

67697

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

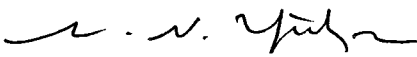
GÜÇ SİSTEMLERİNDE GEÇİCİ
AŞIRI GERİLİMLER


Elek.Müh. Ahmet ÖZDEŞ

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç.Dr. F. Okan PEKİNER


Prof. Dr. H. Nusret Yükselen


Doç. Dr. F. Okan Pekiner
(Danışmanı)

Doç. Dr. Celal KOÇATEPE

İSTANBUL, 1997



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
TEŞEKKÜR	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
1.1 Tarihçe	2
2. BÖLÜM	
YILDIRIM AŞIRI GERİLİMLERİ	5
2.1 Endirekt Yıldırım Darbelerine Bağlı Olarak Endüklenen Gerilimler	6
2.2 Direkt Yıldırım Darbeleriyle Meydana Gelen Aşırı Gerilimler	12
2.2.1 Yıldırım Darbesinin Faz Hattına Düşmesi	12
2.2.2 Yıldırım Darbesinin Topraklanmış Bölümlere Düşmesi	15
2.2.2.1 Yıldırımın Darbesinin Direğe Düşmesi.....	15
2.2.2.2 Yıldırım Darbesinin Korumu Hattına Düşmesi.....	17
2.3 Korunma Yapılmamış Bir 11 kV'luk Hattın Endüklenen Gerilime Tepkisi	18
2.4 11 kV'luk Hava Hatlı Sistemin Aşırı Gerilim Koruması.....	20
2.4.1 Tesisin Korunması	20
3. BÖLÜM	
AKIMLARIN KESİLMESİ SONUCU OLUŞAN AŞIRI GERİLİMLER	21
3.1 Devre Kesilmesi Olayının İşleyiş Şekli.....	21
3.2 Geçici Toparlanma Geriliminin Şiddeti	23
3.3 Kısa Hat Arızaları	27
3.4 Küçük Endüktif Akımların Kesilmesi.....	32
3.4.1 Boşta Açmada Aşırı Gerilimler	32
3.4.2 Aşırı Açma Gerilimlerinin Hesaplanması	37
3.4.3 Kesicinin Zorlanması.....	40
3.4.4 Tekrar Tutuşma Olayları.....	43
3.4.5 Akım Kopması.....	44
3.5 Kapasitif Akımın Kesilmesi.....	46
3.5.1 Tek fazlı devreler	46
3.5.2 Üç-Fazlı Devreler	48
4. BÖLÜM	
SİSTEMİN ENERJİLENDİRİLMESİ NETİCESİNDE MEYDANA GELEN AŞIRI GERİLİMLER	50
4.1 Hattın Enerjilendirilmesi Neticesinde Meydana Gelen Aşırı Gerilimlerin Genliğine Etki Eden Faktörler	50
4.1.1 Kaynak	50
4.1.2 Reaktif Kompanzasyon.....	54
4.1.3 Artık Yük	55
4.1.4 Üç Fazın Eşzamanlı Olmayan Kapaması.....	57
4.2 RLC'li Devrelerin Enerjilendirilmesi	58
4.2.1 Havai Hat ve Kablo	59
4.2.2 Ucunda Reaktif Elemanlar Bağlı Bulunan Fiderler	60
4.3 Kapasitör Banklarının Enerjilendirilmesi	62
4.3.1 Muhtelif Tekrar Tutuşmalar ve Devrenin Kesilmesi	64
4.4 Büyük Motorların Enerjilendirilmesi	65

4.5 Kablo Sistemlerinde Aşırı Gerilimler	66
5. BÖLÜM	
ARIZALARIN SEBEP OLDUĞU AŞIRI GERİLİMLER	70
5.1 Fasilalı Toprak Arızaları	71
5.2 Tek Kutuplu Otomatik Kapamayı Çağrıştıran Sekonder Ark.....	73
5.3 Arıza Uygulamalarının Sebep Olduğu Geçici Aşırı Gerilimler	74
6. BÖLÜM	
GEÇİCİ AŞIRI GERİLİMLER.....	75
6.1 Generatör Yükünün Kalkması	75
6.2 Boşta Çalışan Hattın Sonunda Gerilim Yükselmesi (Ferranti Olayı)	80
6.3 Açık Devre ve Tek Faz Kapaması	82
6.4 Doyma ve Harmonik Rezonans	83
6.4.1 Ani Deşarj Akımı.....	84
6.4.2 Dinamik Olarak Beslenen Aşırı Gerilimler	85
6.5 Alçak Gerilim Şebekelerinde Geçici Aşırı Gerilimler	86
6.5.1 Geçici Olayların Durumu.....	86
6.5.2 Lokal Geçici Olayların Kaynağı	87
6.5.3 Lineer Olmayan Cihazlarla Geçici Olayların Bastırılması	91
7. BÖLÜM	
ANALİZ METODLARI	94
7.1 Analog Metod	94
7.2 Diferansiyel Eşitliklerin Toplu Parametrelili Çözümü.....	95
7.3 Yürüyen Dalga Metodları.....	100
7.4 Fourier Frekans Domen Metodu	101
7.5 Z - Dönüşüm Metodları.....	104
8. BÖLÜM	
SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	122

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinde ve onu izleyen tez yönetiminde, çalışmalarım boyunca değerli ilgi ve katkılarını benden esirgemeyen sayın hocam **Doç.Dr. F.Okan PEKİNER**'e ve sevgili arkadaşım **Arş.Gör.Yük.Müh. Ersan ŐENTÜRK**'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.



ÖZET

Güç sistemleri esas itibariyle akım ve gerilimlerin sürekli hal değerlerindeki ani değişiklikler sebebi ile ortaya çıkan değişik geçici olaylara maruz kalır. Bu geçici olaylar; bir yıldırım darbesinden, sistemin bazen bozuk çalışmasından, bir arızayı temizlemek amacıyla veya normal işletme prosedürüne uygun olarak bir devrenin anahtarlanması dolaylı olarak ortaya çıkabilir. Güç sistemlerinde geçici aşırı gerilimlerin oluşmasına sebep olan bu olaylar, sistem kaynaklı veya sistem dışı kaynaklı olabilirler.

Güç sistemlerinde, açma-kapama olaylarında, toprak ve faz kısa devrelerinde ve rezonans olaylarında meydana gelen gerilimlere iç aşırı gerilimler ve atmosferik deşarjlar neticesinde veya elektrik alan içerisinde hatların yüklenmeleri sonucunda ortaya çıkan gerilimlere de dış aşırı gerilimler denir. Bu geçici gerilimler, en yüksek seviyeli sistem gerilimlerinden konutlarda kullanılan gerilimlere kadar işletilen bütün enerji güç sistemlerinde bazı problemlere yol açarlar. Özellikle güç sisteminin izolasyon koordinasyonunun sağlanabilmesi ve optimum sistem dizaynına katkı sağlaması amacıyla geçici aşırı gerilimlerin çok iyi incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, güç sistemlerinde ortaya çıkan geçici aşırı gerilimler oluşum sebeplerine göre sınıflandırılarak bunlara ait teorik ve ampirik ifadeler verilmiştir. Bu ifadelerden hatlarda endüklenen gerilimlerin genlik ve frekanslarının tayini mümkün olmaktadır. Ayrıca bu gerilimlerin değerlendirilmesine imkan veren mevcut analitik metotlar da son bölümde özetlenmiştir.

ABSTRACT

Power systems are subjected to many forms of transient phenomena brought about essentially by sudden changes in the steady state values of voltages or currents. Such changes may be the result of a lightning stroke, some malfunction of the system or be brought about by the switching of a circuit either to clear a fault or as a normal operational procedure. These events that cause overvoltages in power system may depend on directly system or not.

In power systems, voltages that occur at switching operations, ground and phase short circuits, and resonance events are called internal overvoltages while voltage that occur as a result of atmospheric discharges or charging of the lines in an electrical fields are called external overvoltages. Nevertheless it has been found possible to cover a wide range of transient voltages from those which pose problems in transmission systems operating at the highest levels of system voltage down to those which can appear in the domestic situation. Transient overvoltages must carefully be analysed and evaluated in order to contribute a benefit to the optimum system design and especially to provide insulation coordination of power system.

In this study, transient overvoltages that occur in power system are classified according to their occurrence reasons and theoretical and empirical expressions related to these overvoltages are given. These expressions allow to determine the amplitude and frequency of induced voltages on the lines. In addition, existing analytical methods that make evaluation of these voltages possible are summarised in the last section.

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Bu incelemede, gücün dağıtımı ve beslenmesinden konut bölgelerindeki alçak gerilim geçici olaylarının etkilerine kadar değişik problemler ortaya çıkartan geçici olaylar dikkate alınmıştır.

Yıldırım olayında, geçici olayın kaynağını karakterize etmek güç olabilir, bununla beraber endüklenen gerilime ait dalga şekilleri teorik düşüncelerden elde edilebilir. Bu tür dalga şekillerinin genlik düzeni, darbenin yapısının matematiksel modellerine bağlı nümerik değerlerin kullanılmasıyla bulunabilir.

Elektrik devrelerinde geçici olayların çoğunluğu bir anahtarın veya bir kesicinin açılması veya kapatılması ile başlar. Güç sistem gerilimleriyle ilgilenildiği durumlarda, anahtarlama işlemi esas itibarı ile mekanik bir işlemdir. Herhangi bir devredeki anahtarlama etkisi, devre elemanlarının bağlantılarını değiştirerek devre empedansını değiştirmek ve devreye akım veya gerilim darbeleri uygulamak suretiyle ortaya çıkmaktadır. Statik anahtarlama cihazlarının kullanılmaya başlanması ile endüstriyel ve konut bölgelerinde yüklerin periyot kontrolü ile kumandasında büyük bir artış olmuştur. Bu cihazlar genellikle alçak gerilim devrelerinde çalıştırılır ve çoğu zaman yüksek frekanslı parazitlere benzer geçici olaylar üretirler.

Bu çalışmada, mevcut analitik metotlara da kısaca değinilmiştir. Bu metodların etkinliği, fiziksel durumun detaylı formülasyonuna ve ilgili tesisin karakteristiklerinin ortaya konulabilmesine bağlıdır.

1.1. Tarihçe

1870'lerin sonlarında Swan ve Edison tarafından elektrik lambasının icadı elektriğin kullanımında hızlı bir artışa yol açmıştır. Üretim teçizatı boyut olarak gelişmiş ve çalışma gün ve gecelerinde oldukça değişen yüklerin takviyesini karşılamak amacıyla makinelerin paralel olarak anahtarlanması zorunlu hale gelmiştir. Yaklaşık 90 yıl önce, Ferranti, Londra'da Deptford'dan New Bond Street'e kadar o zaman için ilk büyük güç iletim sistemi olan 10 kV'luk bir bağlantıyı tesis etmiş, daha sonra da yüksüz kablo boyunca gerilimde önemli bir artış ortaya çıktığını bulmuştur. Bu sebeple bu olay, "Ferranti Etkisi" olarak isimlendirilmiş ve bu etkinin bir sürekli-hal aşırı gerilimi meydana getirdiği ortaya konulmuştur. Söz konusu olan sürekli-hal aşırı gerilimi kaynak empedansına, kablonun karakteristik empedansına ve dalga boyunun oldukça küçük bir bölümünü oluşturacak olan kablonun karakteristik empedansının elektriksel uzunluğuna bağlıdır. Bu tip aşırı gerilimler yüksek gerilim (EHV) sistemlerinin ortaya çıkışına kadar problem olmamıştır. EHV sistemlerinde hafif yük şartları altında sürekli-hal aşırı gerilimlerini kontrol etmek amacıyla şönt reaktörler kullanılmıştır. 1905'ten itibaren hava hatlı sistemlerde yıldırım darbelerinin sebep olduğu aşırı gerilimler; toprak iletkenleri, elektrod çubuklu ark aralıkları (rod gaps) ve parafudrların kullanımı ile sınırlandırılmıştır. Yüzyılın başından itibaren içerisinde uzun bir arkın çekildiği havalı kesme anahtarları kullanılmaya başlanmıştır. Uzun ark, akımın aşırı gerilimlerden korunmak amacıyla yavaş yavaş kesilebildiği cihazlarda oluşur. Yüzyılın başından 1920'lerin sonuna kadar generatör gerilimlerinde 11 kV'a kadar tedrici bir artış olmuştur. 1928'de ilk 33 kV'luk generatör Brimsdown santralinde işletmeye alınmıştır.

1920-1929 yılları arasında, bir kesicinin açması sırasında uçları arasında görülen geçici toparlanma geriliminin (transient recovery voltage) önemi farkedilmiştir. Bu durum, kesicilerin görevlerinin gerçekçi bir açıdan değerlendirilmesini ve bu toparlanma geriliminin kontrolü için açma dirençlerinin kullanılmasını gündeme getirmiştir. İkinci Dünya Savaşını takiben, bir kısa-hat arızasına benzeyen şiddetli bir geçici toparlanma gerilimi (severe transient recovery voltage) teşhis edilmiştir. 1946'dan sonra elektriğe

olan talepler elektrik besleme endüstrisinde çok büyük bir gelişmeyi beraberinde getirmiştir. Bu entegre sistemde anahtarlama tesislerine olan artan talep, en iyi ve en ekonomik dizaynları ve bu amacı başarmakta önemli bir rol oynayan rasyonelleştirme ve standartlaştırmayı gerektirmiştir. Bir kesicinin kapanmasıyla üretilen darbe gerilim (surge voltage), bu zaman periyodunun büyük bir bölümünde bilinmekte idi. Fakat 1960'ların başlarında çok yüksek gerilim (UHV) sistemlerindeki izolasyon seviyelerinin sınırlandırılması zorunluluğu bu tür gerilimlerin mükemmel bir şekilde incelenmesini gerektirmiştir. Bu incelemeler, anahtarlama darbe aşırı gerilimlerinin sınırlandırılması amacıyla kapama dirençli kesicilerin üretilmesi sonucunu doğurmuştur. Güç iletim sistemlerinde, hatların ve kabloların anahtarlanması ile şiddetli geçici olayların ortaya çıkması çok karşılaşılan bir durum olmuştur.

Yüksek iletim gerilimlerindeki anahtarlama olayları, yıldırım darbelerinin ürettiği aşırı gerilimlerden genlik olarak daha büyük aşırı gerilimler üretebilir. Bu durum, Kuzey Amerikada [1] 230 kV'luk bir sistemde ark aralıkları (rod gaps) atlamalarının tecrübe edildiği 1960 yılında ortaya çıkartılmıştır. Burada 4.5 mil uzunluğunda bir hat, hattın bir parçası olarak bağlanan seri ve şönt sargılı bir ayar transformatörü ile sonlandırılmıştır. Bu sistemde yapılan anahtarlama testleri, hattaki kapama transformatörünün bara tarafında geçici bir pik meydana geldiğini göstermiştir. Bu pik, normal frekanslı faz-toprak geriliminin 2.6 katıdır (örneğin 488 kV gibi). Geçici olayda hakim olan frekans 9 kHz olarak bulunmuştur. Bu frekans, 4.5 mil uzunluğundaki bir hava hattının çeyrek dalga frekansına yakındır (örneğin;10.3 kHz). Atlamaların (flashovers) sürekli olarak tecrübe edildiği zamanlarda ark aralıkları 36 inç uzunluğundaydı. Daha sonraları ise ark aralıkları 40 inç'e kadar yükseltildi ve neticede bunun benzeri olarak meydana gelen atlamalar ortadan kalktı. 1964 yılında İngilterede 132 kV'luk bir sistemdeki ark boynuzlarında (arc horns) meydana gelen atlamalar detaylı olarak araştırılmıştır [2]. Bu sistem, esas itibarıyla bir havalı kesici ile enerjilendirilen ve uzak ucunda bir arıza sınırlandırıcı endüktörle sonlandırılan 3.8 mil uzunluğunda bir hava hattından oluşmaktadır. Endüktörün uzak ucundaki ark boynuzları hattın enerjilendirilmesi sırasında atlamaya yol açar. Bu olayda geçici olayın hakim frekansı 12 kHz olarak

bulunmuştur. Bu frekans 3.8 mil uzunluğundaki hava hattının çeyrek dalga frekansına çok yakındır. Yüksek gerilim buşingleri ve arıza sınırlayıcı endüktörün dağıtılmış kapasitesinin 12 kHz civarında, rezonans özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu frekans, 4.6 pu'lık bir pik geçici olayı oluşturacak şekilde hattaki yansımalarla karşılıklı olarak etkileşmiştir, örneğin bu pik geçici durum 485 kV'tur. Atlamalar için yapılan çalışmalar neticesinde ark boynuzlarının 38.5 inç'e ayarlanması gerektiği bulunmuştur. Endüktör kombinasyonlu bir hava üfleme kesici bulunan bir hatta, pik besleme geriliminde ön ark (pre-arc) neticesi olan bu atlama anında tesisin karakteristikleri sadece güç frekansında belirlenmiştir. Daha sonraları, aynı verileri sağlayan endüktörler test edilmiş ve ekran tipi sebebiyle kilohertz frekanslı bölgede tesisin geniş ölçüde farklı karakteristiklere sahip olduğu bulunmuştur. Bu özel problemin analizi bir Fourier analiz tekniği kullanılarak detaylıca yapılmış, bu teknikte hattın frekans-bağımlı parametreleri (propagasyon sabiti ve azalma) ölçülen frekans-bağımlı endüktör karakteristikleri ile beraber kullanılmıştır.

2. BÖLÜM

YILDIRIM AŞIRI GERİLİMLERİ

Yıldırımdan dolayı oluşan elektrik dağıtım sistemi arızalarını ilgilendiren çok miktarda bilgi geçmişte ERA'da ve diğer bazı merkezlerde toplanmıştır. Gosden [3], İngiliz Elektrik Kurulu'nun Ulusal arıza ve kesinti raporlama cetvelinden 1967/68-1970/71 yılları arasında İngiliz sistemindeki arızaların istatistiklerini şu şekilde açıklamıştır:

(i) 650V-66 kV arasındaki gerilimlerde işletilen besleme sistemini etkileyen tüm arızaların en az %32'si yıldırımdan dolayı oluşmuştur. Yılda meydana gelen 2.7 milyon tüketici kesintisi sırasında 4.4 milyon tüketici saati kaybı ortaya çıkmıştır.

(ii) Bu arızaların %89'u, yılda 1.6 milyon tüketici kesintisi süresince 1.3 milyon tüketici saati kaybına sebep olmak üzere, 11 kV'luk sistemde oluşmuştur.

(iii) İkinci maddedeki arızaların %77'si besleme teçhizatına hasar vermeyen bir geçici olay niteliğindedir ve bunlar her yıl, 0.7 milyon tüketici kesintisi sırasında 1.3 milyonluk bir tüketici saati kaybıyla sonuçlanmıştır.

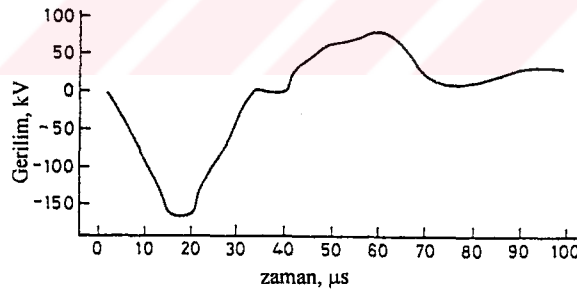
11 kV'luk sistemde geçici hasarsız arızaların önemi bu figürlerden açıkça ortaya çıkmaktadır. Eğer bu sebeplerden dolayı ortaya çıkan kesilmeler düşürülebilirse, besleme güvenilirliğinde büyük bir gelişme mümkün olabilir.

Bir hava hattına tesir eden bir yıldırım darbesi, terminal donanımı için darbe bölücüler - surge diverters- ve ark aralıkları -spark gaps- vasıtasıyla bazı koruma tedbirleri sağlanabilse bile, atlamadan sonra ya hat izolatörlerinde ya da terminal donanımında sürekli hasarla sonuçlanabilir. Bununla beraber direkt darbelerin geliş ihtimalleri çok düşüktür. 11 kV'luk İngiliz sisteminde ortalama olarak her yıl her 100 km'de bir direkt darbe meydana gelir. Ayrıca direkt darbeler 11 kV'luk sistemdeki geçici arızalara

önemli ölçüde bir katkı sağlamaz. Diğer taraftan, yıldırım darbeleri ile endüklenen 11 kV'luk sistemdeki gerilim darbeleri, doğal olaylardan ortaya çıkan besleme kesintilerinin büyük çoğunluğuna sebep olur.

2.1. Endirekt Yıldırım Darbelerine Bağlı Olarak Endüklenen Gerilimler

Bir havai hat civarında toprağa gelen yıldırım darbesi hat iletkenleri üzerinde gerilimler endükler. 11 kV'luk sistemde bir yılda meydana gelen yüzlerce çeşit arızanın sebebi, Golde'nin hattaki yüzey yükleri (bound charge) hakkındaki teorisi [4] ile açıklanmıştır. Halbuki arıza istatistikleri, yıldırımdan dolayı oluşan arızaların etkileri için yılda 10000 adet arızanın gerçekçi bir rakam olduğunu göstermiştir. Cornfield ve Stringfellow'un yaptığı kayıtlar [5] ise, endüklenen gerilim dalga şekillerinin ilk pik değeri negatif polariteli olan ve 200 kV'a kadar değer alabilen iki kutuplu dalga şekilleri yapısında olduğunu göstermiştir. Şekil-2.1'de 33 kV'luk bir hatta kaydedilen tipik bir dalga şekli gösterilmektedir.



Şekil-2.1. Tipik olarak kaydedilmiş iki kutuplu endüklenen gerilim dalga şekli.

33 ve 11 kV'luk sistemlerde tesisin darbe dayanma gerilimleri sırasıyla 200 ve 95 kV'tur. Bu nedenle endirekt yıldırım darbeleri 11 kV'luk sistemlerde çok önemli sayıda geçici hasarsız arızalarla ve 33 kV'luk sistemlerde ise sadece seyrek arızalarla sonuçlanabilir. Bu durum, gerçekten arıza istatistikleriyle de doğrulanmaktadır. Ayrıca, bir hattın 500 m'ye kadar olan uzaklıklarda oluşan endirekt darbeler o hat üzerinde

önemli gerilimler endükleyebilir. Bu sebeple, böyle geniş bir alan içerisinde oluşacak endirekt darbelerin sayısının direkt darbelere göre fazla olmasından dolayı, geçici aşırı gerilimlerin de bu sebeple oluşma olasılığı daha yüksek olacaktır. Bu ihtimal 33 kV'luk hatlarla karşılaştırıldığında, 11 kV'luk hatlarda karşılaşılan daha fazla sayıdaki bransman hatlarından dolayı, daha da artar.

Chowdhuri ve Gross, darbenin parametrelerine ve hattı ilgilendiren bu darbenin pozisyonuna bağlı olarak endüklenen gerilimin tek kutuplu ve çift kutuplu dalga şekillerini veren bir teori geliştirmiştir [6]. Bu teoride, çeşitli yüzey yükleri sebebiyle hatta endüklenen gerilim bileşenlerinin ihmal edilebilir olduğu varsayılmıştır. Öncü darbenin de çok önemli olmayan bir endüklenen gerilim ürettiği farzedilmiştir. Endüklenen gerilim, sadece dönüş darbe yükü ve akımı ile meydana gelir. Herhangi bir anda hat boyunca herhangi bir noktadaki elektrik alan şiddeti şu şekilde ifade edilir:

$$E_i = -\nabla\Phi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2.1.1)$$

Burada

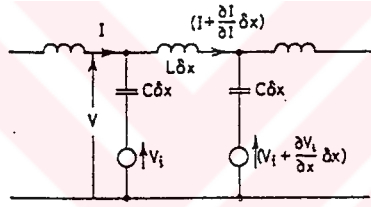
- E_i : Herhangi bir anda hat boyunca herhangi bir noktadaki elektrik alan şiddeti.
- Φ : Dönüş darbesinin yükü ile oluşturulmuş endüklenen skaler potansiyel.
- A : Dönüş darbesinin akımı ile oluşturulmuş vektör potansiyeli.
- h : Hattın yerden yüksekliği.

olarak kullanılmıştır. Φ ve A , sırasıyla yük yoğunluğu ve akım yoğunluğu bakımından Maxwell'in alan eşitlikleri ile verilmiştir. Hattın h yüksekliği bulutla karşılaştırıldığında pek önemli değildir. Böylece herhangi bir anda hattın herhangi bir noktasında endüklenen gerilim değerinin lineer hesabı şu formülle yapılır:

$$V_i = E_i h \quad (2.1.2)$$

Burada V_i , herhangi bir anda, hattın herhangi bir noktasında endüklenen gerilim olarak kullanılmıştır. Dönüş darbesinin yukarı doğru hareket ettiği hız, ışık hızına yaklaşır. Endüklenen gerilimi üreten yük ve akımın elektromagnetik etkileri ışık hızında hatta doğru ilerler. Bundan dolayı, endüklenen potansiyeller A ve Φ , hatta verilen bir noktada belirli bir anda daha önce meydana gelen bir darbeye mevcut olan yük ve akım tarafından belirlenen potansiyelleri göstermek için biraz değiştirilmiştir. Süredeki farklılık, ışık hızında darbe ile alan noktası arasındaki mesafeyi katetmek için geçen zamandan kaynaklanır.

Hattın iletkeni dağıtılmış seri endüktans ve şönt kapasite ile temsil edildi. Endüklenen V_i geriliminin etkisi, Şekil-2.2'de gösterildiği gibi, hattın her noktasında bir gerilim kaynağı bağlanarak temsil edilmiştir.



Şekil-2.2. Endüklenen gerilimli hattın eşdeğer devresi.

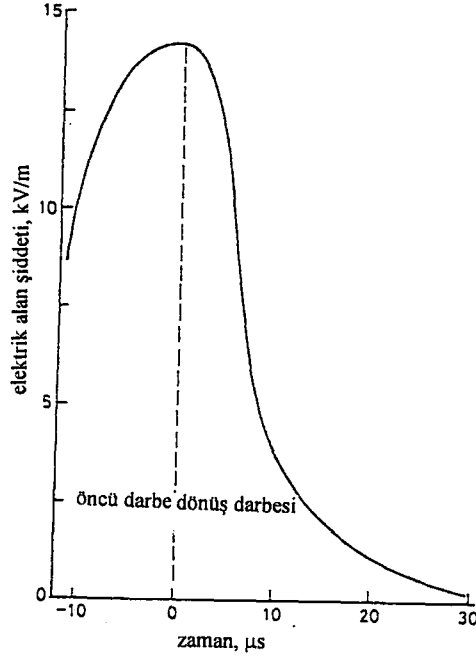
Hat üzerinde, herhangi bir t anında, herhangi bir x noktasında endüklenen V gerilimi aşağıdaki denklemin çözümünden elde edilir:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V_i}{\partial t^2} \quad (2.1.3)$$

Burada c , ışık hızı olarak gösterilmiştir. Sonsuz uzunlukta bir gidiş bir dönüş şeklinde tesis edilen iletkende endüklenen gerilimin hesaplanmasında, lineer olarak artan bir dönüş darbe akımının zamana bağlı olarak mevcut olduğu kabul edilmiştir. Bu teori, bir kaç istisna dışında akımın değişim oranından dolayı ortaya çıkan negatif gerilimin ilk pikine benzer iki kutuplu dalga şekilleri ortaya koymuştur. Bu iki kutuplu dalga şeklinin

polaritesi dönüş darbesindeki yükün etkisiyle ters çevrilir. Sırasıyla, negatif veya pozitif polaritede olan elektrostatik etki veya magnetik etkinin yalnız birisi baskın olduğunda bu dalga şekli tek kutuplu hale gelir. Bu sonuçlar endüklenen gerilimin maksimum değerinin hat üzerinde darbeden uzakta olan bir noktada meydana geldiğini ve bu darbelerin hattın 500 m kadar yakınında oluştuğunda 100 kV'tan daha büyük gerilimler endükleyebildiğini göstermiştir. Herhangi bir noktada endüklenen bu gerilim iki bileşen daha ihtiva eder: 1- yürüyen bir dalga, 2- elektrostatik olarak endüklenmiş bir gerilim. Buradan, elektrostatik etkinin darbeden uzakta; elektromagnetik etkinin ise darbenin daha yakınında etkin olduğu sonucuna varılır. Öncü darbedeki yükün üniform olmayan dağılımına izin verilmiş olsa bile, Chowdhuri ve Gross, hesapladıkları dalga şekillerinin genliklerini Cornfield ve Stringfellow tarafından kaydedilen dalga şekillerine benzetemediler. Singarajah [7], öncü darbenin etkisinin sebebini izah ederek endüklenen gerilimin ilk negatif yarım titreşimini açıklamıştır. Ortalama hızın hesabında öncü darbenin basamakları arasındaki fasilaların öncü darbenin toplam süresi içerisinde gösterilmiş olması sebebiyle öncü darbedeki yükün etkisi daha önce ihmal edilmişti. Bununla beraber, bu basamaklar sırasında önemli bir yük transferi olur, daha sonra son aşamada da toprağa olan deşarj esnasında öncü darbe tarafından veya yüksek hızı ve hatta yakınlığından dolayı, ihmal edilemeyecek bu düzensiz şarjın ilavesiyle hat üzerinde gerilim endüklenmiş olur. Singarajah'ın teorisi, kaydedilen gerilimlere daha önce ileri sürülen herhangi bir teoriden daha çok benzeyen iki kutuplu dalga şekilleri ortaya koymuştur.

Önerilmiş olan teoriyi doğrulamak amacıyla, Stringfellow [8] toprak yüzeyi yakınında bir noktada ve toprağa sun'i olarak tetiklenmiş bir yıldırım darbesinin yakınındaki bir noktada endüklenen alan şiddetinin değişimini kaydetmiştir. Şekil-2.3'de buna dair tipik bir kayıt gösterilmektedir. Öncü darbenin son basamağındaki son artış, dönüş darbesi sırasında hızlı bir düşüşle devam eder. Her darbenin çok yönlü deşarjlardan meydana geldiği bulunmuştur. İlk tetiklenen darbe birbirini izleyen aşağı doğru hareket eden ani ve hızlı öncü darbelerle ve yukarı doğru hareket eden dönüş darbeleriyle devam etmektedir.

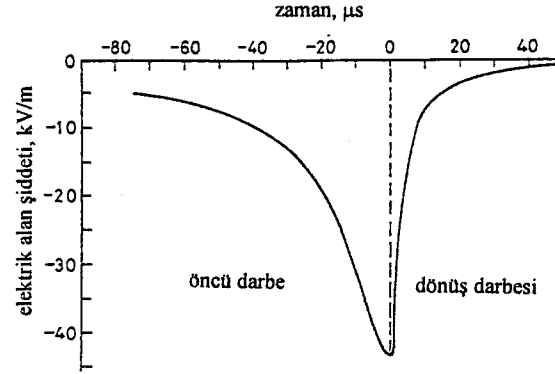


Şekil-2.3. Toprak yüzeyi yakınında kaydedilen elektrik alanı.

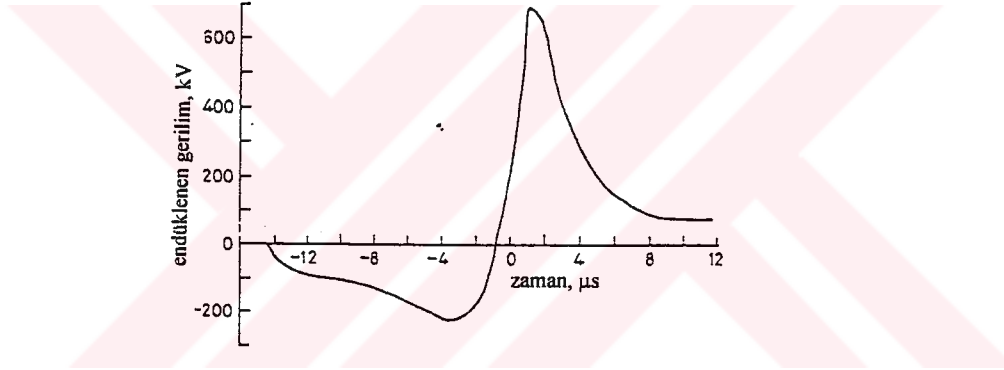
Darbe yapısının teorik modeli, hat üzerinde endüklenen gerilimin genliğini hesaplayabilmek amacıyla benimsenmiştir. Bu modelde öncü darbe süresince yükün, öncü darbe hızla azalırken kanal boyunca üniform olarak çökertildiği kabul edilir. Dönüş darbesi topraktan ve öncü darbe yükünün nötrlenmesinden ortaya çıkan yüksek bir iletim bölgesini ihtiva eder. Ayrıca hem öncü darbe hem de dönüş darbesi sırasında kesintisiz (net) yük, buluttan aşağıda bazı noktalara doğru uzayan negatif bir sütunda bulunur. Bu sütunundan dolayı, negatif yükün ölçüm noktasındaki elektrik alan şiddeti, çeşitli yük yoğunlukları için ve yer yüzeyi üzerindeki bu sütunun baz yüksekliğinin çeşitli değerleri için hesaplanmıştır. Ölçülen alan şiddeti/zaman eğrileri ve hesaplanan alan şiddeti/yükseklik eğrileri arasındaki karşılıklı ilişki, çeşitli zamanlarda ve çeşitli yüksekliklerde, örneğin yeni bir sınır koşulu olarak, öncü darbe veya dönüş darbesi yük dağılımının bir tahminini vermiştir.

Chowdhuri ve Gross'un teorisi, endüklenen elektrik alan şiddetini ve sonrada herhangi bir anda, bir gidiş ve bir dönüş hattı boyunca herhangi bir noktada endüklenen gerilimi hesaplamak için yeni bir sınır koşulunu kullanmıştır. Sırasıyla, elektrik alan şiddetinin

ve endüklenen gerilimin hesaplanmış değişimleri Şekil-2.4 ve Şekil-2.5'te gösterilmektedir.



Şekil-2.4. Hattan 100 m mesafede oluşan bir endirekt yıldırım darbesi için hesaplanan elektrik alan şiddetinin zamanla değişimi.



