

sistem yönünden  
devre kesicileri

### 1. YALITKANLIK DÜZEYLERİ

Yüksek gerilim aygıtlarının yalıtkanlık düzeyleri; kısmen edilen pratik deneyimlerden, kısmen de (örneğin parafudurlar) çalışma niteliklerinden kaynaklanarak bulunur. Şimdiye kadar şartnamelerde (spesifications); aygıtların yalıtkanlık düzeyleri; TYD, temel yalıtkanlık düzeyi (BİL, Basic Insulation Level) olarak bilinen yıldırım darbelerine karşı dayanma gerilimi ile "1-dak. test değeri" diye bilinen güç frekansındaki aşırı gerilimlere karşı dayanma-gerilimi ile belirleniyordu. Şimdi, manevra (switching) aşın gerilimleri de gözönüne alınıyor ve çok yüksek gerilimli sistemlerin yalıtkanlık düzenlemesinde (insulation co-ordination) belirleyici rol oynuyor.

#### 1.1. 100 kV'un üzerindeki Gerilimler

Şekil 1'de seçilmiş bazı sistem gerilimleri için, yeni uluslararası devre kesicisi standartı (IEC yayınlan. 56-2, 1971) ile en son çıkan yalıtkanlık düzenlemesi standartında (IEC yayınları, 71, 1971) verilen yalıtkanlık düzeylerinin bir karşılaştırması yapılmıştır. 245 kVa kadar olan sistem gerilimlerinde fark çok büyük değildir. Ancak, yayın 56\* da kullanılan; tam yalıtma (nötrü tam topraklı olmayan sistemler için geçerli) ve düşük yalıtma (nötrü tam topraklanmış sistemler için geçerli)-kavramlarına yayın 71'de rastlanmıyor. Ayrıca yayın 71'de, sistemleri tanımlamak için kullanılan nötrü tam topraklı (neutrals effectively earthed) ve nötrü tam topraklı olmayan (neutrals non-effectively earthed) kavramlarına bile yer verilmemiş.

Bir sistemin topraklama düzeyi, toprak-arıza çarpanı (earth-

SG kV (nms)	MDOG kV (tepe)	YDDG kV(-hspe)				GFDG kV(rms)	
		Yayın 71	Yayın 56	Yayın 71	Yayın 56	Yayın 71	Yayın 56
145		450 550 650	650 550	185 230 275	275	230	
245		850 950 1050	1050 900	360 395 460	460	395	
362	850- 950- 31050	950 1175	1175 1300			510 570	
420	950- 050- H 1300 I 1425	J1050 (11175 H 1300 I 1425	1425 1550			630 680	
765	,300-U!  1650-III 2100 II 2400						

SG :Sistem gerilimi  
MDDG:Manevra darbe dayanma gerilimi  
YDDG:Yıldırım darbe dayanma gerilimi  
GFDG:Güç frekansı dayanma gerilimi

YT :Yalıtkanlığı tam  
YD :Yalıtkanlığı düşürülmüş

Şekil 1. 100 kV'ın üzerindeki sistem gerilimlerinde yalıtkanlık düzeyleri (IEC)

faul t factor) ile belirlenir. Bu yeni değer, eski topraklama çarpanının /3 katı ve eski topraklama katsayısının /J/100 katına eşittir. Toprak-arıza çarpanı, uygun yalıtkanlık düzeyinin seçiminde sistem tasarımcısına bağlıdır.

362 kV'un altındaki sistem gerilimleri için, manevra darbe dayanma testleri öngörülmemiş ve güç frekansı testlerinin manevra darbelerini de karşılayabileceği düşünülmüştür. Daha üst gerilimler için yayın 71'de önerilen köklü değişiklikler ile geleceğin çok yüksek gerilimli sistemlerinde; manevra aşırı gerilimlerinin yalıtkanlık tasarımında belirleyici etken olacağı sanılıyor.

