varphi_p^{\text{yeni}} - \varphi_p^{\text{eski}}) &= (\varphi_q^{\text{yeni}} - \varphi_q^{\text{eski}})p/q \\ (\varphi_q^{\text{yeni}} - \varphi_q^{\text{eski}}) &= (\varphi_p^{\text{yeni}} - \varphi_p^{\text{eski}})q/p \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

veya

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p^{\text{yeni}} - \varphi_p^{\text{eski}} &= p \lambda \\ \varphi_q^{\text{yeni}} - \varphi_q^{\text{eski}} &= q \lambda \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

ve buradan da "yeni" faz açıları, biri diğerine bağlı olarak,

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p^{yeni} &= (\varphi_q^{yeni} - \varphi_q^{eski})p/q + \varphi_p^{eski} \\ \varphi_q^{yeni} &= (\varphi_p^{yeni} - \varphi_p^{eski})q/p + \varphi_q^{eski} \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

veya

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p^{yeni} &= p \lambda + \varphi_p^{eski} \\ \varphi_q^{yeni} &= q \lambda + \varphi_q^{eski} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

olur.

Örnek olarak, bir nonlinear eleman için 3., 5. ve 11. harmoniklerin uç gerilimine göre olan spektrum faz açıları kendi ölçeklerinde sırasıyla 76° , -10° ve -40° olsun. Buna göre mesela 5. harmonik -25° lik yeni bir faz açısına oturduğunda 3. harmonik $(-25^\circ + 10^\circ)3/5 + 76^\circ = 67^\circ$ ye ve 11. harmonik de benzer olarak -73° ye oturmuş olacaktır. Temel bileşen ise $\lambda = -15/5 = -3^\circ$ ötelenmiş olacaktır.

(4.8) ifadeleri, görüldüğü gibi, $q\lambda$ (veya genel yazılışıyla $n\lambda$) terimi vasıtasıyla, harmonik akım kaynakları için fazlar arasındaki 120° ve 240° lik ötelenmelerin de gerekli katlanma ile hesaba girmesini sağlama durumundadır.

(4.7) ifadelerinin ikincisinde $p=1$ yazılırsa,

$$\varphi_q^{yeni} = (\varphi_1^{yeni} - \varphi_1^{eski})q + \varphi_q^{eski} \quad (4.9)$$

elde edilir. Bu ifade, IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, (1996), "Modeling and Part I:" bildirisinde bu konuda verilen ifadeye denk düşmektedir ve daha basit olarak yukarıdaki (4.8) şeklinde yazılabilir:

$$\varphi_q^{yeni} = q \lambda + \varphi_q^{eski} \quad (4.10)$$

Veya, en genel şekilde, n'inci harmonik için

$$\varphi_n^{yeni} = n \lambda + \varphi_n^{eski} \quad (4.11)$$

şeklını alır.

4.3 Nonlineer Yüklere Ait Akım Harmoniklerinin Yük Noktalarındaki Gerilimlere Göre Kazanacakları Genliklerinin Önceden Belirlenmesi ve Simülasyona Girecek Akım Kaynaklarının Fazör Olarak Yazılması

Harmonikleri temsil edecek olan akım kaynaklarının simülasyon için genliklerinin de önceden belirlenmesi gerekir (Yukarıda aynı şey faz açıları için yapıldı). Bu, nonlinear yüklerin simülasyon esnasında maruz kalacakları uç gerilimine bağlı olarak akım harmoniklerinin alacağı değerleri önceden belirlemek demektir. Şebekenin temel bileşen simülasyonu için, örnek olarak

tek fazlı bir A nonlinear yük elemanının temel bileşeni, anma değerlerine bağlı olarak

$$\underline{Z}_{1AN} = V_N \angle 0^\circ / I_{1AN} \angle \varphi_{1A}^{\text{eski}} \quad (4.12)$$

empedansı ile modellenebilir. Burada V_N ($= 220$ V/faz) elemanın anma uç gerilimi, I_{1AN} anma temel bileşen akımı ve $\varphi_{1A}^{\text{eski}}$ temel bileşen akımının spektrum faz açısıdır.

Temel bileşen simülasyonu sonucunda bu nonlinear elemanın bulunduğu j'yinci yük noktasının faz gerilimi ve elemanın çektiği akım, fazör olarak, sırasıyla $V_{1j} \angle \lambda_j$ ve $I_{1A} \angle \varphi_{1A}^{\text{yeni}}$ şeklinde okunuyor olsun. Söz konusu elemanın temel bileşen akımının modülü, spektrum verilerinden simülasyona geçişte

$$I_{1A} = (V_{1j}/V_N) I_{1AN} = (I_{1A}/I_{1AN}) I_{1AN} \quad (4.13)$$

şeklinde orantılı değişmektedir. Sinüsoidal halde akım gerilimin lineer fonksiyonu olduğundan, bu değişmeyi tanımlayan ölçek katsayısı

$$K_j = V_{1j}/V_N = I_{1A}/I_{1AN} \quad (4.14)$$

harmonik bileşenler için de geçerli olacaktır. Dolayısıyla, ele alınan A nonlinear elemanının n'inci akım harmoniğini temsil edecek akım kaynağının modül değeri

$$(I_{nA})_{\text{enjekte}} = K_j (I_{nA})_{\text{spektrum}} \quad (4.15)$$

olacaktır. A elemanının spektrum tablosunda n'inci harmoniğin anma temel bileşen akımına göre % olarak verilen $(I_{nA})_{\text{spektrum}}/I_{1AN}$ oranı y_{nA} ile gösterilirse,

$$(I_{nA})_{\text{enjekte}} = y_{nA} K_j I_{1AN} \quad (4.16)$$

olur.

Şimdi 4.2 ve 4.3 altbölümlerinin sonuçları birleştirilirse, ele alınan nonlineer elemanın uç geriliminin faz açısı, spektrum verilerine nazaran, simülasyonda temel bileşen ölçeğinde $\{\lambda_j = \phi_{1A}^{\text{yeni}} - \phi_{1A}^{\text{eski}}\}$ kadar bir "ötelenme" kazanacağından, söz konusu akım kaynağı (4.11) ifadesine göre fazör olarak

$$(I_{nA})_{\text{enjekte}} = y_{nA} K_j I_{1AN} \angle \phi_n^{\text{eski}} + n\lambda_j - \quad (4.17)$$

şeklinde olacaktır.

(4.17) ifadesi, yük ve şebeke verilerine göre şebekenin çeşitli noktaları arasında ortaya çıkacak olan faz farkları ve gerilim düşümlerinin harmonikler bazında simülasyona yansıtılmasını ve öylece nonlineer yüklerin sistem şartlarına uygun olarak doğru şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır.

4.4 PSpice Destekli Simülasyon Sonuçları Doğrultusunda Dengesiz Yüklenmeye İlişkin Yeni THD Tanımlamaları

Harmoniklerin etkinliklerini ortaya koyması bakımından son derece önemli olan ve uluslararası standartlarda da çok kullanılan "THD (Toplam Harmonik Distorsiyonu)" kavramı, literatürde gerek faz gerilimlerinin ve gerekse

akımların dengeli (simetrik) hali için tanımlanmıştır. Ulusal harmonik standartları kapsamında İsveç, Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Fransa, Almanya, Finlandiya, Yeni Zelanda ve İngiltere normlarının incelenmesi sonucu (Arrillaga vd., 1985), % THD değerlerinin üç fazlı şebeke için verildiği gözlenmektedir.

Gerek gerilim ve gerekse akım dengesizliğinin bulunabildiği -- inceleme konusu olan -- "harmonikli alçak gerilim şebekeleri" ile ilgili olarak, simülasyon sonuçlarından hareketle her faza ilişkin gerilim THD'si (THD_V) ve akım THD'si (THD_I) hesaplanmıştır. 3 fazlı şebekeyi bir bütün olarak kabul ederek, hesap edilen faz THD'lerini tek bir değere indirgemek düşünülebilir. Üç adet THD büyüklüğü yerine bir tek THD büyüklüğünün verildiği yeni tanımlamalar aşağıda verilmiştir.

4.4.1 Faz gerilimleri için yeni THD tanımlamaları

Herbir yük noktasında nötre göre hesap edilen (R-S-T) faz gerilimlerine ait THD değerleri (2.6) ifadesi yardımıyla ayrı ayrı bulunduktan sonra, üç faza ilişkin bir "bileşke=eşdeğer THD" tanımlaması şöyle yapılabilir:

"Aritmetik ortalama yöntemi" ile

$$THD_V = (THD_R + THD_S + THD_T)_V / 3 \quad (4.18)$$

veya, wattmetrelerde okunan P (kW) faz güçleri önemli bir kriter sayılabileceğinden, "Aktif Güçlere Göre Ağırlıklı Ortalama" olarak

$$THD_V = (P_R \cdot THD_{V,R} + P_S \cdot THD_{V,S} + P_T \cdot THD_{V,T}) / (P_R + P_S + P_T) \quad (4.19)$$

ya da, gerilimlerin temel bileşenlerinin önemli bir kriter olduğu kabul edilerek, "Gerilimlerin Temel Bileşenlerine Göre Ağırlıklı Ortalama" biçiminde

$$THD_V = (V_{R1} \cdot THD_{V,R} + V_{S1} \cdot THD_{V,S} + V_{T1} \cdot THD_{V,T}) / 3V_{ANMA} \quad (4.20)$$

yazılabilir. V_{ANMA} anma faz gerilimini göstermektedir.

4.4.2 Akımlar için yeni THD tanımlamaları

Akımlar şebeke boyunca değişik noktalarda dağılım gösterdiğinden, söz konusu tanımlamaların,

- şebekede (faz iletkenlerinde her kol parçasında),
- her yük noktasında,
- nötr iletkeni üzerinde

yapılması düşünülebilir.

Her yük noktası için yeni akım THD'si tanımlamaları:

Her fazın akım THD'leri (THD_R , THD_S , THD_T)_I simülasyon sonuçlarına göre hesap edildiğinden, "Aritmetik Ortalama Yöntemi" ile

$$THD_I = (THD_R + THD_S + THD_T)_I / 3 \quad (4.21)$$

veya, wattmetrelerden okunacak olan P (kW) faz güçleri önemli bir kriter sayılabileceğinden, "Aktif Güçlere Göre Ağırlıklı Ortalama" alınarak

$$THD_I = (P_R \cdot THD_{I,R} + P_S \cdot THD_{I,S} + P_T \cdot THD_{I,T}) / (P_R + P_S + P_T) \quad (4.22)$$

ya da, amperetrelerden okunacak faz akımlarının önemli bir kriter olduğu kabulü ile, "Efektif Akımlara Göre Ağırlıklı Ortalama" olarak

$$THD_I = (I_R \cdot THD_{I,R} + I_S \cdot THD_{I,S} + I_T \cdot THD_{I,T}) / (I_R + I_S + I_T) \quad (4.23)$$

yazılabilir.

Şebeke için yeni akım THD'si tanımlaması:

Şebekede m tane üç fazlı hat parçası varsa ve herbir hat parçasında -- üç faza ilişkin olarak tanımlanan -- akım THD'leri hesaplanmış ise, şebekenin bütününe ilişkin hat akımı bileşke THD'si, "Hat Parçası Uzunluklarına Göre Ağırlıklı Ortalama" alınarak

$$(THD_I)_{HAT} = \{(THD)_1 \cdot l_1 + (THD)_2 \cdot l_2 + \dots + (THD)_m \cdot l_m\} / (l_1 + l_2 + \dots + l_m) \quad (4.24)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu tanımlama, farklı akımlarla beslenen farklı uzunlukta kolları olan bir şebekede, akım THD'sinin bir değerle ifade edilebilmesini sağlamaktadır.

Nötr iletkeni için yeni akım THD'si tanımlaması:

Şebekede t tane nötr iletkeni parçası varsa -- her bir hat parçasından geçen nötr akımının THD'leri simülasyon sonuçlarından hesaplanmak üzere -- şebekenin nötrüne ilişkin bir bileşke THD, (4.24)'e benzer biçimde

$$(THD_I)_{NÖTR} = \{(THD)_1 \cdot I_1 + (THD)_2 \cdot I_2 + \dots + (THD)_t \cdot I_t\} / (I_1 + I_2 + \dots + I_t) \quad (4.25)$$

şeklinde ilke olarak yazılabilirse de, pratik bir önemi olmayacaktır; çünkü, Alt bölüm 3.4.3'te açıklandığı gibi, nötr iletkeni için akım THD'si tutarlı bir kriter olamaz.

4. SAYISAL UYGULAMA

5.1 Veriler

Sayısal uygulama için seçilen örnek sistem Şekil5.1’de gösterilmiştir. Bu sistem, bir küçük sanayi sitesi enerji dağıtım şebekesinin kollarından biri olarak düşünülmüştür.

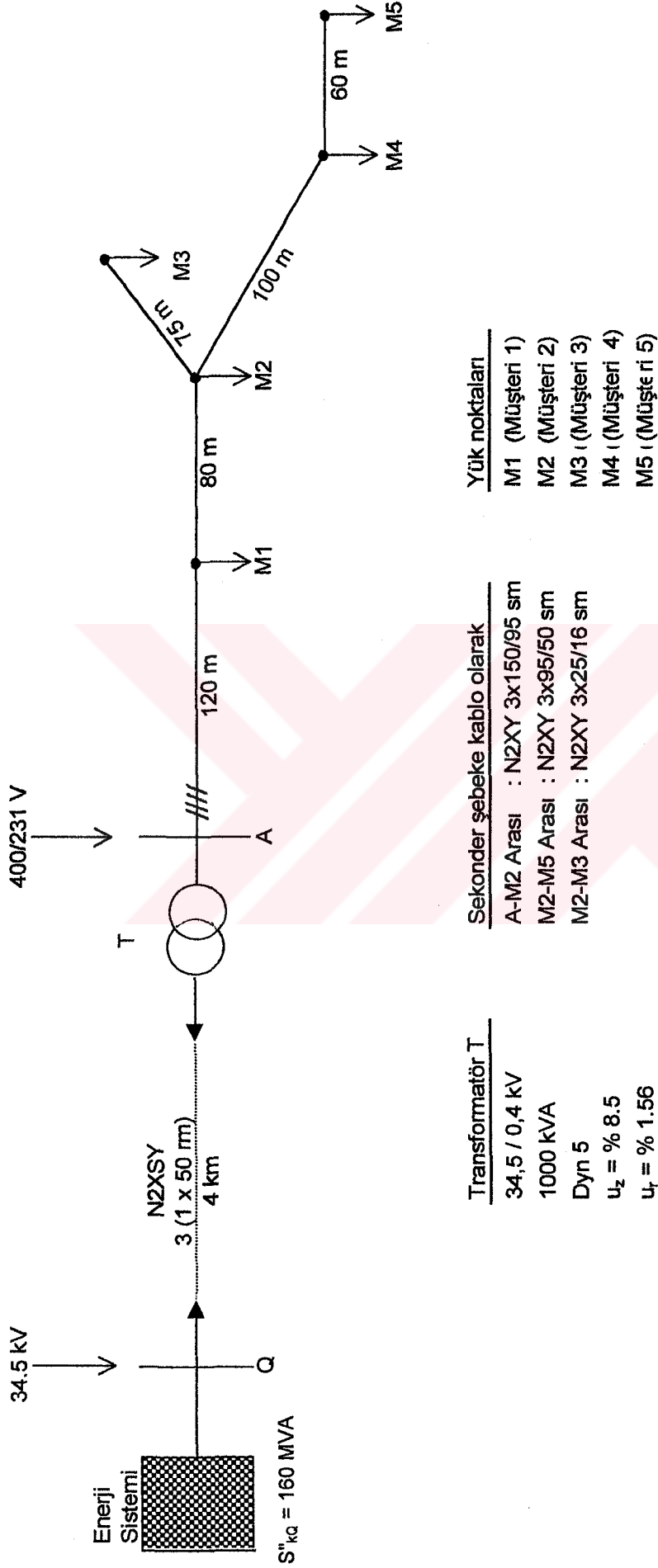
Kablolar bakır iletkenli olup, km başına efektif direnç ve reaktans değerleri şöyledir:

	R_w	X_L
Q – T arası	0.4974 ohm/km	0.23 ohm/km
A – M2 arası (Faz)	0.16 “	0.074 “
(Nötr)	0.247 “	0.075 “
M2 - M5 arası (Faz)	0.247 “	0.075 “
(Nötr)	0.494 “	0.078 “
M2 – M3 arası (Faz)	0.921 “	0.081 “
(Nötr)	1.36 “	0.090 “

IEC 909 veya VDE 0102’ye göre Q barasından görünen enerji sistemi eşdeğer kaynak empedansı bileşenleri için $X_Q = 0.995Z_Q$ ve $R_Q = 0.1X_Q$ kabülleri ile, primer taraftaki toplam empedansın R ve L değerleri 400 V’luk tarafa indirgenmiş olarak şöyle olur:

$$R'_Q + R'_{KABLO} = 3.68 \times 10^{-4} \text{ ohm/faz}$$

$$L'_Q + L'_{KABLO} = 3.56 \times 10^{-3} \text{ mH/faz}$$



Şekil 5.1 Sayısal uygulama için seçilen örnek sistemin tek hat diyagramı.