Şekil-2.5. 10 m yüksekliğindeki bir havai hattan 50 m mesafede oluşan bir endirekt yıldırım darbesi için hesaplanan endüklenen gerilimin zamanla değişimi.

Dönüş darbesinin başlangıcından daha önceki zaman süresince öncü darbe konsepti ve yük yoğunluğu hareketi, endüklenen gerilimin kaydedilmiş olan iki kutuplu dalga şekilleriyle çok yakın bir benzerlik ortaya koymuştur. Bu nedenle öncü darbenin, ilk negatif yarım titreşimi oluşturduğu doğrulanmış oldu. Netice olarak, akımdan dolayı ortaya çıkan magnetik etkinin çok büyük bir etkinliğe sahip olduğu ortaya konulmuş oldu. Ayrıca, endüklenen gerilimin dalga şekline etki eden elektrik alan şiddetinin değişimi de bulundu. Bununla beraber, hatta endüklenen gerilimin yürüyen bir dalga ile

elektrostatik olarak endüklenen ilave bir gerilimden meydana geldiği de gözlemlendi. Chowdhuri ve Gross'un teorisi, gerilimin maksimum değerinin hat üzerinde yıldırım darbesinden uzaktaki bir noktada oluştuğunu da doğrulamaktadır.

2.2. Direkt Yıldırım Darbeleriyle Meydana Gelen Aşırı Gerilimler

Yıldırım darbesinin doğrudan doğruya hava hattı üzerine veya topraklanmış tesis bölümleri üzerine düşmesi direkt tesir olarak nitelendirilir.

2.2.1. Yıldırım Darbesinin Faz Hattına Düşmesi

Yıldırımın doğrudan doğruya hat üzerine düşmesi durumunda yıldırım akımının cephe dikliğine uygun olarak, cephe dikliği bir kaç 1000 kV/μs mertebesinde olan bir yürüyen dalga meydana gelir ve hat boyunca iki yönde ışık hızı ile ilerler [39]. Bu yürüyen dalgaların şekli yıldırım boşalmasındaki akım şekline benzer, yani yıldırım akımı

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.2.1.1)$$

şeklinde olduğuna göre yürüyen gerilim dalgaları da

$$u(t) = \frac{1}{2} Z i(t) = \frac{1}{2} Z I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) = U_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.2.1.2)$$

şeklinde olurlar. Burada

Z : Faz hattının karakteristik empeansı,

U_0 : $Z I_0 / 2$ değeri

olarak gösterilmiştir. Faz hattında meydana gelen aşırı gerilimin tepe değeri

$$U_m = \frac{1}{2} Z I_m \quad (2.2.1.3)$$

ile bulunur. Burada I_m , faz hattına düşen yıldırım akımının tepe değeridir. Tepe değeri çok büyük olan bu yürüyen dalga, ilk direkte izolatör zinciri üzerinden bir atlama meydana getirebilir. Direğin topraklama direnci R_d ile gösterilirse, direkte meydana gelen gerilim

$$u_d \approx R_d i_d = Z i_L \quad (2.2.1.4)$$

ve

$$\frac{1}{2} i = i_d + i_L \quad (2.2.1.5)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Burada

i_d : Direk topraklama direnci üzerinden geçen akım,

i_L : Faz hattı üzerinden geçen akım,

olarak alınmıştır ve

$$u_d \approx \frac{1}{2} i \frac{R_d \cdot Z}{R_d + Z} \quad (2.2.1.6)$$

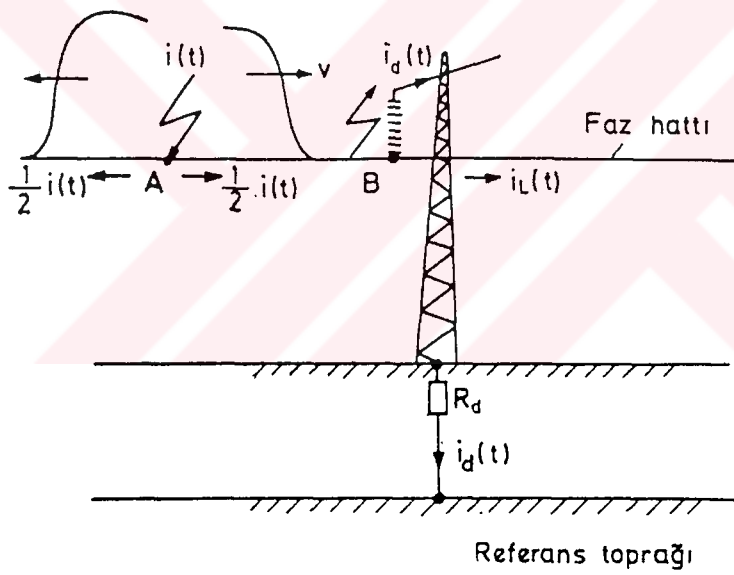
olarak alınabilir. Gerçekte direkte meydana gelen gerilim için

$$u_d = R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - u_k - M \frac{di_L}{dt} \pm u_s \quad (2.2.1.7)$$

denklemleri yazılabilir. Burada

- $R_d i_d$: Direğin darbe topraklama direncindeki gerilim düşümü.
 $L_d(di_d/dt)$: Direğin endüktansında meydana gelen endüktif gerilim düşümü.
 u_k : Koruma hattı ile faz hattı arasındaki kapasitif kuplajdan dolayı, koruma hattının faz hattında meydana getirdiği gerilimi.
 $M(di_L/dt)$: Faz hattında yürüyen yıldırım akımı tarafından direkt olarak endüklenen gerilim.
 $u_ş$: Şebeke geriliminin ani değeri.

olarak gösterilmiştir. Genel olarak $R_d i_d$ yanında diğer terimler ihmal edilebilir [40].



Şekil-2.6. Yıldırımın faz iletkenine düşmesi hali.

2.2.2. Yıldırım Darbesinin Topraklanmış Bölümlere Düşmesi

2.2.2.1. Yıldırımın Darbesinin Direğe Düşmesi

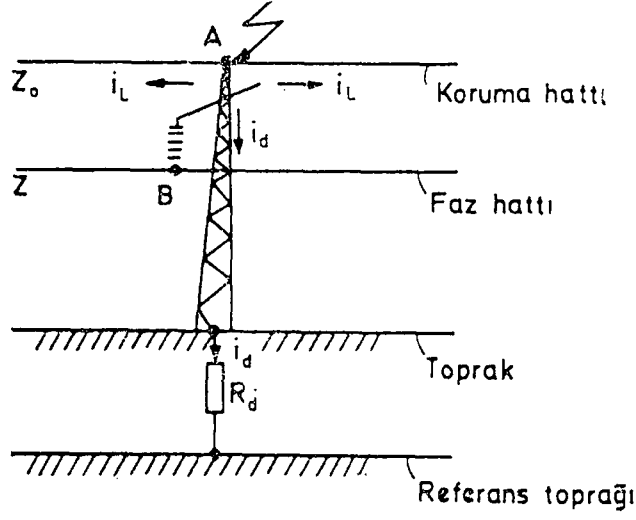
Yüksek gerilim direkleri, yıldırım gerilimleri için düşey yürüyen dalga iletkenleri olarak kabul edilebilir. Bunların dalga dirençleri yaklaşık 250 ohm mertebesinde olup yukarıdan aşağıya doğru sürekli olarak azalır. Direk dalga direncine seri olarak, direk topraklamasına ait yıldırım darbe yayılma direnci mevcuttur; bu da, zeminin cinsine göre, yaklaşık olarak 5-10 ohm arasında değerler alır.

Eğer yıldırım normal olarak topraklanmış olan direğin tepesine düşerse, yıldırım akımı, direk topraklaması (yıldırım topraklaması) üzerinden toprağa geçer. Bu esnada yıldırım akımı, direk dalga direnci ile direk topraklama direnci üzerinde bir gerilim meydana getirir. Eğer bu gerilim, normal işletme gerilimi ile birlikte, hat izolasyonunun darbe dayanma geriliminden daha büyük olursa, direktten hava hattı iletkenlerine doğru, izolatörler üzerinden bir “geri atlama” meydana gelir ve işletme akım devresine geçer. Bu olay tesir bakımından yıldırımın doğrudan doğruya hat üzerine düşmesine eşdeğerdir.

Yıldırım düştüğünde gerilim yükselmesi, özellikle geri atlamalarda, çok ani olduğundan bunlar, makinelerin ve transformatörlerin sargıları için büyük tehlike kaynağı teşkil ederler. Direk topraklama direnci küçük olursa, büyük yıldırım akımında dahi direk topraklama direncinde meydana gelen gerilim düşümünün izolatörlerin darbe atlama geriliminin altında kalması sağlanır.

Yıldırımın doğrudan doğruya bir yüksek gerilim direği üzerine düşmesi halinde bu direk üzerinden yıldırım akımının % 60'ı ve buna koruma hattı aracılığı ile bağlı bulunan her iki tarafındaki en yakın iki direğin her biri üzerinden % 15'i, nihayet bu sonunculardan sonra gelen iki direğin her biri üzerinden % 5'i geçer [39].

Yıldırımın direğe düşmesi durumunda oluşan aşırı gerilimler genel olarak direkt faz hattına düşen yıldırım darbesinin oluşturacağı aşırı gerilimler kadar tehlikeli değildir.



Şekil-2.7. Yıldırımın direğe düşmesi hali.

Şekil-2.7'den

$$I = i_d + 2i_L \quad (2.2.2.1.1)$$

$$u_d = R_d i_d = Z_0 i_L \quad (2.2.2.1.2)$$

denklemleri yazılabilir. Dolayısıyla, direkte meydana gelen gerilim yükselmesi

$$u_d = \frac{R_d Z_0}{2R_d + Z_0} i \quad (2.2.2.1.3)$$

olur. Burada

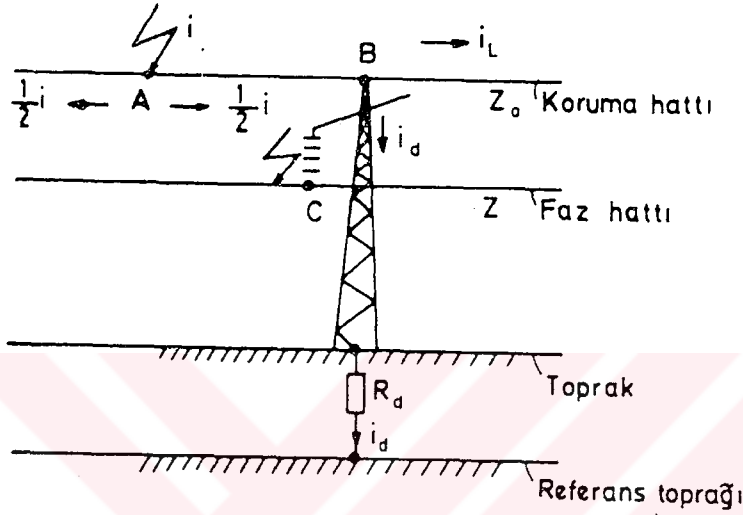
R_d : Direğin topraklama direnci.

Z_0 : Koruma hattının karakteristik empedansı.

olarak gösterilmiştir [40].

2.2.2.2. Yıldırım Darbesinin Koruma Hattına Düşmesi

Yıldırım darbesinin koruma hattına düşmesi halinde de aşırı gerilimler meydana gelebilir. Eğer direkler iyi topraklanmamışsa, yıldırımın direğe düşmesi durumunda olduğu gibi, bu durumda da, geri atlamalar söz konusu olabilir.



Şekil.2.8. Yıldırımın koruma hattına düşmesi durumu.

Şekil-2.8'den

$$\frac{1}{2}i = i_d + i_L \quad (2.2.2.2.1)$$

$$u_d = R_d i_d = Z_0 i_L \quad (2.2.2.2.2)$$

denklemleri yazılabilir. Dolayısıyla direkte meydana gelen aşırı gerilimin ani ve tepe değeri

$$u_d = \frac{R_d \cdot Z_0}{2(R_d + Z_0)} i \quad (2.2.2.2.3)$$

ve

$$U_d = \frac{R_d Z_0}{2(R_d + Z_0)} I_m \quad (2.2.2.2.4)$$

şeklinde ifade edilir. Bu gerilimin tepe değeri, zaman zaman geri atlama dolayısıyla yüksek gerilim şebekesinin arızalanmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu tür durumlardan sakınmak amacıyla izolatörlerin darbe dayanma gerilimlerinin çok iyi tayin edilmesi gerekmektedir [40].

2.3. Korunma Yapılmamış Bir 11 kV'luk Hattın Endüklenen Gerilime Tepkisi

Baker [9], 11 kV'luk bir havai hat şebekesinin endüklenen gerilim dalga şekillerine cevabını tarif etmiştir. Toprağa göre endüklenen gerilim, yaklaşık olarak hattın üç iletkeninin her birinde endüklenen gerilime eşittir. Bu endüklenen gerilim, toprağa göre 50 Hz frekanslı nominal değerli AC gerilime ilave edilecektir. Hat üzerindeki bazı topraklı noktalarda toprağa göre toplam gerilim bir izolatörün 120 kV'luk darbe dayanım değerini aştığında, atlama oluşturacaktır. Bu atlama, darbe geriliminin negatif yarı titreşimi esnasında 50 Hz frekanstan dolayı diğer ikisine göre daha fazla negatif olan iletkende oluşacaktır. Bu atlama, yansıyan darbelerle sonuçlanır.

Bir iletkenin karakteristik empedansı, Schlatter'in teorisinde [10] bir çoklu iletken sistemi için, 11 kV'luk bir hattın tipik parametrelerinin yerini almak üzere 443 Ω olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber, bahsedilen atlamadaki yansıma katsayısı hemen hemen 1'e yakın olup 0.8 mertebesinde ve negatiftir. Atlamanın sebep olduğu pozitif yayılma, kısa bir mesafe ilerledikten sonra her üç iletken tarafından paylaşılır. Baker [9], daha sonra ikinci bir atlamanın oluşumunu izah etmiştir. Dallenmanın olmadığı uzun bir dağıtım hattında, endüklenen gerilimin negatif yarı titreşimi sırasında ilk atlama vasıtasıyla yansıtılan pozitif dalga, endüklenen gerilimin gelen pozitif yarı titreşimi ile

karşılaştığında ikinci bir atlamaya sebep olacaktır. Eğer pozitif yarım titreşimin ve yansıyan pozitif dalganın genlikleri toplamı 120 kV'u aşarsa, bu ikinci atlama oluşacaktır. İkinci atlamanın, o anda toprağa göre oldukça pozitif olan 50 Hz'lik gerilime sahip iletkende, oluşma ihtimali çok yüksektir. Endüklenen gerilimin pozitif ve negatif pikleri arasındaki 20 μ s'lik zaman farkı, bu iki atlamanın yaklaşık olarak birbirinden 6 km uzakta oluştuğunu gösterir.

11 kV'luk pratik bir dağıtım hattında pek çok topraklama noktası vardır. Bundan dolayı ilk atlamanın, yıldırım darbesine en yakın noktanın her iki yanında ve en yakınındaki iki topraklı kutupta oluşması ihtimali oldukça yüksektir. Atlamaya en yakın noktaya doğru geri (dönen) yürüyen bu iki pozitif yansıma karşılaşacak ve yeterli bileşke genlik mevcutsa, ikinci bir atlamaya sebep olacaktır. Bu olay, gelen endüklenen gerilimin pozitif yarım titreşiminin hat üzerinde herhangi bir katkı sağlamadan önce, darbe yakınındaki bazı noktalarda oluşacaktır.

Tipik bir 11 kV'luk havai dağıtım hattı pek çok branşmanlara sahiptir. Bir ana hat üzerinde gerilimin yürüyen dalga bileşenleri, bir branşmanın geçilmesiyle kendi orijinal değerinin 2/3'üne düşer. Bununla beraber, bir branşman hattı sonunda atlama üretmek üzere gerilimin katlanması, darbe genliğinin yeterli miktarda artmasıyla da sonuçlanabilir. 11 kV'luk bir dağıtım şebekesinde atlama oluşması için çeşitli bölgeler vardır. Bununla beraber bu bölgelerin hepsi, toprağa olan bir ilk atlamayla sonuçlanır, daha sonra ikinci bir iletkenden toprağa ikinci bir atlamayla devam eder. Bu sebeple bu durum, genliği iki toprak direnci tarafından sınırlanan, güç frekanslı akımı takip eden 2 faz-toprak arızasını temsil eder. Bu olay, "yıldırımdan dolayı oluşan arızaların %78'i çok faz-toprak arızasıdır" diyen Seed'in [11] arıza kayıtlarıyla aynı paraleldedir. Eğer tesisin darbe dayanım gerilimi aşılsa, hatta bağlı olan bu tesis, gelen ve yansıyan endüklenmiş gerilimlerden zarar görebilir. Tesiste değişiklik yapmaktan sakınmak amacıyla bu endüklenen gerilimlerin toprağa verilmesi zorunludur.

2.4. 11 kV'luk Hava Hatlı Sistemin Aşırı Gerilim Koruması

2.4.1. Tesisin Korunması

11 kV'luk sistemlerde transformatörleri ve kabloları aşırı gerilimlerden korumak amacıyla çift atlama aralıkları ve darbe bölücüler çok miktarda kullanılmaktadır. Servisteki darbe bölücülerden elde edilen tecrübelerden anlaşıldığı üzere, güvenilirlik tatmin edici değildir [161,162]. Baker, çift atlama aralıklarının direkt bir yıldırım darbesinden sonra görülen tipik darbelere maruz kaldığında nispeten zayıf bir dalga yüzü (wavefront) performansına sahip olduğunu kaydetmiştir [163]. İzolatör atlamasından dolayı olan azaltma etkisi de zayıftır. Baker'in tetiklenme aralığı (triggered gap) [6,163], tesis için direkt darbelere karşı koruma sağlayarak çift atlama aralıklı olanlara göre, daha hızlı bir dalga yüzü performansı göstermektedir.

Baker, merkez iletken ile toprak arasına bir tek tetikleme aralığı bağlanılarak tesis için endüklenen gerilimlere karşı neredeyse tam bir koruma sağlayabileceğini iddia etmektedir. Bu aralıktaki atlama olayı, dış iletkenlerin gerilimini toprağa göre yaklaşık %50 düşürerek harici iletken-toprak kapasitelerinin boşalmasıyla sonuçlanır. Toprak elektrodunun direnci bu oranı düşürür. Bağlantı tesisinin izolasyonu 95 kV'luk bir darbe dayanabilir. Bu darbe, 190 kV'luk endüklenen bir gerilim darbesine maruz kaldığında boşlukta oluşan atlamadan sonra geriye kalacak olan gerilimdir. Cornfield ve Stringfellow'un göstermiş oldukları gibi [5], pratikte endüklenen gerilimlerin çok azı 190 kV'u aşar. Çok ender karşılaşılan direkt darbelere karşı sistemi korumak amacıyla kullanılan darbe bölücülerden vazgeçilerek endüklenen darbelere karşı sistemi korumak için bir tetikleme aralığının tesis edilmesinin çok doğru bir yaklaşım olduğu zaman içerisinde ispatlanmıştır. Bir kıvılcım aralığının (spark gap) delinmesi sonucu güç frekanslı akım toprağa iletilmiş olur.

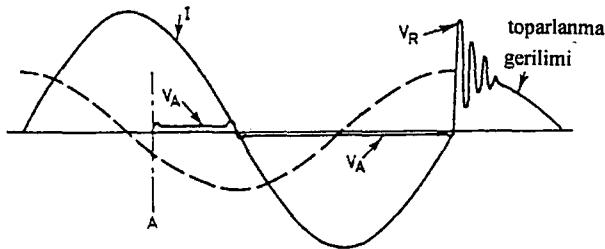
3. BÖLÜM

AKIMLARIN KESİLMESİ SONUCU OLUŞAN AŞIRI GERİLİMLER

Güç sistemlerinde normal işletme prosedürünün bir parçası olarak devrelerin anahtarlanması ve arızaların temizlenmesi işlemi kesiciler vasıtasıyla yapılır. Daha önceki araştırmalar [12,13,14] ve bir IEE çalışması [15] kesiciler konusunu genişçe ele almıştır. Bir kesici vasıtasıyla bir devredeki akımın kesilmesi, normalde AC dalganın bir akım sıfırı noktasında (current zero) olur ve kesicinin kontakları arasında bir gerilim görülmesiyle sonuçlanır. Bu gerilim bir geçici bileşeni içerir. Bu geçici bileşen geçici toparlanma gerilimi (Transient Recovery Voltage, TRV) olarak bilinir ve düşük güç faktörlü devreler için bu geçici bileşen, sistem nominal geriliminden daha yüksek değerlere ulaşabilir. Geçici toparlanma geriliminin pik değeri ve bu pikin artış oranı kesici performansına tesir eder.

3.1. Devre Kesilmesi Olayının İşleyiş Şekli

Devrenin kesilmesi olayı Şekil-3.1'da gösterilmektedir. Bir açma sinyali (trip signal) alındığında, A noktasında kontaklar ayrılır ve kontaklar arasında bir ark meydana gelir.



Şekil-3.1. Akım kesilmesi olayı.

V_a gibi çok küçük bir gerilim düşümüne sahip olan bu ark, I akımı arkı devam ettirmekte yetersiz duruma gelene kadar devam eder. I akımının arkı sürdürmekte yetersiz kalışı akım sıfırından geçerken meydana gelir. Bu noktada ark söner ve kesici kontakları arasında geçici toparlanma gerilimi ortaya çıkar. Başarılı bir kesme yapmak için ayrılan kontaklar arasındaki dielektrik dayanımı, geçici toparlanma geriliminin artış oranından daha yüksek bir oranda tutulmalıdır. İlave olarak geçici toparlanma geriliminin pik değeri, kontaklar arasındaki aralığın delinme dayanımını aşmamalıdır. Eğer bu şartlar sağlanamaz ise ark tekrar oluşturulmuş olacak ve akımın kesilmesi bir sonraki akım sıfırına kadar geciktirilecektir. Akım akışı sona erdiğinde kontaklar arasındaki gerilim gerçek sıfırdan (ark geriliminden) güç frekans geriliminin ani değerine doğru bir değişim gösterir. Bu tür bir değişim ani olarak gerçekleşmez ve bu andaki gerilim, frekansı devre kesiciye yakın devre endüktansları ve kapasitelerinin değeri ile belirlenen bir geçici osilasyon aracılığı ile gerilimin sürekli hal değerine yaklaşır. Geçici toparlanma gerilim osilasyonunun genliği, sürekli hal gerilim değişiminin iki katı kadar bir değere sahip olabilir. Fakat pratikte, geçici toparlanma geriliminin değeri sistemin kayıpları sebebiyle meydana gelen azalmadan dolayı genellikle bu bahsedilen değerden daha düşük olur.

Akım kesilmesi anında toparlanma geriliminin ani değeri, devrenin güç faktörüne bağlıdır. Oluşan bu gerilim değişiminin genliği, yük veya arıza akımının kesilip kesilmemesi durumlarına da bağlıdır. Eğer ikincisi olur, yani arıza akımı kesilirse, kesici ile arıza arasındaki devre empedansı, gerilim değişiminin genliğinde etkili olacaktır. Çeşitli sistem koşulları altında geçici toparlanma geriliminin şekli 16. ve 17. referanslarda gösterilmektedir. Arıza şartları altında, güç sistemleri esas itibarı ile endüktiftir. Bundan dolayı kesiciden de görüleceği üzere, devrenin güç faktörü etkin bir şekilde sıfır geciktiricidir ve geçici toparlanma geriliminin güç frekans bileşeni, akım kesilmesi anında maksimum değerini alır. Üç fazlı bir sistemin fazlarındaki akımlar arasında mevcut olan kaymadan dolayı akım sıfırı ve bundan dolayı da kesilme bir fazda diğer iki fazdan daha önce meydana gelir. Sonuç olarak, nötr noktası topraklanmış bir sistemde üç fazlı topraklanmamış bir arızanın temizlenmesi, kesilme anında faz-nötr

gerilimi pik değerinin 1.5 katı bir değer alan g¼c frekanslı bir geçici toparlanma gerilimine yol açar. Sistemin gerilimi azaltıcı etkisi olmazsa, darbe titreşimi bu gerilimi (1.5 katlık g¼c frekanslı geçici toparlanma geriliminin) iki katına çıkabilir. Böylece bu şartlar altında kesici üzerindeki geçici toparlanma gerilimi faz-nötr gerilimi pik değerinin üç katı kadar bir değere ulaşabilir.

3.2. Geçici Toparlanma Geriliminin Şiddeti

Geçici toparlanma gerilimi hakkındaki bilgi, serviste karşılaşılması muhtemel bir kesicinin dizaynında büyük önem taşır. Bu durum, hem bilgisayar hesaplamaları hem de arazi ölçümleri bazında yapılan g¼c sistem şebekelerinin geçici toparlanma gerilimi araştırmalarına [18-22,27,28], sebep olmuştur. Çok şiddetli (severe) şartlar altında geçici toparlanma geriliminin değerlendirmesine ihtiyaç duyulmuş ve daha alçak gerilimli olan şebekeler için, bir üç fazlı arızayı temizlemek üzere birinci fazın şartlarına bağlı araştırmalar yapılmıştır. 362 kV'dan daha yüksek gerilimlerde işlenen sistemler için, üç-fazlı topraksız bir arızanın oluşması nadiren görülür [20,21]. Bu tür sistemler için geçici toparlanma gerilimi, topraksız bir arızayı çağrıştıran 1.5 çarpım faktöründen çok, 1.3 çarpım faktörlü üç-fazlı topraklı bir arıza bazında değerlendirilmelidir.

Bir kesicinin görevinin zorluğu kesilen arıza akımının büyüklüğüne bağlıdır. Bundan dolayı en ağır şartları elde etmek için, bir üç fazlı arızanın en yüksek seviyesiyle tali trafo merkezinde oluşması beklenir. Kesilen arıza akımını maksimum yapmak için, bir arızanın kesici terminallerinde oluştuğu varsayılır. Böyle bir kesicinin terminallerindeki kaçak şönt kapasite (stray shunt capacitance) değerinin nispeten yüksek olması muhtemeldir. Çünkü yüksek bir arıza seviyesi elde etmek için, her biri toplam şönt kapasiteye katkıda bulunan pek çok devre, bu tali transformatör merkezine bağlanmalıdır. Kesicinin görevinin zorluğu, geçici toparlanma geriliminin artış oranıyla orantılı olarak yükselir. Bu artış oranı yüksek olduğunda geçici dalga şekli, kesici terminallerindeki şönt kapasite değeri düşükken elde edilen bir yüksek frekans bileşenini içerir. Bundan dolayı, geçici toparlanma gerilimi araştırmalarında yüksek

arıza seviyeli tali trafo merkezlerinin dikkate alınmasına ek olarak, kesilen arıza akımı nispeten düşük olsa bile, yüksek artış oranlı geçici toparlanma gerilimi üretebilen kesici terminallerindeki şönt kapasitenin düşük değerleri için de sistem şartları dikkatlice incelemelidir.

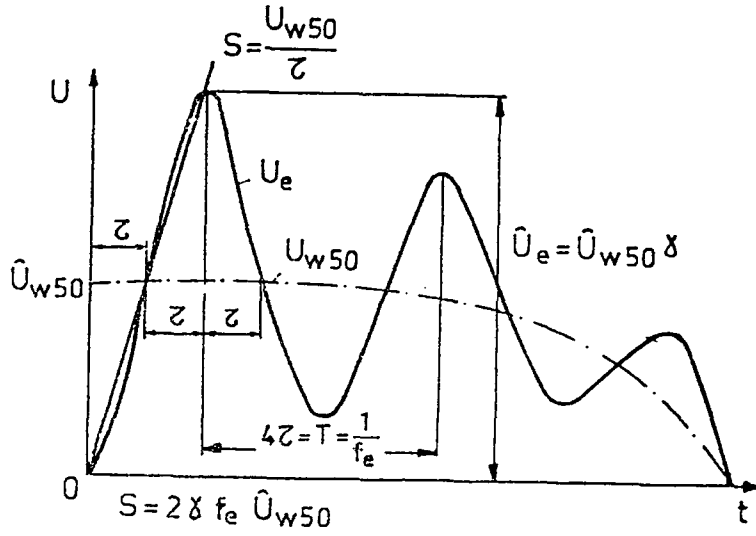
Şu ana kadar dikkate alınan anahtarlama koşulu bir terminal arızasının temizlenmesidir. Örneğin, kesicinin terminallerindeki bir arızanın temizlenmesi gibi. Bunun büyük bir arıza akımı üretmesine ve bu sebepten dolayı daima dikkate alınmasının gerekli olmasına rağmen, diğer anahtarlama koşulları da mevcuttur. Bu koşullar hem kesiciye hemde bir bütün olarak sisteme istenmeyen geçici şartları yüklerler. Bunlar arasında önemli olanlar; kısa hat arızası, düşük endüktif akımların kesilmesi ve açık hatların ve kapasitör banklarının kapasitif akımlarının kesilmesidir.

Günümüzde alternatif akımın kusursuz olarak söndürülmesinde geçici toparlanma gerilimi ve parametreleri çok önemli rol oynamaktadır. Geçici toparlanma gerilimi şu büyüklükler ile tanımlanır:

- f_e : titreşim frekansı
- S : yükselme eğimi
- γ : aşırı titreşim katsayısı

Yalıtımın tekrar kazanılması için S yükselme eğimi, direkt bir karşılaştırma büyüklüğü olduğundan önemli bir parametredir. Yalıtımın tekrar kazanılma hızı yükselme eğiminden daha büyükse, ark tekrar tutuşmaz. Şekil-3.2'de, geçici toparlanma gerilimini tanımlayan büyüklükler idealize edilmiş bir frekanslı bir geçici toparlanma gerilimi üzerinde gösterilmiştir.

Bir frekanslı titreşim devrelerinde titreşim frekansı Thomson'un titreşim denklemine göre hesaplanabilir:



Şekil-3.2. Bir frekanslı bir geçici toparlanma gerilimi.

$$f_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (3.2.1)$$

Burada L ve C kısa devreyi kesen kesici ile generatör arasında kalan şebeke parçasının toplu devre elemanıdır. Gerçekte L ve C şebekede toplu olarak değil, dağılmış olarak bulunur. Buna rağmen Thomson denklemini kullanabilmek için, hattın C kapasitesi yerine toplu C' elemanı eşdeğer olarak konur.

$$C' = kC \quad (3.2.2)$$

Böylece

$$f_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{LkC}} \quad (3.2.3)$$

olur. k faktörü, öyle seçilmelidir ki L ve C' ile teşkil edilen eşdeğer devre, elemanları L ve C olan gerçek devre ile aynı davranışı gösterebilir. Schnessl, k için şu değerleri vermektedir:

Devrenin küçük öz frekansları için $k = 0.33$

Devrenin yüksek öz frekansları için $k = 0.406$

Şebekeler her zaman bir frekanslı ana devreye çevrilemezler. Bununla beraber bu şebekeleri iki frekanslı bir ana devreye çevirmek mümkündür. Her iki titreşim devresinin frekansları Mauduit'ye göre dördüncü mertebeden bir diferansiyel denklemin çözümünden elde edilebilir:

$$\omega_1^2 = \frac{m^2}{2} - \sqrt{\frac{m^4}{4} - n^4} \quad (3.2.4)$$

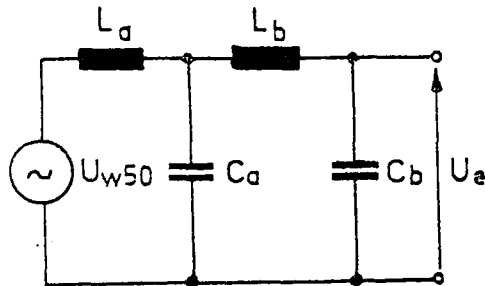
$$\omega_2^2 = \frac{m^2}{2} + \sqrt{\frac{m^4}{4} - n^4} \quad (3.2.5)$$

Burada

$$m^2 = \frac{1}{L_a C_a} + \frac{1}{L_b C_b} + \frac{1}{L_b C_a} \quad (3.2.6)$$

$$n^4 = \frac{1}{L_a L_b C_a C_b} \quad (3.2.7)$$

ω_1 ve ω_2 , her iki titreşim devresinin açısal frekansları olarak kullanılmıştır.



Şekil-3.3. İki frekanslı bir geçici toparlanma gerilimi devresi.

Elektrik şebekelerinde genellikle bir frekanslı gerilimler değil, çok frekanslı geri gelen gerilimler ortaya çıkarlar. Bu sebeple iki titreşim devresinin geçici toparlanma gerilimlerinin genlikleri de önemlidir:

$$\frac{A_1}{U_{w50}} = \frac{\omega_2^2 - \omega_{12}^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (3.2.8)$$

$$\frac{A_2}{U_{w50}} = \frac{\omega_{12}^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (3.2.9)$$

Burada

$$\omega_{12} = \frac{1}{(L_a + L_b)C_b} \quad (3.2.10)$$

göstermektedir. Her iki genliğin toplamı:

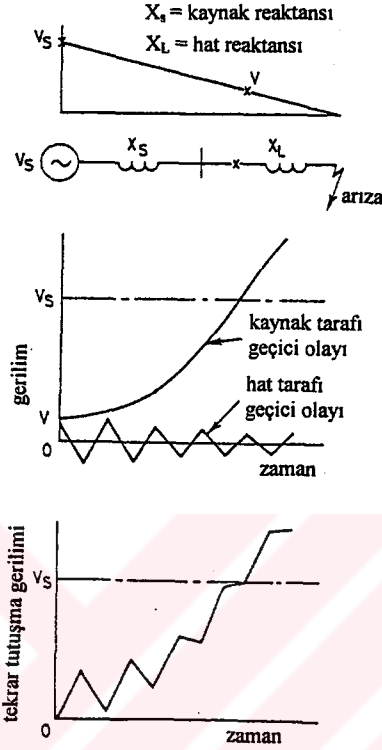
$$U_{w50} = A_1 + A_2 \quad (3.2.11)$$

olarak verilir. Bu ifadelerden anlaşılacağı üzere yalnız bir genliği hesaplamak yeterlidir, diğer genlik son ifadeden elde edilebilir [41].