Manevra darbe gerilimleri; sistemde oluşan manevra aşırı gerilimlerinin genliği ve bunların aygıtların yalıtkanlığını bozma olasılığının istatistiksel ya da yarı istatistiksel yöntemler ile değerlendirilmesi sonucunda bulunmuştur. Yıldırım darbe dayanma gerilimleri seçmeli ve ek açıklama niteliğindedir. Gerçek değer, kullanılacak korumanın

riyetliğine uygun olarak seçilir. Devre kesicileri için değerlerin daha büyük olması doğaldır ve kendiliğinden gelmezdir.

Yayın 71'de; eski güç frekansı testi tamamen bırakılmış, yerine özel durumlar için daha uzun süreli ve daha düşük gerilimdeki testler önerilmiştir (örneğin, aygıtların kirliliğe dayanma, yaşlanma ve ömür niteliklerinin tam olarak saptanması için). Bu yeni yalıtkanlık düzenlemesi kavramının devre kesicisi standartlarına girmesi belki uzun zaman alacaktır. Ancak, birçok elektrik kurumu şimdiden bu konuya eğilmiş ve sipariş şartnamelerinde yer veriyen başlamıştır. Yeni kavramların anlamının ve sonuçlarının ne olacağı konusu gelecekte daha da önem kazanacaktır.

#### 1.2 100 kV'un Altındaki Gerilimler

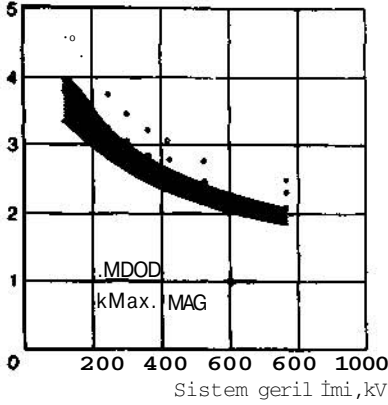
72,5 kV ve altındaki gerilimlerde de değişiklik yapılmıştır. Şekil 2'de, IEC standartlarından yayın 56-2 ile Avrupa pratiğini de içeren yeni yayın 71'de verilen yalıtkanlık düzeyleri karşılaştırılmıştır. Güç frekansı dayanma gerilimleri oldukça düşürülmüş ve yıldırım darbelerine karşı iyi korunmuş aygıtlar için yeni yıldırım darbe dayanma gerilimleri Liste 1 olarak önerilmiştir.

SG kV (rms)	YDDG kV(tepe)			GFDG kV(rtms)	
	Yayın 71 (seçmeli) uo«i üritf.	Yayın 56	Yayın 71 (seçmeli)	Yayın 56	
3,6	20	40	45	10	21
7,2	40	60	60	20	27
12	60	75	75	28	35
17,5	75	95	95	38	45
24	95	125	125	50	55
36	145	170	170	70	75
52	250	250	95	106	
72,5	325	325	140	140	

SG :Sistem gerilimi  
YDDG:Yıldırım darbe dayanma gerilimi  
GFDG:Güç frekansı dayanma gerilimi

Şekil 2. 1 ve 72,5 kV arasındaki sistem gerilimlerinde yalıtkanlık düzeyleri (IEC)

Manevra aşırı gerilim düzeyleri, pu



MDDG: Manevra darbe dayanma düzeyleri  
MAG : Manevra aşırı gerilimleri

Şekil 3. Yalıtkanlık düzeyleri (IEC) ve en üst manevra aşırı gerilimleri

Yeni öneri, birçok ülkelerin (daha çok Almanya ve İngiltere) uzun deneyimlerinden kaynaklanmıştır. Bu seçmeye bağlı önerinin benimseneceği ve yeni düşük değerlerin yapım yönünden çok yarar sağlayacağı sanılıyor.

### 1.3 Aşırı Gerilimler

Manevra aşırı gerilimleri, bir sistemin manevra işlemleri sırasında oluşan gerilimlerdir ve genellikle genlikleri sınırlıdır. Ancak bazı durumlarda tehlikeli değerlere ulaşabilir. Bunlar daha çok, transformatör ve reaktör gibi endüktif devreler ile hat ve kablolar gibi kapasitif devrelerin açılıp-kapanışında oluşur.