Transformatör empedansının boştaki akım ihmal edilerek hesaplanan R ve L değerleri de, gene 400 V tarafına göre şöyledir :

$$R'_T = 2.5 \times 10^{-3} \text{ ohm/faz}$$

$$L'_T = 4.25 \times 10^{-2} \text{ mH/faz}$$

Temel bileşen ve 3'ün katı olmayan mertebelerdeki (5., 7., 11.,) harmonikler ile ilgili PSpice simülasyonlarına

$$(R'_Q + R'_{KABLO}) + R'_T = 2.87 \times 10^{-3} \text{ ohm/faz ve}$$

$$(L'_Q + L'_{KABLO}) + L'_T = 4.6 \times 10^{-2} \text{ mH/faz}$$

toplamları katılmıştır.

3. ve 3'ün tek katı mertebeli akım harmonikleri, faz dengesizliği sonucu kaçabilecek önemsiz miktarlar dışında, transformatörün bağlantı şekli sebebiyle primer şebekeye fazla intikal edemeyeceklerinden, bunlarla ilgili simülasyonlarda devreye sadece transformatöre ait olan R'_T ve L'_T katılmıştır.

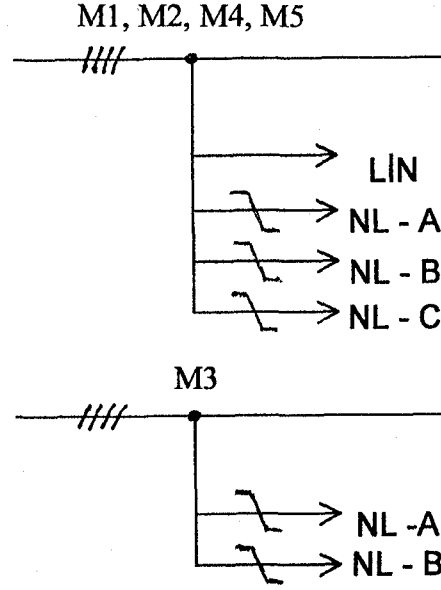
Şekil 5.2, yük noktalarında bulunduğu kabul edilen yük tiplerini göstermektedir. Her tip yük, bulunduğu noktada toplu yük olarak düşünülmüştür. Devrede bulundukları kabul edilen yüklerin anma güçleri, her yük noktası ve her tip yük için faz başına toplu değerler olarak kabul edilmiş ve Tablo 5.1 ve 5.2'de verilmiştir (Nonlinear yükler için temel bileşen bazında olmak üzere).

LİN : Lineer yük

NL-A : Nonlineer yük, A tipi

NL-B : Nonlineer yük, B tipi

NL-C : Nonlineer yük, C tipi



Şekil 5.2 Yük noktalarında bulunduğu kabul edilen yük tipleri.

(M3 noktasında sadece iki çeşit yük)

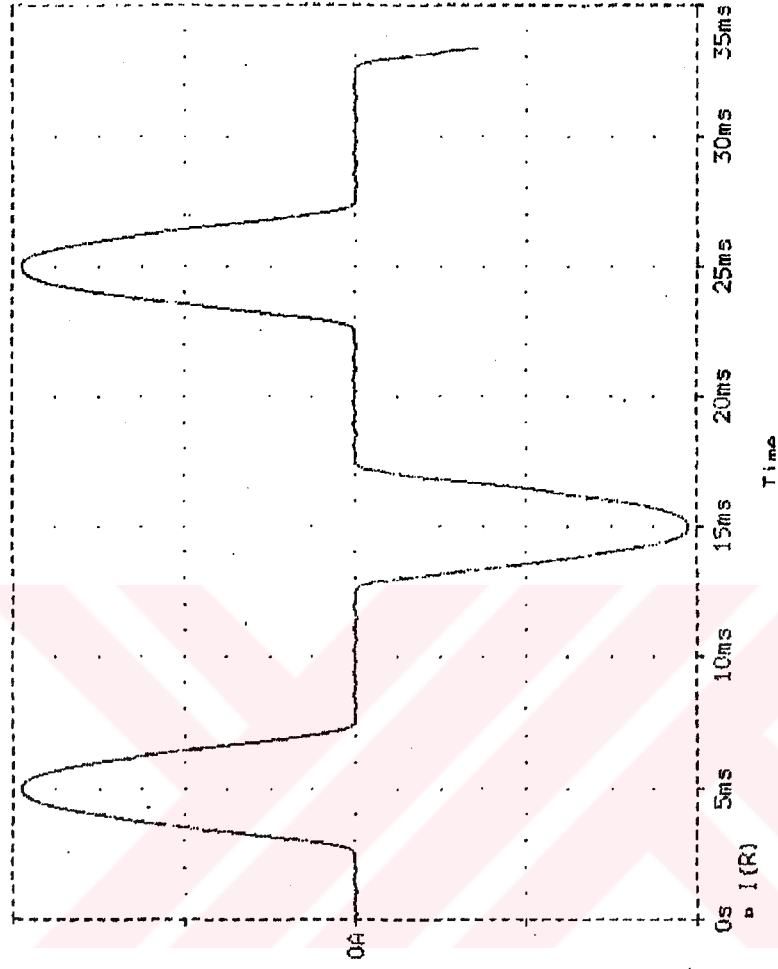
Altbölüm 3.2'de sözü geçmiş olan A, B, C nonlinear yük sınıflarından, bu simülasyonda kullanılmak üzere, Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5'te harmonik spektrum tabloları ve akım dalga biçimleri görülen örnek yük tipleri seçilmiştir. B ve C tipi spektrum örnekleri IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, (1996), "Modeling and" Part II:" den alınmış ve dalga şekilleri PSpice programı ile çizdirilmiştir. A tipi yük örneği için ise, IEEE Standard 519-1992 Şekil 4.13'ten dalga biçimi alınmış, bir "dilimleme" analizi programı ile spektrumu elde edilmiş, kontrol için PSpice ile dalga biçimi çizdirilmiş ve elde edilen spektrum faz açılarının uç gerilimine referanslı sayılabileceğine, Şekil 3.2 ile karşılaştırılarak hükmedilmiştir.

Tablo 5.1 Yük noktalarında lineer yüklerin
faz başına toplu anma değerleri.

Yük Noktası	R Fazı		S Fazı		T Fazı	
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
M1	3.988	1.860	2.843	1.776	3.299	1.828
M2	4.169	2.812	3.472	1.474	3.909	2.443
M3	-	-	-	-	-	-
M4	1.480	0.787	2.359	1.362	1.581	1.027
M5	3.163	2.054	3.734	1.902	4.490	2.698

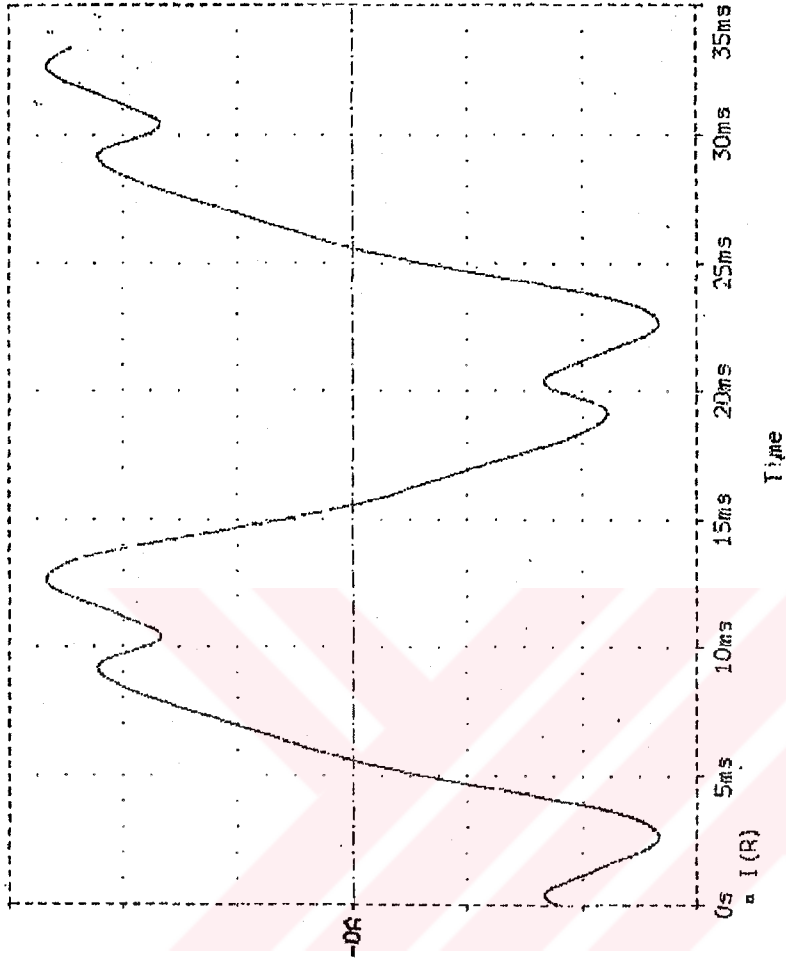
Tablo 5.2 Yük noktalarında nonlineer yüklerin
faz başına toplu anma temel bileşen değerleri.

Yük Noktası	Yük Tipi	R Fazı	S Fazı	T Fazı
		kVA	kVA	kVA
M1	A	1.886	2.305	3.352
	B	2.095	2.514	2.305
	C	4.610	4.610	4.610
M2	A	2.724	4.190	3.352
	B	5.867	7.124	6.286
	C	7.752	7.752	7.752
M3	A	4.610	3.562	5.029
	B	5.238	6.076	4.400
	C	-	-	-
M4	A	3.352	2.514	2.724
	B	4.190	2.933	3.562
	C	5.657	5.657	5.657
M5	A	3.143	3.981	3.562
	B	3.981	4.400	4.819
	C	5.238	5.238	5.238



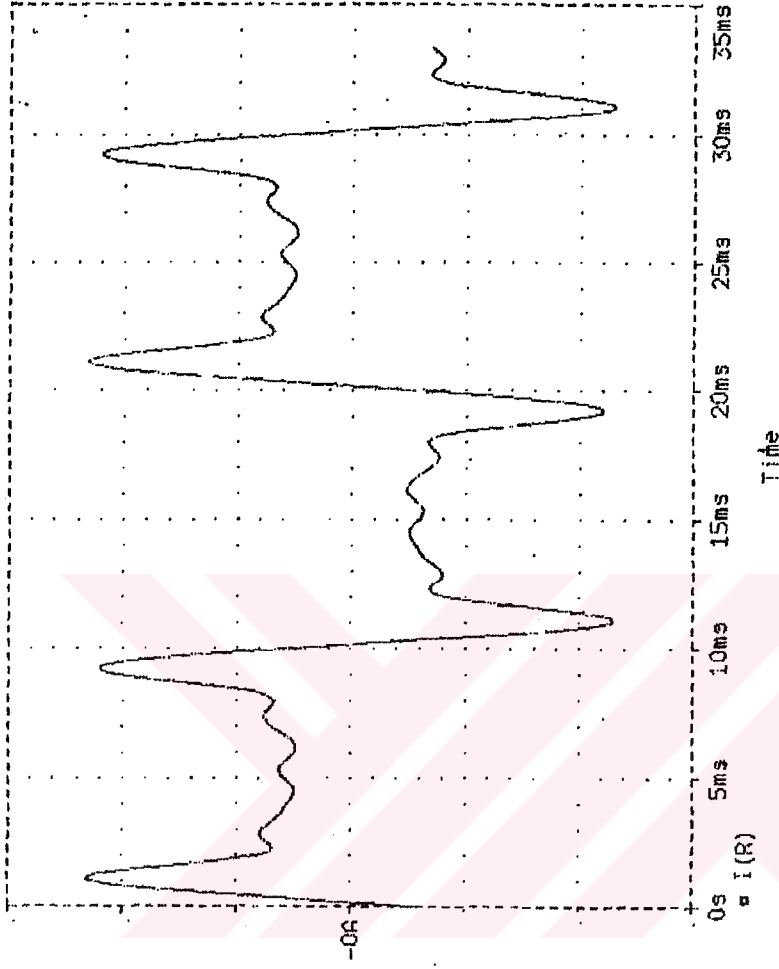
Harm.	Büyüklük (%)	Faz Açısı (°)
1	100	0
3	67.6	180
5	25.6	0
7	1.53	0
9	7.1	180
11	1.76	0
13	2.04	0
15	1.06	180

Şekil 5.3 A tipi nonlineer yükün harmonik spektrumu ve akım dalga biçimi.



Harm	Büyükük (%)	Faz Açısı(°)
1	100	-107
3	19.2	76
5	10.7	10
7	2.1	37
9	1.4	31
11	0.9	36
13	0.6	47
15	0.5	20

Şekil 5.4 B tipi nonlineer yükün harmonik spektrumu ve akım dalga biçimi.



Harm	Büyüklik (%)	Faz Açısı(°)
1	100	- 1.45
3	84.6	- 8.34
5	68.3	- 14.23
7	47.8	- 20.13
9	27.7	- 29.02
11	0.2	- 27.91
13	6.1	158.2
15	4.2	122.3

Şekil 5.5 C tipi nonlinear yükün harmonik spektrumu ve akım dalga biçimi.

Seçilen nonlinear yük tiplerinin ağırlıklı olarak şu çeşit yükleri temsil ettiği düşünülmüştür:

A tipi yük: bilgisayar vb donanımı

B tipi yük: floresan aydınlatma

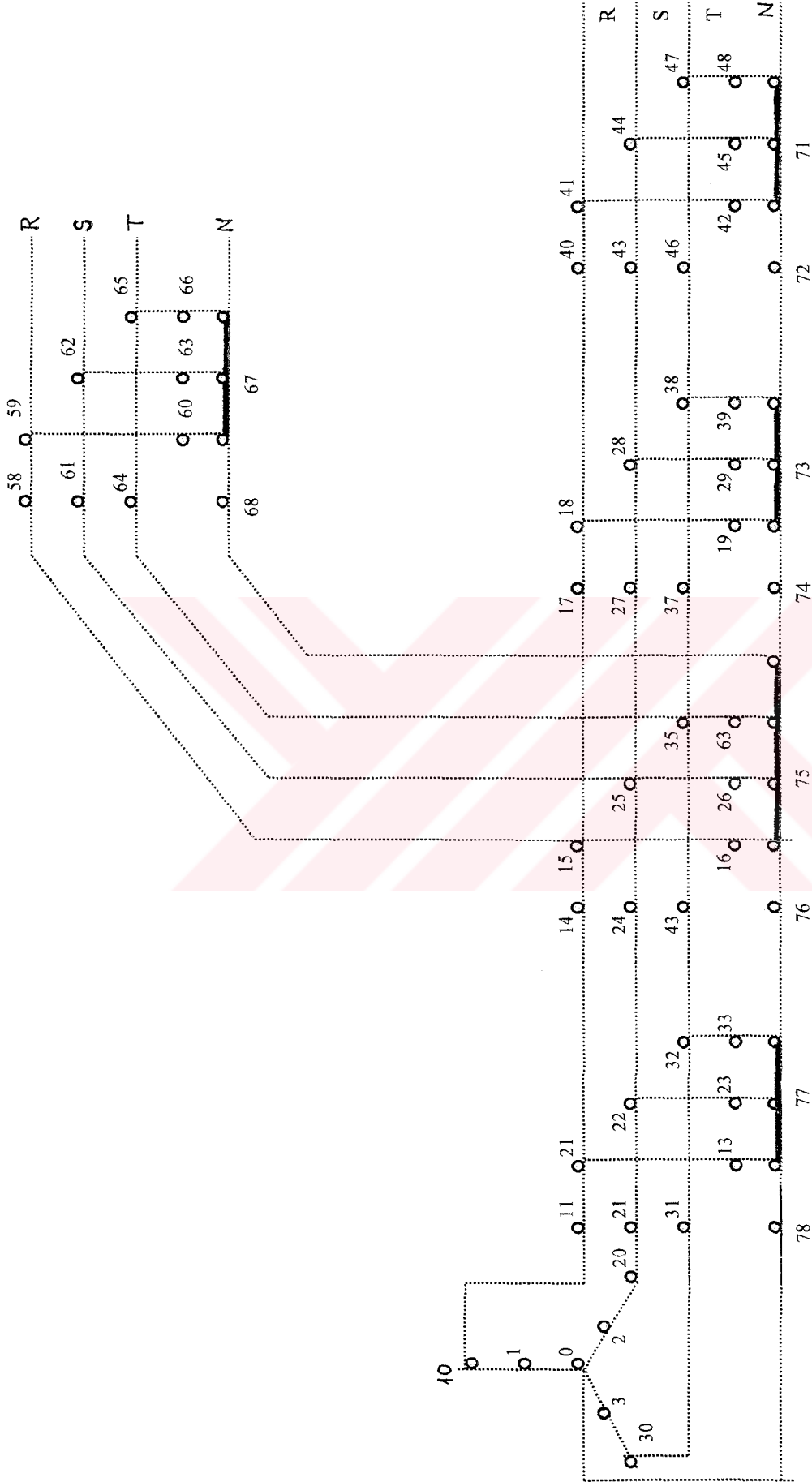
C tipi yük: hız kontrollu motorlar

Spektrumlardaki büyüklük oranlarına bakılarak, simülasyona 1, 3, 5, 7 ve 9 numaralı harmoniklerin dahil edilmesi yeterli görülmüştür. Alternatif akım sisteminin bilinen özellikleri uyarınca, çift mertebeli harmonikler söz konusu değildir.