3.3. Kısa Hat Arızaları

Bu durum, bir şebeke hattı boyunca kesiciden fazla uzak olmayan bir mesafede bir arızanın mevcut olması durumunda söz konusu olur. Arıza ve kesici arasındaki mesafenin uzunluğu eğer 10 km'den az ise, bu arıza bir kısa hat arızası olarak isimlendirilir ve bunun temizlenmesi, kesici için çok zor olan şartlar üretebilir.

Bu şartlar altında geçici toparlanma gerilimi iki bileşene sahiptir. Bunların birincisinin frekansı, kesicinin kaynak tarafında bağlı bulunan devrelerin parametreleri ile belirlenir. İkinci bileşen, kesici ile arıza arasındaki hattın uzunluğuna bağlıdır.



Şekil-3.4. Kısa hat arızası.

Şekil-3.4'de, kaynak empedansının gerisindeki açık devre değerinden arıza noktasındaki sifıra kadar gerilimin azalması ile arıza şartları altındaki gerilim profili verilmektedir. Kesicideki gerilim, kesicinin kaynak tarafında bağlı bulunan devrelerin empedansı ve hattın uzunluğu vasıtasıyla elde edilen bir ara V değerindedir. Arıza temizlendiğinde kaynak tarafındaki gerilim, frekansı kaynak tarafının endüktansları ve kapasiteleri ile belirlenen bir osilasyon vasıtasıyla açık devre değerine geri döner. Hat tarafındaki gerilim, üçgen dalga şekline sahip bir yüksek frekans osilasyonu vasıtasıyla sifıra geri döner. Bu dalga şekline hattın dağılmış parametre etkisi sebep olur. Şekil-3.4'den şu görülebilir: Hattın etkisi, kontakların ayrılma aralığı küçük iken ve izolasyon dayanımının henüz oluşturulmaya başlandığı bir anda geçici toparlanma geriliminin ilk

aşamaları sırasındaki artış oranında keskin bir yükselmeye sebep olur. Bu sebepten dolayı kısa hat arızaları çok önemlidir.

Hat, dağılmış parametrelerle temsil edildiğinde hat bileşeninin frekansı, kesici ile arıza arasında yürüyen bir dalganın aldığı zamana bağlıdır. Hat tarafı bileşeninin genliği, arıza akımıyla ve kesici ile arıza arasındaki hattın uzunluğu ile doğru orantılıdır. Bundan dolayı, kesici ile arıza arasındaki hattın uzunluğu kısaldığında bu etki, genliği azaltıcı ve frekansı arttırıcı yönde etki eder.

Kısa hat arıza koşulları altında, geçici toparlanma geriliminin hat tarafı bileşeninin ilk pikinin doğal karakteristiği, arıza akımının ve hattın etkin karakteristik empedans bilgisinden elde edilebilir. Geçici toparlanma geriliminin artış oranı şu formülle verilir:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{Z di}{dt} \quad (3.3.1)$$

Burada

Z : hattın karakteristik empedansı

$\frac{di}{dt}$: akım sıfırında arıza akım dalgasının eğimi

olarak kullanılmıştır.

Arıza akımı

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t \quad (3.3.2)$$

olarak verildiğinde

$$\frac{di}{dt} = \sqrt{2} I \omega \cos \omega t = \sqrt{2} I \omega \quad (3.3.3)$$

olarak yazılır. Burada, ωt küçüktür ve bundan dolayı $\cos\omega t \approx 1$ dir. Böylece, hat tarafı bileşeninin ilk pikinin artış oranı

$$\frac{dV}{dt} = \sqrt{2} I \omega Z = 2\sqrt{2} \pi f I Z \quad (3.3.4)$$

ile ifade edilir. Burada

f : sistem frekansı, Hz

I : kesilen arıza akımının efektif (RMS) değeri, A

olarak kullanılmıştır.

Hat tarafı bileşeninin ilk pikinin genliği şu şekilde verilir:

$$V = t \frac{dV}{dt} \text{ volt.} \quad (3.3.5)$$

Burada t, kesici ile arıza arasındaki hat uzunluğunu iki defa kat eden bir darbe dalgasının bu yolu alması için geçen zamandır.

Karakteristik empedansın etkin değeri, arızanın temizlenme düzenine ve temizlenen belirli bir fazın yükseliş pozisyonuna bağlıdır. Bu tespit, üzerinde çalışılan hat konfigürasyonu için karakteristik empedans matrisinin hesaplanmasını ve gerekirse faz temizlenmesini yerine getirmek üzere bu matrisin modifikasyonunu içerir. Bu gerekli matris modifikasyonu üç fazın akımları, gerilimleri ve karakteristik empedanslarını ilgilendiren matris eşitliğinde uygun akım ve gerilim koşullarının sağlanması ile elde edilir.

Yüksek gerilim sistemlerinde tek faz-toprak arızası en genel arıza şeklidir ve bu tür bir arızanın temizlenmesinde en şiddetli kısa hat arızası ile karşı karşıya gelinir. Bu durum,

son faz arızalı olduğunda arızayı temizlemek amacıyla üçüncü veya son faz altında oluşur. Bu sebeple, hattın uzunluğu dikkate alındığında arıza akımı, genellikle tek faz arızası durumunda en yüksek değeri vermektedir. Ayrıca, bu şartlar altında karakteristik empedansın etkin değeri de en yüksek olmaktadır.

Karakteristik empedans matrisinin hesaplanması zahmetli olabilir ve bilgisayar kullanılması gerekli olabilir. Eğer toprağın nüfuz (penetrasyon) etkileri de işleme dahil edilecek olursa, mutlaka bir bilgisayar kullanımı gerekir. Toprak iletkenleri mevcut ise ve toprak özgül dirençlerinin düşük değerleri için kısa hat arıza işinin yeterli derecede bir doğrulukta değerlendirmesi, eğer toprak mükemmel bir iletken olarak kabul edilirse ve toprağın nüfuz etkileri ihmal edilirse, kolayca elde edilebilir. Bununla beraber toprak iletkenleri olmadığı durumda ve toprak özgül dirençlerinin yüksek değerleri için, darbe akımlarının toprak içindeki nüfuz derinliğinin [25] zamanla değişimi dikkate alınmalıdır. Nüfuz derinliği değişimi, zamanla değişen bir karakteristik empedansa işaret eder. Bu sebeple zamandan bağımsız bir ortalama değer kullanılmalıdır.

Geçici toparlanma geriliminin bu dik artış oranı, kesicinin hat terminalindeki toplu kapasitenin (lumped capacitance) mevcudiyetiyle azaltılan, hat tarafı bileşeni ile üretilir. Bu kapasite [30,31], hatta bağlı bulunan akım ve gerilim transformatörlerine bağlıdır. Böylece bu transformatörler, hat tarafı bileşeninin pikine zamanı arttıracak şekilde etkide bulunur. Kesiciyi hatta bağlayan kısa uzunluklu bir kablonun mevcudiyeti de benzer bir etkiye sahiptir. Bu tür kapasitenin etkisi, kesici ile arıza arasındaki mesafe azaldığında tedricen daha da artar. Bu tür kapasiteler kesicinin işini kolaylaştırıcı etkiye sahiptir. Kesicideki gerilmenin daha da azaltılması, ya seri bağlı kesici sayısının artırılması ile elde edilebilir veya alternatif olarak direnç anahtarlamasının (resistor switching) kullanılmasıyla [23,32] elde edilebilir. Direnç etkisi, genliği azaltıcı yöndedir. Bu sebeple, direnç, hattın karakteristik empedansına eşit bir değere sahip olduğunda, hat tarafı gerilim bileşeninin dikliği %50 daha az bir değerde gerçekleşecektir [23-26,29-37].

3.4. Küçük Endüktif Akımların Kesilmesi

Bir kesicide akım kesilmesi olayı daima bir tabii akım sıfırında meydana gelmez. Kesici; transformatörleri, şönt reaktörleri ve motorları tekrar enerjilendirmek için kullanıldığında kesilen akım, kesicinin kesmeye muktedir olduğu arıza akımıyla karşılaştırıldığında çok küçük olabilir. Arkın sönmesi ve akımın hemen sıfıra dönmesi muhtemel sonucu ile kesici arkında kararsızlık meydana gelebilir. Akım kopması (current chopping) olarak bilinen [38] bu olay, ani olarak azalan bir akımda doğal olarak oluşacaktır. Akım kopmasının tabii akım sıfırından önce oluşması ihtimali, tabii akım sıfırından sonra oluşması ihtimaline göre çok daha yüksektir.

Kesicideki akım, akım kopması ile sıfıra zorlanmasına rağmen, endüktif yükteki akım hemen değişmez ve yükün terminallerinde mevcut olan herhangi bir kapasite (kaçak kapasite veya başka türlü bir kapasite) içinden akmaya devam eder. Endüktif yükteki bu akım, terminallerde (kapasiteden dolayı) elektrostatik enerjiye dönüştürülen magnetik enerjiyi temsil eder. Eğer kapasite küçükse bu dönüştürme tarzı, terminallerde görülen bir aşırı gerilimle sonuçlanır. Olay bütün endüktanslı yükler, özellikle boşta çalışan transformatörler için önemlidir. Şebekelerde yalıtım düzenlemesi ve işletme güvenliği bakımından geçici aşırı gerilimlerin çok iyi bilinmesi gerektiğinden, küçük endüktanslı akımları açmada oluşan geçici aşırı gerilimler kuramsal ve deneysel olarak eskiden beri incelenmiştir. Bu incelemeleri kolaylaştırmak için özel bilgisayar programları da geliştirilmiştir. Küçük endüktanslı akımları açmada geçici aşırı gerilimler aşağıda önce teorik açıklamaya elverişli basit bir yaklaşımla, sonra uygulamaya yönelik yaklaşımlarla incelenmektedir [38-41].

3.4.1- Boşta Açmada Aşırı Gerilimler

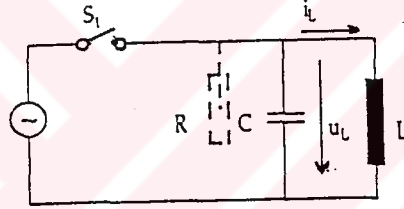
Boşta çalışan bir transformatörün açılmasında, işletme geriliminin iki katını geçebilen çok yüksek gerilimler oluşabilir. Genelde makine sargılarını ve değişik aygıtların

elektromıknatis bobinlerini açmada da görülen bu gerilimler, yalıtkanı zedeleyebilir ve daha sonraki delinmelerin nedeni olabilir.

Bu olayı tehlikeli kılan iki fiziksel neden vardır:

1. Açılan devrede önemli miktarda magnetik enerji biriktiren bir indüktans bulunması.
2. Kesiciler, alternatif akımları genellikle yaklaşık sıfırdan geçerken kestikleri halde, küçük endüktanslı akımları sıfıra ulaşmadan koparmaları ve böylece bir L, C titreşimi oluşturmaları.

Boşta açma, bir geçici olay olmasına rağmen, herhangi bir diferansiyel denklem kullanmadan Şekil-3.5'deki eşdeğer devre ile fiziksel olarak açıklanabilir.



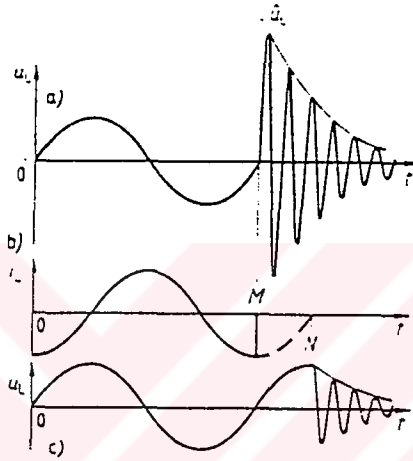
Şekil-3.5. Boşta çalışan bir transformatörün, genelde endüktanslı bir yükün en basit eşdeğer devresi. Burada R, yan geçiş direncini göstermektedir.

Bu açıklama bütün bobinler ve akım türleri için genel olarak geçerli olmakla beraber, burada transformatöre yöneliktir. Genel geçerliliği vurgulamak için yük gerilimi u_L , yük akımı i_L ile gösterilmiştir. Devrenin açıldığı anda boşta akım i_L ise, sistemin L endüktansında birikmiş belli bir W_m magnetik enerjisi vardır. Eşdeğer devrede kayıplar ihmal edildiğinde, açmadan sonra L, C devresinde oluşan titreşimler sırasında transformatör magnetik enerjisinin C birincil sargı kapasitesinde biriken W_e elektrostatik enerjisine dönüştüğü yazılabilir. Böylece elde edilen ve herhangi bir açma anı için genelde geçerli olan enerji denkleminden transformatör birincil uçlarında ortaya çıkan gerilimin genliği u_L bulunabilir.

$$W_m = \frac{1}{2} Li_L^2 = W_e = \frac{1}{2} Cu_L^2 \quad (3.4.1.1)$$

$$u_L = \sqrt{\frac{L}{C}} i_L \quad (3.4.1.2)$$

Bu denkleme göre açma gerilimi, transformatör boşa endüktansının kare kökü ve boşa akımın kopma değeri ile doğru, giriş kapasitesinin kare kökü ile ters orantılıdır.



Şekil-3.6. Küçük endüktanslı akımları açmada oluşan aşırı gerilimlerin akımı koparma anına göre değişmesi.

- a) Akım, en büyük değerinde koparıldığı andaki durum.
- b) Endüktanslı akımın değişimi.
- c) Akım sıfır iken kesildiği durum.

Belli bir transformatör için tek değişken boşa akımın kopmadaki ani değeridir. 0 halde, en büyük aşırı gerilim u_{Lmax} ani boşa akım en büyük değerini aldığı anda, yani genliğine eşit olduğunda elde edilir.

$$u_L = u_{Lmax} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{2} I_L \quad (3.4.1.3)$$

En elverişsiz açma anı boşta akımın en büyük, aradaki 90° faz farkı nedeniyle gerilimin sıfır olduğu andır. Diğer bütün açma anlarında aşırı gerilim daha küçük olur. Akım sıfır iken kesildiğinde, aşırı gerilim elde edilmez (Şekil-3.6). Transformatörün boşta endüktansı büyük, giriş kapasitesi küçük olduğundan, genelde açma gerilimi çok büyük olabilir ve uygun önlem alınmadığında transformatör yalıtkanını zedeleyebilir, hatta delebilir. Açmada oluşan titreşim bir L, C öztitreşimi olup, özfrekansı eşdeğer devre tarafından belirlenir. Bu frekansı hesaplayabilmek için endüktans ve kapasite gerilimlerinin eşitliğini yazmak yeterlidir. Böylece rezonans durumunda

$$W_0 L i_L = \frac{I_L}{W_0 C} \quad (3.4.1.4)$$

ve

$$W_0^2 = \frac{1}{CL} \quad (3.4.1.5)$$

ifadelerinden frekans denklemi aşağıdaki gibi bulunur:

$$f_0 = \frac{W_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}} \quad (3.4.1.6)$$

Titreşim özfrekansı pratikte 0,5....1 kHz kadardır. İncelenen geçici olayın iki temel büyüklüğü $u_{L\max}$ ve f_0 birbirinden bağımsız değildir. En büyük aşırı gerilim denkleminde koparma akımı en büyük değerinin denklemi yerleştirilirse, aralarındaki bağıntı

$$i_{L\max} = \sqrt{2}I = \frac{\sqrt{2}U_N}{\omega_L} \quad (3.4.1.7)$$

$$u_{L\max} = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{\sqrt{2}U_N}{\omega_L} = \frac{f_0}{f} \sqrt{2}U_N \quad (3.4.1.8)$$

olarak bulunur. Buna göre, en büyük açma gerilimi özfrekansın şebeke frekansına oranı ile şebeke gerilimi genliğinin çarpımına eşittir. Özfrekans artınca en büyük açma gerilimi de artar.

Yukarıdaki denklemleri uygulayabilmek için C ve L değerlerinin bilinmesi gerekir. C sargı ve izolatör kapasitesidir. Transformatör boşa akımı I_{10} veya birimsel değeri i_0 olarak bilinir ve birincil direnç, birincil kaçak indüktans, demir kayıp direnci ihmal edilirse

$$I_{10} = I_0 I_{1N} \quad (3.4.1.9)$$

esas indüktans L_{h1} hesaplanabilir ve L'ye yaklaşık eşit alınabilir:

$$L \approx L_{h1} = \frac{X_{h1}}{\omega} = \frac{U_{1N}}{\omega I_{10}} \quad (3.4.1.10)$$

Bu açıklamalar ışığında bir transformatörü boşa açmanın aşırı gerilim oluşturma bakımından yükte ve kısa devrede açmaya göre neden çok daha sakıncalı olduğu anlaşılabilir. Boşa çalışmada tehlikeyi artıran, açmada tüm birincil endüktansın etkili olmasıdır. Yükte çalışmada ise, çok daha küçük değerli olan kısadevre endüktansı etkilidir.

Yukarıdaki yaklaşım yapılabilecek en basit incelemedir. Kayıpların ihmal edildiği ve açma anında endüktans geriliminin sıfır varsayıldığı bu yaklaşımda endüktans gerilimi gözönüne alınmak istenirse, aşağıdaki enerji denkleminin yazılması gerekir:

$$\frac{1}{2} C u_{L_{\max}}^2 = \frac{1}{2} C u_L^2 + \frac{1}{2} L i_L^2 \quad (3.4.1.11)$$

Bu denklemden aşırı gerilimin kuramsal en büyük değeri aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$u_{L \max} = \sqrt{u_L^2 + \frac{L}{C} \cdot i_L^2} \quad (3.4.1.12)$$

Transformatörde önemli söndürüm etkisi yapan histerezis ve girdap akımı kayıpları burada da dikkate alınmamıştır. Formülde $u_L = 0$ alınırsa, önceki özel halin sonucu bulunur [43].

3.4.2. Aşırı Açma Gerilimlerinin Hesaplanması

Küçük endüktanslı akımları açmada oluşan aşırı gerilimler pratikte büyük önem taşıdıklarından, eskiden beri ölçerek ve hesaplanarak incelenmiştir. Hesaplama aşırı geriliminin yukarıda verilen basit denklemleri yeterli olmaz ve olayı daha derinliğine incelemek gerekir. Önce endüktansta biriken magnetik enerji dikkate alınır. Bir çalışma noktasında var olan magnetik enerji, demirden magnetik devrelerdeki histerezis ve girdap akımı kayıpları nedeniyle hiçbir zaman tam olarak geri verilemez. Histerezis ve girdap akımı kayıplarının yaptığı azaltma, dış devreye geri verilen W_2 magnetik enerjisinin, endüktansın aldığı W_1 enerjisine oranı olarak tanımlanan magnetik verim kavramı ile ifade edilir:

$$\eta_m = \frac{W_2}{W_1} \quad (3.4.2.1)$$

Açma titreşimlerinin frekansı büyük olduğundan, transformatörlerde magnetik enerji kaybı büyük dolayısıyla magnetik verim düşüktür ve %30.....50 kadardır. Ancak bu verim değeri devresi açılan yüke bağlıdır ve yaklaşık olarak aşağıdaki değerleri alır:

<u>Yük</u>	<u>Magnetik verim</u>
Boşta transformatör	0,3...~0,5
Boşta transformatör önce kapatılır, sonra açılırsa	>0,5

Reaktansla yüklenen transformatör	1
Yüksek gerilim bobini	1
Havalı bobin	1
Boşta yüksek gerilim motoru	1

Magnetik enerji azalması magnetik verim ile gözönüne alındığında, en büyük aşırı gerilim oranı için şu denklem elde edilir:

$$k_{u \max} = \frac{u_{L \max}}{\sqrt{2}u / \sqrt{3}} = \sqrt{nm} \cdot \frac{f_0}{f} = \sqrt{\frac{\eta_m \cdot \sqrt{3}I_L}{2nf \cdot U \cdot C}} \quad (3.4.2.2)$$

Burada

- U : İşletme hat gerilimi.
- $u_{L \max}$: Aşırı faz gerilimi.
- I_L : Boşta akım.
- C : Faz başına kapasite.

olarak kullanılmıştır.

Modern transformatörlerde kullanılan soğuk haddelenmiş saçlarda magnetik enerji kayıpları daha büyüktür. Titreşim frekansının büyüklüğü de magnetik verimi azaltıcı etki yapar. Yukardaki denklemden görüldüğü gibi, modern transformatörlerde verimin azalması aşırı gerilim oranını düşürür.

Magnetik verimin göz önüne alınmasından sonra aşırı açma geriliminin hesaplanmasında bir düzeltme daha yapılabilir. Kesicinin açtığı anda transformatörün hem boşta endüktansında, hem de kapasitesinde enerji birikmiş olduğu düşünülürse, bu iki enerjinin toplamının kapasitede birikeceği

$$\frac{1}{2}Cu_{L\max}^2 = \frac{1}{2}Cu_L^2 + \eta_m \cdot \frac{1}{2}Li_L^2 \quad (3.4.2.3)$$

yazılabilir ve böylece olayın daha doğru bir denklemi aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$u_{L\max} = \sqrt{u_L^2 + \eta_m \cdot \frac{L}{C} \cdot i_L^2} \quad (3.4.2.4)$$

veya

$$u_L = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}u \quad (3.4.2.5)$$

ve

$$k_{u\max} = \sqrt{1 + \frac{3}{2}\eta_m \frac{L}{C} \cdot \frac{i_L^2}{u^2}} \quad (3.4.2.6)$$

Bu denkleme göre hesaplamada son bir güçlük kalır. O da, L endüktansının hesaplanması veya ölçülmesidir. Güçlük, boşa çalışan transformatörün magnetik bakımdan doymalı bir noktada çalışmasıdır. Doymada çalışan ferromagnetik düzenlerde endüktansın birçok tanımı vardır ve hesaplanan büyüklüğe göre uygun tanımın seçilmesi gerekir. Burada, uygulanması gereken alışılmış akı endüktansı

$$L_F = \frac{\Psi}{I} \quad (3.4.2.7)$$

değil, doymalı devrelerde ondan farkı olan enerji endüktansı

$$L_F = \frac{2W_m}{I^2} \quad (3.4.2.8)$$

şeklindedir. Bu gibi durumlarda magnetik enerjinin, endüktans kavramını kullanmadan aşağıdaki ifade ile doğrudan hesaplanması tavsiye olunur:

$$W_m = \int_0^{B_{\max}} I \cdot d\psi = V \cdot \int H \cdot dB \quad (3.4.2.9)$$

$$k_{u \max} = \sqrt{1 + 3\eta_m \frac{W_m}{CU^2}} \quad (3.4.2.10)$$

Burada V, magnetik devrenin hacmidir. Hesaplamayı yapabilmek için $\phi = f(I)$ veya $B=f(H)$ magnetik özeğrisinin bilinmesi gerekir.

Yukarıdaki inceleme tek fazlı transformatörler için yapılmıştır. Üç fazlı transformatörlerde magnetik akıların birbiriyle bağlantılı olması, olayı daha karmaşık yapar [43].

3.4.3. Kesicinin Zorlanması

Kesicilerin zorlanması bakımından kestikleri akımlar güç katsayısına göre üç sınıfa ayrılır:

1. Endüktanslı akımlar: $\cos\phi < 0.3$

Bu tür akımlar, boşa çalışan veya reaktanslarla yüklü transformatörlerde, bobinlerde, kesici yakınında oluşan kısa devrelerde, transformatör ikincil yanındaki veya iletim hatlarındaki kısa devrelerde, faz karşıtlığında (aynı fazda olmayan şebeke bölümlerinin birleştirilmesi, senkronluktan çıkma...), toprak hatalarında v.b. gibi görülür. Şebeke kısa devreleri genelde daima endüktanslı olur.

2. Dirençli ve endüktanslı akımlar: $0.3 < \cos\phi < 1.0$

Şebekelerde kesicilerin kestiği akımlar en çok bu türdendir.

3. Kapasiteli akımlar: $\cos\phi < -0,3$

Bu tür akımlar kondansatör bataryalarında, boşa çalışan hava hatlarında ve kablolarda görülür.

Bir açmada oluşan aşırı gerilimler kesicileri zorladığından, özellikle önemlidir. Dirençli ve endüktanslı akımlar aşırı gerilim oluşturmaz ve kesiciyi aşırı gerilimle zorlamaz. Buna karşılık, edüktanslı ve kapasiteli akımlar daima aşırı gerilim üretir ve gerek kesicilerde gerek oluştukları donanımda özel önlemlerin alınmasını gerektirir. Özellikle 100A'in altındaki küçük endüktanslı akımları açmada ilginç olaylar görülür ve önemli aşırı gerilimler elde edilebilir. Bunun fiziksel nedeni, küçük endüktanslı akımların tabii sıfırdan geçişinden önce kesici tarafından koparılmasıdır. Koparma ile devrenin açıldığı anda, bir endüktansta bulunan magnetik enerji artık şebekeye dönemez ve bu endüktansa paralel bağlı gibi etki yapan kapasitenin elektrostatik enerjisine dönüşür. Böylece oluşan sönümlü titreşim sırasında endüktans uçlarında bir aşırı gerilim elde edilir. Bu aşırı gerilim, kesici uçları arasındaki gerilimlerin de yükselmesine neden olur. Bunun sonucunda kesici uçlarında tekrar ateşlemeler (restriking) görülebilir. Bu ateşlemeler pek zararlı sayılmaz, çünkü her ateşlemede endüktanstaki magnetik enerjinin bir bölümü tüketilir ve böylece oluşan aşırı gerilimin genliği azalır.

Açmada oluşan gerilimin formülüne göre, bu gerilim açma anındaki akım değeri ile orantılıdır. Transformator boşa akımın sıfır olduğu anda açılırsa, aşırı gerilim oluşmaz. Bu olasılık zayıf olduğundan, genellikle aşırı bir gerilim ile karşılaşılır. Ancak akımın etkisi bakımından alternatif gerilim doğru gerilime göre daha az aşırı gerilim üretir. Alternatif gerilimde diğer önemli bir özellik kesicilerin genellikle akımın sıfır olma bölgesinde açmasıdır.

Endüktanslı akımları açarken oluşan aşırı gerilimler kritik durumlarda bir tesisin yalıtımı için tehlikeli değerlere çıkabilir. Bu gerilimlere karşı şu önlemler alınabilir:

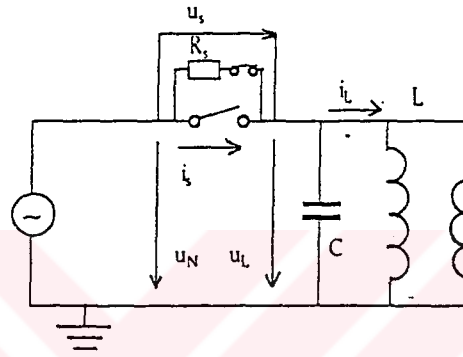
1. Transformatör uçlarına parafudr bağlayarak, aşırı gerilimlerin düzeyi düşürülebilir. Bu tür dirençler transformatörleri atmosfer aşırı gerilimlerine karşı korumak için zaten kullanılmak zorundadır. Böylece ikinci bir işlev yüklenirler ve açmadan kaynaklanan aşırı gerilimleri de tehlikesiz değerlerde sınırlayabilirler. Kesicilerde direnç basamakları kullanılmak istenmez ise, daha büyük aşırı gerilim oranlarına izin vermek gerekir. 420 kV'a kadar yüksek gerilim hatlarına bağlı transformatörlerde direnç basamağı kullanılmadan yapılan şebeke deneylerinde aşırı gerilim oranınının 2.5'i geçmediği görülmüştür.

Aynı amaçla, küçük güçlü alçak gerilim bobinlerinin (kontaktörler, vanalar...) uçlarına varistör (değeri gerilimle değişen direnç elemanı olup, variable resistor sözcüklerinin ilk ve son hecelerinden türetilmiştir), RC devresi, özel diyod gibi elemanlar bağlanır. Elektronik ve güç elektroniği düzenlerinin açma aşırı gerilimlerinden zarar görmemesi için bu tür elemanların kullanılması özellikle önemlidir.

2. Akımı tabii sıfır noktasından önce koparan ve böylece endüklenen gerilimi yükselten büyük güçlü kesicilerin uygulanmasından kaçınılır. Sert kesici denen bu tür kesiciler transformatör yalıtkanını kolayca zedeleyebilir.

3. Açma aşırı gerilimlerine karşı eskiden beri kullanılan bir genel yöntem, kesici kutupları arasına bir direnç basamağının bağlanmasına dayanır. Kesici açtıktan sonra devre paralel bağlı direnç üzerinden açılır ve böylece aşırı gerilimlerin oluşması önlenir. Yüke bağlı olarak, değerleri yaklaşık birbirine uyumlu seçilen dirençler vasıtasıyla açma aşırı gerilimleri izin verilen değerlere zor şartlarda bile kesinlikle düşürülebilir. Sekil-3.7, direnç basamaklı bir kesicinin ilkesel bağlanmasını göstermektedir. Küçük endüktanslı akımlara göre daha kritik bir durum, boşta iletim hatlarını özellikle önceden yüklenmiş olduklarında kapamaktır. 360.....765 kV gerilimlerde kapama için kutup başına gerekli basamak direnci 200....1000 Ω kadardır. Endüktanslı akımları açmada ise bu değer 500....5000 Ω arasında seçilir. Eğer bir kesici hem kapama, hem de açma için dirençle donatılacaksa, o zaman direnç değeri her iki aralığa uygun olarak 500....1000 Ω

arasında alınabilir. Böylece, açma kapama aşırı gerilimlerini sınırlamak için teknik ve ekonomik bakımdan uygun bir çözüm gerçekleştirilmiş olur. Örneğin bu sınırlama yöntemleri ile en büyük kapama aşırı gerilim oranı 4'ten 1,7...2'ye düşürülür. Aşırı gerilimler bir sistemin yalıtım düzeninin boyutlanmasında belirleyicidir. Yalıtım düzeyi seçildikten sonra aşırı gerilimlerin izin verilen sınır değeri geçmemesi istenir. Bu bakımdan küçük endüktanslı akımları açma önemlidir. Şebekelerde açma kapama aşırı gerilimlerinin küçük olması istendiğinde, direnç basamaklı kesiciler ile etkili bir sınırlama gerçekleştirilebilir [43].



Şekil-3.7. Direnç basamaklı bir kesicinin ilkesel bağlaması. R_s , aşırı gerilim önleyici direnç.

3.4.4. Tekrar Tutuşma Olayları

Akım kopmasının bir sonucu olarak görülen titreşimli aşırı gerilim, kesici kontakları arasındaki aralığın dayanma gerilimini ani olarak aşarsa, ark tekrar tutuşacaktır. Sonuç olarak, bir yüksek frekanslı akım kesicinin yük tarafı ve kaynak tarafındaki gerilimler arasındaki fark ile elde edilen bir büyüklükte kesici üzerinden akacaktır. Bu tutuşma, hemen sonra tekrar kesilebilir ve böylece, bir akım kesilmeler ve yeniden tutuşmalar zinciri oluşması ihtimali vardır. Bu şartlar altında, büyük aşırı gerilim değerleri üretilebilir ve gerilim yükselmesi olarak bilinen durum ortaya çıkabilir. Yeniden tutuşma olayının detaylı bir tanımlaması referans 40 ve 41'de verilmektedir. Akım

kopması ve yeniden tutuşmaların etkileri anahtarlama dirençleri kullanılarak minimuma indirilebilir.

3.4.5. Akım Kopması

Kesici arkının yeniden tutuşması, güç frekanslı akım üzerine bindirilen bir geçici akımın akmasına ve böylece kesiciden geçen toplam akımın sifıra düşmesine sebep olabilir. Sonuç olarak kesici, güç frekanslı akım sıfırından önce kesme yapabilir ve eğer yük devresi endüktif karakterli ise, yükte kesme olayı sanki güç frekanslı akım koparılmış gibi meydana gelir. Bu olay hakiki (virtual) akım kopması olarak bilinir. Daha çok orta gerilim motorları ve ark fırını transformatörlerinin anahtarlanması için sıklıkla kullanılan vakum kesicilerin bulunduğu endüstriyel tip sistemlerde meydana gelir. Vakum kesiciler bakım gerektirmeksizin pekçok sayıda kesmeye maruz kalma kabiliyetlerinden dolayı bu tür uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Fakat yüksek kesme kapasitelerinden dolayı bir yüksek frekanslı akım sıfırında yeniden bir tutuşmanın sonucu olarak, akan akımı kesebilirler [42-45,47].

Bu olay tam anlamıyla bir akım kopması değildir ve terminallerinde toprağa göre bazı kapasitelerin mevcut olduğu, endüktif yükün kesildiği bir devrede meydana gelebilir. Bu kapasite, kısa uzunluktaki bir kablunun kapasitesi veya bir darbe kapasitesi olabilir. Eğer yük akımı kesiliyorsa, anahtarın her üç fazının kontakları da ayrıldığında ark meydana gelir. Akım sıfırı ilk olarak bir fazda oluşacak ve kesme işlemi yapılacaktır. Eğer bu faz, meydana gelen toparlanma gerilimine karşı dayanamazsa, kontak aralığının küçük olmasından dolayı tekrar tutuşma olayı oluşacak ve yüksek frekanslı bir geçici akım meydana gelecektir. Bu akım, yeniden tutuşmuş olan fazda güç frekanslı akıma bildirilir ve nötr bağlantısı ile diğer iki faz üzerinden devresini tamamlar. Sonuç olarak, yüksek frekanslı akım sıfırları her üç fazda da görülebilir. Bundan dolayı hakiki akım kopması sadece yeniden tutuşmanın olduğu faz ile sınırlı değildir, diğer iki fazda da meydana gelebilir. Bu tür kesmeler, tekrarlı yeniden tutuşmalara ve gerilim yükselmesine sebep olabilir. Literatürde [42,46,47] tartışıldığı üzere hakiki akım

kopması, devre parametrelerinin değerlerine ve devrenin konfigürasyonuna bağlıdır. Hakiki akım kopmasının oluşmasını önlemek amacıyla çeşitli ölçü aletleri kullanılabilir.