Yukarıda verilen standart yalıtkanlık düzeylerinden, manevra aşırı gerilimlerinin genliği konusunda kaba bir fikir edinebiliriz. Şekil 3'de, IEC standartlarının manevra darbe dayanma gerilimleri (MDDG) pu (per unit) olarak (sistemin faz-toprak geriliminin tepe değeri birim alınarak) verilmiştir. IEC standartlarında manevra darbe gerilimleri verilmemiş ise, değerleri karşılığı olan yıldırım darbe dayanma gerilimlerinden (YDDG) bulunabilir.

Yalıtkanlık düzeyi ile en yüksek manevra aşırı gerilimi arasındaki % 15'lik güvenlik payı genellikle yeterli bulunuyor.. Bu güvenlik payı ile manevra aşırı gerilimlerinin kabul edilebilir en yüksek değerleri; Şekil 3'deki banttıan kolaylıkla bulunabilir. Buradan kolaylıkla manevra aşırı gerilimlerin 145 kV için 3-4 pu, 420 kV için 2,5 pu ve

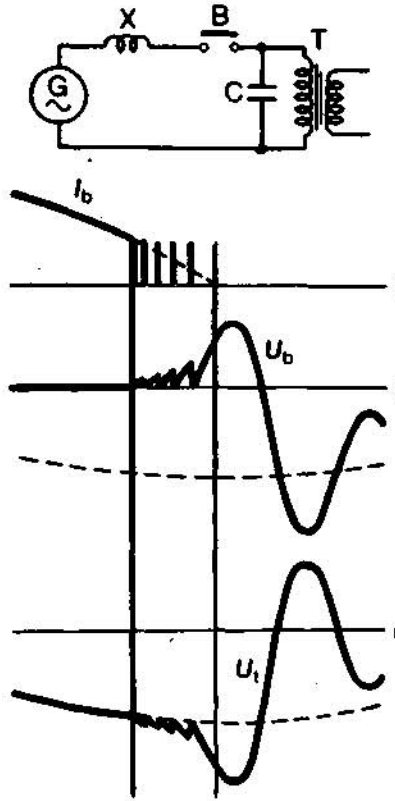
745 kV için 2 pu dolayında olduğunu çıkarabiliriz. Bu değerlerin, hem günümüzün, hem de yakın geleceğin yalıtkanlık düzeylerini belirleyeceği sanılıyor.

## 1.4 Transformatör ve Şönt Reaktörlerin Devreden Çıkarılması

### 1.4.1 Akım Kesme

Düşük endüktif akımlar kesilirken (örneğin transformatör mıknatıslama akımları ve reaktör akımları), eğer devre kesicisinin keseceği akım Şekil 4'teki gibi henüz sıfıra ulaşmamış ise, sistemde çok büyük aşırı gerilimler doğabilir.

Transformatör ya da reaktörde depo edilmiş olan manyetik enerji kesme anında sıfır (her zaman bulunan kaçak sığa) elektrostatik enerjisine dönüşür. Bu sığanın genellikle düşük değerde oluşu, gerilimin büyümesine ve kontaktları yeterince açılıncaya kadar devre kesicilerinde arka arkaya bir çok tekrardan tutuşmaların (re-ignitions) doğmasına yol açacaktır. Transformatör ve sığasının salınım frekansı birkaç Hz dolayındadır. Reaktör akımı ile transformatör mıknatıslama akımlarının kesilmesi arasında belirli bir fark vardır. Çekirdeğin histeresis niteliğinden ötürü, transformatörde; depolanmış enerjinin ancak bir bölümü açığa çıkar. Reaktörde ise, hava aralıkları büyüktür ve pratik olarak histeresis olayı görülmez. Bu yüzden aynı akım genliğinde reaktörde açığa çıkan enerji, transformatördekinden daha fazladır. Ayrıca bir sistemde reaktör akımları transformatörün mıknatıslama akımlarından çok daha büyüktür, örneğin reaktör akımları birkaç yüz amper olduğu halde, transformatörün mıknatıslama akımları birkaç amper dolayındadır. Tüm bu etkenleri düşündüğümüzde, reaktörün devreden çıkarılmasında doğacak aşırı gerilimlerin, transformatörlerinkinden çok daha büyük olacağını rahatlıkla söyleyebiliriz.