5.2 Simülasyon

Yapılan PSpice destekli analiz için şu kabuller öngörülmüştür:

- Analize esas olan yükler belirli bir T periyodu için sabittir ve modelleme için anma değerleri esastır; başka bir deyişle yüklerin anlık değişmediği kabul edilmiştir.
- Normal şebeke işletmesi şartlarında uç gerilimlerindeki değişmeler (düşmeler), yk akımlarını simülasyonda da etkileyecektir; ancak harmonik spektrumlarının bundan etkilenmeyeceği kabul edilmiştir.
- Analiz, geçici olayların sona erdiği sürekli işleme ile ilgilidir.
- Karşılıklı kuplaj ihmal edilmiştir.
- şebeke lineer özelliktedir.
- Deri etkisi ihmal edilmiştir.
- Bütün şönt (kaçak) elemanlar ihmal edilmiştir.



Şekil 5.6 PSpice simülasyonundaki devre topolojisi düğüm numaraları.

Simülasyonda uygulanmış olan işlem sırası aşağıdadır:

- 1) Sistemin 3 faz ve nötr iletkenini içine alan, PSpice simülasyonuna uygun (4 hatlı) devre topolojisi düzenlenmiştir (Şekil 5.6).
- 2) Aynı yük noktasında bulunan lineer yüklerle nonlineer yüklere ait temel bileşenler, topluca bir tek eşdeğer empedansla -- (4.12) ifadesindeki ilkeye göre -- modellenerek, şebekenin temel bileşen simülasyonu uygulanmıştır. Bu uygulamada sistemin kaynak gerilimleri olarak, 3 fazlı $231/0^\circ$, $231/240^\circ$ ve $231/120^\circ$ voltluk 50 Hz'lik gerilimler topolojiye dahildir.
- 3) (2) adımının sonuçlarına dayanılarak, (4.17) ifadesine göre harmonik akım kaynakları modellenmiş ve her bir harmonik frekansı için ayrı ayrı simülasyon uygulanmıştır. Bu simülasyonların topolojisinde ise kaynak gerilimi yok, harmonik akım kaynakları vardır.
- 4) Şebekenin lineer kabul edilmesi sebebiyle toplamsallık teoremi uygulanabilir olduğundan, harmonik bileşenler için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olan analizlerin bileşimi alınarak simülasyon sonucu hesaplamalar yapılmıştır.

5.3 Simülasyon Sonuçları

- (a) PSpice program çıkışından elde edilen yük noktası gerilimleri, hat akımları ve yük akımlarına ait temel bileşen ve harmonik değerleri Tablo 5.3, 5.4 ve 5.5'te verilmiştir (Sayfa 71, 72, 73).
- (b) Hat parçalarındaki akımlarla ilgili olarak, (a)'daki çıktılarından hesaplanmış olan değerler Tablo 5.6, 5.7 ve 5.8'de verilmiştir (Sayfa 74).
- (c) Öne sürülen yeni THD tanımlamaları ile ilgili olarak PSpice çıktılarından bazı alıntılar ve hesaplanmış olan değerler Tablo 5.9 - 5.21'de sunulmuş ve iki değer de hesap olarak verilmiştir (Sayfa 75 - 80).

Tablo 5.3

Faz	V_n	Yük noktalarında faz (faz-nötr) gerilimlerinin temel bileşen ve harmonikleri [Efektif değer, Volt]				
		M1	M2	M3	M4	M5
R	V ₁	223.60	221.00	220.50	218.40	217.60
	V ₃	7.59	10.67	9.85	14.59	15.64
	V ₅	11.64	14.22	14.60	16.30	16.80
	V ₇	10.35	12.89	12.97	15.11	15.77
	V ₉	11.12	15.46	14.96	19.11	20.12
S	V ₁	223.50	220.70	220.30	218.00	217.20
	V ₃	7.39	10.44	9.78	14.33	15.32
	V ₅	12.02	14.70	15.11	16.52	17.12
	V ₇	9.54	11.97	12.04	14.45	15.16
	V ₉	11.04	15.36	14.90	18.98	19.98
T	V ₁	222.70	219.70	217.60	217.10	216.10
	V ₃	7.08	10.10	9.22	14.05	15.08
	V ₅	11.27	13.57	14.14	14.97	15.54
	V ₇	7.50	8.55	8.58	9.00	9.13
	V ₉	10.92	15.22	14.71	18.85	19.85

Tablo 5.4

İletken	I_n	Hat parçalarında faz ve nötr akımlarının temel bileşen ve harmonikleri [Etketif değer, Amper]				
		T-M1	M1-M2	M2-M3	M2-M4	M4-M5
R	I_1	244.50	196.2	26.78	101.30	53.88
	I_3	43.06	31.42	13.82	22.09	10.36
	I_5	98.16	80.95	7.91	43.82	20.94
	I_7	59.57	49.76	0.78	33.47	15.87
	I_9	24.55	19.38	1.22	11.59	5.47
S	I_1	245.50	199.70	27.65	107.00	59.36
	I_3	40.71	30.14	10.96	21.53	7.76
	I_5	99.55	81.52	7.08	43.08	21.89
	I_7	51.66	41.38	0.79	23.62	11.34
	I_9	24.26	19.09	0.84	11.36	5.14
T	I_1	255.20	203.80	25.32	107.90	63.07
	I_3	35.75	28.51	14.83	22.38	9.02
	I_5	95.60	76.55	7.88	38.68	21.60
	I_7	51.9	41.59	0.72	23.80	11.40
	I_9	23.54	18.73	1.38	11.27	5.04
N	I_1	12.44	6.30	8.71	1.72	4.50
	I_3	119.5	90.04	39.48	65.98	27.11
	I_5	3.14	3.68	0.96	4.28	0.98
	I_7	17.14	17.10	0.18	16.74	7.90
	I_9	72.34	57.2	3.44	34.22	15.64

Tablo 5.5

Faz	I_n	Yük noktalarında toplam yük akımlarının temel bileşenleri ve harmonikleri [Etkif değeri, Amper]				
		M1	M2	M3	M4	M5
R	I_1	49.17	70.95	26.78	47.40	53.88
	I_3	11.98	21.89	13.82	11.73	10.36
	I_5	17.24	29.44	7.91	22.88	20.94
	I_7	10.25	17.10	0.78	17.61	15.87
	I_9	5.35	8.91	1.22	6.12	5.47
S	I_1	46.14	72.05	27.65	47.69	59.36
	I_3	10.89	17.71	10.96	13.84	7.76
	I_5	18.05	31.64	7.08	21.20	21.89
	I_7	10.29	17.24	0.79	12.30	11.34
	I_9	5.16	8.51	0.84	6.23	5.14
T	I_1	52.32	71.56	25.32	44.97	63.07
	I_3	7.52	20.00	14.83	13.44	9.017
	I_5	19.06	30.21	7.88	17.13	21.6
	I_7	10.32	17.24	0.72	12.41	11.4
	I_9	4.82	8.70	1.38	6.25	5.04

Tablo 5.6 Hat parçalarında faz ve nötr iletkenlerinde akımların efektif değerleri [A].

İletken	A-M1	M1-M2	M2-M3	M2-M4	M4-M5
R fazı	275	221	31.21	118	61.0
S fazı	274	223	30.61	120	65.0
T fazı	281	224	30.41	120	68.4
Nötr	141	108	40.61	76.3	32.6

Tablo 5.7 Hat parçalarında nötr akımının en büyük faz akımına ve ortalama faz akımına oranları.

Oran	A-M1	M1-M2	M2-M3	M2-M4	M4-M5
$I_N/I_{FAZ,max}$	0.50	0.48	1.30	0.64	0.48
$I_N/I_{FAZ,ort}$	0.51	0.49	1.32	0.64	0.50

Tablo 5.8 Hat parçalarında iletken harmonik (distorsiyon) kayıplarının temel bileşen kayıplarına oranı.

(3.10) ifadesine göre $RI_h^2/RI_1^2 \approx (THD_D)^2$

İletken	A-M1	M1-M2	M2-M3	M2-M4	M4-M5
R fazı	0.26	0.27	0.36	0.36	0.28
S fazı	0.25	0.24	0.22	0.26	0.20
T fazı	0.21	0.21	0.44	0.23	0.18
Nötr	128	294	21	1968	52

Tablo 5.9 Yük noktalarındaki faz-nötr gerilimleri ile toplam yük akımlarına ait temel bileşenlerin efektif değerleri ve faz açıları
(V_1, α_1 : Volt, Derece --- I_1, β_1 : Amper, Derece).

Yük Noktası	Faz	V_1	α_1	I_1	β_1
M1	R	223.6	- 0.6	49.17	- 22.5
	S	223.5	- 120.4	46.14	- 145.9
	T	222.7	119.4	52.32	98.0
M2	R	221.0	- 0.5	70.95	- 31.2
	S	220.7	- 120.2	72.05	- 152.7
	T	219.7	119.5	71.56	86.3
M3	R	220.5	- 0.3	26.78	- 58.7
	S	220.3	- 119.6	27.65	167.5
	T	217.6	119.8	25.32	71.5
M4	R	218.4	- 0.3	47.40	- 28.5
	S	218.0	- 120.1	47.69	- 144.2
	T	217.1	119.7	44.97	92.6
M5	R	217.6	- 0.3	53.88	- 30.3
	S	217.2	- 120.1	59.66	- 148.2
	T	216.1	119.8	63.07	86.1

Tablo 5.10 Yük noktalarında herbir fazda çekilen toplam temel bileşen aktif güçleri [kW].
(lineer + nonlinear)

Yük Noktası	$P = V_1 I_1 \cos(\alpha_1 - \beta_1)$		
	R	S	T
M1	10.20	9.31	10.85
M2	13.48	13.41	13.16
M3	3.04	4.08	3.67
M4	9.12	9.49	8.69
M5	10.15	11.37	11.34

Tablo 5.11 Yük noktalarında toplam yük akımlarının efektif değerleri [A].

$(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2)^{1/2}$					
Faz	M1	M2	M3	M4	M5
R	54.70	82.17	31.20	57.06	61.08
S	52.00	82.92	30.60	55.73	64.95
T	57.33	82.50	30.42	51.86	68.42

Tablo 5.12 Yük noktalarında R-S-T faz gerilimi THD'leri [%].

Faz	$THD_V = (V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + V_9^2)^{1/2} / V_1$				
	M1	M2	M3	M4	M5
R	9.21	12.15	12.02	15.00	15.80
S	9.10	12.02	11.93	14.84	15.66
T	8.43	11.06	11.02	13.49	14.23

Tablo 5.13 Yük noktalarında aritmetik faz ortalaması gerilim THD'leri [%].

$THD_V = (THD_R + THD_S + THD_T)_V / 3$				
M1	M2	M3	M4	M5
8.91	11.74	11.66	14.44	15.23

Tablo 5.14 Yük noktalarında faz başına temel bileşen tüketim aktif güçlerine göre ağırlıklı ortalama olarak gerilim THD'leri [%].

$THD_V = (P_R \cdot THD_{V,R} + P_S \cdot THD_{V,S} + P_T \cdot THD_{V,T}) / (P_R + P_S + P_T)$				
M1	M2	M3	M4	M5
8.90	11.75	11.65	14.46	15.21

Tablo 5.15 Yük noktalarında faz gerilimleri temel bileşenlerine göre ağırlıklı ortalama olarak gerilim THD'leri [%].

$THD_V = (V_{R1} \cdot THD_{V,R} + V_{S1} \cdot THD_{V,S} + V_{T1} \cdot THD_{V,T}) / 3 \cdot V_{ANMA}$				
M1	M2	M3	M4	M5
9.05	11.77	11.63	14.30	15.02

$V_{ANMA} = 220 \text{ V.}$

Tablo 5.16 Yük noktalarında faz girişlerinde yük akımı THD'leri [%].

Faz	$THDI = (I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2)^{1/2} / I_1$				
	M1	M2	M3	M4	M5
R	48.74	58.41	59.71	67.00	53.39
S	52.06	56.96	47.37	60.45	44.39
T	44.81	57.37	66.61	57.44	42.05

Tablo 5.17 Yük noktalarında aritmetik faz ortalaması
yük akımı THD'leri [%].

$THD_I = (THD_{I,R} + THD_{I,S} + THD_{I,T}) / 3.$				
M1	M2	M3	M4	M5
48.54	57.58	57.90	61.63	46.61

Tablo 5.18 Yük noktalarında faz aşına temel bileşen tüketim
aktif güçlerine göre ağırlıklı ortalama olarak
yük akımı THD'leri [%].

$THD_I = (P_R \cdot THD_{I,R} + P_S \cdot THD_{I,S} + P_T \cdot THD_{I,T}) / (P_R + P_S + P_T)$				
M1	M2	M3	M4	M5
48.35	57.58	57.39	61.54	46.43

Tablo 5.19 Yük noktalarında toplam yük akımları efektif değerlerine
göre ağırlıklı ortalama olarak yük akımı THD'leri [%].

$THD_I = (I_R \cdot THD_{I,R} + I_S \cdot THD_{I,S} + I_T \cdot THD_{I,T}) / (I_R + I_S + I_T)$				
M1	M2	M3	M4	M5
48.4	57.6	57.9	61.8	46.4

Tablo 5.20 Hat parçalarında faz ve nötr iletkenlerindeki akım THD'leri [%].

İletken	$THD_I = (I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2)^{1/2} / I_1$				
	T - M1	M1 - M2	M2 - M3	M2 - M4	M4 - M5
R	51.15	51.92	59.75	59.74	53.40
S	49.60	49.14	47.38	51.24	44.39
T	45.81	45.91	66.63	48.07	42.05
N	1132.00	1715.00	455.00	4437.00	718.00
	↑	↑	↑	↑	↑
	(THD) ₁	(THD) ₂	(THD) ₃	(THD) ₄	(THD) ₅
Hat parçası boyu →	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅

Tablo 5.21 Hat parçalarında üç fazın aritmetik ortalaması olarak akım THD'leri [%].

$(THD_{I,R} + THD_{I,S} + THD_{I,T})/3$				
A-M1	M1-M2	M2-M3	M2-M4	M4-M5
48.85	49.00	57.92	53.02	46.61

Ve Tablo 5.20'nin altındaki notasyonla:

Şebekenin bütünü için, hat parçası boylarına göre ağırlıklı ortalama olarak hat akımı THD'si:

$$(THD)_H = \{(THD)_1 \cdot l_1 + (THD)_2 \cdot l_2 + \dots + (THD)_m \cdot l_m\} / (l_1 + l_2 + \dots + l_m)$$

= % 51

Şebekenin bütünü için, nötrlü hat parçası boylarına göre ağırlıklı ortalama olarak nötr akımı THD'si:

$$(THD)_N = \{(THD)_1 \cdot l_1 + (THD)_2 \cdot l_2 + \dots + (THD)_t \cdot l_t\} / (l_1 + l_2 + \dots + l_t)$$

% 1825

Not:

Akım THD'si ve RI_h^2/RI_1^2 şeklindeki distorsiyon kayıpları oranını nötr iletkeni için belirtmenin pratik bir anlam taşımayıp yanıltıcı olacağı, hesap sonuçlarından da görülmektedir (Altbölüm 3.4.3, Tablo 5.8, Tablo 5.20 ve bu sayfa).

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Harmonik içeren alçak gerilim tesislerinde nötr iletkenindeki harmonik akımların incelenmesine ve tesis üzerindeki etkilerinin araştırılmasına yönelik olan bu çalışma, tanıtıcı giriş bölümü dışında dört ana bölümden oluşmaktadır.

Çalışmanın giriş bölümünde, harmonikli enerji sistemleri üzerinde genel olarak durulmuş ve literatürde harmonikler ile ilgili olarak yapılmış olan çalışmalara tarih silsilesi içinde değinilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, harmonik içeren bir şebekede genel tanım büyüklükleri ile şebekedeki güçlerin ayrıştırılması ortaya konulmuştur. Harmonik üreten başlıca elemanlar, harmoniklerin şebeke üzerindeki etkinlikleri ve harmoniklerin modellenmesi gibi konular da kısaca özetlenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, nötr iletkeni bulunan bir alçak gerilim tesisinde harmonikli akımların nötr iletkenini ne şekilde etkilediği üzerinde durulmuştur. Bu konuda tanımlanan parametreler ile nötr akımının harmonikleri incelenmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, PSpice destekli harmonik analizi için gerekli şebeke modellemesi yapılmış, spektrum ve simülasyon faz açıları birbirini cinsinden ifade edilmiş, simülasyonda şebekenin harmonikler açısından doğrulukla modellenebilmesi için akım harmoniklerinin faz açıları ve büyüklüklerinin verilen simülasyon şartlarına uyacak şekilde önceden belirlenmesi gereği açıklanarak, bunun nasıl yapılacağı formüle edilmiş ve diğer

bir konu olarak, THD değerleri ile ilgili bazı yeni tanımlamalar ortaya konulmuştur.