Boşta çalışan bir güç transformatörünün 1.2-2 A civarında olan mıknatıslanma akımlarının kesilmesi sırasında oluşabilecek olan akım kopması olayı incelenirse; transformatörün magnetik enerjisi ile transformatörün endüktansında bu suretle depolanmış durumda kalan enerjinin beraberce bir anormal aşırı gerilimin meydana gelmesine sebebiyet verdikleri görülür. Akım kopması anında akımın değerinin I_0 olduğu varsayılırsa, bu anda transformatörün magnetik enerjisi

$$\frac{1}{2}L_m i_0^2 \quad (3.4.5.1)$$

ifadesi ile verilir. Mıknatıslanma akımı, transformatörün tam yük akımının % 1'i kadar olduğuna ve I_0 da bunun bir parçası olduğuna göre I_0 oldukça küçüktür. Fakat transformatörün mıknatıslanma endüktansı L_m oldukça büyük olduğundan ifadedeki magnetik enerji değeri oldukça büyük olacaktır. Bir endüktif devrede akım birdenbire kesilemez. Bu akım sistem kapasitesini doldurmaya başlar (Bu kapasite esas itibariyle transformatörün sargılarının kapasitesinden ibarettir). Eğer bu C kapasitesi biliniyor ise, bunun dolduktan sonraki u geriliminin tepe değeri şöyle hesaplanabilir:

$$\frac{1}{2}Cu^2 = \frac{1}{2}L_m i_0^2 \quad (3.4.5.2)$$

Ve buradan da

$$u = i_0 \left(\frac{L_m}{C} \right)^{1/2} \quad (3.4.5.3)$$

Burada

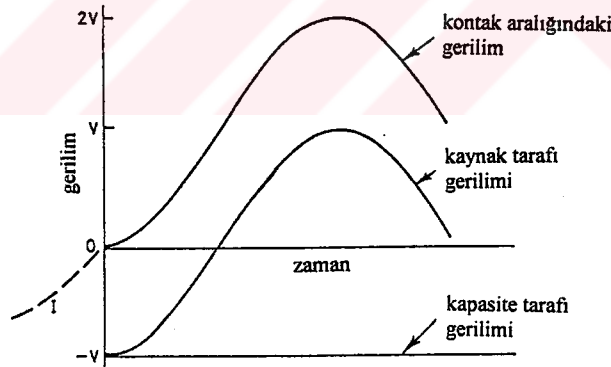
$$Z_0 = \left(\frac{L_m}{C} \right)^{1/2} \quad (3.4.5.4)$$

ile belirlenir. Görüldüğü gibi gerilim, akımın koparma anındaki değeri ile transformatörün dalga empedansının çarpımından elde edilmektedir. Dikkat edilirse bu ifedede sistem gerilimi yoktur. Buradan da açıkça anlaşıldığı üzere sistem geriliminin büyük veya küçük olmasının akım koparılması sonucu meydana gelen aşırı gerilimlere bir etkisi yoktur [41].

3.5. Kapasitif Akımın Kesilmesi

3.5.1. Tek fazlı devreler

Kapasitif akımın kesilmesi bir iletim hattını veya bir kapasitör bankının bir bölümünü ilgililendirdiğinde, ark söndürülmesi olayı akım sıfırında meydana gelir ve tek fazlı bir durum için Şekil-3.8'de gösterildiği gibi, kapasitör ve hat üzerinde tutulan bir şarj gerilimi (trapped charge voltage) kalır.

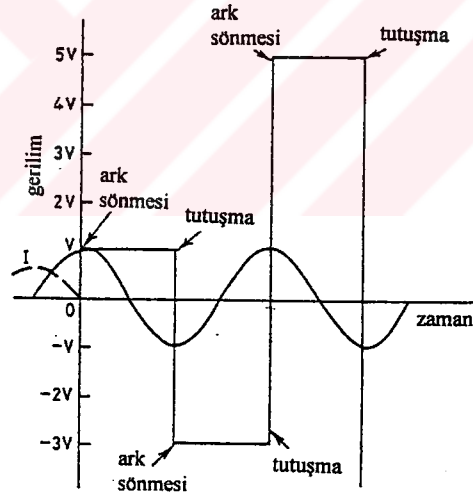


Şekil-3.8. Kapasitif akımın kesilmesi.

Bu tutulan şarj gerilimi genlik olarak kaynak geriliminin V pik değerine eşittir. Bundan dolayı kesici üzerinde ilk anda görülecek gerilim nispeten küçüktür. Bu sebeple kesilmenin gerçekleşmesi için şartlar müsait olduğundan, ark söndürülmesi kontakların ayrılmasından sonraki ilk akım sıfırında meydana gelir. Kaynak tarafındaki gerilim güç

frekansında değişim göstermektedir. Bu sebeple, kesici üzerindeki gerilim, kesilme işleminden sonraki ilk yarım peryoda kadar sinüsoidal olarak oluşur (Bu gerilim $2.V$ değerine ulaşır). Başarılı bir kesmenin oluşması için, kontaklar arasındaki aralığın $2.V$ 'ye dayanması gereklidir. Bu gerilim, kaynak geriliminin pik değerinin iki katı olan, ark söndürülmesinden sonraki ilk yarım periyotluk gerilimdir. Eğer kontaklar arasındaki mesafe kontaklar arasındaki gerilime dayanmazsa bir tekrar tutuşma (restrike) oluşacaktır. Bunun ark söndürülmesinden bir yarım periyod sonra olduğu varsayılırsa, kontaklar arasındaki gerilim $2.V$ 'lik bir değerden hemen sonra sıfıra düşecektir. Bu durum, sistem endüktansı içindeki kapasitörde tutulan şarj geriliminin deşarjı ile olmaktadır. Kapasitördeki gerilim, sistemin kapasitesi ve endüktansı ile frekansı belirlenen bir osilasyon oluşturarak kaynak taraındaki gerilime ulaşmaya çalışır.

Şekil-3.9'de gösterildiği üzere, kapasitördeki gerilim $+V$ 'den $-V$ 'ye $2.V$ 'lik bir geçiş gösterir. Böylece kayıplar ihmal edildiğinde toprağa göre $3.V$ 'lik bir pik değere ulaşabilir.



Şekil-3.9. Tekrar tutuşma durumunda kapasitif akımların kesilmesi.

Bu gerilim tepe değerine ulaştığında, bununla ilişkili bulunan geçici akım, sıfırdan geçer ve böylece kesme için bir fırsat sağlanır. Pratikte, bazı azaltıcı etkiler (damping) mevcut olacaktır ve kontaklar üzerinde gelişen gerilim etkisi, tekrar tutuşmadan önceki kadar

büyük olabilir ve bu şartlar altında kesme işlemi mümkün olur. Eğer kesme işlemi oluşursa, kapasitör -3.V'lik bir gerilimde kalır ve yarım periyod sonra da kaynak tarafı gerilimi +V olur. Böylece kontaklar arasındaki gerilim 4.V olmuştur. Bu periyod esnasında kontaklar birbirinden daha da uzaklaşır ve böylece kesici daha büyük bir gerilime dayanma imkanına sahip olur. Daha büyük bir tekrar tutuşmanın oluşup oluşmayacağı ise, aralığın dielektrik dayanımına bağlıdır. Bu koşullar altında bir tekrar tutuşma oluşursa, Şekil-3.9'de gösterildiği gibi kapasitör toprağa göre 5.V'lik bir gerilime ulaşacaktır. Birleşik yüksek frekanslı akım kesilirse 5.V'lik bu gerilim kapasitör üzerinde tutulacaktır.

Teorik olarak bu gerilim V'nin tek katlarına ulaşmak için sürebilir. Fakat pratikte söndürme (damping) mevcuttur ve tekrar tutuşmaların kaynak gerilimi tepe değerine ulaşmadan önce oluşması muhtemeldir. Muhtelif tekrar tutuşmalara maruz kalabilen bir kesicide, gerilimin oluşumu Şekil-3.9'de gösterildiği kadar hızlı olmayacaktır. Çünkü kontak aralığı, bir gerilim sınırlayıcısı olarak davranır. Bu koşullar, anahtarlama dirençlerinin kullanımı ile hafifletilebilir.

3.5.2. Üç-Fazlı Devreler

Nötrü topraklı olan üç fazlı iletim hatları ve üç fazlı kapasite banklarının birbirinden bağımsız üç ayrı tek fazlı devre gibi davrandığı düşünülebilir ve böylelikle Bölüm 3.5.1 de verilen tanımlamalara uygunluk gösterilir. Nötr noktası topraksız üç fazlı kapasite bankları olması durumunda şartlar çok daha karmaşıktır. Bu durum, temizlenmesi gereken ilk faz için aşağıda verilen ifadedeki toparlanma gerilimi V_R 'den görülebilir [16]:

$$V_R = 1.5V[1 - \cos\omega(t - t_a)] \quad (3.5.2.1)$$

Burada

- V : faz-nötr geriliminin pik değeri
 t_a : temizlenecek olan ilk fazda kesme işleminin yapıldığı süre

olarak kullanılmıştır.

Toparlanma geriliminin piki $3.V$ 'lik bir değere sahiptir ve t_a 'dan yarım periyot sonra meydana gelir. Bu durum, nötr noktası topraklı tek faz ve üç faz durumlarında ortaya çıkan $2.V$ değeri ile karşılaştırılabilir [16,17,48-50].



4. BÖLÜM

SİSTEMİN ENERJİLENDİRİLMESİ NETİCESİNDE MEYDANA GELEN AŞIRI GERİLİMLER

400 kV ve üzerindeki iletim gerilim seviyelerinde, iletim hatlarının enerjilendirilmesinin sebep olduğu geçici aşırı gerilimler gerekli izolasyon seviyesinin karşılaştırılmasında artan bir öneme sahip olmaktadır [51,70-85]. Temel olarak problem, bir iletim hattı boyunca yürüyen bir gerilim darbesi problemidir. Yürüyen dalga teorisi şunu göstermektedir: Bu tür bir darbe gerilimi bir açık devre ucuna ulaşırsa aynı işarette yansır ve bu uçtaki gerilim gelen gerilim darbesinin iki katı kadar bir değer alır. Sonuç olarak; bir hat, kaynak gerilim dalgasının pik değerinde enerjilendirilirse (1 p.u.), hattın açık ucunda 2 p.u.'luk bir gerilim oluşacaktır. Pratikte gerilimin genliği özel sistem koşullarından etkilenir. Bu koşullar enerjilendirme anında mevcut olan koşullardır ve bazı şartlar altında bu gerilim 2 p.u.'ya kadar ulaşabilir.

4.1. Hattın Enerjilendirilmesi Neticesinde Meydana Gelen Aşırı Gerilimlerin Genliğine Etki Eden Faktörler

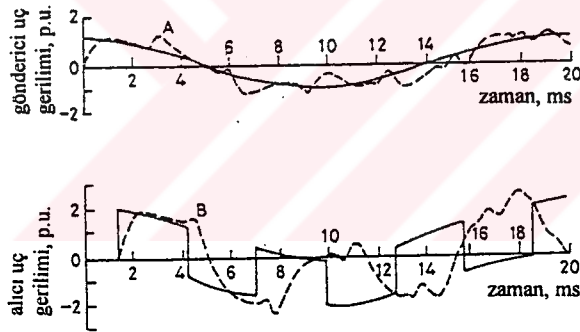
Hattın enerjilenmesi neticesinde meydana gelen aşırı gerilimlerin genliğine etki eden ve literatürde ele alınmış bulunan [52-63] pek çok faktör vardır.

4.1.1. Kaynak

Bir iletim hattının enerjilendiği kaynak, bir hat enerjilendirildiğinde üretilen geçici gerilimin genliğine üzerinde dikkate değer bir etkiye sahiptir. Bu etki, hatta uygulanan gerilim darbesinin şeklini tayin ettiği gibi, hattın açık ucundan geri dönen dalgalar vasıtasıyla karşılanan gönderme katsayısı ve yansıma katsayısını (sending and reflection coefficient) da belirler. Pratikte kaynak karakteristikleri çok değişkendir. Bu değişim

sadece generatör ve transformatörler vasıtasıyla beslenen kaynak baralarının olması durumunda saf bir endüktif karakteristikten, sadece iletim hatları ve kabloları ile beslenen kaynak baralarıyla elde edilen rezistif karakteristikli bir kaynağa kadar geniş bir alanda oluşmaktadır. Bu iki uç durum arasında çeşitli kombinasyonların bir varyasyonu da mevcut olabilir.

Bir iletim hattı bir endüktif kaynak tarafından enerjilendirildiğinde, hatta oluşturulan geçici gerilimlerin genlikleri ve dalga şekilleri üç zaman faktörüne bağlıdır [59,63]. Bu durum, Şekil-4.1'deki dalga şekilleriyle gösterilmektedir. Şekilde gösterilen dalga şekilleri, endüktif bir kaynaktan kaynak gerilim dalgasının pik değerinde enerjilendirilen bir hattın enerjilendirilmesi sırasında hat üzerinde oluşturulan gönderici uç gerilimini (sending end voltage) ve alıcı uç gerilimini (receiving end voltage) göstermektedir. Sonsuz bir bara kaynağından enerjilendirme yapılabilmesi amacıyla ve karşılaştırma yapabilmek amacıyla çeşitli dalga şekilleri gösterilmektedir.



Şekil-4.1. Gönderici ve alıcı uç gerilimleri.

—— sonsuz bara kaynağı.

..... 0.1H'lik endüktif kaynak.

İlk olarak, hat enerjilendirildiğinde gönderici uçtaki gerilim sınırsız bir bara kaynağı durumunda olduğu gibi, bir ilk basamak değişimi sergilemez. Fakat bu gerilim, hattın karakteristik empedansı ve kaynağın endüktansı ile belirlenen zaman sabitli bir güç frekans gerilimine doğru eksponansiyel olarak yükselir. Bu ilk eksponansiyel artış,

hattın alıcı ucunda da meydana gelir ve gerçekte çok yönlü yansımalarından dolayı oluşur. Ekspansiyonel değişimler bu dalga şekillerinin her ikisi boyunca açıkça görülebilir. Bu ekspansiyonel değişimlerin olduğu zaman aralıkları ikinci zaman faktörü ile (second time factor) yani hattın propagasyon süresi ile belirlenir. Gönderici uç dalga şeklinin A piki, alıcı uçtan yansıyıp gönderici uca ulaşan ilk yansımaya ve kaynak endüktansındaki çarpmaya bağlıdır. Bu pik alıcı uca gönderilir ve alıcı uç dalga şeklinde B piki olarak görülür. Ondan sonra çeşitli yansımalarından dolayı bu pikler hattın yayılma süresinin iki katına eşit sürelerde dalga şekilleri üzerinde tekrar görülür. Bu süreler arasındaki ekspansiyonel değişimler, yukarıda bahsedilen ekspansiyonel değişimleri ifade etmektedir. Bütün bu değişimler, zamana karşı değişimin üçüncü zaman faktörünü (third time factor) veren güç frekanslı gerilim dalga şekli üzerine bindirilir. Şekil-4.1'deki dalga şekilleri kayıplar dikkate alınmaksızın hesaplanır ve pratikte sistemin kayıpları, bu geçici gerilimlerin sadece güç frekans geriliminden ayrılarak sönmelerini temin eder. Verilen yapıdaki bir hat ve bunun sabit karakteristik empedansı için, kaynak endüktansının değişimi ekspansiyonel değişimlerin zaman sabitini değiştirecek ve hat uzunluğunun değişimi de A ve B piklerinin meydana geldiği zaman aralığını değiştirecektir. Bu tür değişimler gönderici ve alıcı uç gerilimlerinin dalga şekillerini değiştirecektir ve geçici gerilimlerin genliğinde değişiklikler yapacaktır. Enerjilendirilen bir hat uzunluğu için şu bulunabilir: Eğer kaynak endüktansı belli bir değerin üzerine çıkarılırsa, alıcı uç geriliminin genliği artan endüktans değerleriyle birlikte sürekli olarak artmaya başlar. Aşırı gerilimdeki bu sürekli artış, şartların güç frekansında rezonansa yaklaşıyor olduğunu gösterebilir. Hattın kaynak endüktansı ve şönt kapasitesi ile verilen ve tabii frekansa bağlı olan bu rezonans, düşüktür ve enerjilendirilen daha uzun bir hat için ve daha büyük kaynak endüktansı için güç frekans değerine çok daha fazla yaklaşır. Güç frekanslı rezonansa yakın koşullar altında, önceden yerleştirilmiş olan dirençler gerçekte yetersiz kalır ve büyük aşırı gerilimleri (bu aşırı gerilimler, geçici aşırı gerilimlerden ziyade söndürülen aşırı gerilimlerdir) düşürebilmek için hat kapasitesini şönt reaktörler vasıtasıyla kompanse etmek gerekli olur. Maksimum aşırı gerilimler, kaynak endüktansı ve hat uzunluğuna bağlı olarak çizilen aşırı gerilimlerin

dış sınırları formunda temsil edilirse bütün dalga şekli (bütün resim) açıklanabilir [59,60].

Bir iletim hattının sadece iletim hatlarının bağlı bulunduğu bir kaynak barasından enerjilendirilmesi durumunda, bu kaynak ilk olarak rezistif görünecektir. Fakat bu durum sadece kaynak hatlarının uçlarından yansımalar geri dönünceye kadar hüküm sürecektir. Bu ilk periyodun süresi, kaynak tarafındaki hatların uzunluklarına ve uçlarının yapısına bağlıdır.

Kaynak tarafındaki iletim hatlarının ve enerjilendirilen hattın aynı Z_c karakteristik empedansına sahip olduğu varsayılırsa ve R_e , kaynak hatlarının eşdeğer karakteristik empedansı olarak tarif edilirse, kesici kapandığında enerjilendirilen hatta uygulanan gerilimin başlangıç değeri şu formül ile verilir:

$$V_L = V \frac{Z_c}{R_e + Z_c} \quad (4.1.1.1)$$

Kaynak içerisinde iletilen basamak gerilimi ise

$$V_s = -V \frac{R_e}{R_e + Z_c} \quad (4.1.1.2)$$

olarak verilir. Burada V , kesicinin kapanmasından hemen önce kesici üzerinde görülen gerilim olarak kullanılmıştır. Hatta uygulanan gerilimin ilk basamağı, kaynak tarafındaki hatların sayısına bağlıdır ve $R_e = Z_c$, $V_L = 0.5V$ durumlu yalnız bir kaynak hattı mevcut olduğunda, en küçük değerde olacaktır. Bu basamak gerilimi hattın alıcı ucuna gider. Burada +1'lik bir yansıma katsayısı ile yansır (açık devreden dolayı) ve kaynağa geri döner. Kesici o anda kapatıldığında, böylece basamak gerilimi bir K_R katsayısı ile tekrar yansiyacaktır. K_R katsayısının değeri, kaynak tarafı hatlarının sayısına

bağlıdır. Bir kaynak hattı mevcut olduğunda K_R sıfır olur. Kaynak tarafında iki hat bulunması durumunda ise

$$K_R = \frac{R_e - Z_c}{R_e + Z_c} = \frac{0.5Z_c - Z_c}{0.5Z_c + Z_c} = -\frac{1}{3} \quad (4.1.1.3)$$

olacaktır. Kaynak tarafına daha fazla hat ilave edildiğinde K_R katsayısı daha büyük bir negatif değer alacaktır ve R_e 'nin sıfır olduğu sonsuz bara durumunda ise, yani sonsuz hat bu baraya bağlı olursa, -1'e doğru bir eğilim gösterecektir.

Daha genel olarak kaynağın lokal üretim, transformatörler ve iletim hatlarının bir karışımını içerdiği söylenebilir. Böyle durumlarda başlangıç olarak, değeri hatların karakteristik empedanslarının paralel kombinasyonları ile verilen bir direnç ile paralel bağlı olan bir endüktansın etkisi, hat üzerindeki gerilim dalgasına olan etkiyi temsil eder. Geçici durumun ilk bölümü sırasında bu endüktans küçük bir etkiye sahiptir. Kaynak hatlarının uzak uçlarının etkileri, gerilimin dalga şeklini bu uçların yapısına bağlı olacak şekilde etkiler.

4.1.2. Reaktif Kompanzasyon

Uzun yüksek gerilim hatlarını sürekli hal koşulları altında tatmin edici bir şekilde işletmek amacıyla şönt reaktörlerle üretilen kapasitif reaktif gücün kompanze edilmesi zorunludur. 400 kV'un üzerindeki daha yüksek gerilimlerde bu reaktörler, üç uçlu transformatörlerin kullanılması durumunda transformatörün üçüncü ucundan ziyade, daha çok yüksek gerilim hattına direkt olarak bağlanır. Hatlar enerjilendiğinde bu şönt reaktörler hatta direkt olarak bağlı ise enerjilendirme aşırı gerilimlerini düşürücü rol oynarlar [52,59,63]. Bahsedilen bu düşürme miktarı, hattın uzunluğu ile ilişkili olarak şönt reaktörün büyüklüğüne ve onun sistemdeki pozisyonuna bağlıdır. Genelde reaktör, hattın alıcı ucuna bağlandığından daha büyük bir düşürme beklenebilir.

Zayıf kaynaklar (büyük endüktans) için, önceden yerleştirilmiş olan dirençler, kaynağın tabii frekansı gibi enerjilendirme aşırı gerilimlerini düşürmekte oldukça yetersiz kalır ve hattın güç frekans değerine yaklaşır. Bu şartlar altında aşırı gerilimler, şönt reaktörler yardımıyla hat kapasitesinin kompanse edilmesiyle düşürülebilir. Bu durumun çok uzun iletim hatlarının enerjilendirilmesinde oluşma olasılığı çok yüksektir ve böyle durumlarda, diğer sebeplerden dolayı şönt reaktör kompanzasyonunun yapılması muhtemeldir.

Araştırmalar, sadece seri kapasite kompanzasyonuna haiz bir hat [56] için, enerjilendirme aşırı gerilimlerindeki düşürme etkisinin küçük olduğunu göstermiştir. Hem seri kapasitör hem de şönt reaktör kompanzasyonunun yapıldığı yerlerde, rezonans osilasyon koşulları ve ferrerezonans osilasyonlarının durumları ortaya çıkabilir. Bu tür osilasyonlar çok sürekli bir yapıya sahiptir ve normalde geçici (temporary) aşırı gerilimler olarak sınıflandırılırlar.

4.1.3. Artık Yük

Her üç fazı kapsamayan iletim hattı arızalarının temizlenmesi, arızasız fazların sistemin faz-nötr geriliminin pik değeri kadar bir gerilimle yüklü kalmasıyla sonuçlanır. Bu tür bir hatta arızanın giderilmesi arızasız fazlarda aşırı gerilimler üretebilir. Bu aşırı gerilimler belirli şartlar altında atlamalara sebep olacak kadar büyük olabilir. Tekrar kapamadan dolayı üretilen bu aşırı gerilimlerin genliği, hatta tutulan gerilimin genliğine ve hattın üzerine kapatıldığı kaynak gerilim dalgasının alternansının hangi noktasında kapandığına bağlıdır. Kesici kaynak geriliminin pik değerinde kapatılırsa, maksimum aşırı gerilim oluşur [63] ve kapamanın yapıldığı hat zıt polarite ile yüklenir. Tutulan yükün 1 p.u. olması durumunda bu şartlar altında enerjilendirmede hatta 2 p.u.'luk bir basamak gerilimi uygulanır. 2 p.u.'luk bir gerilim dalgası, bu hattın açık ucuna doğru ilerler ve toprağa göre 3 p.u.'luk bir gerilim değerine ulaşarak ikiye katlanır. Bu hat, akımın kesilmesinden sonra saniyeler mertebesindeki uzun bir süre boyunca özellikle pik gerilimle yüklü kalabilir. Bu süre, yüksek hızlı otomatik tekrar kapama (auto-

reclosure) projelerinde kullanılan süreden çok daha uzun bir süredir. Bu hat, sonuç olarak izolatörler v.b. üzerindeki akış yolları üzerinden deşarj olacaktır. Fakat deşarjın oluş hızı, çeşidi mevcut iklim koşullarıyla belirlenir. Bu deşarjın zaman sabiti 20-60 saniye arasındadır ve genellikle hattın tamamen deşarj olması için 2-5 dakika kadar zamana ihtiyaç vardır. Fakat oldukça kuru iklim şartları altında bu süre 15 dakikanın üzerine çıkabilir. Elle tekrar kapama durumunda bile tutulmuş yüksek bir şarj gerilimini kesme ihtimali vardır.

Kesici açma dirençleriyle donatılırsa veya şönt reaktörler ya da magnetik gerilim transformatörleri hatta bağlanırsa, bu hattın deşarj süresi dikkate değer ölçüde değiştirilebilir. Kesici açma direncinin hattın deşarj süresini azaltan ve hat üzerinde tutulan gerilimi düşüren bu etkisi, kesici açma direncinin değerine, hattın uzunluğuna ve bu direncin devrede kalış süresine bağlıdır. Bu direncin değeri ve devrede kalma süresi kesici dizaynını etkileyen fonksiyonlardır. Kullanılan açma dirençleri onbinlerce ohm'lar mertebesinde ve açma direncinin kontakları ana kesmeden sonra takriben 30-60 milisaniyelik sürede ayrılabilir. Açma direnci kontaklardaki ark sebebi ile bu süreden daha uzun bir süre, takriben 120-150 milisaniye kadar, devrede tutulabilir. Bu deşarjın zaman sabiti hattın direncinden ve şönt kapasiteden hesaplanabilir. Örnek olarak, 5 mikroyaradlık bir şönt kapasiteye ve 25000 ohm'luk bir dirence sahip 266 mil uzunluğundaki bir hatta deşarj zaman sabiti $25 \times 5 = 125$ milisaniye olarak bulunur. Bundan dolayı, eğer açma direnci sadece 30 milisaniye için devrede ise, artık yük (residual charge) gerilimi ilk değerinin yaklaşık %80'ine düşer ve ark'a bağlı olarak eğer bu direnç 120 milisaniye için devrede kalırsa, gerilimdeki azalma gerilimin ilk değerinin yaklaşık %38'ine düşecektir. Açma direnci devre dışı olduğunda bu şarj yükü hızla düşmeye devam edecektir, fakat bu düşme, çok daha düşük bir oranda olacaktır.

Bir hat bir şönt reaktörle kompanse edildiğinde hat, reaktör üzerinden salınımlı bir şekilde, diğer bir ifade ile osilasyon şeklinde, deşarj olacaktır. Bu osilasyonun frekansı reaktörün endüktansı ve hattın kapasiteleri ile belirlenir. Bu osilasyon, hattın ve reaktörün kayıpları ile belirlenen bir hızla azalır, frekansı düşüktür (genelde kaynak

frekansları ile aynı düzeyde) ve genelde kesicinin iki tarafındaki gerilimlerin frekansları arasında bir fark bulunur. Bununla beraber, hattaki ani artık yük gerilimine faz farklı olarak kaynağın hat üzerine kapatılması ihtimali de vardır.

4.1.4. Üç Fazın Eşzamanlı Olmayan Kapaması

Pratikte iletim hatlarının enerjilendirmesi sırasında ortaya çıkan aşırı gerilimler, üç faz arasındaki karşılıklı etkilerden dolayı daha yüksek değerler alırlar ve devrenin üç fazının eşzamanlı kapatılmayacağı bir gerçektir. Maksimum alıcı uç gerilimi birinci, ikinci ve üçüncü fazların kapamaları arasındaki zaman aralıklarıyla dikkate değer ölçüde değişir. Birinci faz ile son fazların kapanması arasında geçen toplam zaman, kesici dizaynına bağlıdır. Fakat önceden yapılan planlamalarda her üç fazın 5 ms'lik bir periyot içerisinde kapanacağı varsayılır. Kesicilerdeki kullanılan pek çok gaz tipi için bu süre fazlasıyla yeterlidir. Fakat bundan daha uzun sürelerle zaman zaman eski donanımlarda rastlanır. Bu donanımlarda kapama, atmosfer basıncında bir döner kol vasıtasıyla yapılır.

Aşırı gerilimlerdeki artış çok büyük öneme sahip olabilir ve farklı kutup kapama serilerinden oluşan geniş varyasyonlardan dolayı durum değerlendirmesi yapmak amacıyla genellikle istatistikî metodlara başvurulur [55,61,64,65,66]. Pek çok sayıda oluşturulan rastgele kapama serileri için aşırı gerilimler hesaplanır ve sonuçlar frekans dağılım eğrileri olarak çizilir.

Bu tür eğriler, sistem için bir izolasyon seviyesi belirlemek üzere dikkate alınan faktörlardan birini temsil eder. Havai hat iletkenlerine transpoze işlemi uygulanmamasının etkisi [53-55,57,67,68] normalde nispeten küçüktür. Fakat bazı şartlar altında bu etki büyük öneme sahip olabilir. Aynı şekilde, toprak dönüş yollarının homojen olmamasının etkileri de, pek çok yazar tarafından dikkate alınarak detaylı şekilde incelenmiştir [53,57,68,69].

4.2. RLC'li Devrelerin Enerjilendirilmesi

En basit RLC'li fider farklı karakteristiklere sahip iki bileşenden oluşur ve bu fider iki osilasyonlu devreler olarak göz önüne alınabilir. Bir hat ve bir kablonun olması durumunda, bu devrelerde dağıtılmış parametreler kullanılır. Her bir devre, devrenin uzunluğu ve propagasyon hızıyla belirlenen bir frekansa sahiptir. Transformatöre bağlı bir fider dağıtılmış parametrelerle gösterilir ve diğer devre fiderin hat ucundan enerjilendirilmesi anında toplu seri bir endüktans-kapasitans devresi olarak karakterize edilir. Bu şartlar altında bu endüktans, transformatörün kaçak endüktansıdır (leakage inductance) ve kapasitans ise açık devre edilen transformatörün sekonderinde görülür ve transformatörü ona ait olan kesiciye bağlamakta kullanılan kısa uzunluklu bir kablonun kapasitesiyle transformatörün toprağa olan kaçak kapasitesinden oluşur. Bu devrenin tabii frekansı bu endüktans ve kapasitelerin değerleriyle belirlenir.

Bir devre enerjilendirilirken enerjilendirmenin gerçek anı, kesici üzerindeki gerilim maksimum değerinde veya o civarda olduğunda oluşabilir ve bu durum, enerjilendirilen devreye takriben faz geriliminin pik değerinde olan bir gerilim basamağının uygulanmasıyla sonuçlanır. Bir RLC'li fiderde, gerilimin bu basamağı fiderin birinci devresine uygulanır ve bu devrede bir geçici gerilim üretilir. Bu birinci devre bir kaynak olarak davranır ve bu devrenin geçici gerilimi, fiderin ikinci devresine o devrede de aynı şekilde büyük bir geçici gerilim üretecek şekilde uygulanır. Bu olay bazen darbe kuvvetlendirmesi (surge magnification) olarak algılanır ve bazı şartlar bu durum, kendi kendine enerjilenen bir devreye nazaran daha büyük aşırı gerilimler üretilir. Üretilen bu aşırı gerilimlerin genliği bu iki devre arasındaki karşılıklı etkileşim (interchange) enerjisine bağlıdır. Bu karşılıklı değişim enerjisi de devre parametre değerlerine bağlıdır.

4.2.1. Havai Hat ve Kablo

Bir RLC'li fiderin en basit örneği, belirli uzunlukta bir iletim hattı oluşturmak üzere havai hattın belirli bir uzunluğu ile seri bağlı kablonun belirli bir uzunluğunun birleştirilmesi suretiyle oluşan devredir ve tamamı bir tek ünite olarak anahtarlanabilir. En yüksek gerilim seviyelerinde havai hatla karşılaştırıldığında kablo uzunluğu çok kısa olsa bile bütün gerilim seviyelerinde bu tür kombinasyonlar geneldir. Daha düşük gerilim seviyelerinde ise kablo uzunluğunun havai hat uzunluğuna yakın değer alması ihtimali vardır.

Hat ile kablonun bağlantı noktasındaki koşulların dikkate alınması şunu gösterecektir: Hattın karakteristik empedansının kablonun karakteristik empedansından çok daha büyük olmasından dolayı, kablodan gelen herhangi bir dalganın çok geniş bir oranı kaynağa geri yansıtılacaktır. Bu bağlantı ile ilgili olan iletim katsayısı birden daha büyük bir değer alabilecek ve 2 değerine kadar yaklaşabileceklerdir.

Sonuç olarak, eğer bu fider kablo ucundan pik gerilimle enerjilendirilirse, yaklaşık 2 p.u.'lik yürüyen bir dalga, bu hat/kablo bağlantısında havai hattın iletilir. Bu hattın açık devre edilmiş ucuna varıldığında ikiye katlama olayı oluşur ve bu noktada 4 p.u.'e yaklaşan bir gerilim meydana gelir. Diğer taraftan, eğer bu fider havai hat ucundan enerjilendirilirse, hattın kabloya doğru yürüyen dalgalar için iletim katsayısı 1'den çok daha küçük olacaktır ve sonuçta fiderin açık devre edilmiş ucundaki gerilim önceki duruma göre çok daha yavaş bir dalga yüzüne sahip olacaktır. Böylece bu fideri enerjilendirmek için optimum bir ucun varolduğu anlaşılır. Yukardaki durum, en iyi uçtan yapılan anahtarlama şeklinin en basit bir örneğidir. Pratikte gerilim dalga şekilleri pek çok faktör tarafından değiştirilir. Kablo ile havai hattın nispi uzunlukları kritik bir öneme sahip olabilir ve kayıplar mevcut olacağından aşırı gerilimleri azaltıcı bir görev yapacaktır. Enerjilendirme anında bu fiderde tutulan bir şarj geriliminin mevcut olmasının şiddetini, zorluğunu daha da arttıracaktır ve özellikle kablo ucundan enerjilendirme durumunda, hattın açık ucunda daha büyük gerilimlerin üretilmesine

sebepler olacaktır. Pratikte özellikle daha düşük gerilim seviyelerinde bir fider, belirli bir uzunluğa sahip havai hat iletkeni ve belirli bir uzunluğa sahip kablodan daha fazla eleman içerecektir, özellikle de arıza sınırlandırma reaktörlerini kapsayacaktır. Böyle durumlarda enerjilendirme aşırı gerilimlerinin genliği: bu fiderin bileşenlerinin düzenlenmesine, onların uzunluklarına ve karakteristiklerine bağlıdır. Genelde bu şartlar altında anahtarlama yapmak için optimum bir uç mevcut olsa da bunun belirlenmesi özel bir çalışma konusudur.