X : Kaynak empedansı  
B : Devre kesicisi  
C : Kaçak sığa  
T : Güç transformatörü  
Ib: Kesici üzerinden geçen akım  
Ub: Kesicinin uçları arasındaki gerilim  
Ut: Transformatörün uçları arasındaki gerilim

Şekil 4. Yüksüz transformatörlerin devreden çıkarılması

#### 1.4.2 Aşırı Gerilimler

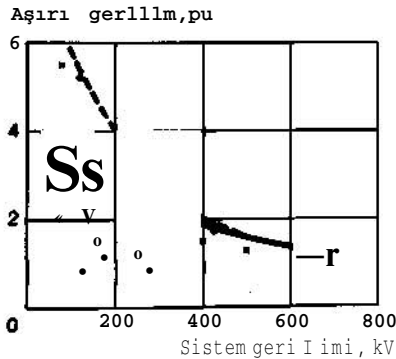
Tanecikleri yönlendirilmiş (grain-oriented) saçlardan yapılan modern transformatörlerde; mıknatıslama akımları çok düşüktür ve histeresis halkası dikdörtgen biçimindedir. Ayrıca, transformatör yapısının sıkı (compact) olması, sargı sığasını artırır. Normal işletme koşullarında; modern yüksek gerilim transformatörlerinin devreden çıkarılması sırasında doğabilecek en yüksek aşırı gerilimler Şekil 5'te verilmiştir. Bu aşırı gerilimlerin genellikle ve en azından 100 kV'un üzerindeki sistem gerilimleri için zararsız olduğunu söyleyebiliriz.

Ancak, transformatör, devreye alınışından hemen sonra, devreden çıkarılırsa, tehlikeli aşırı gerilimler doğabilir. Çünkü bu sırada yığılma (in-rush) akımları çok yüksektir.

Bu durumda ya da reaktörün devreden çıkarılışında oluşacak en üst aşırı gerilimlerin bulunması oldukça güçtür. Çünkü devre kesicisinin nitelikleri burada önemli rol oynar. Ancak kaba bir hesaplama bize, aşırı gerilimlerin koruyucu ölçmeleri gerektirecek kadar büyük olabileceğini gösterir.

#### 1.4.3 Yayılan Arızalar

Yüksüz (boşta) transformatör ve reaktörlerin devreden çıkarılışında doğan aşırı gerilimler, yalnız yalıtkanlık için değil, devre kesicisinin



Şekil 5. Yüksüz transformatörlerin devreden çıkarılışında doğan en yüksek aşırı gerilimler

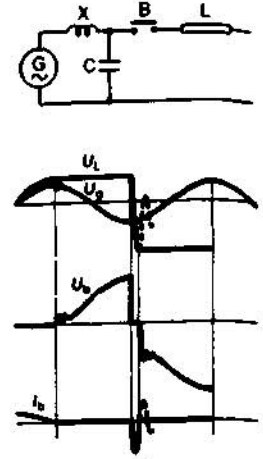
kendisi için de tehlikeli olabilir. Eğer aşırı gerilimler, sistemde bir atlama ve sonucunda bir kısa devreye yel açarsa, devre kesicisinin üzerinden geçecek akım da hızla artar. Bu olay, yayılan arıza (evolving fault) diye anılır ve özellikle kendi ürettiği basınçla çalışan devre kesicileri (tam ve az yağlı devre kesicileri) için çok tehlikelidir.

Bu tür kesicilerin reaktör akımını ve transformatör mıknatıslama akımını kesebilmesi için kesici kontaklarının daha fazla açılması gerekir. Halbuki, büyük kısa devre akımlarını kesme işi daha çok küçük kontak açıklıklarında (contact separation) gerçekleştirilir. Yayılan arıza da, eğer kesici kontaktları çok açıkta (normalde kısa devre akımlarını kesebileceği bölgenin dışında ise), kesici çok büyük akımlar ile karşılaşır. Açığa çıkan enerji, oldukça büyüktür ve kesicinin ark söndürme hücrelerinde çok büyük basınç üretir. Devre kesicilerinin tasarımı ve testinde, bu olaylar için ayrıca özen gösterilmelidir.