Çalışmanın beşinci bölümünde, nonlinear yüklerin yer aldığı bir alçak gerilim şebekesi örneğinde nötr akımının harmonikleri PSpice programı yardımıyla analiz edilmiştir.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar ile ortaya konulan yenilikler şöyle sıralanabilir:

1. Şebekelerde yüklere bağlı olarak istenmeyen harmonik bileşenler ortaya çıkabilmektedir. Özellikle son yıllarda alçak gerilimli şebekelerde -- gelişen SCR teknolojisinin yaygın kullanımı sonucu -- harmonik seviyeleri önemli ölçüde artmıştır. Harmonik akım dağılımı veya harmonik yük akışı analizleri genellikle faz iletkenlerini göz önüne almakta iken, bu çalışmada özellikle nötr iletkenindeki harmonik bileşenler üzerinde durulmuştur.
2. Nötr iletkenindeki harmoniklerin incelenmesi kapsamında, alçak. gerilim şebekesinde nötr akımının dağılımı için iki ayrı düzen tanıtılmıştır (Şekil 3.5). Nötr akımı harmoniklerinin ısınma etkisi ortaya konulmuş (Bölüm 3.4.1) ve gerekli bağıntılar ifade edilmiştir (Denklem (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4)). Aynı şekilde nötr akımının yol açtığı kayıplar da formüle edilmiştir (Denklem (3.5) ve (3.6)).
3. Nötr iletkenindeki harmonik kayıpların ekonomik değeri işletme ekonomisinden bilinen "Para akış diyagramı" yardımıyla ortaya konulmuştur (Şekil 3.6). Nötr iletkenindeki ek (harmonik) kayıpların belirli

bir dönem sonundaki tutarı, piyasanın değişen parametrelerine bağlı olarak ifade edilmiştir (Denklem (3.7), (3.8) ve (3.9)).

4. PSpice yardımıyla bir alçak gerilim şebekesinde analiz yapabilmek için gerekli modelleme ve dönüşüm bağıntıları ortaya konulmuştur (Bölüm 4.2, Bölüm 4.3; Şekil 4.1 ve 4.2; Denklem (4.1) - (4.17)). Bu şekilde, lineer olmayan yüklere ait spektrum bilgilerinden simülasyon "data"sına geçiş yapılabilmesi imkânı sağlanmıştır.
5. Geleneksel harmonik analiz algoritmaları ve yazılımlarının dengeli yüklenen şebekelere yönelik olmasına karşılık, bu çalışmada PSpice yazılımı ve uygun modelleme ile dengesiz yüklenen şebeke üzerinde analiz yapılabilmektedir. Böylece, bu çalışmada, üç fazlı dört telli dengesiz yüklü şebekelerde harmonik analizi için geliştirilmiş bir bilgisayar programının aranılmasına gerek kalmamıştır.
6. Hem akım hem de gerilim asimetrisinin olması sonucu her faz için ayrı ayrı hesaplanan THD değerlerinin tek bağıntıyla ifade edilmesi için öngörülen bazı tanımlamalar ortaya konulmuştur (Bölüm 4.4; Denklem (4.18) - (4.25)).
7. Beş adet müşteri barasına sahip bir alçak gerilim şebekesi üzerinde yapılmış olan sayısal uygulama sonuçlarından (Tablo 5.3 - Tablo 5.21 ve devamındaki sonuçlar) hareketle aşağıdaki değerlendirmeler ve önerilerde bulunulabilir:

- Üç fazlı dört telli dengesiz yüklü şebekelerde harmonik analizi için geliştirilmiş bir bilgisayar programının elde bulunmaması veya temin edilememesi durumunda, PSpice gibi bir programdan kısmî destek alarak en azından orta karar boyutlarda bu türlü bir dağıtım şebekesinin harmonik analizinin yine de gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuş olmaktadır.
- Yük akımlarının dengesizliği ve özellikle 3'üncü ve 3'ün tek katları mertebelerindeki harmonikler, nötr iletkenindeki akımı alışılmış seviyelerin çok üzerine yükseltebilmektedir. Sayısal uygulamada, lineer yüklerin bulunmadığı hat parçasında nötr akımı en büyük faz akımının 1.30 katı olarak bulunmuştur (Tablo 5.7); üstelik o hat parçasında faz akımları arasındaki dengesizlik pek azdır (Tablo 5.6).
- Bu sonuçlar şunu göstermektedir ki, lineer olmayan yüklerin şebekede süregelen çoğalışı dikkate alınır, bazı yabancı literatürde rapor edilen ve özellikle bilgisayar ve bilgi-işlem türünden ortamların ağırlıklı olduğu şebeke bölümlerinde (ABD'de) kaydedildiği bildirilen -- faz akımlarını aşan değerlerde -- yüksek nötr akımlarının yakın bir gelecekte ülkemizde de ciddiyle ortaya çıkmasının beklenmesi gerekir. Dolayısıyla, nötr iletkeninin kesit tayini ile ilgili yönetmelik hükümlerinin gözden geçirilmesi ve -- ele alınacak şebeke veya tesislerin özelliklerine göre -- aktif veya pasif filtre çözümleri gibi seçenekler ile nötr iletkeninin kesitini arttırmak (meselâ nötr hattı olarak faz iletkenine eşit kesitte çift iletken kullanmak) seçeneğinin karşılaştırılarak teknik ve malî yönden uygun çözümler üretilmesi gereği ortaya çıkmaktadır.

- Alçak gerilim şebekesinde harmoniklerin bulunması ve nötr akımının da harmonik içermesi durumunda, nötr iletkeninin harmonik yüklenmesi, çeşitli faktörlerin (şebeke topolojisi, yüklerin karakteristiği ve özelliği, günlük yüklenme programı, nötr akımında maksimum harmonik bileşenin genliği gibi) dikkate alınmasıyla incelenmelidir. Nötr iletkeni kesitinin yetersiz kalacağının görülmesi durumunda, yukarıda belirtildiği gibi, filtre vb. çözümler ve nötr iletkeni kesitinin büyütülmesi seçeneği incelenerek uygun önlemler araştırılmalıdır. (Yeni kurulan tesisler için kablo seçiminde, faz ve nötr iletken kesitleri eşit olan kabloların tercihinin önemli ölçüde bir ön fayda sağlayacağı kanaati ortaya çıkmaktadır.)
- Nötr iletkenindeki harmonik ek kayıpların mertebesi hesaplanmalı ve işletmede -- henüz harmonik filtre koyma zorunluluğu olmamasına rağmen -- harmonik filtre ihtiyacının varlığı ekonomik bazda incelenmelidir. TL/kWh tarifesinde yapılan fiyat ayarlaması, paranın değerlendirme oranı, yüklerin günlük yüklenme oranı dikkate alınarak <filtre maliyeti> ile <nötr iletkenindeki harmonik kayıpların maliyeti> karşılaştırılmalıdır. Karşılaştırma için zaman dilimi olarak "yıl" alınabilir.
- Şebekede hangi harmonik frekans için filtre devresi tasarlanması gerektiğini belirlemek için dikkate alınacak parametrelerden birisi de akım dengesizliği olacaktır; her bir harmonik bileşen için I^2R kayıpları faz bazında hesaplanarak, kayıp minimizasyonu öngörülebilir.
- Nötr iletkeni için akım THD'si hesaplanacak olursa, % birkaç yüz ve hattâ % birkaç bin gibi son derece yüksek rakamlara ulaşan sonuçlar çıkabilmektedir (Tablo 5.20 ve Sayfa 80). Ancak -- Altbölüm 3.4.3'te açıklandığı üzere -- nötr iletkeni için akım THD'si tutarlı bir kriter olmayıp yanıltıcı sonuçlar vereceğinden -- bu rakamlar değerlendirmeye alınamaz.

- Aynı şekilde, harmonik kayıpların temel bileşen kayıplarına oranı da nötr iletkeni için son derece çarpıcı bir yükseklikte görülebilmektedir (Tablo 5.8), çünkü bu oran yaklaşık olarak akım THD'sinin karesine eşittir. Dolayısıyla nötr iletkeni için bu oran da anlamsız ve yanıltıcı olup, değerlendirmeye alınamaz (Alt bölüm 3.4.3).
- Yük akımlarının dengesizliği sonucu, yük noktalarındaki gerilim THD'leri -- her bir faz için ayrı olmak üzere -- üç adet hesaplanmaktadır. Bunların tek bir ifade ile verilmesi kapsamında Bölüm 4.4.1'deki tanımlamalar kullanılabilir.
- Gene yük akımlarının dengesizliği sonucu hat parçalarındaki faz iletkenleri de farklı yüklenmekte ve farklı oranlarda ısınmaktadır. Bu yönden olacak aşırı ısınmaların, koruma düzenlerinin ayarında dikkate alınması yerinde olur.
- Harmonik ek kayıpların enerji tarifesine yansıtılması yönünde, ülkemizde halen bir uygulama bulunmamaktadır. Bu konunun gelecekte gündeme gelmesi durumunda, nötr iletkeni kayıplarının da uygun kriterler bazında böyle bir yansıtılmaya dahil edilmesinin yerinde olacağı değerlendirilmektedir.
- PSpice destekli analiz, devreler teorisinden bilinen empedans, akım kaynağı, gerilim kaynağı kavramlarının uygun kombinasyonu ile toplamsallık teoremine uygun çalışmaktadır. Bu sebeple analizin her aşamasında ve sonucunda çıktıların kontrol edilme kolaylığı açıkça görülmektedir.

KAYNAKLAR

Arrillaga, J., Bradley, D. A. ve Bodger, P. S., (1985), Power System Harmonics, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.

Baggott, A. G., (1974), "The Effect of Waveshape Distortion on the Measurement of Energy Tariff Meters", IEE Conf. Publ., Vol. 110.

Balser, S. J. ve Feltes, J. W., (1985), "Power System Harmonics Measurement and Analysis", Rural Electric Power Conference, Paper 85CH2126-1-C5.

CBEMA (Computers and Business Equipment Manufacturers' Association), (1988), Information Letter, Washington.

Christensen, E. F., Willis, C. H. ve Herskind, C. C., (1944), "Analysis of Rectifier Circuits", AIEE Trans., 115; 1048-1058.

Coi, B. T., Menemenlis, N. ve Nakra, H. L., (1980), "Fast Steady-State Solution for HVDC Analysis", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-99: 2453-2459.

Densem, T. J., Bodger, P. S. ve Arrillaga, J., (1984), "Three-Phase Transmission Sytem Modelling for Harmonic Penetration Studies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-103: 310-317.

DIgSILENT Data Systems, Integrated Electrical Engineering Program, Version 9.1, DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany.

Domijan, A., Heydt, G. T., Meliopoulos, A. P. S., Venkata, S. ve West, S., (1993), "Directions of Research in Electric Power Quality", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, Jan. 1993: 429-436.

Dugan, R. C., (1980), "Simulation of Arc Furnace Power Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, IA-, 813-818.

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F. ve Beaty, H. W., (1996), Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, New York.

EI-Serefi, A. M. ve Shehata, S. A., (1976), "Digital Solution of an AC/DC System in Direct-Phase Quantities", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-95: 731-793.

Emanuel, A. E., Levitsky, F. J. ve Gulachenski, E. M., (1981), "Induction Watthour-Meter Performance on Rectifier Inverter Circuits", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-100: 4422-4427.

Emanuel, A. E., vd., (1995), "Distribution Feeders with Nonlinear Loads in the Northeast U.S.A.: Part I – Voltage Distortion Forecast", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, Jan. 1995: 340-347.

Eralp, F. Y., (1985), Mühendisler için Fourier Yöntemi ile Dalga Analizi: Teori ve Çözümlü Problemler, Nur Ofset Matbaası, İstanbul.

Ergeneli, A., (1984), Elektrikte Laplace Dönüşümü ve Fourier Analizi, Kipaş Dağıtım, İstanbul.

Gönen, T., (1986), Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill, New York.

Gruzs, T. M., (1990), "A survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No. 4, July/Aug. 1990: 719-725.

Hay, J. L. ve Hingorani, N. L., (1970), "Dynamic Simulation of Multiconverter HVDC Systems by Digital Computers", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-89: 218-222.

Herrick, P. R., (1980), "Mathematical Models for High Intensity Discharge Lamps", IEEE Trans. on Industry Applications, IA-16: 648-654.

Heydt, G. T., Grady, W. M. ve Xia, D., (1983), Harmonic Power Flow Studies, Vol. 1, EPRI, EL-3306-CCM Research Project.

Hingorani, N. G., Hay, J. L. ve Crosbe, R. E., (1968), "Dynamic Simulation of HVDC Transmission Systems on Digital Computers", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-87: 989-996.

Htsui, J. S. C. ve Shepherd, W., (1971), "Method of Digital Computation of Thyristor Switching Circuits", Proc. IEE, 118: 993-998.

IEEE, (1979), IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters, Project No. 519.

IEEE, (1993), IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519-1992.

IEEE Standards Board, (1976), IEEE Recommended Guide for Measurement of Electrical Noise and Harmonic Filter Performance of High Voltage Direct Current Systems, Project No. 368.

IEEE Task Force on Harmonic Impacts, (1993), "Effects of Harmonics on Equipment", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993: 672-680.

IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, (1996), "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks; Part I: Concepts, Models, and Simulation Techniques", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, Jan.1996: 452-465.

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), "Power System Harmonics: An Overview", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, Aug. 1983: 2455-2460.

Johnson, B. K., de Mello, F. P. ve Undrill, J. M., (1982), "Comparing Fundamental Frequency and Differential Representation of AC/DC Transmission", Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-101: 3379-3384.

Katzaraoff, P., (1990), "Effects of Nonlinear Loads on the Power Distribution Systems – A General Overview", Power Quality, Jan. 1990: 281-286

Kimbark, E. W., (1971), Direct Current Transmission, John Wiley, New York

Linders, J. R., (1979), "Electric Wave Distortions, Their Hidden Costs and Containment", IEEE Trans. on Industry Applications, IA-15: 458-471.

McGranaghan, M. F., Shaw, J. F. ve Owen, R. E., (1981), "Measuring Voltage and Current Harmonics on Distribution Systems," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-93: 453-457.

Mohan, N., Undeland, T. M. ve Robbins, W.P., (1989), Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley, New York.

Owen, R. E., ve McGranaghan, M.F., (1980), "Study of Distribution System Surge-Harmonic Characteristics", EPRI Final Report Research Project, EPRI EL-1627.

Pileggi, D. J., Chandra, N. H. ve Emanuel, A.E., (1981), "Prediction of Harmonic Voltages in Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-100: 1307-1315.

Reiser, J., (1968), Elektrische Maschinen – Grundlagen und Transformatoren, Carl Hanser Verlag.

Say, M. G., (1963), The Performance and Design of Alternating Current Machines, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., London

Schmidt, A., (1953), "Capacitors in Power Systems with Rectifier Loads," AIEE Trans., 77: 14-17.

Sharma, V. K. ve Fleming, R. J., (1986), "Harmonic Analysis of Power Transmission Networks in the Frequency Domain", Proc. Second Int. Conference on Harmonics in Power Systems, Monitoba, Canada, 148-157.

Shepherd, W. ve Zand, P., (1979), Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits, Cambridge University Press.

Siemens AG, (1987), Electrical Installations Handbook, Siemens AG ve John Wiley, New York.

Steinmetz, C. P., (1916), Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena, McGraw-Hill, New York.

Steinmetz, C. P., (1917), Theory and Calculation of Electric Circuits, McGraw-Hill, New York.

Sundberg, Y., (1976), "The Arc Furnace As a Load on the Network", ASEA Journal, 49: 75-87.

Szabados, B. ve Lee, J., (1981), "Harmonic Impedance Measurement on Transformers," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-100: 5020-5026.

Tarkan, N., (1984), Optimisation et Estimation d'Etat des Systems d'Energie Electrique, Premiere Partie, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İ.T.Ü. Rektörlük Matbaası.

Tuinenga, W., (1986), PSpice Simulation Program, Prentice-Hall, New York.

Waymouth, J. F., (1971), Electric Discharge Lamps, MIT Press.

Westinghouse Electric Corporation, (1964), Electrical Transmission and Distribution Reference Book, East Pittsburgh, Pennsylvania.

Williams, S. ve Smith, I. R., (1973), "Fast Digital Computation of Three-Phase Thyristor Bridge Circuits", Proc. IEE, 120: 791-795.