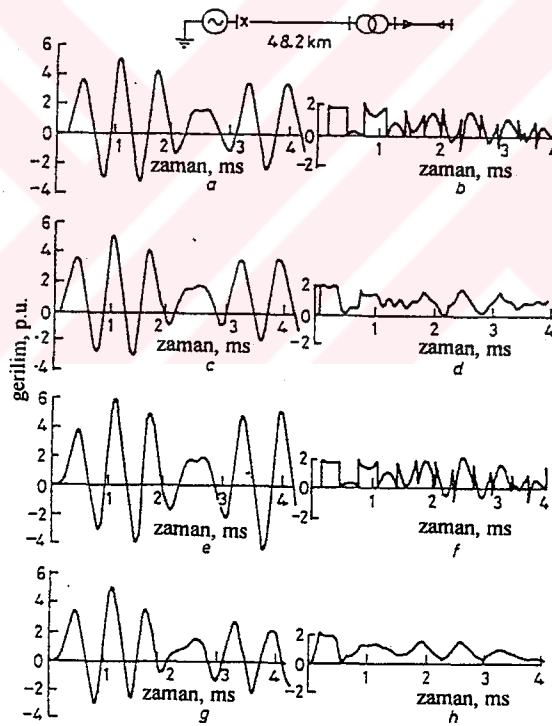
4.2.2. Ucunda Reaktif Elemanlar Bağlı Bulunan Fiderler

RLC'li fidere örnek olarak transformatör bağlanmış bir hat daha önce verilmişti. Bir yeraltı kablosunun bir transformatöre bağlı olması durumunda ve bir arıza sınırlandırıcı reaktöre bağlı bir havai hat veya kablonun olması durumunda [2] da benzer koşullar mevcut olacaktır. Burada reaktif olarak sonlandırılmış bir fideri çağrıştıran temel olayların bir açıklaması verilmektedir [87].

Bir sıfır empedans kaynağından (a zero impedance source) yalnızca bir havai hattın enerjilendirilmesi, ilk enerjilendirme gerilim basamağının hat bağlantılarındaki yansımalarından dolayı hattın açık ucunda bir kare dalga gerilimin üretilmesiyle sonuçlanır. Kayıplar ihmal edildiğinde, bu kare dalganın genliği enerjilendirme gerilim basamağının iki katı olur. Bu kare dalganın frekansı $1/4T$ dir. Burada T , hattın propagasyon süresidir. Eğer bu hat seri bağlı endüktans ve kapasitans ihtiva eden osilasyonlu bir devre ile sonlandırılırsa, bu devre bahsedilen kare dalga gerilimle uyumludur ve aşırı salınımdan dolayı reaktif elemanların üzerindeki gerilim bu kare dalga gerilimin genliğini aşabilir. Transformatörün sekonder tarafında üretilen gerilim (örneğin kapasite üzerinde) hattın uzunluğuna bağlıdır. Eğer bu hat kısa uzunlukta ise hat frekansı transformatör frekansından daha yüksek olabilir. Bu durumda kapasitör üzerinde oluşan gerilim, hattın kaynak ucundan dönen zıt polariteli bir yansıma dalgasından önce kendi maksimum değerine ulaşamayabilir. Eğer hattın uzunluğu, hattın frekansı ve transformatörün frekansı birbirine eşit olacak şekilde ise, bir rezonans durumu mevcut

olur ve transformatörün sekonderindeki bu kapasite üzerinde büyük aşırı gerilimler üretilir.

Transformatörün tabii frekansı ve efektif karakteristik empedansı aşırı gerilimin genliğinin belirlenmesinde önemli faktörlerdir. Transformatörün genliğine, nominal değerine ve dizaynına bağlı olan çok geniş bir aralıkta frekansların mevcudiyeti ayrı bir çalışmada [87] gösterilmiştir. 132-400 kV aralığındaki sargılar ve 50-1000 MVA nominal değerleri için sadece transformatörlerin uygun tabii frekansları (sekonder bağlantıları içermeyen sadece transformatörün frekansı) 3-15 kHz aralığındadır. Transformatörlerin efektif karakteristik empedansları için 1 k Ω 'un altından sekonder bağlantılarının kapasitesine bağlı olarak 10 k Ω 'un üzerine kadar geniş bir aralıkta değerler bulunmuştur.



Şekil-4.2. Transformatöre bağlı bir fiderin enerjilendirilmesi.

Doyma ihmal edilerek bir tek fazlı eşdeğer devre kullanılarak transformatör uçlarındaki gerilim dalga şekillerinin hesaplanması.

a,c,e,g : Transformatör sekonderindeki gerilim.

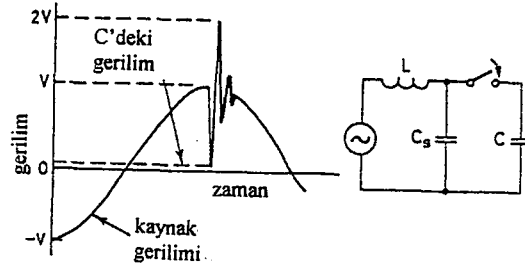
- b,d,f,h : Transformatorün hat tarafındaki gerilim.
 a,b : Kompanzasyon metodu.
 c,d : Toplu parametre metodu.
 e,f : Kafes diyagram metodu.
 g,h : Geçici şebeke analizör tasviri.

Bu sistemin tek fazlı bir temsili bazında bir ilk değerlendirme yapılabilir [91]. Şekil-4.2'in sonuçları şunu göstermektedir: Eğer transformator basit olarak kaçak endüktansıyla temsil edilirse geçerli bir sonuç elde edilebilir. Şekil-4.2'deki iletim sistemi için kompanzasyon metodu ile [91] ve diğer üç metod ile hesaplanan transformatorün her iki tarafındaki gerilim dalga şekilleri yine Şekil-4.2'de gösterilmektedir. Bütün bu hesaplama durumlarında transformatorün doyması ihmal edilmiştir.

Diğer sonuçlar ise kaskad bağlı π devrelerinin temsil ettiği iletim hatlı toplu parametre metodundan, kafes diyagram metodundan ve transformatorlerin bir model transformatorle temsil edildiği bir geçici şebeke analizör metodundan elde edilir. Transformatorün hat tarafındaki gerilim dalga şekillerinin karşılaştırılmasından, dağıtılmış parametre metoduyla elde edilen sonuçla toplu parametre metodundan elde edilen sonuç arasında bir farkın mevcut olduğu dikkat çekebilir. Diğer taraftan, her dört metodla hesaplanan sekonder gerilim dalga şekilleri birbirlerine uyum göstermektedirler. Temel fark şudur: Geçici şebeke analizörü ile hesaplanan gerilimin genliği diğer metodlarla hesaplanan gerilimlerin genliğinden biraz daha düşüktür [88,89].

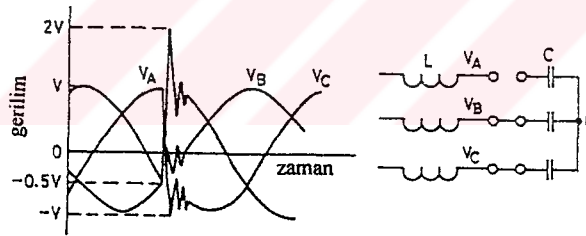
4.3. Kapasitör Banklarının Enerjilendirilmesi

En kötü aşırı gerilim koşulu, enerjilendirmenin kaynak gerilim dalgasının pikinde yapılmasında ortaya çıkar. Şekil-4.3, bir tek fazlı bankın enerjilendirilmesini veya nötrü topraklı üç fazlı bir bankın bir fazı ile ilgili olan koşulları gösterir.



Şekil-4.3. Tek fazlı bir kapasitenin enerjilendirilmesi.

Kaynak tarafının kapasitesi enerjilendirilecek olan bankın C kapasitesiyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. C bank kapasitesi başlangıçta yüksüzdür. Bundan dolayı enerjilendirme anında kaynak tarafındaki gerilim, C'nin ilk anda kısa devre özelliği göstermesinden dolayı sıfıra düşer. Kaynak tarafı ve kapasite gerilimleri bu anda eşittirler ve güç frekanslı geriliminin V pikine doğru artış gösterirler. Devre endüktansından dolayı bir osilasyonlu darbe titreşimi oluşur ve söndürme (damping) olmaksızın bu kapasitenin gerilimi Şekil-4.3'de gösterildiği gibi 2.V'lik bir değere ulaşabilir.



Şekil-4.4. Nötrü topraklı bir üç-fazlı kapasite bankının enerjilendirilmesi.

Nötrü topraklı üç fazlı bir kapasite bankının enerjilendirilmesi Şekil-4.4'te gösterilmektedir. Burada B ve C fazlarının çoktan kapanmış olduğu ve A fazının, kaynak geriliminin pozitif pikinde kapandığı varsayılır. Bu anda B ve C fazlarının gerilimleri -0.5 V değerine eşittir. Bu aynı zamanda A faz anahtarının kapasite tarafındaki gerilimdir. Sonuç olarak kapama anında bu anahtar (A fazı anahtarı) üzerindeki gerilim 1.5 V dir. Kapama olayından hemen sonra gerilimler

$$V_A = V_B = V_C = 0 \quad (4.3.1)$$

olur ve müteakkip olarak Şekil-4.4'de gösterildiği gibi bir osilasyon vasıtasıyla kendi güç frekanslı değerine doğru tekrar tırmanırlar. Söndürme ihmal edildiğinde A fazındaki kapasite gerilimi $2.V$ 'lik bir değere ulaşabilir ve B,C fazlarındaki gerilimler $-V$ 'lik bir değere ulaşabilirler ($-0.5 V$ 'nin 2 katı bir değer).

Bu sebeple, üç fazlı kapasitör banklarının enerjilendirilmesinde maksimum aşırı gerilim nötrün topraklanıp topraklanmamasından bağımsızdır. Her iki durumda da (topraklı veya topraksız) maksimum gerilim $2.V$ dir.

4.3.1. Muhtelif Tekrar Tutuşmalar ve Devrenin Kesilmesi

Bölüm 3.5'te tekrar tutuşmaların, kapasitör banklarının ve iletim hatlarının devreden çıkartılmaları sırasında oluşabileceği gösterilmişti. Kapasitör banklarının enerjilendirilmesi sırasında bazı şartlar altında muhtelif tekrar tutuşmalar ve devre kesilmeleri oluşabilir. Buna, metalik kontaklama yapılmadan önce kesici ön tutuşması (prestriking) ile sebep olunur ve kapama arkında bir yüksek frekanslı akım sıfırında kesilmiş olan yüksek frekanslı akım geçici olayı ile sonuçlanır. Bu tür muhtelif tekrar tutuşmalar ve devre kesilmeleri sistemi etkileyen tahrip edici aşırı gerilimlere götürebilir. Bu aşırı gerilimler devre konfigürasyonuna bağlı olarak yayılabilir, artabilir veya azalabilir ve kesiciden uzak noktalarda hasara neden olabilir. Büyük kesme kapasiteli modern kesicilerin kullanılması halinde bu olayların oluşma ihtimalinin en yüksek oranda olması maktıksız bir durum gibi görülebilir.

Bütün bu yöntem oldukça kompleks bir yöntem olabilir ve detaylı bir analiz yönteminde, hem kesilmelerin oluştuğu hemde kontak aralığı delinmesinin meydana geldiği gerilim zorlanmasının yüksek frekanslı akım sıfırlarının belirlenmesini sağlayabilmelidir. İlave olarak, varsayımlar bu yöntemin dalga üzerinde başlatıldığı noktaya göre yapılmalıdır.

4.4. Büyük Motorların Enerjilendirilmesi

Geçici aşırı gerilimin bir başka durumu, büyük bir motorun anahtarlanmasıyla ortaya çıkabilir. Böyle bir motor için normalde motorun, bir kesiciye sahip belirli uzunluktaki bir kablo ile kablonun kaynak ucunda kaynak barasına bağlanmalıdır. Eğer kaynak barasına bağlı başka kablolar da varsa, kesicinin kapanmasıyla motoru besleyen kablonun enerjilendirilmesi, kablodan motora doğru yürüyen bir gerilim basamağıyla sonuçlanır. Gerilimin bu ilk basamağının genliği, enerjilendirme anında kaynak barasına bağlı bulunan kablo sayısına bağlıdır ve bu kabloların sayısı arttırıldıkça, artacaktır. Bu gerilim basamağı motor ucuna ulaştığında, motorun nispeten büyük olan empedansından dolayı büyümeye maruz kalacaktır. Düşük dielektrik kayıplarına sahip modern kablo tiplerinde çok büyük dalga yüzü distorsiyonu oluşur. Böylece motor sargı izolasyonu dik cepheli bir ön gerilim dalgasına maruz kalır. Arazi testleri [173-175], 0.2 μ s'lik dalga yüzlerine sahip geçici durumlar ve 2 p.u.'yu aşan genliklerin nadir olmadığını göstermiştir.

Kapama işlemi sırasında tekrar tutuşmalar oluştuğunda şiddetli koşulların oluşması beklenebilir. Bu koşullarda [169] kesicinin kapama kontakları arasındaki mesafe delinir ve bir tekrar tutuşma oluşur. Kesicinin her iki tarafındaki gerilimler genel bir gerilim seviyesine çok hızlı bir şekilde ulaşacak ve kesicinin motor tarafında ve kabloda oluşacak olan bu hızlı gerilim değişimi, kabloya enjekte edilen çok dik cepheli bir ön dalgaya eşdeğerdir. Bu dalga daha sonra motordan kabloya doğru ilerler ve izolasyonlara gerilmeler uygular. Ön tutuşma sırasında ark içerisinden akan akım kesici tipine bağlı olarak kesilebilir ve eğer akım kesilirse kapama kontakları arasındaki aralığın dielektrik dayanımı bir sonraki ön tutuşma oluşumuna kadar aralığa hakim olur. Bundan dolayı bir dizi tekrar tutuşma oluşması ihtimali vardır ve kesicinin kontakları arasında metalik kontakten önce kapamalar yapılır. Herbir ön tutuşma, motor uçlarında bir geçici aşırı gerilim üretir. Bundan dolayı sargı izolasyonu bir dizi dik cepheli gerilim dalgasına maruz kalır ve izolasyon arızaları oluşabilir.

Motorların çoğunluğu topraklanmış bir nötre sahip değildir. Bu sebepten, ilk faz kapandığında üretilen gerilim dalgası sargılar boyunca iletilebilir ve ikinci ve üçüncü faz uçlarında bir gerilim osilasyonunun oluşmasına sebep olur. İlk kutbun kapanmasıyla ikinci kutbun kapanması arasındaki gecikmeye ve bu osilasyonun frekansına bağlı olarak ikinci kutup kapandığında yükselmiş bir gerilim dalgası başlatılabilir. Sonuç olarak, motor sargı izolasyonunda daha yüksek gerilmeler oluşturulabilir.

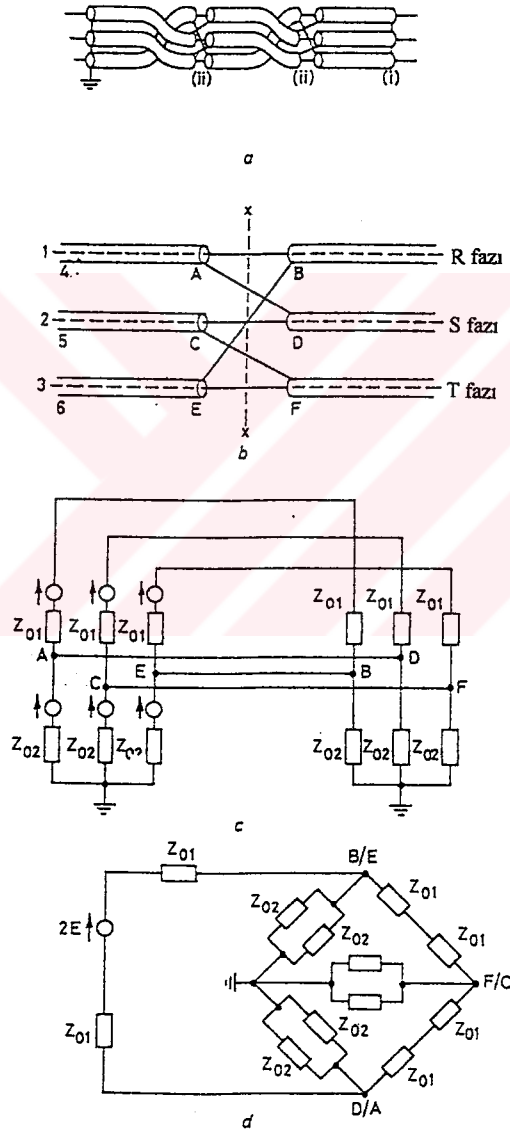
Motor terminallerine mümkün olduğu kadar yakın kapasitörlerin bağlanmasının izolasyondaki gerilmeleri azaltmanın etkin bir yolu olduğu daha önce [169-172] gösterilmişti.

4.5. Kablo Sistemlerinde Aşırı Gerilimler

500 m'den daha uzak mesafelere 3-fazlı güç iletmek için üç ayrı koaksiyel kablonun kullanıldığı gömülü kablo sistemlerinin kullanımı yaygındır. Kabloların nominal değerlerini geliştirmek için, sürekli hal mahfaza (sheath, kablo kılıfı) akımlarının mahfaza kesicileriyle (sheath interrupters) ve daha uzun bölümleri oluşturmak amacıyla kısa uzunluklu üç bölümün çapraz-bağlanması (cross-bonding) suretiyle bastırılması zorunludur. Bu durum çapraz bağlamanın ve kesmenin kullanıldığı yerde, kablolar yanyana düz bir şekilde (flat formation) gömülmüş ise magnetik simetriyi sağlamak amacıyla üç fazın yerlerinin değiştirilmesini de içerir. Hesapların yapılması amacıyla tüm simetrinin sürekli halde mevcut olduğu ve etkin bir düşük bariyer kapasitesinin (low barrier-capacitance) güç frekans sirkülasyon akımlarını engellemek amacıyla mevcut olduğu varsayılır.

Sadece bir faza bir basamak gerilimi uygulandığında, çapraz bağlı bir sistemin ilk bağlantısında görülen geçici aşırı gerilimler eşdeğer devreler vasıtasıyla hesaplanabilir. Bu eşdeğer devreler, koaksiyel moddaki kablonun karakteristik empedansına (Z_{01}), mahfaza-toprak (Z_{02}) ve mahfaza-mahfaza karakteristik empedanslarına göre geliştirilir [107].

Bu problem, oldukça iletken olan toprak dönüş yönünün, bütün kablo mahfaza izolasyonunun dış yüzeylerinde ince bir kabukta toplandığı varsayımıyla basitleştirilebilir. R fazı ile onun kılıfı (mahfazası) arasında görülen bir dalga gerilimi E'nin dikkate alınması Şekil-4.5'de gösterilmiştir. Şekil-4.5, X-X hattı boyunca doğal süreksizlikli yonca biçiminde (trefoil) çapraz bağlı bir kablo sistemi için bağlantı şemasıdır.



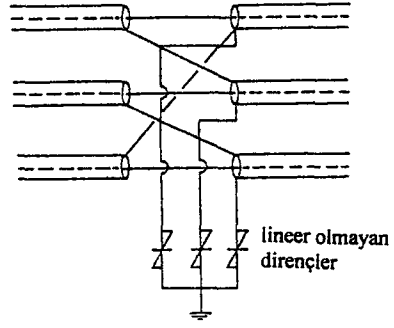
Şekil-4.5. Simetrik sistemde tipik bir çapraz bağlı bağlantı.

- a : Fazların çaprazlanmasını gösteren çapraz bağlı sistemin esas bölümünün bağlantıları.
- (i) : Katı bağlantı (solid bond).
- (ii) : Çapraz bağlantılar (cross bonds).
- b : Bağlantı diyagramı.
- c : Genelleştirilmiş formda eşdeğer devre.
- d : R faz iletkeni ile mahfaza arasındaki gerilim için eşdeğer devre.

olarak gösterilmiştir. R fazı kesicisi uçlarındaki gerilim V_{AB} , per unit bazda şu şekilde verilir:

$$\frac{V_{AB}}{E} = \frac{4Z_{02}}{4Z_{01} + 3Z_{02}} \quad (4.5.1)$$

Maksimum mahfaza gerilimlerinin, genellikle bir çapraz bağlama ek yerinde ilk yansımadan sonra ortaya çıktığı kabul edilir. Bu sebeple, $Z_{01} = 18\Omega$ ve $Z_{02} = 7\Omega$ olan 132 kV'luk bir güç kablosu $V_{AB} = 0.3$ p.u. ve mahfaza ile toprak arasında 0.15 p.u.'lik bir gerilim değeri verir. Bu ikinci gerilim değeri, topraktan bağımsız şartlar için, bu değer iki katı kadar olabilecektir. Bu açıdan bakıldığında, 15 kV'tan daha büyük bir pik gerilimde, toprakla kablonun kurşun mahfazası arasında bir geçici olay ortaya çıkabilir. Sentetik kauçuk (neoprene), yaklaşık 4 mm kalınlığında bir anti-korozyon izolasyon mahfazası olarak kullanılır. Bir kablonun 3.5 olan doyurulmuş kağıt dielektriği ile karşılaştırıldığında, 5.7'lik bir dielektrik sabitine sahiptir. Bu sonuç, mahfaza malzemesinde dalganın yayılma hızının yaklaşık 0.8'i kadar olacağına işaret eder. Propagasyon hızlarındaki bu fark, sistem boyunca diğer çapraz bağlamalı ek yerlerinde aşırı gerilimlerin hesabında dikkate alınmak zorundadır. Kılıflar, 230 kV ve üzerindeki gerilimlerde işletilen sistemler için, bu tür aşırı gerilimlere dayanamayabilir ve netice olarak bu geçici olayları sınırlandırmak üzere sisteme koruyucu cihazlar yerleştirilir. Toprağa bağlı, lineer olmayan üç dirençli çapraz bağlamalı bir ek yeri (dirençlerin her biri bir mahfazaya bağlanmıştır) Şekil-4.6'de gösterilmektedir.



Şekil-4.6. Lineer olmayan dirençlerle çapraz bağlama.

Bu sebeple, lineer olmayan seri bağlı iki direnç her bir kılıfı bir diğerine bağlar. Bu lineer olmayan dirençler, kablodaki yüklü enerjiyi bir faz-toprak arızası sonucu deşarj olduğunda bazı bölümlere dağıtma kabiliyetine sahip olmak zorundadır.

Çapraz bağlı bir kablo sisteminde anahtarlama sonucu oluşan geçici aşırı gerilimler, ilk çapraz bağlama ek yerindeki geçici gerilim dışında, teorik analizlerle kolayca belirlenemez. Geçici olayları sistem boyunca daha da araştırmak için, yüksek-oranlı kapasite potansiyel bölücüler kablonun izolasyon performansını önemli ölçüde etkilememek şartıyla kullanılabilir. Bir kapasite bölücü, bir çapraz bağlama ek yerinde uygun bir şekilde devreye dahil edilebilir. Kapasite bölücü, mahfazaya yakın birkaç kağıt tabaka içine yerleştirilen bir koaksiyel tabaka ihtiva eder. 33 kV'ta kullanım amacıyla hibrit tip bir potansiyel bölücü dizayn edilmiştir. Bu bölücü, hem kapasitif hem de rezistif bölgede görev yapar ve 2 Mhz'e kadar bir tepki gösterme kabiliyetine sahiptir. Kapasite, potansiyel bölücünün bu tipi kablolarda inşa edildiği zaman geçici olayın ve kablo sistemlerindeki güç frekans gerilimlerinin [108,109] efektif bir şekilde kontrol edilmesini sağlamıştır.

5. BÖLÜM

ARIZALARIN SEBEP OLDUĞU AŞIRI GERİLİMLER

Bu kategorideki aşırı gerilimler pek çok sebepten dolayı ve yapılmış olan sistem topraklaması tipine bağlı olarak ortaya çıkabilir. Bir güç sistem nötrünün topraklanması pek çok yolla yapılabilir. En uç iki topraklama durumu şunlardır: Birisi iyi bir şekilde topraklanmış bir nötrün mevcut olması durumu ve ikincisi ise izoleli bir nötrün mevcut olması durumudur. Nötrün topraklanmamış olması durumunda (izoleli nötr durumu), asimetrik arıza akımları daha küçük olmasına rağmen arıza koşulları, nötrü iyi bir şekilde topraklanmış bir sistemde oluşan aşırı gerilimlerden daha yüksek aşırı gerilimler oluşturmaya müsaittir. Buna karşılık nötrü iyi bir şekilde topraklanmış sistemlerde asimetrik arıza akımları daha büyüktür. Fakat arıza koşulları altındaki aşırı gerilimler genelde daha düşük olma eğilimi gösterir.

Güç sistem şebekelerinde arızaların çok büyük bir kısmını tek faz toprak arızaları oluşturur. Bu arıza şartlarında, arızasız fazların gerilimlerinde arıza temizlenene kadar mevcut olan süreksiz bir aşırı gerilim yükselmesine sebep olan bir artış görülür. Bu aşırı gerilimin genliği, arızalı şebekenin sıfır bileşen parametrelerine bağlıdır ve izoleli bir nötr sisteminin uç (aşırı) bir durumunun faz-faz değerine ulaşır. $X_1 = X_2$, $R_1 = R_2 = 0$ değerli X_0/X_1 , R_0/X_1 'in farklı değerleri için geçici (temporary) aşırı gerilimler tek faz toprak arıza durumu için 95. referansta verilmektedir. Daha önceki çalışmalarda [93],

$$X_0/X_1 < 3 \quad (5.1)$$

ve

$$R_0/X_1 < 1 \quad (5.2)$$

durumları için ele alınan sistem efektif olarak topraklanmış bir sistemindi. Bu değerler 1.4 değerinden daha düşük bir geçici aşırı gerilim manasına gelir. Fakat bu tanımlama şu anda terkedilmiştir. Topraklama koşulları şu anda bir “toprak arıza faktörü” (earth fault factor) ile karakterize edilmektedir. Bu faktör, arıza esnasında herhangi bir fazdaki en yüksek güç frekanslı geriliminin, arızasız normal faz toprak gerilimine oranıdır.

Dengesizliğin sebep olduğu benzer bir geçici aşırı gerilim de iki faz-toprak arıza koşulları altında arızasız olan fazda oluşacaktır. Sistem sabitlerine sahip asimetrik arıza koşulları altında, arızasız fazdaki bu gerilimin genliğinin varyasyonları literatürde [92,94,95] verilmektedir.

5.1. Fasilalı Toprak Arızaları

İletim hatlarında bir faz toprak arızalarının çoğunluğu arızanın esas sebebine göre kendi kendine temizlenmektedir, örneğin geçici yapıya sahip bir yıldırım darbesi gibi. Nötrü topraklanmamış bir sistemde böyle bir arızanın ürettiği ark, eğer iki arızasız fazla toprak arasındaki kapasitif akım, arızalı faz ile toprak arasındaki iyonize olmuş ark yolunu canlı tutmaya yeterli ise devam edecektir. Böyle bir ark, arızasız fazların kapasitif akımlarıyla canlı tutulduğunda, bu ark genellikle bir ark zemini olarak algılanır.

Bir ark zemini, arkın söndürülmesi ve ark tekrar tutuşmasının tekrarından dolayı sistemde oluşacak yüksek bir geçici aşırı gerilim riskini ihtiva eder. Dikkate alınan bu tarz, bir kesicinin hattın şarj akımını kestiği yerde oluşabilecek olan aşırı gerilime çok benzerdir. Bundan dolayı bir ark zemininin mevcut olması halinde, yüksek bir aşırı gerilimin oluşması sırasındaki olaylar dizisi bir kesicide oluşabilecek olandan çok daha tesadüfidir. Fakat tehlikeli bir bileşen için mevcut zaman uzunluğu arkın devam ettiği toplam zaman olarak çok daha uzundur. Bu yöntem için, bütün kayıpların ihmal edilmesiyle ve nötrü izoleli sadece endüktif bir kaynağın (bir generatör veya bir transformatör olabilir) dikkate alınmasıyla ve üç fazın toprağa göre kapasiteleri vasıtasıyla genel bir fikir elde edilebilir. Bir tek-faz arızası için, kaynağın endüktansıyla

birleştirilmiş arızasız iki fazın kapasitesi, osilasyonun tabii frekansının oluşmasını sağlar. Sistem büyük ölçüde reaktif olduğunda bu gerilim ve akım yatay eksendedir. Bu sebeple bu akım bir tabii sıfırda ortadan kaldırılırsa toparlanma gerilimi maksimum bir değer alır. Arkın ilk darbesinden sonra herhangi bir andaki olayların bileşeni literatür [92,96]'da tarif edilmektedir.

Sistemin transformatör nötrüne bağlı bir reaktör üzerinden sistemin topraklanması suretiyle bu durumdan sakınılabılır. Faz-toprak arıza koşulları altında, akım bu reaktör üzerinden toprağa akacak ve arıza yolu ile geri dönecektir. Nötr toprak gerilimini 90° geciktiren bu akım, arızadaki kapasitif akımla zıt fazlıdır. Reaktör değerinin uygun seçilmesiyle reaktör akımının genliği kapasitif arıza akımının genliğine eşit yapılabilir. Bu şartlar altında, arızadaki bu akım sıfıra çok yakındır ve arkı devam ettirmek için yeterli değildir. Sistem bazı dirençlere sahiptir ve gerilimli fazda küçük bir akım arıza içinden akmaya devam eder ve sistem dengelenemez. Böyle bir reaktör “ark bastırma bobini”, “Peterson bobini” veya “toprak arıza nötrleyicisi” olarak adlandırılır.

Eğer kapasitif arıza akımı 5-10 amper'i geçerse, nötrü izoleli bir sistemi tehlikeli geçici ark arıza gerilimlerine doğru artış gösterir. Bu koşullar hemen hemen tüm 33 kV'luk sistemlerde ve sık sık 11 kV'luk sistemlerde ve daha yüksek gerilim seviyelerinde elde edilir. Bu tür sistemlerin hepsi, eğer bu sistemler nötrü izoleli olarak işletilirse Peterson bobiniyle desteklenebilir. 220 kV ve üzerindeki gerilimlerde, korona kayıpları ve diğer faktörler, akımların faz açılarının sırasıyla 90° 'den uzaklaşmasına ve 90° 'ye yaklaşmasına sebep olurlar. Bu sebeple nötrlenemeyen gerilimli fazda bileşke bir akım mevcut olur.

Bağımsız devreler birbirlerine çok yakın ilerlerse, Peterson bobini topraklamasının önemli bir tehlikesi ortaya çıkar. Bu tür koşullar altında devreler arasında karşılıklı kuplaj etkisi mevcut olur ve özelde sıfır bileşen şebekeleri arasında böyle bir etki mevcut olacaktır. Bu tür durumlarda, bir devredeki arıza, bu karşılıklı kuplaj etkisine bağlı olarak bileşke yüksek aşırı gerilimlere sahip ikinci devrede seri rezonans üretebilir.

Bu durumda çıkar yol [97,98], sıfır bileşen şebekelerini bir kompanzasyon transformatörü üzerinden direkt kuple temektir. Bu direkt kuplajın etkisi karşılıklı kuplajın etkisine zıttır.

5.2. Tek Kutuplu Otomatik Kapamayı Çağrıştıran Sekonder Ark

Tek kutuplu anahtarlama ile bir iletim hattında bir tek-faz arızanın temizlenmesinden sonra arızalı faz, arızasız fazlara kuple edilmiş olarak kalır. Bu kuplajın bir sonucu olarak, bir artık akım sekonder bir ark'a katkıda bulunacak bir şekilde arıza ark yolundan akmaya devam edebilir [110-112,116,118]. Tekrar kapama işleminin başarılı olabilmesi için tekrar kapama projesinin ölü zamanı (dead time) içerisinde bu arkın söndürülmesi zorunludur. Sekonder arkın söndürülmesi için gerekli olan zaman çok önemlidir ve bir çok faktöre bağlıdır. Bunlar sekonder ark akımı, ark söndürüldüğünde görülen toparlanma gerilimi, arkın uzunluğu ve iklim şartlarıdır. Bunlara ilaveten hattın yapısı ve uzunluğu arızalı faz ile arızasız fazlar arasındaki kuplajın miktarını etkileyecektir. Arıza yeri ve arızalı fazın pozisyonu, sekonder ark akımı değeri ile ilgilidir. Arkı söndürmek için gerekli zamanın önceden tahmin edilmesi kolay değildir ve pek çok çalışma arazi testlerini ve bilgisayar simülasyonlarını tasvir etmektedir [113-117]. Eğer iletim hattı reaktif olarak kompanze edilirse bu durum çok daha karmaşıklaşır. Arızanın yerine bağlı olarak seri kapasitelerin ve şönt reaktörlerin mevcudiyeti sekonder arktaki akımı arttırabilir. Eğer şönt reaktörler hatta bağlanırsa literatürde tarif edilmiş olan [110,111,118,119] çözüm türünden ölçümlerin kabulüyle sekonder ark akımında bir azalma elde edilebilir. Böyle bir ölçüm, reaktörün yıldız noktası ile toprak arasına bağlanmak üzere dördüncü bir kola sahip olan bir şönt reaktörün kullanılmasıdır. Yani bu, daha önce bahsedilen Peterson bobininin etkisine benzer bir etkidir.