#### 1.4.4 Koruma

Transformatör ve reaktörlerin devreden çıkarılışında doğan aşırı gerilimleri düşürmek için iki yöntem kullanılır: Devre kesicilerinde açma-kapama dirençleri ve parafudurlar (lightning arresters, parafoudres, surge diverters). Dirençler, iki yönlü işlev görür: Birincisi, ark devresinde sönmüleme etkisi yaratarak kesicinin kesme durumunda kaldığı akımı azaltmak, ikincisi, kesme işleminden sonra transformatördeki enerjiye boşalma (deşarj) yolu sağlamak. Edinilen deneyimler bize, bu koşullarda büyük dirençlerin etkili olduğunu gösteriyor.

Yüksek gerilim transformatörlerini ve reaktörleri, atmosfer kaynaklı aşırı gerilimlere karşı korumak için çoğunlukla parafudur kullanılır. Bu parafudurlar transformatör ve reaktörleri manevra aşırı gerilimlerine karşı da korur ve açığa çıkan ener-



- X : Kaynak empedansı
- B : Devre kesicisi
- C : Kaçak sığa
- L : İletim hattı
- I0 : Kesici üzerinden geçen akım
- U1, U2, U3 : Kesicinin uçları arasındaki gerilim
- Ug : Kaynak tarafındaki gerilim
- U2 : Hat tarafındaki gerilim

Şekil 6. Yüksüz hatların devreden çıkarılması

ji yönünden bir sorun yaratmaz, istenen nitelikte parafudur bulutabiliyorsa, diğer kerum biçimlerine gerek duyulmaz. Üzerinde çok sık açma kapama işlemleri yapılan reaktör kesicilerinde direnç kullanılması tavsiye edilebilir. Böylece parafudurların çok sık çalışması önlenmiş olur.

#### 1.5. Hatların ve Kablolara Devreden Çıkarılması

##### 1.5.1. Tekrardan atlama ve tekrardan tutuşma

Uzun yüksüz hatlar devreden çıkarılırken, çok büyük kapasitif akımların kesilmesi sorunuyla karşılaşılır. Kesme işi, akım sıfırdan geçerken, yani gerilim en üst değerindeyken (Şekil 6) olursa, kesme güçleşir. Kesmeden sonra, hatta kalan DA geriliminin kaybolması ya da sönmülmesi uzun süre alır. Kesicinin kaynak tarafındaki gerilim ise, işletme frekansındaki değişmesini sürdürür. Kesmeden yarım çevrim (eyele) sonra, kesicinin uçları arasındaki ge-

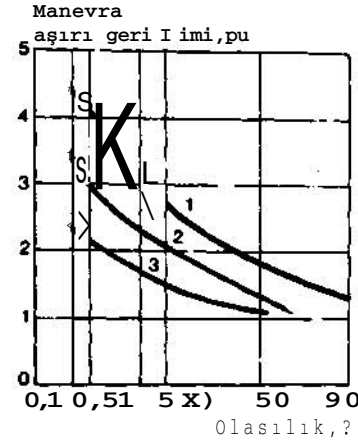
rilim faz geriliminin iki katına ulaşır. Eğer bu anda, devre kesicisinin kontakları arasında tekrardan atlama (restrike) olursa, hattın üzerindeki enerji sistem endüktansı üzerinden boşalır ve birçok yüz Hz'lik temel frekanslı salınımlar başlar. Boşalma (deşarj) akımının ilk sıfır geçişinde kesme tekrarlanırsa (böyle bir olasılık vardır), hattın gerilimi bir öncekinin iki katına ulaşır ve ters yöndedir. Yine bir yarım çevrim sonrasında kesici uçlarındaki gerilim, faz geriliminin üç katına ulaşmış olur ve diğer bir tekrardan atlama (restrike; tehlike doğar. Böylece hat üzerindeki gerilim kademeli olarak büyür.