Xia, D. ve Heydt, G. T., (1982), "Harmonic Power Flow Studies, Part I – Formulation and Solution", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101,

EKLER



Ek 1.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (50 Hz)
(Akım çözümleri)

**** 06/06/99 11:05:00 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE50HZ

VR 10 1 AC 231 0
 VS 20 2 AC 231 240
 VT 30 3 AC 231 120
 ra 0 1 lp
 rb 0 2 lp
 rc 0 3 lp
 R1011 10 11 0.0221
 L1112 11 12 0.0745m
 R2021 20 21 0.0221
 L2122 21 22 0.0745m
 R3031 30 31 0.0221
 L3132 31 32 0.0745m
 R1213 12 13 4.218
 L1377 13 77 5.412m
 R2223 22 23 4.373
 L2377 23 77 6.63m
 R3233 32 33 3.963
 L3377 33 77 4.944m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 2.592
 L1675 16 75 5.50m
 R2526 25 26 2.584
 L2675 26 75 5.235m
 R3536 35 36 2.567
 L3675 36 75 5.365m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R5960 59 60 4.31
 L6067 60 67 22.33m
 R6263 62 63 2.34
 L6367 63 67 24.24m
 R6566 65 66 5.71
 L6667 66 67 20.44m
 R1517 15 17 0.0247
 L1718 17 18 0.0239m
 R2527 25 27 0.0247
 L2728 27 28 0.0239m
 R3537 35 37 0.0247
 L3738 37 38 0.0239m
 R1819 18 19 4.062
 L1973 19 73 6.92m
 R2829 28 29 4.175
 L2973 29 73 5.923m
 R3839 38 39 4.296
 L3973 39 73 7.016m
 R1840 18 40 0.0148

Ek 1.1

PSpice girişleri ve analiz sonuçları (50 Hz)
 (Akım çözümleri)

L4041 40 41 0.0143m
R2843 28 43 0.0148
L4344 43 44 0.0143m
R3846 38 46 0.0148
L4647 46 47 0.0143m
R4142 41 42 3.497
L4271 42 71 6.427m
R4445 44 45 3.226
L4571 45 71 5.494m
R4748 47 48 2.85
L4871 48 71 6.05m
L7172 71 72 0.0149m
R7273 72 73 0.0296
L7374 73 74 0.0248m
R7475 74 75 0.0494
L6768 67 68 0.0215m
R6875 68 75 0.102
L7576 75 76 0.0191m
R7677 76 77 0.0198
L7778 77 78 0.0287m
R780 78 0 0.0296

.AC LIN 1 50 50

.PRINT AC IM(R1011) IP(R1011)
.PRINT AC IM(R2021) IP(R2021)
.PRINT AC IM(R3031) IP(R3031)
.PRINT AC IM(R780) IP(R780)
.PRINT AC IM(R1213) IP(R1213)
.PRINT AC IM(R2223) IP(R2223)
.PRINT AC IM(R3233) IP(R3233)
.PRINT AC IM(R1214) IP(R1214)
.PRINT AC IM(R2224) IP(R2224)
.PRINT AC IM(R3234) IP(R3234)
.PRINT AC IM(R7677) IP(R7677)
.PRINT AC IM(R1516) IP(R1516)
.PRINT AC IM(R2526) IP(R2526)
.PRINT AC IM(R3536) IP(R3536)
.PRINT AC IM(R1558) IP(R1558)
.PRINT AC IM(R2561) IP(R2561)
.PRINT AC IM(R3564) IP(R3564)
.PRINT AC IM(R6875) IP(R6875)
.PRINT AC IM(R5960) IP(R5960)
.PRINT AC IM(R6263) IP(R6263)
.PRINT AC IM(R6566) IP(R6566)
.PRINT AC IM(R1517) IP(R1517)
.PRINT AC IM(R2527) IP(R2527)
.PRINT AC IM(R3537) IP(R3537)
.PRINT AC IM(R7475) IP(R7475)
.PRINT AC IM(R1819) IP(R1819)
.PRINT AC IM(R2829) IP(R2829)
.PRINT AC IM(R3839) IP(R3839)
.PRINT AC IM(R1840) IP(R1840)
.PRINT AC IM(R2843) IP(R2843)
.PRINT AC IM(R3846) IP(R3846)
.PRINT AC IM(R7273) IP(R7273)
.PRINT AC IM(R4142) IP(R4142)
.PRINT AC IM(R4445) IP(R4445)
.PRINT AC IM(R4748) IP(R4748)

```

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
.width out=80
.end

```

```

FREQ    IM(R1011) IP(R1011)

```

```

5.000E+01  2.445E+02 -3.249E+01

```

```

FREQ    IM(R2021) IP(R2021)

```

```

5.000E+01  2.455E+02 -1.528E+02

```

```

FREQ    IM(R3031) IP(R3031)

```

```

5.000E+01  2.552E+02  8.828E+01

```

```

FREQ    IM(R780) IP(R780)

```

```

5.000E+01  1.244E+01  1.110E+02

```

```

FREQ    IM(R1213) IP(R1213)

```

```

5.000E+01  4.917E+01 -2.252E+01

```

```

FREQ    IM(R2223) IP(R2223)

```

```

5.000E+01  4.614E+01 -1.459E+02

```

```

FREQ    IM(R3233) IP(R3233)

```

```

5.000E+01  5.232E+01  9.804E+01

```

```

FREQ    IM(R1214) IP(R1214)

```

```

5.000E+01  1.962E+02 -3.497E+01

```

```

FREQ    IM(R2224) IP(R2224)

```

```

5.000E+01  1.997E+02 -1.544E+02

```

FREQ IM(R3234) IP(R3234)

5.000E+01 2.038E+02 8.578E+01

FREQ IM(R7677) IP(R7677)

5.000E+01 6.303E+00 1.338E+02

FREQ IM(R1516) IP(R1516)

5.000E+01 7.095E+01 -3.416E+01

FREQ IM(R2526) IP(R2526)

5.000E+01 7.205E+01 -1.527E+02

FREQ IM(R3536) IP(R3536)

5.000E+01 7.156E+01 8.625E+01

FREQ IM(R1558) IP(R1558)

5.000E+01 2.678E+01 -5.869E+01

FREQ IM(R2561) IP(R2561)

5.000E+01 2.765E+01 1.675E+02

FREQ IM(R3564) IP(R3564)

5.000E+01 2.532E+01 7.146E+01

FREQ IM(R6875) IP(R6875)

5.000E+01 8.708E+00 1.253E+02

FREQ IM(R5960) IP(R5960)

5.000E+01 2.678E+01 -5.869E+01

FREQ IM(R6263) IP(R6263)

5.000E+01 2.765E+01 1.675E+02

FREQ IM(R6566) IP(R6566)

5.000E+01 2.532E+01 7.146E+01

FREQ IM(R1517) IP(R1517)

5.000E+01 1.013E+02 -2.944E+01

FREQ IM(R2527) IP(R2527)

5.000E+01 1.070E+02 -1.464E+02

FREQ IM(R3537) IP(R3537)

5.000E+01 1.079E+02 8.880E+01

FREQ IM(R7475) IP(R7475)

5.000E+01 1.720E+00 -3.989E+01

FREQ IM(R1819) IP(R1819)

5.000E+01 4.740E+01 -2.847E+01

FREQ IM(R2829) IP(R2829)

5.000E+01 4.769E+01 -1.442E+02

FREQ IM(R3839) IP(R3839)

5.000E+01 4.497E+01 9.257E+01

FREQ IM(R1840) IP(R1840)

5.000E+01 5.388E+01 -3.030E+01

FREQ IM(R2843) IP(R2843)

5.000E+01 5.936E+01 -1.482E+02

FREQ IM(R3846) IP(R3846)

5.000E+01 6.307E+01 8.612E+01

FREQ IM(R7273) IP(R7273)

5.000E+01 4.498E+00 8.583E+01

FREQ IM(R4142) IP(R4142)

5.000E+01 5.388E+01 -3.030E+01

FREQ IM(R4445) IP(R4445)

5.000E+01 5.936E+01 -1.482E+02

FREQ IM(R4748) IP(R4748)

5.000E+01 6.307E+01 8.612E+01

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 4.34

Ek 1.2 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (50 Hz)
(Gerilim çözümleri)

**** 06/06/99 12:06:00 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE50HZ

VR 10 1 AC 231 0
 VS 20 2 AC 231 240
 VT 30 3 AC 231 120
 ra 0 1 1p
 rb 0 2 1p
 rc 0 3 1p
 R1011 10 11 0.0221
 L1112 11 12 0.0745m
 R2021 20 21 0.0221
 L2122 21 22 0.0745m
 R3031 30 31 0.0221
 L3132 31 32 0.0745m
 R1213 12 13 4.218
 L1377 13 77 5.412m
 R2223 22 23 4.373
 L2377 23 77 6.63m
 R3233 32 33 3.963
 L3377 33 77 4.944m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 2.592
 L1675 16 75 5.50m
 R2526 25 26 2.584
 L2675 26 75 5.235m
 R3536 35 36 2.567
 L3675 36 75 5.365m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R5960 59 60 4.31
 L6067 60 67 22.33m
 R6263 62 63 2.34
 L6367 63 67 24.24m
 R6566 65 66 5.71
 L6667 66 67 20.44m
 R1517 15 17 0.0247
 L1718 17 18 0.0239m
 R2527 25 27 0.0247
 L2728 27 28 0.0239m
 R3537 35 37 0.0247
 L3738 37 38 0.0239m
 R1819 18 19 4.062
 L1973 19 73 6.92m
 R2829 28 29 4.175
 L2973 29 73 5.923m
 R3839 38 39 4.296
 L3973 39 73 7.016m

Ek 1.2

PSpice girişleri ve analiz sonuçları (50 Hz)

(Gerilim çözümleri)

```

R1840 18 40 0.0148
L4041 40 41 0.0143m
R2843 28 43 0.0148
L4344 43 44 0.0143m
R3846 38 46 0.0148
L4647 46 47 0.0143m
R4142 41 42 3.497
L4271 42 71 6.427m
R4445 44 45 3.226
L4571 45 71 5.494m
R4748 47 48 2.85
L4871 48 71 6.05m
L7172 71 72 0.0149m
R7273 72 73 0.0296
L7374 73 74 0.0248m
R7475 74 75 0.0494
L6768 67 68 0.0215m
R6875 68 75 0.102
L7576 75 76 0.0191m
R7677 76 77 0.0198
L7778 77 78 0.0287m
R780 78 0 0.0296
.AC LIN 1 50 50
.PRINT AC VM(12,77) VP(12,77)
.PRINT AC VM(22,77) VP(22,77)
.PRINT AC VM(32,77) VP(32,77)
.PRINT AC VM(15,75) VP(15,75)
.PRINT AC VM(25,75) VP(25,75)
.PRINT AC VM(35,75) VP(35,75)
.PRINT AC VM(59,67) VP(59,67)
.PRINT AC VM(62,67) VP(62,67)
.PRINT AC VM(65,67) VP(65,67)
.PRINT AC VM(18,73) VP(18,73)
.PRINT AC VM(28,73) VP(28,73)
.PRINT AC VM(38,73) VP(38,73)
.PRINT AC VM(41,71) VP(41,71)
.PRINT AC VM(44,71) VP(44,71)
.PRINT AC VM(47,71) VP(47,71)
.PRINT AC VM(12,0) VP(12,0)
.PRINT AC VM(22,0) VP(22,0)
.PRINT AC VM(32,0) VP(32,0)
.PRINT AC VM(77,0) VP(77,0)
.PRINT AC VM(32,77) VP(32,77)
.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
.width out=80
.end

```

```

FREQ      VM(12,77)  VP(12,77)

```

```

5.000E+01  2.236E+02 -5.710E-01

```

```

FREQ      VM(22,77)  VP(22,77)

```

```

5.000E+01  2.235E+02 -1.204E+02

```

FREQ VM(32,77) VP(32,77)

5.000E+01 2.227E+02 1.194E+02

FREQ VM(15,75) VP(15,75)

5.000E+01 2.210E+02 -4.672E-01

FREQ VM(25,75) VP(25,75)

5.000E+01 2.207E+02 -1.202E+02

FREQ VM(35,75) VP(35,75)

5.000E+01 2.197E+02 1.195E+02

FREQ VM(59,67) VP(59,67)

5.000E+01 2.205E+02 -2.591E-01

FREQ VM(62,67) VP(62,67)

5.000E+01 2.203E+02 -1.196E+02

FREQ VM(65,67) VP(65,67)

5.000E+01 2.176E+02 1.198E+02

FREQ VM(18,73) VP(18,73)

5.000E+01 2.184E+02 -3.124E-01

FREQ VM(28,73) VP(28,73)

5.000E+01 2.180E+02 -1.201E+02

FREQ VM(38,73) VP(38,73)

5.000E+01 2.171E+02 1.197E+02

FREQ VM(41,71) VP(41,71)

5.000E+01 2.176E+02 -2.980E-01

FREQ VM(44,71) VP(44,71)

5.000E+01 2.172E+02 -1.201E+02

FREQ VM(47,71) VP(47,71)

5.000E+01 2.161E+02 1.198E+02

FREQ VM(12,0) VP(12,0)

5.000E+01 2.234E+02 -4.936E-01

FREQ VM(22,0) VP(22,0)

5.000E+01 2.233E+02 -1.205E+02

FREQ VM(32,0) VP(32,0)

5.000E+01 2.231E+02 1.195E+02

FREQ VM(77,0) VP(77,0)

5.000E+01 3.851E-01 1.279E+02

FREQ VM(32,77) VP(32,77)

5.000E+01 2.227E+02 1.194E+02

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 3.29

Ek 2.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (150 Hz)
(Akım çözümleri)

Ek 2.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (150 Hz) - (Akım çözümleri)

**** 06/06/99 18:14:33 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE-150Hz

I1277 12 77 AC 12.41 -5.46
 I2277 22 77 AC 11.17 -3.5
 I3277 32 77 AC 7.84 -6.38
 I1575 15 75 AC 22.48 0.25
 I2575 25 75 AC 18.26 4.79
 I3575 35 75 AC 20.52 1.286
 I5967 59 67 AC 13.82 160.46
 I6267 62 67 AC 10.96 153.16
 I6567 65 67 AC 14.83 165
 I1873 18 73 AC 12.03 0.922
 I2873 28 73 AC 14.30 -2.97
 I3873 38 73 AC 13.72 -1.473
 I4171 41 71 AC 11.00 1.42
 I4471 44 71 AC 8.554 5.026
 I4771 47 71 AC 9.89 6.01
 R011 0 11 0.0217
 L1112 11 12 0.07082m
 R021 0 21 0.0217
 L2122 21 22 0.07082m
 R031 0 31 0.0217
 L3132 31 32 0.07082m
 R1213 12 13 9.97
 L1377 13 77 14.8m
 R2223 22 23 12.24
 L2377 23 77 24.35m
 R3233 32 33 11.22
 L3377 33 77 19.8m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 7.98
 L1675 16 75 17.13m
 R2526 25 26 11.81
 L2675 26 75 15.96m
 R3536 35 36 8.91
 L3675 36 75 17.71m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R1517 15 17 0.0247
 L1718 17 18 0.0239m
 R2527 25 27 0.0247

L2728 27 28 0.0239m
 R3537 35 37 0.0247
 L3738 37 38 0.0239m
 R1819 18 19 25.5
 L1973 19 73 43.15m
 R2829 28 29 15.39
 L2973 29 73 28.28m
 R3839 38 39 21.53
 L3973 39 73 44.5m
 R1840 18 40 0.0148
 L4041 40 41 0.0143m
 R2843 28 43 0.0148
 L4344 43 44 0.0143m
 R3846 38 46 0.0148
 L4647 46 47 0.0143m
 R4142 41 42 10.76
 L4271 42 71 22.25m
 R4445 44 45 10.29
 L4571 45 71 16.69m
 R4748 47 48 7.92
 L4871 48 71 15.15m
 L7172 71 72 0.0149m
 R7273 72 73 0.0296
 L7374 73 74 0.0248m
 R7475 74 75 0.0494
 L6768 67 68 0.0215m
 R6875 68 75 0.102
 L7576 75 76 0.0191m
 R7677 76 77 0.0198
 L7778 77 78 0.0287m
 R780 78 0 0.0296
 .AC LIN 1 150 150