5.3. Arıza Uygulamalarının Sebep Olduğu Geçici Aşırı Gerilimler

Bir faz-toprak veya iki faz-toprak arızalarının sebep olduğu dengesiz koşullar altında, arızasız fazlarda devamlı bir sürekli hal aşırı gerilimi mevcut olabilir. Bu aşırı gerilimin genliği, arızalı devrenin sıfır bileşen parametrelerine bağlıdır ve izoleli bir nötr sisteminde belirli bir faz-toprak arızası durumunda faz-faz değerine ulaşabilir. Sürekli hal aşırı gerilim koşullarına geçici bir osilasyon vasıtasıyla ulaşılır. Bundan dolayı topraklı bir sistem için bile arızasız fazlardaki gerilimler, geçici bir durum olarak yaklaşık 1.8-2 p.u. değerini alabilirler. Bu koşullar, maksimum aşırı gerilim seviyelerinin yaklaşık 1.6 p.u.'de sınırlanması gerektiğini söyleyen önerilerin varlığından dolayı 1000 kV ve üzeri gerilim seviyelerindeki işletme sistemleri açısından çok ilginçtir. Bu tür sistemler dizayn edilirken arızaların ürettiği aşırı gerilimlerin genliklerinin aşılması, aşırı gerilimlerin genliklerinin etkilerini minimum yapmak için gereklidir. Şebekenin herhangi bir fazında bir arızanın başlaması, aynı fazda aşırı gerilim de üretebilir. Bir arıza oluştuğunda gerilim aniden sıfıra düşer ve bu basamak değişim bir yürüyen dalga olarak sistem üzerinde yayılır ve devre süreksizliğinde iletim ve yansımaya maruz kalır. Sonuç olarak, eğer şartlar uygunsa darbe büyümesi oluşabilir ve arızalı fazda aşırı gerilimler meydana gelebilir. Bu gerilim basamaklarının gerisinde sürekli bir gerilim kaynağı olmadığı için söndürme etkisi, bu gerilim basamaklarını hızla düşürecektir. Özellikle terminallerdeki sisteme bağlı yükler, aşırı gerilimlerin oluşmasını engelleyebilir veya onların genliklerini azaltabilir. Buna rağmen böyle bir olayın meydana gelmesi teorik olarak mümkündür ve pratikte bunun örnekleri kaydedilmiştir.

6. BÖLÜM

GEÇİCİ AŞIRI GERİLİMLER

Bunlar tam anlamıyla geçici aşırı gerilimler olmamasına rağmen geçici (temporary) aşırı gerilimler sıklıkla geçici olayı çağrıştırır ve geçici olaya çok benzer. Bir geçici (temporary) aşırı gerilim [120], nispeten uzun süreli osilasyonlu bir aşırı gerilimdir. Bu aşırı gerilim söndürülmemiş veya sadece çok az söndürülmüştür. Bu, kısa süreli ve genellikle oldukça söndürülmüş olan yıldırım ve anahtarlama aşırı gerilimleri ile zıt yapıdadır. Anahtarlama ve süresiz aşırı gerilimlerin her ikisi de bir anahtarlama işleminin sonucu olarak veya bir arızanın başlaması veya temizlenmesiyle oluşur. Bu sebepten ikisi arasında (anahtarlama ile geçici-temporary-aşırı gerilimler arasında) iyi bir ayırım yapabilmek her zaman mümkün değildir.

Süresiz aşırı gerilimler sistemde farklı etkilere sahip olabilir. Eğer genlikleri yüksek ise izolasyon atlaması ve dahili izolasyonun delinmesi; eğer doymaya sebep olursa transformatör ve reaktör çekirdeğinin ısınması, bu etkiler arasındadır. İlave olarak, darbe parafudrunun (surge arrester) ısıl stabilitesini etkileyebilir.

6.1. Generatör Yükünün Kalkması

Normal yüklü bir generatörün yükünün herhangi bir nedenle ani olarak kalkması halinde, örneğin bir kısa devre arızası sonunda anahtarın açması ile generatörün iç gerilim düşümü sıfıra düşeceği gibi, yük akımının sebep olduğu endüvi reaksiyonu da ortadan kalkar. Bu durumda uyarma regülatörü faaliyete geçerek gerilimi ayarlarsa da regülatör faaliyete geçinceye kadar, ani bir gerilim yükselmesi baş gösterir. Bu gerilim yükselmesinin genliği dikkate değer bir seviyede olabilir ve bu genlik hattın uzunluğuna, kaynağın reaktansına ve devreden çıkan/çıkartılan yüke bağlıdır [121]. Gerilimdeki bu artışı minimize etmekte reaktif kompanzasyon yardımcı olabilir. Fakat seri kapasitör kompanzasyonunun belirli seviyeleri için kendiliğinden uyarıcı (self

excited) osilasyonlar oluşabilir [125,126]. Bilindiği gibi, stasyonær (sürekli) çalışmada generatörün uçlarındaki U gerilimi ile E e.m.k. arasında

$$E = U + (R + jX_d) I \quad (6.1.1)$$

bağıntısı olup, R sargı direncinin ihmal edilmesiyle,

$$E = U + jX_d I \quad (6.1.2)$$

denklemini yazılabilir. Burada

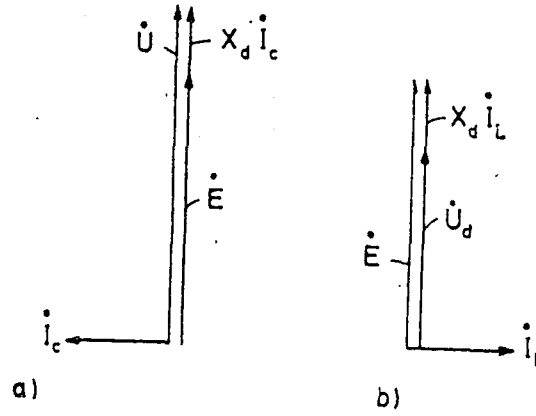
- I : Bir faz sargısından geçen akım.
- X_d : Faz sargısının senkron reaktansı.
- E : e.m.k. (uyarma sabit kabul edildiğinden, E=sabittir).
- U : Sargı ucundaki gerilim.
- I : Yük akımı (I_L endüktif, I_c kapasitif).

göstermektedir. Sürekli çalışmada boyuna gerilim düşümü

$$\Delta U = X_d I \sin\phi \quad (6.1.3)$$

bağıntısıyla verilir. Generatör yükü kalktığında $I = 0$ olduğundan, gerilim düşümü de sıfır olur. Genellikle generatörler omik ve endüktif yüklendiklerinden $E > U$ dur ve gerilim düşümü sıfıra eşit olunca, uyarmanın sabit kalması şartı ile gerilim ΔU kadar büyüyerek $U=E$ olur. Şekil-6.1'de saf endüktif ve saf kapasitif yüklere ait basit fazör diyagramları gösterilmiştir.

Şekil-6.2'de gerilim yükselmesinin zamana bağlı değişimi gösterilmiş ve uyarmanın bunun üzerine olan etkisi işaret edilmiştir.



Şekil-6.1. Reaktif akımla yüklenen bir generatörün basit fazör diyagramları.

- a) Saf kapasitif yük için.
- b) Saf endüktif yük için.

Genel olarak S_1 zahiri gücü ile çalışmakta olan bir generatörün yükü ani olarak ΔS kadar azalır, bunun reaktif bileşeninde ΔQ gibi bir azalma olur. Yük kalkmasından önce generatörün yük akımı I_1 ise, gerilimde

$$\Delta u'' = X_d'' I_1 \quad (6.1.4)$$

gibi ani bir artış başgösterir. Ani olarak subtransiyent (başlangıç) gerilim darbesi anma geriliminin % 30'una kadar çıkar. Bu artış herhangi bir regülatörle karşılanamaz. X_d'' generatörün başlangıç reaktansı olup, $\Delta u''$ ise başlangıç gerilim artışıdır. 2-3 periyot sonra gerilim artışı

$$\Delta u' = X_d' I_1 \quad (6.1.5)$$

değerine yükselir. Buna geçici veya transiyent gerilim artışı denir. Burada X_d' generatörün transiyent reaktansı olup $(\Delta u' - \Delta u'')$ farkı, hemen hemen hiç karşılanamaz. $\Delta u'$ gerilim yükselmesi % 25 mertebesine kadar çıkabilir. Eğer generatör hızlı çalışan bir gerilim regülatörü ile donatılmış ise, $\Delta u'$ den sonra gerilim yine U_1

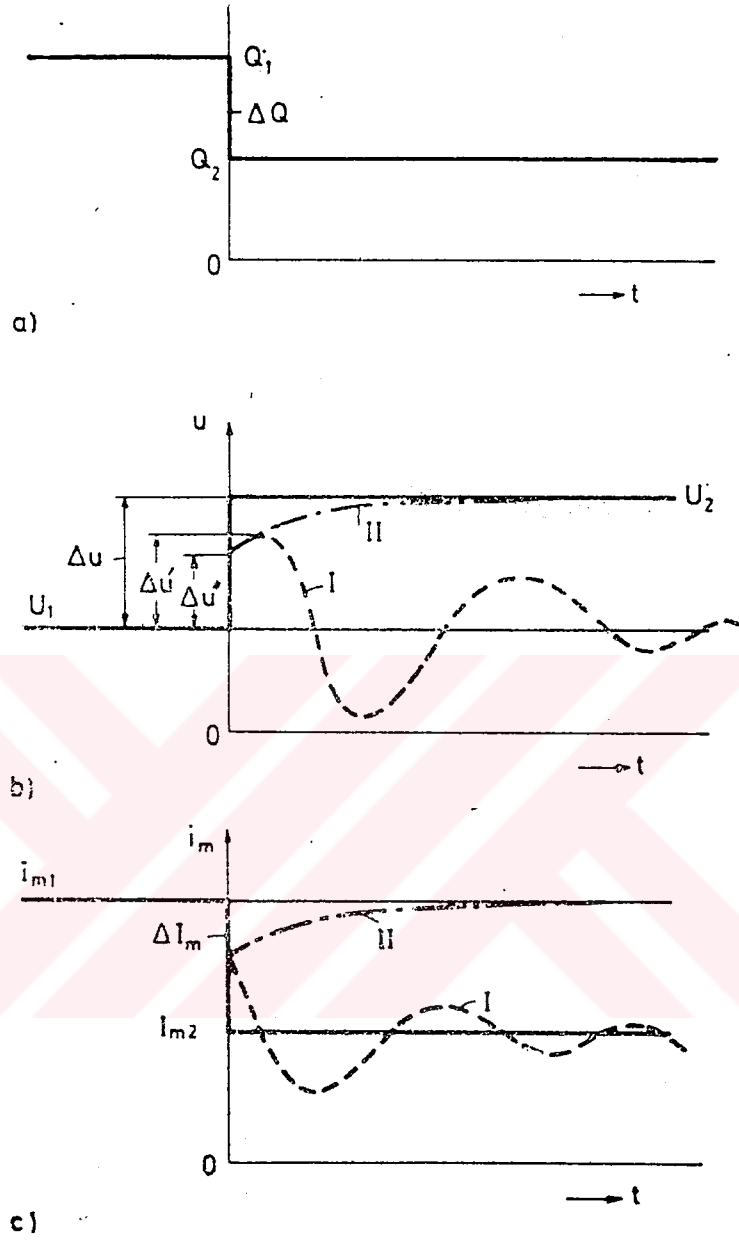
başlangıç değerine ayarlanır. Eğer bir gerilim regülatörü yoksa veya regülatör çalışmazsa, gerilim U_2 değerine kadar çıkar ve Δu gerilim artışı tehlikeli değerlere yükselir.

Bundan başka ani yük kalkması halinde, dönme sayısı regülatörü faaliyete geçinceye kadar, türbinin dönme sayısı da yükselebilir; bu da generatör geriliminin yükselmesine neden olabilir. Dönme sayısının artması ile ayrıca uyarma dinamları ile donatılmış generatörlerde uyarma dinamosunun gerilimi yükseldiğinden, generatörün uyarması da artar. Bilindiği gibi, generatörün e.m.k. dönme sayısı ve uyarma ile orantılı olarak değişir.

$$E = k n \phi \quad (6.1.6)$$

Buhar santrallerinde aktif yükün kalkması halinde dönme sayısı regülatörü çok kısa zamanda faaliyete geçerek dönme sayısını ayarladığından, türbo alternatörlerde dönme sayısının artması sebebiyle gerilim yükselmesi tehlikesi büyük değildir. Buna karşılık su santrallerinde boru tesislerinin mekanik bakımdan aşırı zorlanmasına yol açmamak için dönme sayısı ayarının çok hızlı yapılması mümkün değildir. Bu sebeple su santrallerinde türbin tipine göre % 50 oranında bir artış söz konusu olur ve böylece hem gerilimde hem de frekansta aynı oranda bir artış baş gösterir.

Eğer devreden çıkan generatör ayrıca kapasitif yüklenirse, mesela generatör boştaki çalışırken uzun bir yüksek gerilim hava hattına bağlı kalırsa, bu durumda endüvi reaksiyonu uyarma alanını desteklediğinden, yukarıda açıklanan olaylardaki artışlara ilave olarak, gerilim bir miktar daha yükselebilir. Bu yoldan meydana gelen gerilim yükselmesi, kapasitif yükün büyüklüğüne bağlıdır. Şekil-6.1'de saf kapasitif yüklü bir generatörde gerilim yükselmesi, basitleştirilmiş fazör diyagramında gösterilmiştir [40].



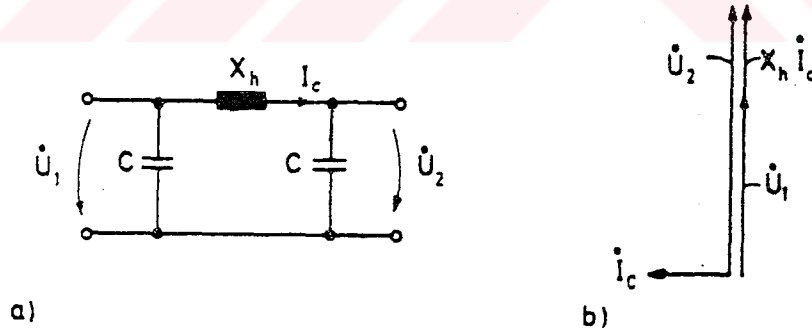
Şekil-6.2. Yük kalkması sonucu gerilim yükselmesi.

- a) Ani yük kalkışı.
 b) Generatör gerilimindeki yükselme.
 c) Uyarma akımı değişimi.
- ΔQ : Yük azalması (reaktif).
 u : Generatör gerilimi.

- $\Delta u''$: Başlangıç (subtransiyent) gerilimi artışı.
 $\Delta u'$: Geçici (transiyent) gerilim artışı.
 i_m : Uyarma akımı.
I : Uyarma regülatörü faaliyete geçmiştir.
II : Regülatörsüz.

6.2. Boşta Çalışan Hattın Sonunda Gerilim Yükselmesi (Ferranti Olayı)

Kısa ve orta uzunluktaki hava hatlarında boşta çalışma durumunda hat kapasitesinden dolayı, hattın sonunda gerilim, hat başı gerilimine göre bir hayli yükselir. Ferranti olayı adı verilen bu olayda gerilim yükselmesinin sebebi, hat başından hat sonuna doğru, hat boyunca geçen kapasitif akımdır. Bu akımın hattın endüktif reaktansı üzerinde meydana getirdiği gerilim düşümü, hat başı doğrultusunda olduğundan bununla toplanır. Şekil-6.3'te orta uzunluktaki hattın basitleştirilmiş eşdeğer şeması ile buna ait gerilim fazör diyagramı verilmiştir. Burada hattın omik direnci ve kondüktansı ihmal edilmiştir.



Şekil-6.3. Boşta çalışan hattın sonunda gerilimin yükselmesi (Ferranti olayı).

- a) Hattın eşdeğer şeması.
b) Fazör diyagramı.

Burada

- U_1 : Hat başı gerilimi.
 U_2 : Hat sonu gerilimi.
 I_c : Kapasitif hat akımı.
 X_h : Hattın kapasitesi.

olarak gösterilmiştir.

Boşta çalışan kısa hatlarda gerilim bağıntısı için yaklaşık olarak

$$U_1 = U_2 (1 - \sigma) \quad (6.2.1)$$

yazılabilir. Burada U_1 ile U_2 aynı fazdadır ve

$$\sigma = \omega^2 L' C' l^2 / 2 \quad (6.2.2)$$

ile bulunur. Bazı basitleştirici kabuller ile L' ve C' birim hat sabitleri için

$$L' C' = \epsilon_0 \mu_0 = 1.112 \cdot 10^{-11} \text{ s}^2/\text{km}^2 \quad (6.2.3)$$

bulunur. $f = 50$ Hz şebeke frekansında yukarıdaki denklem için

$$\sigma = 5.5 \cdot 10^{-7} \cdot l^2 \quad (6.2.4)$$

elde edilir; burada l , km cinsinden hat uzunluğudur. Buna göre gerilim artışı yüzde cinsinden

$$(\%) \epsilon = \frac{U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{\sigma}{1 - \sigma} \cdot 100 \quad (6.2.5)$$

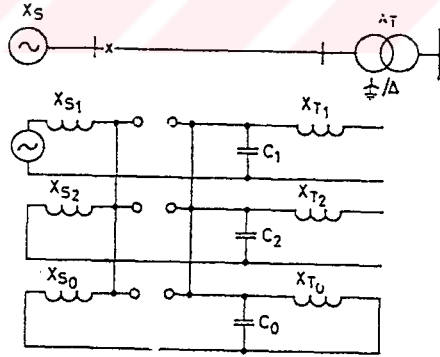
dır. $\sigma \ll 1$ olduğundan, yukarıdaki denklem ile birlikte

$$(\%) \varepsilon \approx 100\sigma = 5.5 \cdot 10^{-5} \cdot l^2 \quad (6.2.6)$$

bulunur. $l = 500$ km için hat sonundaki gerilim artışı yaklaşık olarak $\varepsilon = \%14$ dür. Bu yaklaşık hesap $l = 500$ km'ye kadar kullanılabilir [39].

6.3. Açık Devre ve Tek Faz Kapaması

Yüksüz bir transformatörü ilgilendiren bir hat anahtarlandığında, güç frekansında rezonans koşulları oluşabilir [121]. Bu tür bir durum Şekil-6.4'de gösterilmektedir. Eğer kesicinin bir fazının kapamasında bir gecikme olursa pozitif bileşen şebeke, paralel bağlı negatif ve sıfır bileşen şebekelerle seri bağlı durumda bulunur. Bazı hat uzunlukları için pozitif bileşen şebeke, sıfır bileşen şebeke endüktif olmasına rağmen kapasitiftir. Sonra, güç frekansında pozitif ve sıfır bileşen reaktanslarını eşit yapan bu hat uzunluğunda bir rezonans koşulu oluşur. Yapılan bir rezonans için, rezonans eğrisinin pik değerine yaklaşan yüksek değerli gerilimlerin oluşması önemli değildir.



Şekil-6.4. Tek fazlı açık devreye bağlı olarak ortaya çıkan rezonans durumu.

Bu tür bir durum, İsveç'te [122] yüksüz bir transformatöre bağlanmış 400 kV'luk hattın 200 km'lik bir uzunluğunda oluşmuştur. Bir kesici kutbu arızadan dolayı diğer iki fazdan 300 ms sonra kapanmıştır ve bu durum transformatörde bir darbe parafudrunun

yetersiz kalmasına sebep olan aşırı bir gerilimle sonuçlanmıştır. Sonraki araştırmalar bu aşırı gerilimin 2.25 p.u.'luk bir genliğe sahip olduğunu fakat transformatördeki doyma sebebiyle 2.15 p.u.'e düştüğünü göstermiştir. En kötü durum, doyma dahil edilmediğinde 4 p.u.'luk aşırı gerilimleri veren 250 km uzunluğundaki bir hat ile oluşacaktır (doyma dikkate alındığında bu gerilim 2.15 p.u.dur).

Bu koşullara benzer koşullar, hafif yüklü bir transformatörün bir hat ile beslenmesi durumunda tek faz kapama işlemleri esnasında oluşabilir. Bu aşırı gerilimin üretilmesi, tekrar kapamanın ilk önce transformatör sonunda oluşması şartına bağlıdır. Neticede, hattın kaynak sonunda bir fazı açık devre edilmiş olarak bırakılır. Bu durumdan sakınmak için tekrar kapama (auto-reclosure) elemanı, hattın yük ucundaki kesiciden önce, kaynak ucundaki kesici tekrar kapayacak şekilde seçilmelidir.

6.4. Doyma ve Harmonik Rezonans

Büyük geçici (temporary) aşırı gerilimler sisteme bağlı transformatörlerde doymaya yol açabilir. Üretilen harmonikler bir sistem tabii frekansına yakın bir frekansa ulaşırsa harmonik rezonans oluşabilir.

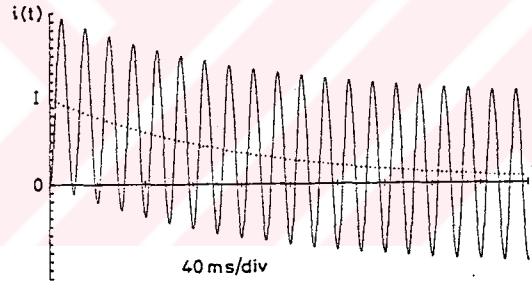
Yükün devreden çıkartılması ve bu sebeple gerilimdeki yükselme transformatörde doymaya ve harmoniklerin üretilmesine sebep olabilir. Bir generatör transformatörüne bağlı 420 kV'luk 35.4 km uzunluktaki bir hattın 270 MW, 0.85 güç faktörlü bir yük devre dışı edildiğinde, böyle bir durum kaydedilmiştir [90]. Bu sırada 1.4 p.u.'luk bir geçici (temporary) aşırı gerilim kaydedilmiş ve bu gerilim güç frekanslı gerilime bir harmonik gerilimin bindirilmesinden oluşmuştur.

Transformatörlerle sonlandırılmış hatların enerjilenmesi harmonik rezonansların sebep olduğu geçici (temporary) aşırı gerilimlere götürebilir. Finlandiya'da [123] transformatörlerle sonlandırılmış 400 kV'luk 520 km uzunluklu bir hat, zayıf bir kaynaktan enerjilendirilmiştir ve uzun süreli 2.5 p.u.'luk bir aşırı gerilimle sonuçlanan

bu durumda 2. harmoniğin görüldüğü resmi olarak açıklanmıştır. Böyle aşırı gerilimlere, uzun hatlara sahip zayıf sistemlerde sıkça karşılaşılr. Sistem, harmoniklerden biriyle rezonansa geldiğinde çok zor koşulların oluştuğu bilinmektedir. Bu aşırı gerilimler uzun bir süre devam edebilir. Bu gecikmenin sebebi, yüksüz transformatör çekirdeklerinin yavaş yavaş mıknatıslıktan kurtulmasıdır.

6.4.1. Ani Deşarj Akımı

Ani deşarj akımının (inrush current) yapısı, sabit bir L endüktansı ile seri bir R reaktansını karşılaştıran bir lineer devrenin geçici tepkisini bulmak suretiyle değerlendirilebilir. Basit bir diferansiyel eşitlik, $t=0$ anında $E \sin \omega t$ güç frekanslı gerilimin uygulamasından doğan en kötü durum için $i(t)$ ani deşarj akımını bulmak amacıyla çözülebilir. $t=0$ anından sonra $i(t)$ akımının değeri Şekil-6.5’de gösterilmiştir.



Şekil-6.5. Sürekli hal durumunda I pik değerindeki gecikmeyi ($e^{-R\omega L}$) gösteren, $t=0$ da $E \sin \omega t$ gerilimiyle uyarılmış seri bir R ve L devre için ani deşarj akımı.

Burada güç frekansının yirmi periyodundan sonra sürekli hal koşuluna yaklaşılr. Bu başlangıç cevap, sürekli hal pik akımının muhtemel olan ikiye katlanışını gösterir. $i(t)$ akımının demir çekirdekli bir transformatörde mıknatıslanma akımını temsil edebileceği bilinmektedir. Şekil-6.5’de gösterilen akım dalga şeklinin pikleri ile demir devresinin doyurulmaması şartı ile iyi bir temsil gerçekleşebilir. Bundan dolayı pek çok güç transformatörü, mıknatıslanma akımının ve çekirdek kayıplarının aşırı olmadığı yerlerde B-H eğrisinin yakınında çalışmak üzere dizayn edilir. Bu durumda, geçici akım

(transient current) transformatörden akan aşırı akımla sonuçlanan ard arda gelen yarım periyotlarda çekirdek doymasını sağlayacaktır.

Yukarıda tarif edilen durum, enerjilendirme işleminden önce çekirdekdeki artık mıknatıslanmaya ve kesicinin kapadığı noktaya bağlıdır. Transformatör kaynağa bağlı değilken bu artık mıknatıslanma devre şartlarına bağlıdır. Bir kesici ile akımın kesilmesi normal olarak bir tabii akım sıfırında olur ve histerezis çevrimi (hysteresis loop) demir çekirdekte kalan artık mıknatısiyeti gösterir. Artık mıknatısiyet ve noktasal anahtarlamanın en kötü koşulları altında, tam yük akımından daha büyük genlikli çeşitli ani deşarj akımlarının meydana gelmesi mümkündür. Bu ani deşarj akımı bir seri direnç yolu ile enerjilendirme vasıtasıyla sınırlanabilir. Bu durumda çekirdekdeki magnetik akı bir kaç periyod sonra yaklaşık sıfır değerine kadar değişebilir ve seri direnç aşırı akım akışı olmaksızın devre dışı edilebilir.

6.4.2. Dinamik Olarak Beslenen Aşırı Gerilimler

Çekirdek doyması oluşturmak üzere oldukça yeterli bulunan transformatör ani deşarj akımlarını ilgilendiren uzun süreli dinamik aşırı gerilimlere, güç faktörü düzeltme kapasitelerinin veya harmonik filtrelerin kullanıldığı durumlarda rastlanılır. Bu tip anahtarlama aşırı gerilimleri, bir DC sistemin izoleli generatör gibi çok az söndürülmüş bir AC sisteme bağlanması ile yüksek gerilimli doğru akım (HVDC) sisteminde ortaya çıkar [164,165]. Bu özel durumda, dönüştürücü valflerin nominal gerilimlerinin normal teçizatınki kadar iyi bir şekilde dikkate alınma zorunluluğu vardır. Bu aşırı gerilimler transformatör enerjilendirilmesi esnasında, AC arıza temizlenmesi sırasında ve DC yükün devreden çıkartılmasından sonra oluşur.

Genelde ferrezonans ve ani deşarj akımlarıyla dinamik olarak beslenen aşırı gerilimler, AC sistemlerde bir iletim hattı veya kablosunun uç noktası gibi bir kapasitif kaynaktan bir transformatörün enerjilendirilmesinde oluşur [164,166,167].

6.5. Alçak Gerilim Şebekelerinde Geçici Aşırı Gerilimler

6.5.1. Geçici Olayların Durumu

1961'den önce fabrikalarda, laboratuvarlarda, ofislerde ve yerel arazilerde geçici olayları inceleyen çok az istatistiki bilgi yayınlanmıştır. Elektronik teçhizatlarda yarı iletkenlerin kullanımının sürekli gelişimi (termik cihazlar yerine kullanılmak üzere) aşırı gerilimlere maruz kaldıklarında dizayncıların yarı iletkenlerin işletme güvenliği problemini dikkate almalarına sebep olmuştur. Bu tür düşünceler geçici olayların otomatik olarak kaydedilmesi için gerekli donanımların gelişmesini sağlamıştır. Müteakkip olarak alçak gerilim şebekesi ana besleme hatlarında kısa süreli geçici durumların oluşumunun frekansı ile genliği arasındaki ilişkinin istatistiki bilgisi 1964'te [106] yayınlanmıştır. Bu bilgiyi elde etmekte kullanılan donanım, 0.3 mikrosaniyeyi aşan sürelerle sahip dalgaları cevaplayacak ve 50,100,140,200,280,400 ve 560 volt gibi daha önceden elde edilmiş gerilimlerden daha büyük genliklere sahip geçici olayların sayısını sayacak kapasitedeydi. Ana besleme hattı geriliminin ani değerine zıt olarak oluşan büyük genlikli geçici olayların kaydedilmesini sağlamak için kaydedici cihazlar pasif şebeke yolu ile (frekans engelleyici filtreler -frequency rejection filters-) nötr noktası ile hat arasına bağlanmıştır. Bu filtreler, CR yüksek geçiren filtre bölümleriyle tamamlanan paralel T-tipi çentik filtrelerinin (notch filters) kullanımı ile şebeke frekanslı dalga şeklinin büyük ölçüde engellenmesini sağlamıştır. Böylece geçici olaylar, gerçekte elde edilen şebeke frekanslı dalga şekilleriyle direkt olarak ölçülmüştür. Toplam gerilim yarı titreşim kayıtları, şebeke engelleyici filtreleri kullanılmaksızın geçici durumun tam bir değerlendirmesini yapmak amacıyla eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Araştırmalar [106], 50 volt pik değerine kadar olan geçici gerilimlerin verilen bir bölgede her 100 günde bir oluştuğunu ve daha yüksek geçici gerilimlerin oluşum frekansına ışık tutması açısından, gerilimin genliğindeki her yarı-yarıya artış için bu gerilimlerin oluşma sıklıklarının onda bire düştüğünü göstermiştir.

Güç kaynağı bozuklukları şu şekilde sınıflandırılabilir: “Darbe”(surge), bir kaç peryod için kaynak geriliminde bir artışa işaret ederken “sapma” (sag) terimi, şebeke dalga şeklinin bir kaç peryodu için kaynak gerilimindeki belirli bir düşüşe işaret etmek için kullanılır. “Normal mod” terimi, hat ve nötr arasında gözlenebilecek geçici olayları göstermeye yarar. Bu tür geçici olaylar bir toprak referansı ile ya bir hat ya da bir nötr arasında gözlenebilir. Bu tür gözlemlerin hem hat hem de nötrde bir geçici olayın zaman uyuşmasına gösterdiği ettiği durumlarda genel mod teriminden sıklıkla bahsedilir.

1984’te iki günlük bir peryodla bir araştırma laboratuvarında gerçekleştirilmiş olan tipik bir araştırma, 100 normal modlu geçici olayın oluştuğunu kaydetmiştir. Bu geçici olaylardan 3’ü 400 volt’u aşan 10 adet en yüksek genlikli dalga şekilleri kaydedilmiştir. Bu geçici dalgalardan hepsi (100 adet) de 50 volt’u aşmıştır.

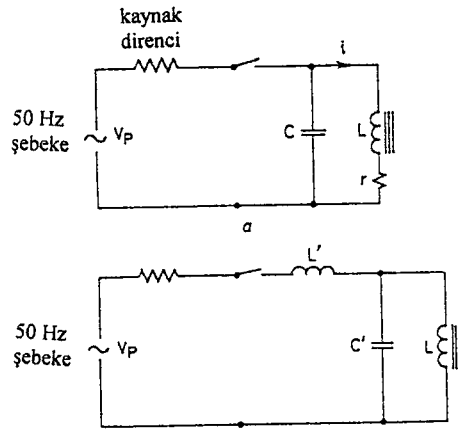
6.5.2. Lokal Geçici Olayların Kaynağı

Daha önceki bölümlerde harici sebeplerden dolayı ortaya çıkan geçici gerilimler, uygun alçak gerilim şebekeleri içerisinde de ortaya çıkabilirler. Örneğin toprak arıza şartları altında bir tali trafo mahalinin tamamı doğru bir toprağa göre yüzlerce volt gerilimlere yükselebilir. Bundan dolayı tecrübelerden şu ortaya çıkmıştır; alçak gerilim sistemlerinde ortaya çıkan geçici olayların çoğunluğu alçak gerilim sisteminin kendisi içerisinde üretilir. Bu üretilen geçici olaylar, normal yük şartları altında bir tali transformatörün alçak gerilim terminallerinde ortaya çıkan 200 volt genlikli (zaman zaman sivri uçlu) gerilimlerdir. Tali transformatör merkezinden uzaklaştıkça yüklerin lokal anahtarlanması geçici olayların oluş frekansını büyük ölçüde belirler. Konut yüklerinde, 100 watt’lık bir akkor flemalı lamba gibi düşük akımlı endüktif olmayan yükler, uzun bir PVC kabloyla elektriksel olarak bağlandığında, yani kapandığında 100 volt genliğini aşan radyo frekanslı söndürülmüş osilasyonlar meydana gelebilir. 100 watt’lık bir lamba normal çalışma koşullarında ilk olarak 600 Ω civarına yükselen 40 Ω ’luk (soğuk direnci) bir yük teşkil etse bile, bu kablonun uzunluğu yaklaşık 100 Ω karakteristik empedanslı bir iletim hattı olarak hesaba katılabilir. 240 volt’luk şebeke

dalga şeklinin pikinde ve 0.43 genlikli bir yansıma katsayısında kablodaki kapamanın olduğu varsayımı 100Ω 'luk hattın yerine 40Ω 'luk dirençle temsil edilmesi manasına gelir. Sonra ilk yansıyan dalga 146 volt'luk bir genliğe sahip olacaktır. Art arda gelen yansımalar yaklaşık 1 Mhz'lik söndürülmüş osilasyonlar üretmiştir. Bu frekans, hattın fiziksel uzunluğuna ve PVC izolasyonun dielektrik sabitine bağlıdır.

Bir flouresan lambanın anahtarlanması megahertz'ler mertebesinde yaklaşık 500 volt genlikli, söndürülmüş osilasyonlu bir geçici olayın bir kaç periyodunu üretebilir. Böyle geçici olaylar, deşarj lambasının bu tipi için kullanılan ateşleme mekanizması ve tüpünü çağrıştırmaktadır. Geçici olayların daha genel bir sebebi katı anahtarların (hard switches) kullanılmasıdır. Katı anahtarlar, (kontak ayrılmasının yüksek hız özelliğinden dolayı) söndürülmüş sinüsoidal osilasyonun bir darbesi gibi enerjiyi dağıtılmış halde bırakan bir endüktif devrede akımı kesebilme kabiliyetine sahiptir. Bu geçici olayın genliği, anahtarın açıldığı şebeke periyodunun dalga üzerindeki noktasına bağlıdır.