Tekrardan atlama ve tekrardan tutuşma (re-ignition) arasında bir ayırım yapmak gereklidir. Tekrardan atlama; akım kesme işleminden sonraki 1/4 çevrim (50 Hz) içerisinde, kesici üzerinden olan boşalmadır. Şekil 6'da görülebileceği gibi, tekrardan atlama ile gerilim kademeli yükselir ve tehlikeli aşırıgerilimler doğabilir. Tekrardan tutuşma ise, yine kesme işleminden sonraki 1/4 çevrim içerisinde oluşur, ancak tekrardan atlamada olduğu gibi, gerilimin kademeli yükselmesine ve tehlikeli aşırıgerilimler doğmasına yol açmaz. Bu yüzden devre kesicilerinde tekrardan tutuşmaya izin verilebilir ve tehlikeli sayılmaz.

### 1.5.2. Koruma

Uç fazlı sistemdeki koşullar yukarıda anlatılanlardan daha karmaşıktır. Bir fazdaki tekrardan atlama, diğer fazlara «» sıçrayabilir. Böylesi bir durum iyidir, çünkü kesici kutupları arasındaki gerilim en üst değere ulaşmadan bu faz üzerinden boşalma olur. Pratikte karşılaşılan aşırıgerilimler üzerine yapılan kapsamlı çalışmanın sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Eğriler; tekrardan atlamalı devre kesicilerinde yüksüz hatların açılması sırasında doğan aşırıgerilimlerin istatistiksel verilerini gösteriyor.

Nötrü tam (effectively) topraklı sistemlerde aşırıgerilimler çoğunlukla 3 pu'in altında kalı-



1. Kaynak tarafı. Nötrü ark söndürme bobini ile topraklanmıştır.
2. Hat tarafı. Nötrü tam topraklıdır.
3. Kaynak tarafı. Nötrü tam topraklıdır.

Şekil 7. Yüksüz hatların tekrardan atlamalı (restriking) devre kesicileri ile devreden çıkarılması sırasında doğacak aşırı gerilimler

yor. Ancak olasılığı çok az da olsa, 3 pu'ü aştığı oluyor. Daha önce üzerinde durduğumuz kabul edilebilir yalıtkanlık düzeylerini düşündüğümüzde, 3 pu'lik değerler ekstra yüksek gerilimli (EYG) sistemler için çok yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Bu yüzden 145 kV'un üzerindeki sistemlerde kullanılan devre kesicileri, tekrardan atlama olayından etkilenmemelidir (restrike-free olmalıdır).

### 1.6. Hatların ve Kabloların Devreye Alınması

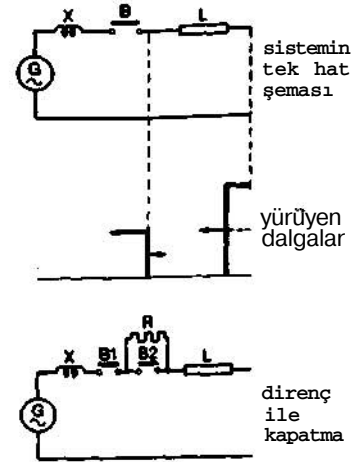
#### 1.6.1. Yürüyen dalgalar

Bir hat sisteme bağlandığında, hat gerilim dalgası sürülür. Eğer hattın öbür ucu açık ise, sürülen dalga karşı uçtan yansır ve gerilim iki katına çıkar (Şekil 8). Devreye alınmadan önce, hattın üzerinde bir artık yük varsa (trapped charge) ve kapama anında sistem gerilimi, hat üzerindeki gerilime zıt yönde ise, daha büyük aşırı ge-

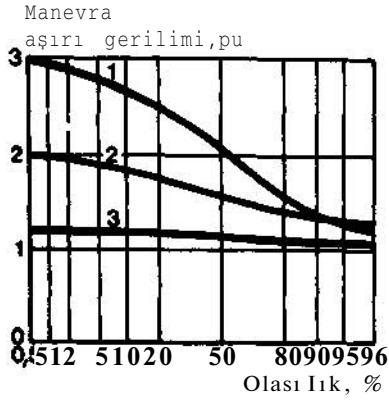
rilimler doğabilir. Dalganın karşı uçtaki yansımından sonra, hat üzerindeki gerilim sistem geriliminin üç katına ulaşır. Bu duruma hattın hızlı tekrar kapanması (reclosing) sırasında rastlanabilir.