.PRINT AC IM(R011) IP(R011)
 .PRINT AC IM(R021) IP(R021)
 .PRINT AC IM(R031) IP(R031)
 .PRINT AC IM(R780) IP(R780)
 .PRINT AC IM(R1213) IP(R1213)
 .PRINT AC IM(R2223) IP(R2223)
 .PRINT AC IM(R3233) IP(R3233)
 .PRINT AC IM(R1214) IP(R1214)
 .PRINT AC IM(R2224) IP(R2224)
 .PRINT AC IM(R3234) IP(R3234)
 .PRINT AC IM(R7677) IP(R7677)
 .PRINT AC IM(R1516) IP(R1516)
 .PRINT AC IM(R2526) IP(R2526)
 .PRINT AC IM(R3536) IP(R3536)
 .PRINT AC IM(R1558) IP(R1558)
 .PRINT AC IM(R2561) IP(R2561)
 .PRINT AC IM(R3564) IP(R3564)
 .PRINT AC IM(R6875) IP(R6875)
 .PRINT AC IM(R1517) IP(R1517)
 .PRINT AC IM(R2527) IP(R2527)
 .PRINT AC IM(R3537) IP(R3537)
 .PRINT AC IM(R7475) IP(R7475)
 .PRINT AC IM(R1819) IP(R1819)
 .PRINT AC IM(R2829) IP(R2829)
 .PRINT AC IM(R3839) IP(R3839)
 .PRINT AC IM(R1840) IP(R1840)
 .PRINT AC IM(R2843) IP(R2843)

```
.PRINT AC IM(R3846) IP(R3846)
.PRINT AC IM(R7273) IP(R7273)
.PRINT AC IM(R4142) IP(R4142)
.PRINT AC IM(R4445) IP(R4445)
.PRINT AC IM(R4748) IP(R4748)

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
.width out=80
.end
```

FREQ IM(R011) IP(R011)

1.500E+02 4.306E+01 5.600E+00

FREQ IM(R021) IP(R021)

1.500E+02 4.071E+01 8.344E+00

FREQ IM(R031) IP(R031)

1.500E+02 3.575E+01 7.072E+00

FREQ IM(R780) IP(R780)

1.500E+02 1.195E+02 6.975E+00

FREQ IM(R1213) IP(R1213)

1.500E+02 4.427E-01 -1.742E+02

FREQ IM(R2223) IP(R2223)

1.500E+02 2.841E-01 1.789E+02

FREQ IM(R3233) IP(R3233)

1.500E+02 3.252E-01 -1.795E+02

FREQ IM(R1214) IP(R1214)

1.500E+02 3.142E+01 9.949E+00

FREQ IM(R2224) IP(R2224)

1.500E+02 3.014E+01 1.262E+01

FREQ IM(R3234) IP(R3234)

1.500E+02 2.851E+01 1.066E+01

FREQ IM(R7677) IP(R7677)

1.500E+02 9.004E+01 1.107E+01

FREQ IM(R1516) IP(R1516)

1.500E+02 5.925E-01 1.752E+02

FREQ IM(R2526) IP(R2526)

1.500E+02 5.457E-01 -1.724E+02

FREQ IM(R3536) IP(R3536)

1.500E+02 5.338E-01 1.765E+02

FREQ IM(R1558) IP(R1558)

1.500E+02 1.382E+01 1.605E+02

FREQ IM(R2561) IP(R2561)

1.500E+02 1.096E+01 1.532E+02

FREQ IM(R3564) IP(R3564)

1.500E+02 1.483E+01 1.650E+02

FREQ IM(R6875) IP(R6875)

1.500E+02 3.948E+01 1.601E+02

FREQ IM(R1517) IP(R1517)

1.500E+02 2.209E+01 1.708E+00

FREQ IM(R2527) IP(R2527)

1.500E+02 2.153E+01 4.874E-01

FREQ IM(R3537) IP(R3537)

1.500E+02 2.238E+01 2.417E+00

FREQ IM(R7475) IP(R7475)

1.500E+02 6.599E+01 1.550E+00

FREQ IM(R1819) IP(R1819)

1.500E+02 3.040E-01 1.727E+02

FREQ IM(R2829) IP(R2829)

1.500E+02 4.655E-01 1.709E+02

FREQ IM(R3839) IP(R3839)

1.500E+02 2.981E-01 1.671E+02

FREQ IM(R1840) IP(R1840)

1.500E+02 1.036E+01 2.358E+00

FREQ IM(R2843) IP(R2843)

1.500E+02 7.759E+00 6.291E+00

FREQ IM(R3846) IP(R3846)

1.500E+02 9.017E+00 7.840E+00

FREQ IM(R7273) IP(R7273)

1.500E+02 2.711E+01 5.304E+00

FREQ IM(R4142) IP(R4142)

1.500E+02 6.635E-01 1.666E+02

FREQ IM(R4445) IP(R4445)

1.500E+02 8.149E-01 1.729E+02

FREQ IM(R4748) IP(R4748)

1.500E+02 9.233E-01 1.678E+02

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 4.56

Ek 2.2 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (150 Hz)
(Gerilim çözümleri)

Ek 2.2 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (150 Hz) - (Gerilim çözümleri)

**** 06/06/99 18:33:17 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE-150Hz

I1277 12 77 AC 12.41 -5.46
 I2277 22 77 AC 11.17 -3.5
 I3277 32 77 AC 7.84 -6.38
 I1575 15 75 AC 22.48 0.25
 I2575 25 75 AC 18.26 4.79
 I3575 35 75 AC 20.52 1.286
 I5967 59 67 AC 13.82 160.46
 I6267 62 67 AC 10.96 153.16
 I6567 65 67 AC 14.83 165
 I1873 18 73 AC 12.03 0.922
 I2873 28 73 AC 14.30 -2.97
 I3873 38 73 AC 13.72 -1.473
 I4171 41 71 AC 11.00 1.42
 I4471 44 71 AC 8.554 5.026
 I4771 47 71 AC 9.89 6.01
 R011 0 11 0.0217
 L1112 11 12 0.07082m
 R021 0 21 0.0217
 L2122 21 22 0.07082m
 R031 0 31 0.0217
 L3132 31 32 0.07082m
 R1213 12 13 9.97
 L1377 13 77 14.8m
 R2223 22 23 12.24
 L2377 23 77 24.35m
 R3233 32 33 11.22
 L3377 33 77 19.8m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 7.98
 L1675 16 75 17.13m
 R2526 25 26 11.81
 L2675 26 75 15.96m
 R3536 35 36 8.91
 L3675 36 75 17.71m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R1517 15 17 0.0247

L1718 17 18 0.0239m
 R2527 25 27 0.0247
 L2728 27 28 0.0239m
 R3537 35 37 0.0247
 L3738 37 38 0.0239m
 R1819 18 19 25.5
 L1973 19 73 43.15m
 R2829 28 29 15.39
 L2973 29 73 28.28m
 R3839 38 39 21.53
 L3973 39 73 44.5m
 R1840 18 40 0.0148
 L4041 40 41 0.0143m
 R2843 28 43 0.0148
 L4344 43 44 0.0143m
 R3846 38 46 0.0148
 L4647 46 47 0.0143m
 R4142 41 42 10.76
 L4271 42 71 22.25m
 R4445 44 45 10.29
 L4571 45 71 16.69m
 R4748 47 48 7.92
 L4871 48 71 15.15m
 L7172 71 72 0.0149m
 R7273 72 73 0.0296
 L7374 73 74 0.0248m
 R7475 74 75 0.0494
 L6768 67 68 0.0215m
 R6875 68 75 0.102
 L7576 75 76 0.0191m
 R7677 76 77 0.0198
 L7778 77 78 0.0287m
 R780 78 0 0.0296
 .AC LIN 1 150 150

.PRINT AC VM(12,77) VP(12,77)
 .PRINT AC VM(22,77) VP(22,77)
 .PRINT AC VM(32,77) VP(32,77)
 .PRINT AC VM(15,75) VP(15,75)
 .PRINT AC VM(25,75) VP(25,75)
 .PRINT AC VM(35,75) VP(35,75)
 .PRINT AC VM(59,67) VP(59,67)
 .PRINT AC VM(62,67) VP(62,67)
 .PRINT AC VM(65,67) VP(65,67)
 .PRINT AC VM(18,73) VP(18,73)
 .PRINT AC VM(28,73) VP(28,73)
 .PRINT AC VM(38,73) VP(38,73)
 .PRINT AC VM(41,71) VP(41,71)
 .PRINT AC VM(44,71) VP(44,71)
 .PRINT AC VM(47,71) VP(47,71)
 .PRINT AC VM(12,0) VP(12,0)
 .PRINT AC VM(22,0) VP(22,0)
 .PRINT AC VM(32,0) VP(32,0)
 .PRINT AC VM(77,0) VP(77,0)

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
 .width out=80
 .end

FREQ VM(12,77) VP(12,77)

1.500E+02 7.591E+00 -1.198E+02

FREQ VM(22,77) VP(22,77)

1.500E+02 7.389E+00 -1.191E+02

FREQ VM(32,77) VP(32,77)

1.500E+02 7.082E+00 -1.205E+02

FREQ VM(15,75) VP(15,75)

1.500E+02 1.067E+01 -1.211E+02

FREQ VM(25,75) VP(25,75)

1.500E+02 1.044E+01 -1.205E+02

FREQ VM(35,75) VP(35,75)

1.500E+02 1.010E+01 -1.216E+02

FREQ VM(59,67) VP(59,67)

1.500E+02 9.848E+00 -9.270E+01

FREQ VM(62,67) VP(62,67)

1.500E+02 9.783E+00 -9.276E+01

FREQ VM(65,67) VP(65,67)

1.500E+02 9.219E+00 -9.112E+01

FREQ VM(18,73) VP(18,73)

1.500E+02 1.459E+01 -1.294E+02

FREQ VM(28,73) VP(28,73)

1.500E+02 1.433E+01 -1.291E+02

FREQ VM(38,73) VP(38,73)

1.500E+02 1.405E+01 -1.301E+02

FREQ VM(41,71) VP(41,71)

1.500E+02 1.564E+01 -1.305E+02

FREQ VM(44,71) VP(44,71)

1.500E+02 1.532E+01 -1.303E+02

FREQ VM(47,71) VP(47,71)

1.500E+02 1.508E+01 -1.312E+02

FREQ VM(12,0) VP(12,0)

1.500E+02 3.022E+00 -1.024E+02

FREQ VM(22,0) VP(22,0)

1.500E+02 2.857E+00 -9.967E+01

FREQ VM(32,0) VP(32,0)

1.500E+02 2.509E+00 -1.009E+02

FREQ VM(77,0) VP(77,0)

Ek 3.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (250 Hz)
(Akım çözümleri)

Ek 3.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (250 Hz) - (Akım çözümleri)

**** 07/06/80 12:03:22 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE-250Hz

I1277 12 77 AC 17.68 -13.93
 I2277 22 77 AC 18.35 107.45
 I3277 32 77 AC 19.4 227
 I1575 15 75 AC 29.94 -12.81
 I2575 25 75 AC 32.16 109.46
 I3575 35 75 AC 30.67 227.4
 I5967 59 67 AC 7.914 1.93
 I6267 62 67 AC 7.08 126.2
 I6567 65 67 AC 7.88 241.7
 I1873 18 73 AC 23.1 -11.37
 I2873 28 73 AC 21.54 108.71
 I3873 38 73 AC 17.33 224.27
 I4171 41 71 AC 21.4 -11.23
 I4471 44 71 AC 22.5 110.35
 I4771 47 71 AC 22.22 229.82
 R011 0 11 0.0221
 L1112 11 12 0.0745m
 R021 0 21 0.0221
 L2122 21 22 0.0745m
 R031 0 31 0.0221
 L3132 31 32 0.0745m
 R1213 12 13 9.97
 L1377 13 77 14.8m
 R2223 22 23 12.24
 L2377 23 77 24.35m
 R3233 32 33 11.22
 L3377 33 77 19.8m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 7.98
 L1675 16 75 17.13m
 R2526 25 26 11.81
 L2675 26 75 15.96m
 R3536 35 36 8.91
 L3675 36 75 17.71m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R1517 15 17 0.0247
 L1718 17 18 0.0239m

R2527 25 27 0.0247
L2728 27 28 0.0239m
R3537 35 37 0.0247
L3738 37 38 0.0239m
R1819 18 19 25.5
L1973 19 73 43.15m
R2829 28 29 15.39
L2973 29 73 28.28m
R3839 38 39 21.53
L3973 39 73 44.5m
R1840 18 40 0.0148
L4041 40 41 0.0143m
R2843 28 43 0.0148
L4344 43 44 0.0143m
R3846 38 46 0.0148
L4647 46 47 0.0143m
R4142 41 42 10.76
L4271 42 71 22.25m
R4445 44 45 10.29
L4571 45 71 16.69m
R4748 47 48 7.92
L4871 48 71 15.15m
L7172 71 72 0.0149m
R7273 72 73 0.0296
L7374 73 74 0.0248m
R7475 74 75 0.0494
L6768 67 68 0.0215m
R6875 68 75 0.102
L7576 75 76 0.0191m
R7677 76 77 0.0198
L7778 77 78 0.0287m
R780 78 0 0.0296
.AC LIN 1 250 250

.PRINT AC IM(R011) IP(R011)
.PRINT AC IM(R021) IP(R021)
.PRINT AC IM(R031) IP(R031)
.PRINT AC IM(R780) IP(R780)
.PRINT AC IM(R1213) IP(R1213)
.PRINT AC IM(R2223) IP(R2223)
.PRINT AC IM(R3233) IP(R3233)
.PRINT AC IM(R1214) IP(R1214)
.PRINT AC IM(R2224) IP(R2224)
.PRINT AC IM(R3234) IP(R3234)
.PRINT AC IM(R7677) IP(R7677)
.PRINT AC IM(R1516) IP(R1516)
.PRINT AC IM(R2526) IP(R2526)
.PRINT AC IM(R3536) IP(R3536)
.PRINT AC IM(R1558) IP(R1558)
.PRINT AC IM(R2561) IP(R2561)
.PRINT AC IM(R3564) IP(R3564)
.PRINT AC IM(R6875) IP(R6875)
.PRINT AC IM(R1517) IP(R1517)
.PRINT AC IM(R2527) IP(R2527)
.PRINT AC IM(R3537) IP(R3537)
.PRINT AC IM(R7475) IP(R7475)
.PRINT AC IM(R1819) IP(R1819)
.PRINT AC IM(R2829) IP(R2829)
.PRINT AC IM(R3839) IP(R3839)
.PRINT AC IM(R1840) IP(R1840)

```
.PRINT AC IM(R2843) IP(R2843)
.PRINT AC IM(R3846) IP(R3846)
.PRINT AC IM(R7273) IP(R7273)
.PRINT AC IM(R4142) IP(R4142)
.PRINT AC IM(R4445) IP(R4445)
.PRINT AC IM(R4748) IP(R4748)

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
.width out=80
.end
```

```
FREQ      IM(R011)  IP(R011)
```

```
2.500E+02  9.816E+01 -1.129E+01
```

```
FREQ      IM(R021)  IP(R021)
```

```
2.500E+02  9.955E+01  1.102E+02
```

```
FREQ      IM(R031)  IP(R031)
```

```
2.500E+02  9.560E+01 -1.316E+02
```

```
FREQ      IM(R780)  IP(R780)
```

```
2.500E+02  3.144E+00  1.195E+02
```

```
FREQ      IM(R1213) IP(R1213)
```

```
2.500E+02  4.601E-01 -1.780E+02
```

```
FREQ      IM(R2223) IP(R2223)
```

```
2.500E+02  2.993E-01 -6.296E+01
```

```
FREQ      IM(R3233) IP(R3233)
```

```
2.500E+02  3.410E-01  5.689E+01
```

```
FREQ      IM(R1214) IP(R1214)
```

```
2.500E+02  8.095E+01 -1.064E+01
```

FREQ IM(R2224) IP(R2224)

2.500E+02 8.152E+01 1.108E+02

FREQ IM(R3234) IP(R3234)

2.500E+02 7.655E+01 -1.312E+02

FREQ IM(R7677) IP(R7677)

2.500E+02 3.677E+00 8.745E+01

FREQ IM(R1516) IP(R1516)

2.500E+02 5.066E-01 1.735E+02

FREQ IM(R2526) IP(R2526)

2.500E+02 5.303E-01 -5.796E+01

FREQ IM(R3536) IP(R3536)

2.500E+02 4.646E-01 5.254E+01

FREQ IM(R1558) IP(R1558)

2.500E+02 7.914E+00 1.930E+00

FREQ IM(R2561) IP(R2561)

2.500E+02 7.080E+00 1.262E+02

FREQ IM(R3564) IP(R3564)

2.500E+02 7.880E+00 -1.183E+02

FREQ IM(R6875) IP(R6875)

2.500E+02 9.584E-01 -9.047E+01

FREQ IM(R1517) IP(R1517)

2.500E+02 4.382E+01 -1.137E+01

FREQ IM(R2527) IP(R2527)

2.500E+02 4.308E+01 1.095E+02

FREQ IM(R3537) IP(R3537)

2.500E+02 3.868E+01 -1.327E+02

FREQ IM(R7475) IP(R7475)

2.500E+02 4.277E+00 5.602E+01

FREQ IM(R1819) IP(R1819)

2.500E+02 2.251E-01 1.755E+02

FREQ IM(R2829) IP(R2829)

2.500E+02 3.514E-01 -6.739E+01

FREQ IM(R3839) IP(R3839)

2.500E+02 2.047E-01 5.006E+01

FREQ IM(R1840) IP(R1840)

2.500E+02 2.094E+01 -1.129E+01

FREQ IM(R2843) IP(R2843)

2.500E+02 2.189E+01 1.102E+02

FREQ IM(R3846) IP(R3846)

2.500E+02 2.160E+01 -1.302E+02

FREQ IM(R7273) IP(R7273)

2.500E+02 9.814E-01 -1.768E+02

FREQ IM(R4142) IP(R4142)

2.500E+02 4.593E-01 1.714E+02

FREQ IM(R4445) IP(R4445)

2.500E+02 6.077E-01 -6.555E+01

FREQ IM(R4748) IP(R4748)

2.500E+02 6.194E-01 5.061E+01

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 3.30

Ek 3.2 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (250 Hz)
(Gerilim çözümleri).