Endüktif devreler temel olarak endüktif motorlarda, şebeke transformatörlerinde, selenoid kontrol valflarında ve rölelerde yer alan demir çekirdeğe sahip toplu endüktanslardan oluşur. Geçici durum koşulu, hem açma hem de kapama işlemini ilgilendirir ve Şekil-6.6a ve Şekil-6.6b'deki açma kapama düşüncelerinden sonra basit bir analiz gösterilmektedir.



Şekil-6.6. Endüktif devre geçici olayları.

- a : Açma işlemi.
 b : Kaçak sargı endüktansı L ve C'nin geçici olayın frekansını belirlediği kapama işlemi.

Toplu kapasite C, geçici olayı tavsiye edilen sınırlar içerisinde tutmak amacıyla kullanılabilir. Bu kapasite olmazsa, devrenin açılmasında endüktör içinde akımın mıknaştırılmasında ani bir kesilme olacaktır. Bu endüktör di/dt'nin büyük bir değerini üretebilecek ve böylece oldukça yüksek bir gerilim gelişebilecek ve endüktör üzerindeki kaçak sargı kapasitesi vasıtasıyla sınırlanabilecektir. Anahtarın açılmasından hemen önce endüktörde akan I akımı, anahtarın açılması sırasında C, L ve r ile şekillendirilen osilasyonlu devre içinde akmalıdır. Burada r, bakır ve demir devre kayıplarıyla belirlenir. r'nin ihmali, ilk anda C' nin şarj olacağı V pik gerilimini belirlemek için enerjinin ölçülü kullanılmasına izin verir.

$$\frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} L I^2 \quad (6.5.2.1)$$

ve buradan

$$V = i \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6.5.2.2)$$

Bu muhtemel pikin ani düşüş oranı

$$\omega L/r \quad (6.5.2.3)$$

ifadesine bağlıdır. Burada ω osilasyonun radyan frekansı

$$1/\sqrt{LC} \quad (6.5.2.4)$$

ile verilir. En büyük genlikli geçici olay

$$i = V_p / \omega_s L \quad (6.5.2.5)$$

gibi bir kaynak şebeke akımının bir pik değerindeki kesmeye tekabül eder. Değerler yerine konulduğunda

$$V/V_p = \omega / \omega_s \quad (6.5.2.6)$$

olur. Bu, normalize edilmiş formda geçici olayın genliğini verir ve

$$\omega = \omega_s \quad (6.5.2.7)$$

olduğunda, geçici olayın, şebeke gerilim pikiyle sınırlandırıldığını gösterir. Kapasitenin bu rezonans değeri pratikte nadiren kullanılır. Çünkü bu kapasite değerinin bir bölümü geçici olayı belirlenmiş değerde sınırlayabilir. Anahtarın açılması ile oluşan geçici olayların, toplu kapasite C kullanılmadığı zaman çok fazla öneme sahip olmadığı bilinmektedir. Fakat C mevcut olduğunda, bu geçici olayın kapasite değerinin artışıyla pik şebeke geriliminin iki katı kadar bir maksimum değere ulaşacağı bulunur (şebeke gerilim pikinde kapama varsayımı ile). Oldukça söndürülmüş yapıdaki bu osilasyonlu geçici olayın frekansı, Şekil-4.6b'de işaret edildiği gibi, L'ye öncülük eden şebekeye uyan endüktansla idare edilir ve bu tür bir yüksek frekansta endüktörün ωL empedansının etkisi ihmal edilebilir.

Katı hal cihazlarının geniş kullanılması sebebi ile geçici olaylar sürekli olarak meydana gelmektedir. Bu cihazlar, şebeke frekans dalgasının herbir periyodunun kıyılması suretiyle yük gücünün faz kontrolünü sağlar. Bu dalga şekli kıyııcı (chopping) devrelerin hızlı açma kapama özellikleri (tristör ve triyakların kullanılması) radyo parazitlerine sebep olan yüksek harmonikleri üretebilir. Bu parazitler, yük akımındaki artışa paralel olarak artar ve bastırılması oldukça maliyetli ve oldukça güç bir hal alabilir. Uzun

zaman sabitine sahip bir yük olarak düşünölebilen elektrikli ısıtma, integral periyot kontrolü veya ani ateşleme olarak adlandırılan teknikle kontrol edilebilir. Anahtarlama, şebeke dalga şeklinde sıfır gerilim geçişinde yapılır ve gerçekte parazitten bağımsız şebeke dalga şeklinin düşük frekanslı açma-kapama modölyasyonunun bir şekliyle sonuçlanır.

Ani ateşleme ile lambaların karartılması, istenmeyen ve bazı durumlarda zararlı kırpışma etkileri (flicker effects) üretecektir. Bu sebepten dolayı, bu teknik aydınlatma yüklerine uygulanmaz. Geçici olayların bütün formlarıyla üretilen parazitler elektromagnetik parazitler (EMI) olarak bilinir. Bilgisayar elektromagnetik paraziti dijital kapıların yüksek seviyeden alçak seviyeye (lojik 1'den lojik 0'a) sürekli olarak anahtarlanması ile üretilir ve yapılan Fourier analizi neticesi, lojik sinyallerin yüz megahertzlere kadar varan tekrarlı harmonikleri üretilebileceği gösterilmiştir.

Yer yüzeyinin üzerinde (atmosfer dışında) bir nükleer cihazın infilakı 10 nanosaniyeden daha kısa bir yükselme süresine sahip 100'lerce mikrosaniye süren muazzam bir elektromagnetik darbe (EMP) üretecektir. Bu elektromagnetik darbe, tekil bir dikdörtgen darbeye yaklaşır ve en düşük frekanslardan yüzlerce megahertzlik frekanslara kadar geniş bir frekans spektrumunu kaplar. Bir megatonluk atmosfer dışı bir patlama, sadece yeryüzü eğimiyle sınırlanmış belirli bir bölgenin her metresinde kilovoltlarca alan dayanımları oluşturur ve patlamanın merkezinden 1000 km yarıçaplı alandaki haberleşme donanımlarında ve güç besleme hatlarında çeşitli hasarlara sebep olur.

6.5.3. Lineer Olmayan Cihazlarla Geçici Olayların Bastırılması

Gerilim bağımlı dirençler (varistors) röle kontaklarında veya bitişikteki komütatör bölümünde görölen gerilimler gibi olan aşırı gerilimleri bastırmak amacıyla kullanılır. Lineer olmayan bu ilişki

$$V = (\text{const.})I^\beta \quad (6.5.3.1)$$

veya

$$\log V = k + \beta \log I \quad (6.5.3.2)$$

şeklinde logaritmik olarak verilebilir. 1 watt'lık dağılımdan daha az ve düşük gerilimler için, titanyum oksit tanecikleri (damlaları) β değerinin 0.11-0.3 aralığıyla kullanılır. ZnO kullanılarak imal edilen disk tipleri, 50 volt'tan 425 volt'a kadar efektif çalışma gerilimlerine sahiptir. Yaklaşık 1 cm çaplı diskler 6 Joule'lik tekrarsız enerjiler elde edebilir. Bu enerjiler, geçici olaylardan ortaya çıkar ve ark bastırıcı (spark suppressor) olarak görev yapar. Bu tür diskler için test şartnamesi, 2 kV'la şarjlı bir kapasiteden 8 joule'lük bir deşarj enerjisi gerektirir. Maksimum deşarj akımı genellikle 1Ω 'dan biraz düşük bir seri dirençle sınırlandırılır. Ağır gerilim bastırıcısının bu gerilim bağımlı direnç tipi, yarı iletkenleri korumak amacıyla bir bastırma etkisi ile (clamping action) geçici olayın genliğini düşüren bir sabit gerilim cihazı olarak çalışır. Bu cihaz, normal çalışma gerilimi koşulları altında akımın ihmal edilebilir boşalmasına sahip olacak şekilde dizayn edilir ve bastırma gerilimi mümkün olduğunca düşük olacak şekilde dizayn edilir. Cihazın fiziksel boyutu dağıtılacak enerjideki artışa paralel olarak artar. Bu enerji dağılımı 10 mikro saniyede sıfırdan maksimum değerine doğru lineer olarak artan ideal bir geçici olay ile ilgilidir. 1 mikro saniyede lineer olarak sıfıra inişten hemen sonra bu enerjinin nominal değeri, joule'e dönüşecektir. Yol gösterici olması açısından bu sıkıştırma gerilimi, nominal efektif iletme geriliminin 2.4 katıdır. Örneğin 250 volt efektif maksimum sürekli nominal değerli bir çinko-oksit (ZnO) akım bağımlı direnç, normal çalışma geriliminde cihazdan geçen akım yaklaşık 1 miliamper olsa da, içinden 100 amper geçtiğinde bir geçici olayı 600 volt ile sınırlayacaktır. Bu gerilim bölücü direnç, enerjinin nominal değeri ve maksimum akım değeri aşılmamak şartıyla geçici durum sıfıra düştükten sonra bu düşük akım boşalma (drain) koşuluna geri döner.

Alçak gerilim devrelerinde hızlı geçici olaylardan entegre devreler gibi yarı iletken cihazların direkt koruması ve DC güç kaynaklarından çıkan geçici olaylardan direkt korunma, PN silikon geçici olay bastırıcılarının kullanımı ile yapılır. Silikon bastırıcılar yüksek darbe elde etme kapasiteleri ve hızlı tepki süreleriyle karakterize edilir. Bu bastırıcılar, temel olarak iyonizasyonun kendi kendine artımı özelliklerine sahip zener diyotlardır. Tek kutuplu formda bu bastırıcı, iki zener diyodun arka arkaya seri olarak bağlanmasından oluşur. Böyle cihazlar işletmede tek bir PN cihaza göre daha yavaştır. 6.8 volt'luk DC bir kaynak barasında kullanılan tipik bir bastırıcı, 139 amper'lik maksimum bir pik akımda geçici gerilimi 10.8 volt'a bastıracaktır. Küçük bilgisayarlar ve mikro işlemci bazlı sistemler, bir yüksek dereceli Faraday ekranlamalı şebeke transformatörleriyle tamamlanan LC tipli, ekranlanmış şebeke filtreleriyle genelde radyo frekans parazitlerinden ve geçici olaylardan korunur.



7. BÖLÜM

ANALİZ METODLARI

Güç sistem şebekelerindeki geçici olayların hesaplanması basit değildir. Bunun sebebi güç sisteminin birçok tesis ihtiva etmesidir. Bu tesisin karakteristikleri çok geniş bir alanda değişim gösterir. Havai hatlar ve kablolar, pek çok amaç için toplu dağıtılmış parametrelili (lumped) olarak düşünülebilen transformatörler ve generatörlere zıt olarak doğada dağıtılmış parametrelere sahiptir. Geçici durum şartları altında güç sistemi, 100 Khz'lik bölgeye kadar güç frekansının geniş bir frekans bandını kaplayan gerilimler ve akımlara maruz kalabilir. Bu frekans alanının üzerinde, sistem parametreleri ve toprak yolu parametreleri frekansla değişen değerlere sahiptir. Sonuç olarak, herhangi bir hesaplama metodu, geniş bir frekans bandında toplu ve dağılmış parametrelerin her ikisini de iyi bir şekilde temsil etme kabiliyetine sahip olmalıdır ve darbe parafudrları, magnetik doyma, korona ve ark gibi nanlineer karakterli etkileri kapsar. Pratikte böyle bir metodu başarmak kolay değildir ve akımın kullanıldığı metodlar bazı bakımlardan bir uzlaşmayı temsil eder. Kullanıcının özel taleplerinin belirlenmesine kadar bu uzlaşma geçerlidir.

Elle yapılan hesaplamalar sadece çok basit sistemler için pratiktir. Çünkü bu tür hesaplamaların karmaşıklığı ve zahmetli oluşu şebeke boyutlarındaki artışa paralel olarak hızla artar. Bu sebepten dolayı analog veya dijital bilgisayarların kullanımı zorunlu hale gelmiştir. İleriki kısımlarda, kullanılan bu metodların bazıları özetlenmektedir [68,127]. Analiz metodlarının etraflıca araştırılması bu çalışmanın konusu değildir, ancak bu konu ile ilgili detaylı bilgi [168]'den temin edilebilir.

7.1. Analog Metod

Güç sistemlerinde geçici olayların hesaplanması için geleneksel metod geçici şebeke

analizörünün (Transient Network Analyser, TNA) kullanılmasıdır. Bu metod 1939'dan beri kullanılmaktadır [95,128] ve esas itibarıyla toplu endüktans, kapasitans ve direnç elemanlarını kullanarak şebekenin bir ölçek (taksimat) modelininin oluşturulması amaçlanır. Model, küçük bir gerilim kaynağından enerjilendirildiğinde empedans ve frekans ölçeklendirmesi yapılabilir. Anahtarlama işlemleri minyatür anahtarlar vasıtasıyla yapılır ve sonuçta geçici olaylar bir osilaskoptan gözlemlenir.

Geçici şebeke analizörü, geçici olayların oluş şeklinin tam olarak bilinmediği yerlerde özel bir avantaja sahip olabilir. Dijital aletlerle, geçici şebeke analizörünün kombinasyonu oldukça faydalı olabilir ve bu iki yaklaşım rekabetten ziyade birbirini tamamlayıcı bir görüntü vermelidir. Literatürde geliştirilmiş, yani yüksek teknoloji ile üretilmiş birçok geçici şebeke analizör cihazı tanımlanmıştır [129-132]. Bazı durumlarda bu analizörler, dijital cihazlara da bağlı olarak kullanılabilir [133-136].

7.2. Diferansiyel Eşitliklerin Toplu Parametrelili Çözümü

Rezistif olarak sonlandırılmış kayıpsız bir iletim hattının geçici analizi klasik olarak hattın sonundaki yansımalarla göre yapılır. Bundan dolayı faz farklı dalgaların bir (time shifted waves) serisi, bir ünite basamağının (a unit step) kaynakla bağlantı noktası arasını katedebilmesi için geçen zamana bağlı olarak belirli bir zaman aralıklarında ortaya çıkar. Reaktif terminal empedanslı hat probleminin bir çözümü arandığında, pek çok yansıma dikkate alındığından dolayı Laplace dönüşümleri ile dalga yaklaşımı ters dönüşüme duyulan ihtiyaçtan dolayı oldukça karmaşık bir hal alır.

Problemi açıklamayı sağlayan bir yaklaşım, iletim hattını temsil etmek amacıyla sabit toplu parametrelere sahip sonsuz sayıda π ve T devreleriyle (bölümleriyle) ortaya konmuştur. Devrenin karmaşık yapısını minimize etmek amacıyla seçilen belirli sayıdaki bu devreler (bölümler), bu sınırlı temsilin ihtiyaç duyulan yüksek frekans performansı ile uyumluluk arzeder.

Hat uzunluğunun bir bölümünü temsil etmesi amacıyla bir tek T-devresinin alınması, ilgi alanı içerisindeki en yüksek frekansa kadar, karakteristik empedansın (Z_0) sabit olması gerekliliğini ortaya çıkarır. Kayıplardan bağımsız t-devresi için

$$Z_T = Z_0 \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.2.1)$$

yazılır. Burada

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}} \quad (7.2.2)$$

ve

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7.2.3)$$

şeklindedir. Burada

L : Bu devrenin (bölümün) toplam seri endüktansı.

C : Bu devrenin toplam şönt kapasitesi.

olarak kullanılmıştır.

En yüksek f frekansı f_c 'nin 1/7'ı kadar olduğunda, Z_T değeri Z_0 'dan yaklaşık %1 daha düşük olur.

Herhangi bir frekansta bu T-devresinden dolayı oluşturulan β faz gecikmesi şu eşitlikten elde edilir:

$$\cosh \beta = \cos \beta = 1 - 2\pi^2 f^2 LC = 1 - 2\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \quad (7.2.4)$$

β 'nın küçük değerleri için

$$\cos \beta = 1 - \frac{\beta^2}{2} \quad (7.2.5)$$

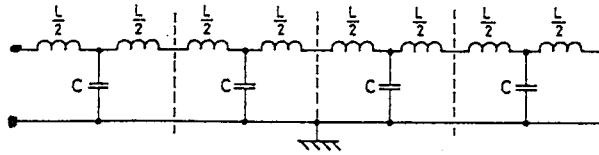
olur ve bu her devre (bölüm) için

$$\beta = 2\pi f \sqrt{LC} = 2\left(\frac{f}{f_c}\right) \text{ radyan} \quad (7.2.6)$$

eşitliğini verir. Bu T-devresi için t zaman gecikmesi her bölüm için

$$t = \sqrt{LC} \text{ saniye} \quad (7.2.7)$$

formülü ile verilir. Bu sebepten dolayı, herhangi bir hat veya kablonun temsil edilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan devre sayısı seçilebilir. Böylece, eşdeğer devreyi oluşturan sabit parametrelili bölümlerin frekans cevabı en yüksek öneme sahip frekans değerine kadar yeterli olacaktır. Bu yolla temsil edilebilen diğer bir fiziksel sistem, Şekil-7.1'da gösterilmektedir.



Şekil-7.1. Bir alternatör sargısının bir fazı. Herbiri L endüktansına ve çekirdekle bağlantılı C kapasitesine sahip T-devreleriyle temsil edilen sargılar.

Burada alternatör sargısının bir fazı seri bobin setleri olarak gösterilmektedir. Herbiri L self endüktanslı ve çekirdeğe göre dağıtılmış kapasiteye sahiptir. Yukarıda tanımlanan şeklin basamak cevabı şebeke analiziyle çözülebilir. Dört ağı ihtiva edildiği basit bir durum, p Laplace operatöründe sekizli bir polinoma yol açar. Bu polinomun türevine uyan cebirsel yöntem çok zahmetlidir. Polinomun elde edilmiş (doğru) katsayıları kullanılarak, kompleks birleşik köklerin dört çifti dijital hesaplama vasıtasıyla belirlenebilir. Bu yolla toplu parametrelili bir sistemin basamak cevabı için çözümün kapalı bir formu elde edilir.

Bununla beraber temsil amacıyla çok sayıda devrelere (T-devrelere) ihtiyaç duyulduğunda, bu tür lineer devre problemlerini çözmek için şekle dair analizleri içeren metodlar kullanılır. Burada eşitlikler, sabit katsayılara sahip lineer eşitliklerdir. Toplu parametre metodunun kullanılmasının sebebi, gerilim bağımlı dirençlerin (darbe bölücülerin) aksiyonunun aşırı gerilimlerin dijital hesaplanmasında dikkate alınabilmesidir [150]. Toplu parametrelili eşdeğer devrenin tek fazlı bir genel formu Şekil-7.2'de gösterilmektedir. Burada i akımının, verilen bir gerilim seviyesini aşmış v_0 geriliminin bulunduğu yerde, gerilim bağımlı dirençler üzerinden aktığı varsayılır. Bu devre, vektör diferansiyel eşitliği formunda vurgulanabilen sonlu sayıda diferansiyel eşitlikler vasıtasıyla tasvir edilebilir.

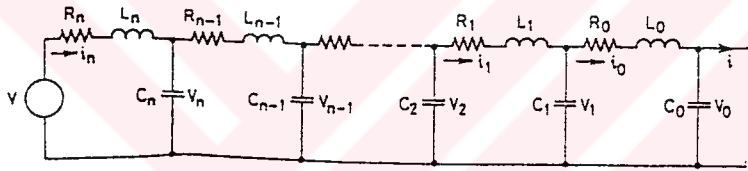
$$\dot{x} = Ax + Bv + Ci \quad (7.2.8)$$

Burada

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ \vdots \\ i_n \\ \cdots \\ \vartheta_0 \\ \vartheta_1 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{bmatrix} \quad (7.2.9)$$

$i = 0$ olduğunda, bu formül lineer bir şekilde dönüşür:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bv} \quad (7.2.10)$$



Şekil-7.2. Bir hattın eşdeğeri.

Bu eşitlikler bir nümerik integrasyon yöntemi ile integre edilebilir. Bu nümerik entegrasyon usulü lineer olmayan elemanların aksiyonunu yönlendiren yonteme bir şekil vermek amacıyla adapte edilmiştir, örneğin i, v_0 'ın bilinen bir fonksiyonudur. Örnek olarak, lineer olmayan silikon karpit dirençler için i, v_0 geriliminin 5. gücüne orantılı olarak alınabilir. Yukarıda tarif edilen metod, ön-şarjlı hat ile ilgili durumlar gibi sıfır başlangıç koşullu devrelere uygulanabilir. Eşitliğin lineer bir şeklinin mevcut olmasının da fazla bir değeri yoktur.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Ci} \quad (7.2.11)$$

Bu lineer form, geçici toparlanma geriliminin hesaplanmasında kullanılabilir. Burada i, enjekte edilmiş akımdır.

7.3. Yürüyen Dalga Metodları

Bu metodlar iletim hattı eşitliklerinin çözümü ile ilgilidir ve hat üzerinde yürüyen dalganın ilerisinin veya gerisinin bir kombinasyonu olarak vurgulanabilir. Çözümün iki grafiksel şekli mevcuttur. Birisi Schnyder [137] ve Bergeron [138]'a bağlı ve sıklıkla Schnyder-Bergeron Metodu olarak belirtilen metot. İkincisi Bewley [139] tarafından geliştirilmiş Kafes Diyagram Metodu olarak bilinen metottur. Dijital bilgisayarların ortaya çıkışı genişletilmiş tek fazlı ve üç fazlı şebekeleri ihtiva eden problemlerin çözümüne bu iki tekniğin uygulanmasını mümkün kılmıştır. Bu gelişme, Schnyder-Bergeron metodu için [63,105,145-148]'de ele alınarak tanımlanmıştır.

Bu metodlar hatlar ve kablolar gibi dağıtılmış parametre elemanlarına temelde uygulandığı halde generatörler, transformatörler ve kapasite banklarının toplu parametre elemanları kısa hat uçları vasıtasıyla yaklaştırılabilir [145,146]. Üç fazlı bir sistemin fazları arasındaki karşılıklı etkiler, şebeke elemanlarının tam empedans ve admitans matrislerinin kullanılmasıyla işleme dahil edilir.

İletim hattı bastırılması ve bozulması (attenuation and distorsion) her iki metotta da temsil edilebilir ve temsil edilen hat parametrelerinin frekansa bağlı olarak gösterilmesine izin verir [63, 147,148]. Kafes diyagram metodu durumunda, iletim hat kayıpları bütün gerilim basamaklarında düşünülerek hesaplamaya dahil edilir. Bu işlem, hattın en son ucuna varıldığında gerçek veya faz domenine geri dönüştürülmeden önce bastırıldıkları ve bozuldukları yerde karşılıklı endüklenen gerilim dahil edilerek, hattın modal domenine girilmesiyle yapılır.

7.4. Fourier Frekans Domen Metodu

Fourier serileri veya Fourier dönüşümlerini kullanan herhangi bir frekans domen yaklaşımı, istediğimiz şekle konmuş herhangi bir giriş dalgası ile sadece lineer sistem elemanları ve işlemleri hesaba dahil edildiğinde başarılı olabilir. Bir sinüs dalgasına lineer bir sistemin cevabı çoğunlukla, orjinal dalgayla aynı faz ve genlikli farklı bir sinüs dalgasıdır. Bu durum Fourier analizine, frekans spektrumu ve frekans cevabı düşüncelerine fiziksel önem kazandırır. Tekrarlı bir fonksiyona göre problemin formülasyonu ile herhangi bir giriş dalgası, ilgili sinüs dalgalarının bir toplamı olarak temsil edilebilir. Herhangi bir lineer sistemin çıkışı, sistemin frekans cevabı ile belirlenmiş olarak herbiri genlik ve faz bakımından dönüştürülmüş aynı sayıda ilgili sinüs dalgalarından oluşacaktır. Bu dalgalar, ilgilenilen sinüs dalgası aralığı için genlik ve faz olarak bilinmek zorundadır. Belirli sayıdaki sinüs dalgalarının herhangi birisi yalnız kendisi mevcutmuş gibi lineer sistemin içerisinden iletilecektir. Herbir sinüs dalga şeklinin süperpozisyonu, çıkış dalga şekillerinin toplamı gibi zamana bağlı bir fonksiyon olarak çıkış dalga şeklini verir.

Bu metodun avantajları; R, L, C, karakteristik empedans Z_0 ve propagasyon sabiti $(\alpha + j\beta)$ gibi bir veya daha fazla frekans bağımlı devre parametrelerinin fiziksel bir sistemin doğru temsil edilmesini sağlamak amacıyla dikkate alınmasıyla ancak tam olarak takdir edilebilir [151]. Bu sebeple, hem toplu ve hemde dağıtılmış frekans bağımlı parametrelerle karşılaştırıldığında, lineer bir sistemin cevap süresi, arzu edilen herhangi bir doğrulukta elde edilebilir. Bu sadece sistemin parametrelerinin bilindiği doğrulukla sınırlanmıştır [152]. Örneğin, stabil bir fiziksel sistemin bir basamak giriş cevabı, sonlu bir T zaman aralığından sonra bütün pratik amaçlar için bir sürekli hale ulaşır. Bu basamak (fonksiyonu) tekrarlama aralığı T'den büyük bir tekrarlı kare dalga ile yer değiştirilirse, sistemin geçici davranışını göz önünde tutan tüm bilgi cevaptan elde edilebilir durumdadır. Bu cevabı elde etmek için, ilk olarak temel ve harmonik frekanslarda değerlendirilmiş sistemin frekans cevap fonksiyonu ile giriş kare dalgasının Fourier katsayılarının genlik ve faz olarak dönüştürülmesi gereklidir. Yeterli baskın

çıkış harmoniklerinin toplanması suretiyle, istenilen doğrulukta bir geçici cevabın beirlenmesi mümkün olur. Çıkış dalga şekli farklı zaman aralıklarında alınan toplamlardan belirlenir. Bu toplamlar yüksek seviyeli bir programlama dilinde kolayca programlanır.

Herhangi bir fiziksel sistemin cevabı doğru süreksizliği kaydedemezse, bu metot daima uygulanabilir durumdadır. Herhangi bir generatörün küçük bir sonlu iç empedansa sahip olması gerektiği ve kablolar veya hatlar üzerinden akımı beslediği bir gerçektir. Bu hatlar ve kablolar, bağlantılar ve düğüm noktaları üzerinde kenar kapasitelere sahiptirler. Sonlu bir toplamın artık ortalama kare yaklaşım hatası çok sayıda terimlerin toplanması sayesinde istenilen herhangi bir değere düşürülebilir. Temel ω_0 ve V_g genlikli bir $f(t)$ kare dalgası için Fourier serisi şu şekilde verilir:

$$f(t) = \frac{V_g}{2} + \frac{2V_g}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)\omega_0 t}{2n+1} \quad (7.4.1)$$

DC terimin kaldırılması, yarı dalga simetrisi ve dikkate alınan şebeke için sadece sürme fonksiyonu (driving function) olarak tek (sayılı) haroniklerin sinüs dalgalarının bir serisini sağlar. Bu, zaman domeninde genel basamak girişinin yerini alır. Bu şebekeler kural olarak dikkate alınan noktalara direkt akım yollarına sahiptirler ve DC terim değiştirilmek suretiyle en sonunda bütün cevabı elde etmek için tam sinüsoidal cevaba eklenmiştir.

Bir iletim hattı üzerinde herhangi bir x noktasında sürekli-hal gerilim cevabı şu şekilde formüle edilebilir:

$$V(x) = V_g \frac{Z_0}{Z_0 + Z_g} \frac{\exp(-\gamma \cdot x) + \theta_1 \exp[-\gamma (2l - x)]}{1 - \theta_1 \theta_g \exp(-2\gamma \cdot l)} \quad (7.4.2)$$

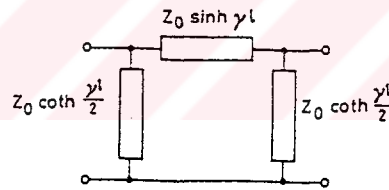
Burada

$$\theta_1 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (7.4.3)$$

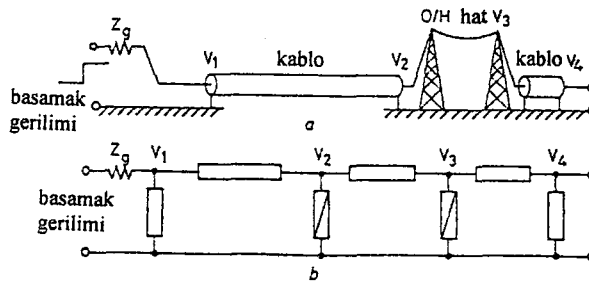
$$\theta_g = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} \quad (7.4.4)$$

sırasıyla yükteki ve generatördeki yansıma katsayılarıdır.

Kompleks bir bağlantıya sahip tek bir hat veya kablo dikkate alındığında, bu ifade kullanılması gereken en basit ifadedir. Bunun ötesinde hatlar, kablolar ve toplu kapasitelerin kaskad bağlantısı işleme dahil edildiğinde şu yaklaşım uygulanabilir [152]: l uzunluğundaki herhangi bir düz hattın iletim özellikleri Şekil-7.3'de gösterildiği gibi eşdeğer bir T veya π -devresiyle temsil edilebilir. Seri ve şönt elemanlar genelde frekansın kompleks bir fonksiyonu olan propagasyon sabiti yolu ile frekans bağımlıdır. Örneğin; Şekil-7.4a'da gösterilen sistem, bir hava üflemeli kesici ile enerjilendirilir.



Şekil-7.3. Bir dağıtılmış parametrelili hat uzunluğunun π -devresi modeli.



Şekil-7.4. Bir basamak gerilimiyle enerjilendirilen bir kablo veya hat sisteminin tek fazı.

- a : Şematik diyagram.
- b : Sistem boyunca üretilen gerilimlerin hesaplanması amaçları için düz π -devresi modeli.

Bu kesici, V_G değerli sürekli bir basamak gerilimi üreten güç frekanslı dalga şeklinin pik değerine yakın ark-geçiş (arc-through) elemanı olarak farzedilir. Bütünlük olması açısından generatörün iç empedansı Z_g ile ifade edilir. Verilen herhangi bir frekansta sistem, Şekil-7.4b'de gösterilen kaskad bağlı üç π -devre ile temsil edilebilir. V_1 girişindeki gerilim, şebekeyi generatör çıkış uçları arasındaki tek bir empedansa simetrik olarak düşürmekle bulunabilir.

Böylece ilk kablodaki giriş gerilimi elde edilmiş olur. Böylece, artık bu gerilim, sisteme ideal bir gerilim generatöründen uygulanıyormuş gibi uygulanabilir. Sistem boyunca V_2 , V_3 ve V_4 gibi diğer gerilimler her bölümün girişinden çıkışına doğru sistem boyunca yapılacak olan bir çalışmayla hesaplanabilir [153-157].

7.5. Z - Dönüşüm Metodları

Yakın geçmişte Z-dönüşümü güç sistemlerinin geçici analizine uygulanmıştır [127]. Ters Fourier dönüşümü, mevcut güçlükleriyle beraber kullanılan (bu güçlükler sigma kullanma zorunluluğundan ve kesmeden dolayı -frekans tepesi kesmesi-) frekans domeninden zaman domenine ters dönüşümden kurtulmayı sağlayan bir metottur. Bu metod, frekans domeninden Z domenine ve sonra direkt olarak zaman domenine ilerler. Bu metod, frekans domenindeki prensip iletim hattı cevaplarının eksponansiyel formu ile Z dönüşümünün eksponansiyel formu arasındaki benzerliği kullanır. Bu metodun uygulaması [158-160]'de detaylıca izah edilmiştir.

8. BÖLÜM

SONUÇLAR

Bu çalışmada, enerji güç sistemlerinde karşılaşılan geçici aşırı gerilimler meydana gelme sebeplerine bağlı olarak ayrı ayrı tanımlanmış ve başlıca çıkış sebepleri incelenmiştir. Pratikte, bu tür aşırı gerilimlerle ilgili problemlerin hepsinin aynı anda ortaya çıkmasının söz konusu olmadığı kabul edilen bir gerçektir. Bu problemler, yıllar boyunca güç sistem şebekelerinin artan yüke bağlı olarak gelişmesi ve buna bağlı olarak iletim gerilimlerinin yükseltilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Çeşitli dönemlerde bu problemler incelenmiş, araştırılmış ve gerekli olan çözümler bulunmuştur. Ancak, yük artışına paralel olarak gelişen güç sistemlerinin karmaşık yapısı, bu araştırmaların bugüne kadar olduğu gibi bundan sonra da aynı şekilde devam edeceğine işaret etmektedir. Dolayısı ile, yeni bazı problemlerin de öncekiler gibi ortaya çıkması muhtemeldir ve gelecekte inceleme, araştırma ve çözüm için temel bir konu olarak ele alınacaktır.

Bu çalışmada, ayrıca güç sistemlerinde endüklenen gerilimlerin frekans ve genlik olarak ne kadar tehlikeli boyutlara ulaşabileceği, kapasitif bir devrenin anahtarlanması hat üzerinde oluşan aşırı gerilimlerin tekrar tutuşmalar neticesinde güç sistem geriliminin 5 katına çıkabildiği, açık devre edilmiş bir iletim hattının bir kablo bölümünden enerjilendirilmesi durumunda 2 p.u.'lik bir yürüyen gerilim dalgasının hat üzerinden ilettildiği ve hat sonu açık ucunda gerilimin ikiye katlanmasıyla 4 p.u. gibi çok aşırı gerilimlere ulaşıldığı, hatta 500 m'ye kadar uzaklıklarda oluşan endirekt yıldırım darbelerinde dahi hat üzerinde çok yüksek genlikli yürüyen dalgaların oluştuğu tesbit edilerek açıklanmıştır. Sistemi bu tür aşırı gerilimlerden korumanın ne kadar önemli bir problem teşkil ettiği böylece anlaşılmış, hattın söndürme etkisinin, kapama dirençlerinin, basamak dirençlerinin ve parafudrların söndürme etkilerinin de dikkate

alınmasıyla bu geçici olayların minimize edilme seviyeleri hakkında genel bilgi verilmiştir.