R2527 25 27 0.0247
 L2728 27 28 0.0239m
 R3537 35 37 0.0247
 L3738 37 38 0.0239m
 R1819 18 19 25.5
 L1973 19 73 43.15m
 R2829 28 29 15.39
 L2973 29 73 28.28m
 R3839 38 39 21.53
 L3973 39 73 44.5m
 R1840 18 40 0.0148
 L4041 40 41 0.0143m
 R2843 28 43 0.0148
 L4344 43 44 0.0143m
 R3846 38 46 0.0148
 L4647 46 47 0.0143m
 R4142 41 42 10.76
 L4271 42 71 22.25m
 R4445 44 45 10.29
 L4571 45 71 16.69m
 R4748 47 48 7.92
 L4871 48 71 15.15m
 L7172 71 72 0.0149m
 R7273 72 73 0.0296
 L7374 73 74 0.0248m
 R7475 74 75 0.0494
 L6768 67 68 0.0215m
 R6875 68 75 0.102
 L7576 75 76 0.0191m
 R7677 76 77 0.0198
 L7778 77 78 0.0287m
 R780 78 0 0.0296
 .AC LIN 1 250 250

.PRINT AC VM(12,77) VP(12,77)
 .PRINT AC VM(22,77) VP(22,77)
 .PRINT AC VM(32,77) VP(32,77)
 .PRINT AC VM(15,75) VP(15,75)
 .PRINT AC VM(25,75) VP(25,75)
 .PRINT AC VM(35,75) VP(35,75)
 .PRINT AC VM(59,67) VP(59,67)
 .PRINT AC VM(62,67) VP(62,67)
 .PRINT AC VM(65,67) VP(65,67)
 .PRINT AC VM(18,73) VP(18,73)
 .PRINT AC VM(28,73) VP(28,73)
 .PRINT AC VM(38,73) VP(38,73)
 .PRINT AC VM(41,71) VP(41,71)
 .PRINT AC VM(44,71) VP(44,71)
 .PRINT AC VM(47,71) VP(47,71)
 .PRINT AC VM(12,0) VP(12,0)
 .PRINT AC VM(22,0) VP(22,0)
 .PRINT AC VM(32,0) VP(32,0)
 .PRINT AC VM(77,0) VP(77,0)

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
 .width out=80
 .end

FREQ VM(12,77) VP(12,77)

2.500E+02 1.164E+01 -1.112E+02

FREQ VM(22,77) VP(22,77)

2.500E+02 1.202E+01 9.291E+00

FREQ VM(32,77) VP(32,77)

2.500E+02 1.127E+01 1.271E+02

FREQ VM(15,75) VP(15,75)

2.500E+02 1.422E+01 -1.130E+02

FREQ VM(25,75) VP(25,75)

2.500E+02 1.470E+01 6.812E+00

FREQ VM(35,75) VP(35,75)

2.500E+02 1.357E+01 1.248E+02

FREQ VM(59,67) VP(59,67)

2.500E+02 1.460E+01 -1.148E+02

FREQ VM(62,67) VP(62,67)

2.500E+02 1.511E+01 5.980E+00

FREQ VM(65,67) VP(65,67)

2.500E+02 1.414E+01 1.231E+02

FREQ VM(18,73) VP(18,73)

2.500E+02 1.630E+01 -1.151E+02

FREQ VM(28,73) VP(28,73)

2.500E+02 1.652E+01 3.505E+00

FREQ VM(38,73) VP(38,73)

2.500E+02 1.497E+01 1.229E+02

FREQ VM(41,71) VP(41,71)

2.500E+02 1.680E+01 -1.157E+02

FREQ VM(44,71) VP(44,71)

2.500E+02 1.712E+01 3.016E+00

FREQ VM(47,71) VP(47,71)

2.500E+02 1.554E+01 1.222E+02

FREQ VM(12,0) VP(12,0)

2.500E+02 1.169E+01 -1.120E+02

FREQ VM(22,0) VP(22,0)

2.500E+02 1.186E+01 9.477E+00

FREQ VM(32,0) VP(32,0)

2.500E+02 1.139E+01 1.277E+02

FREQ VM(77,0) VP(77,0)

2.500E+02 1.696E-01 1.762E+02

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 3.02

Ek 4.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (350 Hz)
(Akım çözümleri)

Ek 4.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (350 Hz) - (Akım çözümleri)

**** 08/06/99 15:03:42 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE-350Hz

I1277 12 77 AC 10.42 -22.93
 I2277 22 77 AC 10.46 218.5
 I3277 32 77 AC 10.48 97.14
 I1575 15 75 AC 17.41 -21.63
 I2575 25 75 AC 17.55 220.67
 I3575 35 75 AC 17.45 98.29
 I5967 59 67 AC 0.78 20.87
 I6267 62 67 AC 0.79 268.95
 I6567 65 67 AC 0.72 138.85
 I1873 18 73 AC 17.76 -48.18
 I2873 28 73 AC 12.5 220.51
 I3873 38 73 AC 12.49 99.36
 I4171 41 71 AC 16.18 -47.42
 I4471 44 71 AC 11.73 221.33
 I4771 47 71 AC 11.66 100.75
 R011 0 11 0.0221
 L1112 11 12 0.0745m
 R021 0 21 0.0221
 L2122 21 22 0.0745m
 R031 0 31 0.0221
 L3132 31 32 0.0745m
 R1213 12 13 9.97
 L1377 13 77 14.8m
 R2223 22 23 12.24
 L2377 23 77 24.35m
 R3233 32 33 11.22
 L3377 33 77 19.8m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 7.98
 L1675 16 75 17.13m
 R2526 25 26 11.81
 L2675 26 75 15.96m
 R3536 35 36 8.91
 L3675 36 75 17.71m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R1517 15 17 0.0247
 L1718 17 18 0.0239m

R2527 25 27 0.0247
 L2728 27 28 0.0239m
 R3537 35 37 0.0247
 L3738 37 38 0.0239m
 R1819 18 19 25.5
 L1973 19 73 43.15m
 R2829 28 29 15.39
 L2973 29 73 28.28m
 R3839 38 39 21.53
 L3973 39 73 44.5m
 R1840 18 40 0.0148
 L4041 40 41 0.0143m
 R2843 28 43 0.0148
 L4344 43 44 0.0143m
 R3846 38 46 0.0148
 L4647 46 47 0.0143m
 R4142 41 42 10.76
 L4271 42 71 22.25m
 R4445 44 45 10.29
 L4571 45 71 16.69m
 R4748 47 48 7.92
 L4871 48 71 15.15m
 L7172 71 72 0.0149m
 R7273 72 73 0.0296
 L7374 73 74 0.0248m
 R7475 74 75 0.0494
 L6768 67 68 0.0215m
 R6875 68 75 0.102
 L7576 75 76 0.0191m
 R7677 76 77 0.0198
 L7778 77 78 0.0287m
 R780 78 0 0.0296
 .AC LIN 1 350 350

.PRINT AC IM(R011) IP(R011)
 .PRINT AC IM(R021) IP(R021)
 .PRINT AC IM(R031) IP(R031)
 .PRINT AC IM(R780) IP(R780)
 .PRINT AC IM(R1213) IP(R1213)
 .PRINT AC IM(R2223) IP(R2223)
 .PRINT AC IM(R3233) IP(R3233)
 .PRINT AC IM(R1214) IP(R1214)
 .PRINT AC IM(R2224) IP(R2224)
 .PRINT AC IM(R3234) IP(R3234)
 .PRINT AC IM(R7677) IP(R7677)
 .PRINT AC IM(R1516) IP(R1516)
 .PRINT AC IM(R2526) IP(R2526)
 .PRINT AC IM(R3536) IP(R3536)
 .PRINT AC IM(R1558) IP(R1558)
 .PRINT AC IM(R2561) IP(R2561)
 .PRINT AC IM(R3564) IP(R3564)
 .PRINT AC IM(R6875) IP(R6875)
 .PRINT AC IM(R1517) IP(R1517)
 .PRINT AC IM(R2527) IP(R2527)
 .PRINT AC IM(R3537) IP(R3537)
 .PRINT AC IM(R7475) IP(R7475)
 .PRINT AC IM(R1819) IP(R1819)
 .PRINT AC IM(R2829) IP(R2829)
 .PRINT AC IM(R3839) IP(R3839)
 .PRINT AC IM(R1840) IP(R1840)

```
.PRINT AC IM(R2843) IP(R2843)
.PRINT AC IM(R3846) IP(R3846)
.PRINT AC IM(R7273) IP(R7273)
.PRINT AC IM(R4142) IP(R4142)
.PRINT AC IM(R4445) IP(R4445)
.PRINT AC IM(R4748) IP(R4748)

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
.width out=80
.end
```

```
FREQ    IM(R011)  IP(R011)
```

```
3.500E+02  5.957E+01 -3.553E+01
```

```
FREQ    IM(R021)  IP(R021)
```

```
3.500E+02  5.166E+01 -1.393E+02
```

```
FREQ    IM(R031)  IP(R031)
```

```
3.500E+02  5.190E+01  9.922E+01
```

```
FREQ    IM(R780)  IP(R780)
```

```
3.500E+02  1.714E+01 -8.657E+01
```

```
FREQ    IM(R1213) IP(R1213)
```

```
3.500E+02  3.039E-01  1.477E+02
```

```
FREQ    IM(R2223) IP(R2223)
```

```
3.500E+02  1.737E-01  5.008E+01
```

```
FREQ    IM(R3233) IP(R3233)
```

```
3.500E+02  1.667E-01 -7.041E+01
```

```
FREQ    IM(R1214) IP(R1214)
```

```
3.500E+02  4.976E+01 -3.812E+01
```

FREQ IM(R2224) IP(R2224)

3.500E+02 4.138E+01 -1.386E+02

FREQ IM(R3234) IP(R3234)

3.500E+02 4.159E+01 9.979E+01

FREQ IM(R7677) IP(R7677)

3.500E+02 1.710E+01 -8.663E+01

FREQ IM(R1516) IP(R1516)

3.500E+02 3.347E-01 1.385E+02

FREQ IM(R2526) IP(R2526)

3.500E+02 3.232E-01 5.582E+01

FREQ IM(R3536) IP(R3536)

3.500E+02 2.139E-01 -7.217E+01

FREQ IM(R1558) IP(R1558)

3.500E+02 7.800E-01 2.087E+01

FREQ IM(R2561) IP(R2561)

3.500E+02 7.900E-01 -9.105E+01

FREQ IM(R3564) IP(R3564)

3.500E+02 7.200E-01 1.389E+02

FREQ IM(R6875) IP(R6875)

3.500E+02 1.764E-01 -1.251E+01

FREQ IM(R1517) IP(R1517)

3.500E+02 3.347E+01 -4.781E+01

FREQ IM(R2527) IP(R2527)

3.500E+02 2.362E+01 -1.394E+02

FREQ IM(R3537) IP(R3537)

3.500E+02 2.380E+01 9.987E+01

FREQ IM(R7475) IP(R7475)

3.500E+02 1.674E+01 -8.836E+01

FREQ IM(R1819) IP(R1819)

3.500E+02 1.538E-01 1.345E+02

FREQ IM(R2829) IP(R2829)

3.500E+02 2.255E-01 5.014E+01

FREQ IM(R3839) IP(R3839)

3.500E+02 8.970E-02 -7.010E+01

FREQ IM(R1840) IP(R1840)

3.500E+02 1.587E+01 -4.737E+01

FREQ IM(R2843) IP(R2843)

3.500E+02 1.134E+01 -1.390E+02

FREQ IM(R3846) IP(R3846)

3.500E+02 1.140E+01 1.005E+02

FREQ IM(R7273) IP(R7273)

3.500E+02 7.901E+00 -8.923E+01

FREQ IM(R4142) IP(R4142)

3.500E+02 3.148E-01 1.303E+02

FREQ IM(R4445) IP(R4445)

3.500E+02 3.976E-01 5.167E+01

FREQ IM(R4748) IP(R4748)

3.500E+02 2.665E-01 -6.843E+01

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 3.24

Ek 4.2 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (350 Hz)
(Gerilim çözümleri)

Ek 4.2 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (350 Hz) - (Gerilim çözümleri)

**** 08/06/99 18:03:50 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE-350Hz

I1277 12 77 AC 10.42 -22.93
 I2277 22 77 AC 10.46 218.5
 I3277 32 77 AC 10.48 97.14
 I1575 15 75 AC 17.41 -21.63
 I2575 25 75 AC 17.55 220.67
 I3575 35 75 AC 17.45 98.29
 I5967 59 67 AC 0.78 20.87
 I6267 62 67 AC 0.79 268.95
 I6567 65 67 AC 0.72 138.85
 I1873 18 73 AC 17.76 -48.18
 I2873 28 73 AC 12.5 220.51
 I3873 38 73 AC 12.49 99.36
 I4171 41 71 AC 16.18 -47.42
 I4471 44 71 AC 11.73 221.33
 I4771 47 71 AC 11.66 100.75
 R011 0 11 0.0221
 L1112 11 12 0.0745m
 R021 0 21 0.0221
 L2122 21 22 0.0745m
 R031 0 31 0.0221
 L3132 31 32 0.0745m
 R1213 12 13 9.97
 L1377 13 77 14.8m
 R2223 22 23 12.24
 L2377 23 77 24.35m
 R3233 32 33 11.22
 L3377 33 77 19.8m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 7.98
 L1675 16 75 17.13m
 R2526 25 26 11.81
 L2675 26 75 15.96m
 R3536 35 36 8.91
 L3675 36 75 17.71m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R1517 15 17 0.0247

L1718 17 18 0.0239m
 R2527 25 27 0.0247
 L2728 27 28 0.0239m
 R3537 35 37 0.0247
 L3738 37 38 0.0239m
 R1819 18 19 25.5
 L1973 19 73 43.15m
 R2829 28 29 15.39
 L2973 29 73 28.28m
 R3839 38 39 21.53
 L3973 39 73 44.5m
 R1840 18 40 0.0148
 L4041 40 41 0.0143m
 R2843 28 43 0.0148
 L4344 43 44 0.0143m
 R3846 38 46 0.0148
 L4647 46 47 0.0143m
 R4142 41 42 10.76
 L4271 42 71 22.25m
 R4445 44 45 10.29
 L4571 45 71 16.69m
 R4748 47 48 7.92
 L4871 48 71 15.15m
 L7172 71 72 0.0149m
 R7273 72 73 0.0296
 L7374 73 74 0.0248m
 R7475 74 75 0.0494
 L6768 67 68 0.0215m
 R6875 68 75 0.102
 L7576 75 76 0.0191m
 R7677 76 77 0.0198
 L7778 77 78 0.0287m
 R780 78 0 0.0296
 .AC LIN 1 350 350

.PRINT AC VM(12,77) VP(12,77)
 .PRINT AC VM(22,77) VP(22,77)
 .PRINT AC VM(32,77) VP(32,77)
 .PRINT AC VM(15,75) VP(15,75)
 .PRINT AC VM(25,75) VP(25,75)
 .PRINT AC VM(35,75) VP(35,75)
 .PRINT AC VM(59,67) VP(59,67)
 .PRINT AC VM(62,67) VP(62,67)
 .PRINT AC VM(65,67) VP(65,67)
 .PRINT AC VM(18,73) VP(18,73)
 .PRINT AC VM(28,73) VP(28,73)
 .PRINT AC VM(38,73) VP(38,73)
 .PRINT AC VM(41,71) VP(41,71)
 .PRINT AC VM(44,71) VP(44,71)
 .PRINT AC VM(47,71) VP(47,71)
 .PRINT AC VM(12,0) VP(12,0)
 .PRINT AC VM(22,0) VP(22,0)
 .PRINT AC VM(32,0) VP(32,0)
 .PRINT AC VM(77,0) VP(77,0)

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
 .width out=80
 .end

FREQ VM(12,77) VP(12,77)

3.500E+02 1.035E+01 -1.394E+02

FREQ VM(22,77) VP(22,77)

3.500E+02 9.541E+00 1.272E+02

FREQ VM(32,77) VP(32,77)

3.500E+02 7.497E+00 5.145E+00

FREQ VM(15,75) VP(15,75)

3.500E+02 1.289E+01 -1.435E+02

FREQ VM(25,75) VP(25,75)

3.500E+02 1.197E+01 1.272E+02

FREQ VM(35,75) VP(35,75)

3.500E+02 8.546E+00 4.939E+00

FREQ VM(59,67) VP(59,67)

3.500E+02 1.297E+01 -1.435E+02

FREQ VM(62,67) VP(62,67)

3.500E+02 1.204E+01 1.273E+02

FREQ VM(65,67) VP(65,67)

3.500E+02 8.583E+00 4.825E+00

FREQ VM(18,73) VP(18,73)

3.500E+02 1.511E+01 -1.505E+02

FREQ VM(28,73) VP(28,73)

3.500E+02 1.445E+01 1.262E+02

FREQ VM(38,73) VP(38,73)

3.500E+02 8.988E+00 7.489E+00

FREQ VM(41,71) VP(41,71)

3.500E+02 1.577E+01 -1.521E+02

FREQ VM(44,71) VP(44,71)

3.500E+02 1.516E+01 1.260E+02

FREQ VM(47,71) VP(47,71)

3.500E+02 9.125E+00 8.198E+00

FREQ VM(12,0) VP(12,0)

3.500E+02 9.848E+00 -1.332E+02

FREQ VM(22,0) VP(22,0)

3.500E+02 8.541E+00 1.231E+02

FREQ VM(32,0) VP(32,0)

3.500E+02 8.580E+00 1.540E+00

FREQ VM(77,0) VP(77,0)

3.500E+02 1.195E+00 -2.170E+01

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 3.08

Ek 5.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (450 Hz)
(Akım çözümleri)

Ek 5.1 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (450 Hz) - (Akım çözümleri)

**** 10/06/99 18:04:00 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE-450Hz

I1277 12 77 AC 5.43 -36.09
 I2277 22 77 AC 5.32 -35.05
 I3277 32 77 AC 5.01 -39.03
 I1575 15 75 AC 9.22 -33.87
 I2575 25 75 AC 8.84 -32.53
 I3575 35 75 AC 9.00 -34.65
 I5967 59 67 AC 1.22 169.54
 I6267 62 67 AC 0.84 169.84
 I6567 65 67 AC 1.38 172.25
 I1873 18 73 AC 6.27 -34.5
 I2873 28 73 AC 6.45 -31.96
 I3873 38 73 AC 6.39 -33.76
 I4171 41 71 AC 5.78 -34.38
 I4471 44 71 AC 5.55 -33.8
 I4771 47 71 AC 5.48 -30.95
 R011 0 11 0.0217
 L1112 11 12 0.07082m
 R021 0 21 0.0217
 L2122 21 22 0.07082m
 R031 0 31 0.0217
 L3132 31 32 0.07082m
 R1213 12 13 9.97
 L1377 13 77 14.8m
 R2223 22 23 12.24
 L2377 23 77 24.35m
 R3233 32 33 11.22
 L3377 33 77 19.8m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 7.98
 L1675 16 75 17.13m
 R2526 25 26 11.81
 L2675 26 75 15.96m
 R3536 35 36 8.91
 L3675 36 75 17.71m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R1517 15 17 0.0247
 L1718 17 18 0.0239m

R2527 25 27 0.0247
L2728 27 28 0.0239m
R3537 35 37 0.0247
L3738 37 38 0.0239m
R1819 18 19 25.5
L1973 19 73 43.15m
R2829 28 29 15.39
L2973 29 73 28.28m
R3839 38 39 21.53
L3973 39 73 44.5m
R1840 18 40 0.0148
L4041 40 41 0.0143m
R2843 28 43 0.0148
L4344 43 44 0.0143m
R3846 38 46 0.0148
L4647 46 47 0.0143m
R4142 41 42 10.76
L4271 42 71 22.25m
R4445 44 45 10.29
L4571 45 71 16.69m
R4748 47 48 7.92
L4871 48 71 15.15m
L7172 71 72 0.0149m
R7273 72 73 0.0296
L7374 73 74 0.0248m
R7475 74 75 0.0494
L6768 67 68 0.0215m
R6875 68 75 0.102
L7576 75 76 0.0191m
R7677 76 77 0.0198
L7778 77 78 0.0287m
R780 78 0 0.0296
.AC LIN 1 450 450

.PRINT AC IM(R011) IP(R011)
.PRINT AC IM(R021) IP(R021)
.PRINT AC IM(R031) IP(R031)
.PRINT AC IM(R780) IP(R780)
.PRINT AC IM(R1213) IP(R1213)
.PRINT AC IM(R2223) IP(R2223)
.PRINT AC IM(R3233) IP(R3233)
.PRINT AC IM(R1214) IP(R1214)
.PRINT AC IM(R2224) IP(R2224)
.PRINT AC IM(R3234) IP(R3234)
.PRINT AC IM(R7677) IP(R7677)
.PRINT AC IM(R1516) IP(R1516)
.PRINT AC IM(R2526) IP(R2526)
.PRINT AC IM(R3536) IP(R3536)
.PRINT AC IM(R1558) IP(R1558)
.PRINT AC IM(R2561) IP(R2561)
.PRINT AC IM(R3564) IP(R3564)
.PRINT AC IM(R6875) IP(R6875)
.PRINT AC IM(R1517) IP(R1517)
.PRINT AC IM(R2527) IP(R2527)
.PRINT AC IM(R3537) IP(R3537)
.PRINT AC IM(R7475) IP(R7475)
.PRINT AC IM(R1819) IP(R1819)
.PRINT AC IM(R2829) IP(R2829)
.PRINT AC IM(R3839) IP(R3839)
.PRINT AC IM(R1840) IP(R1840)

```
.PRINT AC IM(R2843) IP(R2843)
.PRINT AC IM(R3846) IP(R3846)
.PRINT AC IM(R7273) IP(R7273)
.PRINT AC IM(R4142) IP(R4142)
.PRINT AC IM(R4445) IP(R4445)
.PRINT AC IM(R4748) IP(R4748)

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
.width out=80
.end
```

```
FREQ      IM(R011)  IP(R011)
```

```
4.500E+02  2.455E+01 -3.549E+01
```

```
FREQ      IM(R021)  IP(R021)
```

```
4.500E+02  2.426E+01 -3.368E+01
```

```
FREQ      IM(R031)  IP(R031)
```

```
4.500E+02  2.354E+01 -3.568E+01
```

```
FREQ      IM(R780)  IP(R780)
```

```
4.500E+02  7.234E+01 -3.494E+01
```

```
FREQ      IM(R1213) IP(R1213)
```

```
4.500E+02  2.585E-01  1.443E+02
```

```
FREQ      IM(R2223) IP(R2223)
```

```
4.500E+02  1.579E-01  1.417E+02
```

```
FREQ      IM(R3233) IP(R3233)
```

```
4.500E+02  1.912E-01  1.420E+02
```

```
FREQ      IM(R1214) IP(R1214)
```

```
4.500E+02  1.938E+01 -3.532E+01
```

FREQ IM(R2224) IP(R2224)

4.500E+02 1.909E+01 -3.334E+01

FREQ IM(R3234) IP(R3234)

4.500E+02 1.873E+01 -3.481E+01

FREQ IM(R7677) IP(R7677)

4.500E+02 5.720E+01 -3.449E+01

FREQ IM(R1516) IP(R1516)

4.500E+02 3.149E-01 1.391E+02

FREQ IM(R2526) IP(R2526)

4.500E+02 3.292E-01 1.451E+02

FREQ IM(R3536) IP(R3536)

4.500E+02 2.993E-01 1.397E+02

FREQ IM(R1558) IP(R1558)

4.500E+02 1.220E+00 1.695E+02

FREQ IM(R2561) IP(R2561)

4.500E+02 8.400E-01 1.698E+02

FREQ IM(R3564) IP(R3564)

4.500E+02 1.380E+00 1.723E+02

FREQ IM(R6875) IP(R6875)

4.500E+02 3.439E+00 1.707E+02

FREQ IM(R1517) IP(R1517)

4.500E+02 1.159E+01 -3.409E+01

FREQ IM(R2527) IP(R2527)

4.500E+02 1.136E+01 -3.234E+01

FREQ IM(R3537) IP(R3537)

4.500E+02 1.127E+01 -3.189E+01

FREQ IM(R7475) IP(R7475)

4.500E+02 3.422E+01 -3.278E+01

FREQ IM(R1819) IP(R1819)

4.500E+02 1.533E-01 1.387E+02

FREQ IM(R2829) IP(R2829)

4.500E+02 2.331E-01 1.384E+02

FREQ IM(R3839) IP(R3839)

4.500E+02 1.477E-01 1.365E+02

FREQ IM(R1840) IP(R1840)

4.500E+02 5.469E+00 -3.383E+01

FREQ IM(R2843) IP(R2843)

4.500E+02 5.140E+00 -3.324E+01

FREQ IM(R3846) IP(R3846)

4.500E+02 5.036E+00 -2.985E+01

FREQ IM(R7273) IP(R7273)

4.500E+02 1.564E+01 -3.235E+01

FREQ IM(R4142) IP(R4142)

4.500E+02 3.153E-01 1.360E+02

FREQ IM(R4445) IP(R4445)

4.500E+02 4.137E-01 1.392E+02

FREQ IM(R4748) IP(R4748)

4.500E+02 4.557E-01 1.368E+02

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 3.29

Ek 5.2 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (450 Hz)
(Gerilim çözümleri)

Ek 5.2 PSpice girişleri ve analiz sonuçları (450 Hz) - (Gerilim çözümleri)

**** 10/06/99 20:09:08 ***** Evaluation PSpice (January 1992) *****

DEVRE-450Hz

I1277 12 77 AC 5.43 -36.09
 I2277 22 77 AC 5.32 -35.05
 I3277 32 77 AC 5.01 -39.03
 I1575 15 75 AC 9.22 -33.87
 I2575 25 75 AC 8.84 -32.53
 I3575 35 75 AC 9.00 -34.65
 I5967 59 67 AC 1.22 169.54
 I6267 62 67 AC 0.84 169.84
 I6567 65 67 AC 1.38 172.25
 I1873 18 73 AC 6.27 -34.5
 I2873 28 73 AC 6.45 -31.96
 I3873 38 73 AC 6.39 -33.76
 I4171 41 71 AC 5.78 -34.38
 I4471 44 71 AC 5.55 -33.8
 I4771 47 71 AC 5.48 -30.95
 R011 0 11 0.0217
 L1112 11 12 0.07082m
 R021 0 21 0.0217
 L2122 21 22 0.07082m
 R031 0 31 0.0217
 L3132 31 32 0.07082m
 R1213 12 13 9.97
 L1377 13 77 14.8m
 R2223 22 23 12.24
 L2377 23 77 24.35m
 R3233 32 33 11.22
 L3377 33 77 19.8m
 R1214 12 14 0.0128
 L1415 14 15 0.0188m
 R2224 22 24 0.0128
 L2425 24 25 0.0188m
 R3234 32 34 0.0128
 L3435 34 35 0.0188m
 R1516 15 16 7.98
 L1675 16 75 17.13m
 R2526 25 26 11.81
 L2675 26 75 15.96m
 R3536 35 36 8.91
 L3675 36 75 17.71m
 R1558 15 58 0.0691
 L5859 58 59 0.0194m
 R2561 25 61 0.0691
 L6162 61 62 0.0194m
 R3564 35 64 0.0691
 L6465 64 65 0.0194m
 R1517 15 17 0.0247

L1718 17 18 0.0239m
 R2527 25 27 0.0247
 L2728 27 28 0.0239m
 R3537 35 37 0.0247
 L3738 37 38 0.0239m
 R1819 18 19 25.5
 L1973 19 73 43.15m
 R2829 28 29 15.39
 L2973 29 73 28.28m
 R3839 38 39 21.53
 L3973 39 73 44.5m
 R1840 18 40 0.0148
 L4041 40 41 0.0143m
 R2843 28 43 0.0148
 L4344 43 44 0.0143m
 R3846 38 46 0.0148
 L4647 46 47 0.0143m
 R4142 41 42 10.76
 L4271 42 71 22.25m
 R4445 44 45 10.29
 L4571 45 71 16.69m
 R4748 47 48 7.92
 L4871 48 71 15.15m
 L7172 71 72 0.0149m
 R7273 72 73 0.0296
 L7374 73 74 0.0248m
 R7475 74 75 0.0494
 L6768 67 68 0.0215m
 R6875 68 75 0.102
 L7576 75 76 0.0191m
 R7677 76 77 0.0198
 L7778 77 78 0.0287m
 R780 78 0 0.0296
 .AC LIN 1 450 450

.PRINT AC VM(12,77) VP(12,77)
 .PRINT AC VM(22,77) VP(22,77)
 .PRINT AC VM(32,77) VP(32,77)
 .PRINT AC VM(15,75) VP(15,75)
 .PRINT AC VM(25,75) VP(25,75)
 .PRINT AC VM(35,75) VP(35,75)
 .PRINT AC VM(59,67) VP(59,67)
 .PRINT AC VM(62,67) VP(62,67)
 .PRINT AC VM(65,67) VP(65,67)
 .PRINT AC VM(18,73) VP(18,73)
 .PRINT AC VM(28,73) VP(28,73)
 .PRINT AC VM(38,73) VP(38,73)
 .PRINT AC VM(41,71) VP(41,71)
 .PRINT AC VM(44,71) VP(44,71)
 .PRINT AC VM(47,71) VP(47,71)
 .PRINT AC VM(12,0) VP(12,0)
 .PRINT AC VM(22,0) VP(22,0)
 .PRINT AC VM(32,0) VP(32,0)
 .PRINT AC VM(77,0) VP(77,0)

.OPTIONS ABSTOL=1.0u reltol=0.01 vntol=0.01
 .width out=80
 .end

FREQ VM(12,77) VP(12,77)

4.500E+02 1.112E+01 -1.391E+02

FREQ VM(22,77) VP(22,77)

4.500E+02 1.104E+01 -1.384E+02

FREQ VM(32,77) VP(32,77)

4.500E+02 1.092E+01 -1.393E+02

FREQ VM(15,75) VP(15,75)

4.500E+02 1.546E+01 -1.403E+02

FREQ VM(25,75) VP(25,75)

4.500E+02 1.536E+01 -1.396E+02

FREQ VM(35,75) VP(35,75)

4.500E+02 1.522E+01 -1.404E+02

FREQ VM(59,67) VP(59,67)

4.500E+02 1.496E+01 -1.397E+02

FREQ VM(62,67) VP(62,67)

4.500E+02 1.490E+01 -1.390E+02

FREQ VM(65,67) VP(65,67)

4.500E+02 1.471E+01 -1.398E+02

FREQ VM(18,73) VP(18,73)

4.500E+02 1.911E+01 -1.431E+02

FREQ VM(28,73) VP(28,73)

4.500E+02 1.898E+01 -1.425E+02

FREQ VM(38,73) VP(38,73)

4.500E+02 1.885E+01 -1.432E+02

FREQ VM(41,71) VP(41,71)

4.500E+02 2.012E+01 -1.437E+02

FREQ VM(44,71) VP(44,71)

4.500E+02 1.998E+01 -1.431E+02

FREQ VM(47,71) VP(47,71)

4.500E+02 1.985E+01 -1.437E+02

FREQ VM(12,0) VP(12,0)

4.500E+02 4.945E+00 -1.317E+02

FREQ VM(22,0) VP(22,0)

4.500E+02 4.885E+00 -1.299E+02

FREQ VM(32,0) VP(32,0)

4.500E+02 4.741E+00 -1.319E+02

FREQ VM(77,0) VP(77,0)

4.500E+02 6.249E+00 3.502E+01

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 3.02

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	25/4/1936	
Doğum yeri	Eskişehir	
Orta Okul	1948-1951	Eskişehir Tayyare Fabrikası Çırak Okulu
Lise	1952-1955	Eskişehir Erkek Sanat Enstitüsü
Lisans	1955-1960	Maarif Vekâleti İstanbul (Yıldız) Teknik Okulu Elektrik Şubesi
Yüksek Lisans	1965-1967	Milli Eğitim Bakanlığı İstanbul (Yıldız) Teknik Okulu Elektrik İhtisas Şubesi
Doktora	1994-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

1960-1963	A. Reyrolle & Company Ltd., Hebburn-on-Tyne, İngiltere (IEE "Postgraduate Training" programı altında Stajiyer Mühendis)
1964-1968	E.İ.E. İdaresi Genel Müdürlüğü, Ankara (Proje Kolu Hidroelektrik Santraller Bölümü'nde Proje Mühendisi; Stone & Webster (NY) Inc. firması ile yapılan "TEK için teknik hazırlık" çalışmalarına iştirak)
1968-1969	Foster Wheeler, Inc., Ankara (Petkim Petrokimya Kompleksi Elektrik Projeleri Grubu'nda Proje Mühendisi)
1969-1973	Gpuppo Industrie Elettromeccaniche per Impianti All'Esterio (Milano) S.p.A., Ankara-Kütahya (2x150 MW Seyit Ömer Termik Santrali inşaatında Elektrik Mühendisi)
1973-1977	İskenderun Demir-Çelik Fabrikaları İnşaatı (235, 236, 237 ve 248 No.lu Üniteler Elektrik Tesisatı Alt Yükleniciliği)
1977-1978	Serbest çalışma, Ankara
1979-Halen	Y.T.Ü. Elektrik -Elektronik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü (Öğr. Grv.)



**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**