Elektrik güç sistemlerinde geçici olaylardan dolayı ortaya çıkan problemlerin sürekli artması, özellikle çok hızlı hesaplama kolaylıklarının ortaya çıkışından beri analiz ve çözüm metodlarının artmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, gelecekte kurulması mümkün olan sistemler, dizayn çalışması aşamasında analiz edilebilir ve böylece, işletme esnasında ortaya çıkacak olan problemlerden ve daha sonra sistem tam işletmede iken ortaya çıkabilecek olan problemlerden sistemin korunması sağlanabilir. Bu tür fizibilite çalışmaları, bir metod seçimindeki başarılarla bağlantılıdır. Bu metod, sistem elemanlarının performansını ilgilendiren mevcut bütün verileri dikkate alabilir. Dolayısıyla, idealde fiziksel sistemlerin kusursuz matematiksel modellerle analiz edilmesi gerektiği halde pratikte metod seçimi kaynaklarla, hesaplama kolaylıklarıyla, tekrar çözüm ve doğruluk gibi sınırlamalarla ve kapsamlı verilerin daima elde mevcut olamaması gibi sebeplerden dolayı etkilenir.

Bu çalışma, literatürde ulaşılabilen şu ana kadar yapılmış olan çalışmaların ayrıntılı bir taraması ve özeti niteliğindedir.

KAYNAKLAR

1. WATSON, W.: "Transient overvoltages and power line terminations", Proc.IEE, 1966, 113, (10), pp. 1654
2. HEATON, A.G., and REID, I.A.: "Transient overvoltages and power line terminations", Proc.IEE 1966, 113, (3), pp. 461-470
3. GOSDEN, R.H.: "Lightning and distribution systems-the nature of the problem", IEE Conf. Publ. 108, 1974, pp. 1-8
4. GOLDE, R.H.: "Lightning performance of British high-voltage distribution systems", Proc. IEE, 1966, 113, (4), pp. 601-610
5. CORNFIELD, G., and STRINGFELLOW, M.F.: "Calculation and measurement of lightning-induced overvoltages on overhead distribution lines", IEE, Conf.Publ. 108, 1974, pp.41-50
6. CHOWDHURI, P., and GROSS, E.T.B.: "Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes", Proc. IEE, 1967, 114, (12), pp. 1899-1907
7. SUNGARAJAH, C.: "Surges induced on overhead transmission lines by indirect lightning strokes, with particular reference to Nigeria" Ph.D. Thesis, University of London, 1971
8. STRINGFELLOW, M.F.: "Electric field close to ground lightning flashes" Electricity Research Report R 897, April 1976
9. BAKER, W.P.: "Responce of an 11 kV overhead network to induced voltages", IEE, Conf. Publ. 108
10. SEED; J.J.: "Fault current measurement on 11 kV overhead networks", IEE Conf. Publ. 108, 1974, pp. 9-17
11. FLURSCHEIM, C.H.: "Switchgear-A review of progress", Proc. IEE, 1956, 103A, pp. 239-262
12. GARRARD, C.J.O.: "Highvoltage switchgear-A review of progress", Proc. IEE, 1966, 113, (9), pp. 1523-1540
13. GARRARD, C.J.O.: "Highvoltage switchgear", Proc. IEE, 1976, 123, (10R), pp. 1053-1080

14. FLURSCHEIM, C.H.: "Power circuit breaker theory and design", IEE Monograph 17 (Peter Peregrinus, 1975)
15. ZABORSZKY, J., and RITTENHOUSE, J.W.: "Some fundamental aspects of recovery voltage", IEEE Trans., 1963, PAS-82, pp. 815-821
16. ZABORSZKY, J., and RITTENHOUSE, J.W.: "Fundamental aspects of some switching overvoltages on power systems", IEEE Trans., 1963, PAS-82, pp. 821-830
17. BALTENSBERGER, P., CASSIE, A.M., CATENACCI, G., HOCHRAINER, A., JOHANSEN, O.S., and POUARD, M.: "Transient recovery voltage in high voltage network-terminal faults", CIGRE paper 13-10, 1968
18. CALDWELL, R.O., DISSENDORF, J., LOWE, S., MEDHURST, P.J., MORTISS, J.R., TRUUPOLD, E., BIRD, A.N., SAUNDERS, L., and STOKES, A.D.: "Australian Studies of TRV and the influence of breaker interaction by field tests and calculation", CIGRE paper 13-05, 1976
19. "TRV in EHV networks, 362 kV and above", CIGRE WG 13001, Electra, 1979, 63, pp. 37-63
20. BASAK, P.K., and PARROTT, P.G.: "Survey of TRV condition on the CEGB 400 kV system", IEE Proc. C., Gener., Trans. & Distrib., 1981, 128, (6), pp. 342-350
21. CIGRE SC 13. "Transient recovery voltages in medium voltage networks", Electra. May 1983, 88, pp. 49-88
22. SKEATES, W.F., TITUS, C.H., and WILSON, W.R.: "Severe rates of rise of recovery voltage associated with transmission line short circuits", IEEE Trans., 1958, PAS-76, pp. 1256-1266
23. YOUNG, A.F.B., and ELLIS, N.S.: "The short line fault-a severe test for modern circuit breaker", Electr. Rev., 1963, 173, pp. 271-274
24. BOLTON, E., EHRENBERG, A.C., HAMILTON, F.L., HAWKINS, A.G., MATRAVERS, F.P., and THOMAS, J.A.: "British investigations of short line fault phenomena", CIGRE Papers 109, 109a, 1964
25. BOLTON, E., BATTISON, M.J., BICKFORD, J.P., DWEK, M.G., JACKSON, R.L., and SCOTT, M.: "Short line fault tests on the CEGB 175 kV system", Proc. IEE, 1970, 117 (4), pp. 771-784

26. SUJEER, V.N., and VAIDYANATHAN, R.: "Transient recovery voltage characteristics of a three phase power system", Proc. IEE, 1971, 118, (1), pp. 119-124
27. COLCLASER, R.G., BEEHLER, J.E., and GARRITY, T.F.: "A field study of bus fault transient recovery voltages", IEEE Trans., 1976, PAS-95, pp. 1769-1776
28. COLCLASER, R.G., BEEHLER, J.E., and GARRITY, T.F.: "A field study of the short line fault component of transient recovery voltage", IEEE Trans. 1975, PAS-94, pp. 1943-1953
29. COLCLASER, R.G., BERKEBILE, L.E., and BUETTNER, D.E.: "The effect of capacitors on the short line fault component of transient recovery voltage", IEEE Trans, 1971, PAS-90, pp. 660-669
30. BICKFORD, J.P.: "The calculation of restriking voltages using a digital computer" in "Computation in engineering", AEI Engineering Supplement, 1963, pp. 24-28
31. THOMMEN, H., BALTENSBERGER, P.: " A high speed air blast circuit breaker for the most severe conditions of operation", CIGRE Paper 121, 1962
32. POUARD, M.: "New concepts on rates of rise of restriking voltage at the terminals of high voltage circuit breakers", Bull.Soc.Fr.,1958,8,(95),pp. 748- 764
33. BALTENSBERGER, P., and RUOSS, E.: "The short line fault in high voltage systems", Brown Boveri Rev., 1960, 47, pp. 329- 339
34. PETITPIERRE, R.: "Air blast circuit breakers with relation to stresses which occur in modern networks with particular reference to the interruption of short line faults", CIGRE Paper 115, 1960
35. BALTENSBERGER, P.: "New knowledge in the field of switching phenomena and circuit breaker testing", Brown Boveri Rev., 1962, 49, pp. 381- 397
36. EIDINGER, A., and JUSSILA. J.: "Transients during three phase short line faults", Brown Boveri Rev., 1964, 51, pp, 303-319
37. YOUNG, A.F.B.: "Some researches on current chopping in high voltage circuit breakers" Proc. IEE. 1953, 76,(2), pp. 337-360
38. RIZK, F.: "Arc instability and time constants in air blast circuit breakers", CIGRE Paper 107, 1964

39. BAYRAM, M.: "Elektrik Tesislerinde Aşırı Gerilimler ve Bunlara Karşı Koruma", 1984, İstanbul
40. ÖZKAYA, M.: "Yüksek Gerilim Tekniği", 1988, İstanbul
41. ÖZKAN, F.Y.: "Yüksek Gerilim Yük Kesicileri", 1994, İstanbul
42. PANEC, J., and FEHRLE, K.G.: "Overvoltage phenomena associated with virtual current chopping in three phase circuits", IEEE Trans., 1975, PAS-94, pp. 1317-1325
43. ÇETİN, İ.: "Boşta çalışan transformatörleri, genelde küçük endüktanslı akımları açmada oluşan geçici aşırı gerilimler", Kaynak Dergisi, 1995/6
44. MURANO, M., FUJII, T., NISHIKAWA, H., NISHIWAKI, S., and OKAWA, M.: "Three phase simultaneous interruption in interrupting inductive current using vacuum switches", IEEE Trans., 1974, PAS-93, pp. 272-280
45. SAKSHAUG, E.C., KRESGE, J.S., and MISKE, S.A.: "A new concept in station arrester design", IEEE Trans., 1977, PAS-96, pp. 647-654
46. YU, C.W., and BICKFORD, J.P.: "Digital computer simulation of virtual current chopping in vacuum circuit breakers", Proc. IEE J, Electr. Power Appl. 1979, 2,(4), pp. 125*131
47. BOEHNE, E. W., and LOW, S.s.: "Shunt capacitor energisation with vacuum interrupters- a possible source of overvoltage", Trans. IEEE, 1969, PAS-90, pp. 1424-1443
48. JOHNSON, I.B, SCHULTZ, A.j., SCHULTZ, N.R., and Shores, R.B.: "Some fundamentals on capacitance switching", Trans. IEEE, 1955, PAS-74, pp. 727-736
49. LEEDS, W.M., and VAN SICKLE, R.C.: "The interruption of charging current at high voltage", Trans. IEEE, 1947, PAS-66, pp. 373-382
50. DILLARD, J.K.: "Status report on EHV transmission design", Trans. IEEE, 1966, PAS-85, pp. 55-558
51. CLERICI, A., RUCKSTUHL, G., and VIAN, A.: "Influence of shunt reactor on switching surges", Trans. IEEE, 1970, PAS-89, pp. 1727-1736
52. CLERICI, A., and TASCHINI, A.: "Influence on switching surges of the switched line zero sequence impedance", Trans. IEEE, 1971, PAS-90, pp. 1327-1333

53. WELLE, D.H., THOMAS, C.H., ButkHARD, L.A., LUND, W.R., HEDIN, R.A., and KILGOUR, A.E.: "Parallel EHV untransposed transmission lines studied for overvoltages due to switching surges and resonance", Trans. IEEE, 1972, PAS-91, pp. 190-194
54. CLERICI, A., and NOGAROLE, M.: "Influence of line transportations on re-energisation overvoltages", Trans. IEEE, 1973, PAS-92, pp. 25-30
55. WILSON, D.D.: "Series compensated lines-voltages across circuit breakers and terminals caused by switching", Trans. IEEE, 1973, PAS-92, pp. 1050-1056
56. KASSAKIAN, J.G.: "The effects of non transposition and earth return frequency dependence on transients due to high speed reclosing", Trans. IEEE, 1976, PAS-95, pp. 610-620
57. SVENSON, O.H.: "The influence of prestrikes on the peak values of energisation transients", Trans. IEEE, 1976, PAS-95, pp. 711-719
58. BICKFORD, J.P., and EL-DEWIENY, R.M.K.: "Energisation of Transmission lines from inductive sources", Proc. IEE, 1973, 120, (8), pp. 883-890
59. BICKFORD, J.P., and EL-DEWIENY, R.M.K.: "Energisation of Transmission lines from mixed sources", Proc. IEE, 1974, 121, (5), pp. 355-360
60. DUBANTAN, C., and GERVAIS, G.: "Switching overvoltages when closing unloaded lines. Effect of power and system configuration, statistical distribution", CIGRE Paper 33-05, 1972
61. KIMIEC, A.: "The effect of circuit breaker characteristics on overvoltage magnitude during EHV transmission line switching on", Biuletyn Instytutu Energetyki, 1972, 14, (3/4), pp. 17-20
62. BICKFORD, J.P., and DOEPEL, P.S.: "Calculation of switching transients with particular reference to line energisation", Proc. IEE, 1967, 114, (4), pp. 465-477
63. PARIS, L.: "Statistical approach to overvoltages in insulation coordination", Symposium on Power System Overvoltages. University of Manchester Institute of Science and Technology, September 1974
64. PARIS, L.: "Basic considerations of magnitude reduction of switching surges due to line energisation", IEEE Trans., 1968, PAS-87, pp. 295-302

65. VYSKOCIL, V., and FIC, J.: "Results of statistical investigation of overvoltages in the Czechoslovak System", CIGRE Paper 33-01, 1972
66. THOMAS, C.H., WELLE, D.H., HEDIN, R.A., and WEISHAUP, R.W.: "Switching surges on parallel HV and EHV untransposed lines Studied by analog simulation", IEEE Trans., 1972, PAS-91, pp, 180-189
67. BICKFORD, J.P., MULLINEAUX, N., and REED, J.R.: "Computation of power system transients", IEE Monograph 18(Peter Peregrinus, 1976)
68. BATTISON, M.J., MULLINEAUX, N., and PARTON, K.C.: "Some effects of frequency dependence of transmission line parameters", Proc, IEE, 1969, 116, (7), pp. 1209-1216
69. BARNES, H.C.: "Preliminary analysis of extensive switching surge testing of A.E.P' s first 765 kV line and stations", IEEE Trans., 1971, PAS-90, pp. 785-798
70. GARRITY, T.F., HAAHR, J.C., KNUDSEN, L., and RAEZER, M.C.: "Experience with the AEP 750 kV system Pt V- Overvoltage and staged fault test- Analysis", IEEE Trans., 1973, PAS-92, pp. 1074-1084
71. THANASSOULIS. P., DEFRANCO, N., CLERICI, A., and CAZZANI, M.: "Overvoltage on a series compensated 750 kV system for the 1000 MW Itaipu Project", IEEE Trans., 1975, PAS-94, pp. 622-631
72. STEMLER, G.E.: "BPA' s field test evaluation of 500 kv pcb' s rated limit line switching overvoltages to 1.5 p.u.", IEEE Trans., 1976, PAS-95, pp. 352-361
73. FAKHERI, A., AND HAAHR, J.C.: "Experience with the AEP 765 kv system Dumont- Marysville-Kammer field tests", IEEE Trans., 1978, PAS-97, pp. 109-117
74. BATTISON. M.J., BICKFORD, J.P., CORCORAN, J.C.W., JACKSON, R.L., SCOTT, M., and WARD, R.J.S.: "British investigations on the switching of long EHV transmission lines", CIGRE Paper 13-02, 1970
75. DILLARD, J.K., and HILEMAN, A.r.: "Switching surge performance of transmission systems" CIGRE Paper 33-07, 1970
76. BALTENSBERGER, P., and RUOSS, E.: "Switching overvoltages in EHV and UHV networks" CIGRE Paper 13-14, 1970

77. DWEK, M.G., HALL, J.E., JACKSON, R.L., and JONES, B.: "Field tests and analysis to determine switching transients on the British system" CIGRE Paper 13-03, 1972
78. SMITH, D.C.: "Switching surge measurements on an uncompensated 500 kV line", CIGRE Paper 33-06, 1972
79. AKOPYAN, A.A., BOURGSDORF, V.V., KUZMITCHEVA, K.I., KYSKOV, Yu.I., RASHKES, V.S., and FOTIN, V.P.: "Switching overvoltages and the system of protection against them in 750 kV networks of the USSR", CIGRE Paper 33-07, 1972
80. CAZZANI, M., CLERICI, A., MARGARITIDIS, P., and THELOUDIS, J.: "Internal overvoltages on the new Greek 400 kV network", CIGRE Paper 33-03, 1974
81. LEGATE, A.C., STEMLER, G.E., REICHERT, K., and CUK, N.P.: "Limitation of phase to phase and phase to ground switching surges: Field tests in B.P.A. 500 kV system", CIGRE Paper 33-06, 1976
82. BELIAKOU, N.N., KOMAROV, A.N., and RASHKES, V.S.: "Results of internal overvoltages and electrical equipment characteristics, measurements at the 750 kV networks", CIGRE Paper 33-03, 1978
83. DILLARD, J.K., CLAYTON, J.M., and KILAR, L.A.: "Controlling switching surges 1100 kV transmission systems", IEEE Trans., 1970, PAS-89, pp. 1752-1762
84. AIEE Committee Report: "Switching surge field tests on Arizona public service 345 kV system", IEEE Trans., 1968, PAS-87, pp. 1635-1643
85. WHITE, E.L.: "Switching surges on a 275/ 132 kV auto-transformer", ERA Report S/T111, 1961
86. CSUROS, L., FOREMAN, K.F., and GLAVITCH, H.: "Energising overvoltages on transformer feeders", Electra, 18, pp. 83-105
87. CSUROS, L., and FOREMAN, K.F.: "Energising overvoltages on transformer feeder circuits", Electr. Times, August 1972, pp. 37-40
88. BICKFORD, J.P.: "Transient overvoltages on power systems", IEE Proceedings, Vol. 133, May 1986, pp. 201-224

89. CSUROS, L., and FOREMAN, K.F.: "Some practical aspects of overvoltages on the CEGB transmission system", IEE Proc, C, Gener., Trans., & Distrib., 1980, 127, (4), pp. 248-261
90. DISEKO, N.L., and BICKFORD, J.P.: "A method of simulating linear and non-linear resonant phenomena associated with transformer feeders", IEE Proc, C, Gener., Trans., & Distrib., 1980, 127, (3), pp. 169-178
91. Westinghouse transmission and distribution book" 4th Edition, p. 625
92. "Surge divertors" BS 2914: 1957
93. VOSPER, J.S.: "Fundamental frequency voltages due to single phase earth faults on HV lines with resistance earthing", Proc, IEE, 1963, p. 1990
94. Peterson, H.A.: "Transients in power systems" (Wiley, 1951)
95. BEEMAN, d.: "Industrial power system handbook" (McGraw Hill, 1955)
96. MORTLOCK, J.R., and DOBSON, J.M.: "Neutral earthing of three phase systems with particular reference to large power systems", J. Inst. Electr, Eng., 1947, (2), pp. 549-572
97. MORTLOCK, J.R.: "AC switchgear Vol. 1" (Chapman & Hall, 1956)
98. KIMBARK, E.W., and LEGATE, A.C.: "Fault surge versus switching surge, a study of transient overvoltages by line to ground faults", IEEE Trans, 1968, PAS-87, pp. 1762-1769
99. CLERICI, A., SANTAGOSTINO, G. and MAGAGNOLI, A.: "Influence of fault initiation and fault clearing overvoltages on the insulation of UHV lines", IEEE Trans, 1975, PAS-94, pp. 802-809
100. CLERICI, A., SANTAGOSTINO, G. MAGAGNOLI, A., and TASCHINI, T.: "Overvoltages due to fault initiation and fault clearing and their influence on the design of UHV lines", CIGRE Paper 33-17. 1974
101. BALASUBRAMANIAM, R., and GUPTA, s.: "Calculation of transients due to fault initiation on a double circuit line", Proc, IEE, 1976, 123, (6), pp. 537-542
102. CLERICI, A., and TASCHINI, T.: "Overvoltages due to line energisation and re-energisation versus overvoltages caused by faults and fault clearing in EHV systems", Trans, IEEE, 1970, PAS-89, pp. 932-941

103. COLCLASER, R.G., WAGNER, C.L., and BUETTNER, D.E.:"Transient overvoltages caused by the initiation and clearance of faults on a 1100 kV system", Trans, IEEE, 1970, PAS-89, pp. 1744-1751
104. BICKFORD, J.P., and ABDEL-RAHMAN, M.H.:"Application of travelling- Wave methods to the calculation of transient fault currents and voltage in power system networks", IEE Proc. C. Gener., Trans.&Distrib., 1980, 120,(3), pp. 153-168
105. BULL, J.H., and NETHERCOT, W.:"The frequency of occurrence and the magnitude of short duration transients in low voltage supply mains", Radio&Electron. Eng., September 1964, pp. 185-190
106. HEATON, A.g., and ISSA, A.M.H.:"Transient response of crossbonded cable systems", Proc. IEE, 1970, 117, (3), pp. 578-586
107. GRANT A.E., and HEATON , A.G.:"capacitance potential dividers for the investigation of transient overvoltages in crossbonded cables", Proc. IEE, 1967, 114, (6), pp. 803-808
108. HEATON, A.g., and MELAS, E.:"DEtermination of effective permittivity and loss, as functions of temperature and frequency, of impregnated, paper insulation by measurements on lengths of 132 kV power cables", IEE Symposium on Dielectrics, Lanchester University, 24th July 1970
109. KIMBARK, E.W.:"Suppression of ground fault arcs on single pole switched EHV lines by shunt reactors" IEEE Trans., 1964, PAS-83, pp. 285-290
110. HAUBRICH, H.J., HOSEMANN, G., and THOMAS, R.:"Single phase auto reclosing in EHV systems", CIGRE Paper 31-09, 1974
111. LAMBERT, S.R., KOSCHIK, V., WOOD, C.E., WORNER, G., and ROCAMORA, R.G.:"Long Line Single Phase Switching transients and their effect on station equipment", IEEE Trans., 1978, PAS-97, pp. 857-863
112. KIMBARK, E.W.:"Discussion on single pole switching- a comparison of computer studies with field test results", IEEE Trans., 1974, PAS-93, pp. 107-108
113. EDWARDS, L., CHADWICK, J.W., REICH, H.A., AND SMITH, L.E.:"Single pole switching on TVA' s paradise- division 500 kV line- Design concepts and staged fault test results", IEEE Trans., 1971, PAS-90, pp. 2436-2450

114. KAPPENMAN, J.G., SWEEZY, G.A., KOSCHIK, V., AND MUSTAPHI, K.K.: "Staged fault tests with single phase reclosing on the Winnipeg- Twin Cities 500 kV interconnection", IEEE Trans., 1982, PAS-101, pp. 662-670
115. JOHNS, A.T., and AL- RAWI, A.M.: "Digital simulation of EHV systems under secondary arcing conditions associated with single pole autoreclosure", IEE Proc. C, Gener., Trans. & Distrib., 1982, 129, (2), pp. 49-58
116. JOHNS, A.T., and AL- RAWI, A.M.: "Developments in the simulation of long-distance single pole-switched EHV systems", IEE Proc. C, Gener., Trans. & Distrib., 1984, 131, (2), pp. 67-77
117. PERRY, D.E., and HASIBAR, R.M.: "Investigations and evaluation of single phase switching on EHV networks in the United States", CIGRE Paper 38-08, 1984
118. SEKINE, Y., and ICHIDA, Y.: "Assymetrical four legged reactor extinguished secondary arc current for high speed reclosing on UHV systems", CIGRE Paper 38-03, 1984
119. GERT, R., GLAVITSCH, H., SHUR, S.S., TIKHODEYEV, N.N., AND THOREN, B.: "Temporary overvoltages their classification magnitude duration shape and frequency of occurrence", CIGRE Report 33-12, 1972
120. THOREN, B.: "Temporary overvoltages", Symposium on Power System Overvoltages, UMIST, 1974
121. KELLER-JACOBSEN, J.: "Resonance overvoltages in the 380 kV network", Elteknik, 1960, 3, pp. 81-83
122. KATTELIUS, J.: "A resonance phenomenon observed in the 400 kV system", Saehkoe, 1965, 38, (4), pp. 137-140
123. DANDENO, P.L., and MCCLYMONT, K.R.: "Extra high voltages following load rejection of hydraulic generation", IEEE Trans., 1963, PAS-82, pp. 49-57
124. RUSTEBAKKE, H.M., and CONCORDIA, C.: "Self excited oscillations in a transmission system using series capacitors", IEEE Trans., 1970, PAS-89, pp. 1504-1512

125. BALASUBRAMANIAM, R., BABU RAM, and TRIPATHY, S.C.: "Temporary overvoltages due to load rejection on a series compensated transmission line", IEE Proc. C, Gener., Trans. & Distrib., 1983, 130, (1), pp. 8-15
126. HUMPÁGE, W.D.: "Z transform electromagnetic transient analysis in high voltage networks", IEE Power Engineering Series 3 (Peter Peregrinus, 1982)
127. PETERSON, H.A.: "An electric circuit transient analyser", Gen. Elect. Rev., 1939, p. 394
128. DICKSON, J.K., HEDMAN, D.E., LEWIS, W.A., and WEBLER, R.M.: "A new TNA Pt, 1- Design features provide versatile capabilities" IEEE Conference Paper C73-390-2, 1973
129. BORGONOVO, G., CAZZANI, M., CLERICI, A., LUCCHINI, G., and VIDONI, G.: "Five years of experience with the new CESI TNA", IEEE Canadian Communication and Power Conference, Montreal, Canada, 1974
130. RITCHIE, W.M., and PENDER, J.T.: "The modern transient network analyser and its role in analysis and design of electrical systems", Proc. IEE. 1978, 125, (2), pp. 129-134
131. PENDER, J.T.: "A combined steady state and transient AC network analyser", Int, J, Elect, Eng, Educ., 1968, 6, pp. 353-361
132. BROWN, J.L., MORSZTYN, K., and WRIGHT, I.A.: "A new transient network analyser", Trans, Inst, Engrs, Aust, Electr. Eng., 1969, EE%, (2), pp. 263-270
133. MORSZTYN, K.: "Computer controlled transient network analyser", Symposium on Power System Overvoltages, UMIST, 1974
134. CLERICI, A.: "Analogue and digital simulation for transient overvoltage determination", Electra, 1972, pp. 11-138
135. BOWLES, J.P.: "An integrated computing facility for power system studies", Canadian Communication and EHV Conference, 1972
136. SCHNYDER, O.: "Durchstrossde in pumpensteiglectungen", Schwertz, Banztg., 1929, 94, (22), p. 271
137. BERGERON, L.J.B.: "Etude des variations de regime dans les conduities d' eau: Solution graphique generale", Rev. Gen. Hydraulique, 1935, 1, p. 12

138. BEWLEY, L.V.: "Travelling waves in transmission systems" (Wiley, 1933)
139. FREY, W., and ALTHAMMER, P.: "The calculation of electromagnetic transients on lines by means of a digital computer", *Brown Boveri Rev.*, 1961, 48, p.344
140. ARLETT, P., and MURRAY-SHELLEY, R.: "The teaching of travelling wave techniques using an improved graphical method" *Int. J. Elec. Eng. Educ.*, 1966, 4, pp. 213-230&327-349
141. ARLETT, P., and MURRAY-SHELLEY, R.: "The use of graphical method for the solution of transients on simple symmetrical three phase systems" *Int. J. Elec. Eng. Educ.*, 1966, 5, pp. 377-388
142. DOMMEL, H.W.: "Digital solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks", *IEEE Trans.*, 1969, PAS-88, (4), pp.388-395
143. BERGMANN, R.Ch.G., and PONSIOEN, I.J.P.J.M.: "Calculation of electrical transients in power systems", *Proc. IEE*, 1979, 126, (8), pp. 764-770
144. BARTHOLD, L.O., and CARTER, G.K.: "Digital travelling wave solutions, single phase equivalents", *Trans. AIEE*, 1961, 80, Pt. III, p. 812
145. MCELROY, A.J. and PORTER, R.M.: "Digital computer calculations of transients in electrical networks", *IEEE Trans.*, 1963, PAS-82, p. 88
146. AMETANI, A.: "Modified travelling wave techniques to solve electrical transients on lumped and distributed constant circuits", *Proc. IEE*, 1973, 120, (4), p. 497
147. BICKFORD, J.P., SANDERSON, J.V.H., ABDELSALEM, M.M., MOHAMED, S.E.T., MORAIS, S.A., AND OLIPADE, O.: "Developments in the calculation of waveforms and frequency spectra for transient fault currents and voltages", *IEE Proc. C, Gener., Trans.& Distrib.*, 1980, 127, pp. 145-152
148. WEDEPOHL, L.M.: "Application of matrix methods to the solution of travelling wave phenomena in polyphase systems", *Proc. IEE*, 1963, 110, (12), pp. 2200-2212
149. ANDERSON, J.H., and HEATON, A.G.: "Transient analysis of power line/cable systems including reactive terminations with surge diverters", *Proc. IEE*, 1966, 113, (12), pp. 2017-2022
150. HEATON, A.G., and EDWARDS, R.: "Implementation of a numerical method for transient analysis of power Systems with lumped and distributed frequency

- dependent parameters", IEEE Summer Power Meeting New Orleans., USA, 1966, paper 31 pp. 66-413
151. HEATON, A.G., and EDWARDS, R., and HILL, R.:"An inherently accurate method for transient analysis of linear power systems", Int., J. Electr, Eng. Educ., 1969, 7, pp. 7-14
152. DAY, S.J., MULLINEUX, N., and REED, J.R.:"Developments in obtaining transient response using Fourier transforms Pt. 1", Int., J. Electr, Eng. Educ., 1965, 3, p. 501; Pt.II, 1966, 4, p. 31; Pt. III, 1968, 6, p. 259; Pt. IV, 1972, 10, p. 256
153. BATTISON, M.J., DAY, S.J., MULLINEUX, N., PARTON, K.C., and REED, J.R.:"Calculation of switching phenomena in power systems", Proc. IEE, 1967, 114, (4), p. 478
154. BATTISON, M.J., DAY, S.J., MULLINEUX, N., and REED, J.R.:"Calculation of transients on transmission lines with sequential switching", Proc. IEE, 1970, 117, (3), p. 587
155. WEDEPOHL, L.M., and MOHAMED, S.E.T.:"Multiconductor transmission lines, theory of natural modes and Fourier integral applied to transient analysis", Proc. IEE, 1969, 116, (9), p. 1553
156. WEDEPOHL, L.M., and MOHAMED, S.E.T.:" Transient analysis of multiconductor lines with reference to nonlinear problems", Proc. IEE, 1970, 117, (5), p. 979
157. HUMPAGE, W.D., WONG, K.P., NGUYEN, T.T., and SUTANTO, D.:"z transform transient analysis in power systems", IEE Proc, C, Gener., Trans. & Distrib., 1980, 127, pp. 370-378
158. HUMPAGE, W.D., WONG, K.P., and NGUYEN, T.T.:"Development of Z transform electromagnetic transient analysis for multinode power networks", IEE Proc, C, Gener., Trans. & Distrib., 1980, 127, pp. 379-385
159. HUMPAGE, W.D., WONG, K.P., and NGUYEN, T.T.:"Time convolution and Z transform methods of electromagnetic transient analysis in power systems", IEE Proc, C, Gener., Trans. & Distrib., 1980, 127, pp. 386-394

160. BAKER, W.P., and OAKESHOTT, D.F.: "Surge diverters and spark gap protection", IEE Conf. Publ. 108. 1974, pp. 60- 66
161. DARVENIZA, B.E., and MERCER, D.R.: "Service performance of distribution lighting arresters and transformers", Trans. Inst. Eng. Aust. Electr. Eng., 1966
162. BAKER, W.P.: "Spark gaps for lighting protection", Cired, 1971, Report 17
163. BOWLES, J.P.: "AC system and transformer representation for HV-DC transmission studies", IEEE trans., 1970, PAS-89, (7)
164. BOWLES, J.P.: "Overvoltages in HVDC transmission systems caused by transformer magnetizing inrush currents", Paper T73 433- 0 IEEE PES Summer Meeting and EHV/UHV Conference, Vancouver, B.C., Canada, July 15-20, 1973
165. THIO, C.V., MCNICHOL, J.R., MCDERMID, W.M., POVH, D., and SCHULTZ, W.: "Switching overvoltages on Nelson River HVDC system Studies experience and field tests" IEEE Conference on "Overvoltages and Compensation on Integrated AC-DC systems", Winnipeg, Canada, July 9-11, 1980
166. HOLMGREM, B., JENKINS, R.S., and RUIBRUGENT, J.: "Transformer inrush current", CIGRE International Conference on large high tension electric systems Paris, Session 10, 20th June 1968
167. HUMPAGE, W.D., WONG, K.P.: "Electromagnetic transient analysis in EHV power networks", Proc. IEEE, 1982, 70. pp. 379-402
168. CORNICK, K.J., and THOMPSON, T.R.: "Steep- fronted switching voltage transients and their distribution in motor windings, part 1: System measurements of steep fronted switching voltage transients", IEE proc. B, Electr, Power Appl., 1982, 129, 129, (2), pp. 45-55
169. CORNICK, K.J., and THOMPSON, T.R.: "Steep- fronted switching voltage transients and their distribution in motor windings, part 2: Distribution of steep fronted switching voltage transients in motor windings", IEE proc. B, Electr, Power Appl., 1982, 129, 129, (2), pp. 56-63
170. CIGRE WG: "Interruption of small inductive currents Chapter 3 part A. High voltage motors", Electra, march 1981, 75, pp. 5-30

171. CIGRE WG:"13.02" Interruption of small inductive currents Chapter 3 Pt. B",
Electra, July 1984, 95, pp. 31-45
172. SHANKLE, D.F., EDWARDS, F.R., and Moses, G.L.:"Surge for pipe line
motors", IEEE Trans. 1968, IGA-4, pp. 171-176
173. PRETORIOUS, R.E., and ERIKSSON, A.J.:" A basic guide to RC Suppression on
motors and transformers", Trans. S. Afr. Inst. Electr. Eng., 1980, pp. 201-209
174. PARROTT, P.G.:"Switching surge measurements on two high voltage induction
motor installations" ERA report 72-159, 1972



ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	24 Eylül 1971
Doğum Yeri	Kayseri
Eğitim	1985-1989 Kayseri Merkez Teknik Lisesi, Elektronik Bölümü 1990-1994 Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Müh. Böl. 1994 Y.T.Ü. F.B.E. Elk. Müh. A.B.D. Yüksek Lisans Başlangıcı
Görevi	Y.T.Ü. Elk.-Elekt. Fak. Elk. Müh. Böl. Elk. Tes. A.B.D. Arş.Gör.
Çalışma Alanı	Elektrik Enerji Dağıtım ve İletim Sistemleri
Yabancı Dil	İngilizce