Bir üç fazlı hatta, kesicinin kutupları (3 fazda) aynı anda kapanmazsa, çok daha büyük aşırıgerilimler doğabilir. Bir fazdaki gerilim dalgası, diğer fazlardaki gerilim dalgalarını endüktiyerek bu fazlardaki gerilimin daha da büyümesine yol açar.

Yüksüz hatların devreye alınması sırasında doğan aşırıgerilimleri düşürmenin etkin yolu, devre kesicilerinde kapama dirençleri kullanmaktır. Bu yöntemde hattın kapatılması işi iki aşamada gerçekleştirilir: Birinci aşamada, direnç hatte seri girer ve gerilim bölünür. Böylece hattın üzerindeki yürüyen gerilim dalgasının genliği düşürülür. İkinci aşamada, direnç kısa devre edilir. Bu sırada hatte ikinci gerilim dalgası doğar, ancak bunun genliği sınırlıdır. Aşırıgerilimleri etkili biçimde düşürmek için, kapama direncinin hattın dalga empedansına eşit ve direncin devreye alınma süresinin 10 ms dolayında olması gerekir.



Şekil 8. Yüksüz hatların devreye alınması



1. Alan testleri: Aşırı gerilimi düşürmek için hiçbir yöntem kullanılmamıştır.
2. Bilgisayar çalışması: Aşırı gerilimi düşürmek için tek kademeli direnç kullanılmıştır.
3. Bilgisayar çalışması: Aşırı gerilimi düşürmek için çok kademeli direnç kullanılmış ve kapama süreci denetlenmiştir.

Şekil 9. Yüksüz hatların devreye alınışında doğan aşırı gerilimler

#### 1.6.2. Aşırı gerilimler

Bir hat, boşta kapatıldığında ya da tekrar kapatıldığında (re-close) en yüksek aşırıgerilimler hattın açık ucunda oluşur'. Çeşitli durumlar için aşırıgerilimin dağılıma eğrileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Kapsamlı ve ayrıntılı olarak yapılmış alan testlerinden ve bilgisayar çalışmalarından aşırıgerilimlerin hiçbir gerilim düşürme yöntemi kullanılmadığı zaman bile, 3 pu'ü aşmadığını görüyoruz. Günümüzün yalıtkanlık düzeylerini gözönüne alırsak, bu aşırı gerilimler, 420 kV'a kadar olan sistemler için bir sorun yaratmaz ve bugün bu sistemlerde aşırıgerilimler düşürülmeye çalışılmıyor. Ancak, yalıtkanlık düzeylerinin düşürülmesi yolundaki genel eğilim 362 kV'a kadar olan sistemlerde bile aşırıgerilimlerin sınırlandırılmasını gerektiriyor. Şekil 9'dan da görülebileceği gibi, tek kademeli kapama direnci ile, manevra aşırıgerilimleri 2 pu'e kadar düşürülebiliyor. Bugün 525 kV ve 765 kV sistemlerinin yalıtkanlık düzeyleri, bu düşürmeyi gerektiriyor ve bu

sistemlerin devre kesicilerinde tek kademeli kapama direnci kullanılıyor.

Geleceğin, yalıtkanlık düzeyleri çok düşük ekstra yüksek gerilim (EYG) ve ultra yüksek gerilim (UYG) sistemlerinde, aşırıgerilimlerin daha çok düşürülmesi gerekecektir. Böyle bir durum çok basamaklı kapama dirençlerinin kullanılması ve kapama sürecinin denetlenmesiyle gerçekleştirilebilir. Bu işe, devre kesicilerin tasarımını daha da karmaşılaştırıyor.

#### 2. KISA DEVREYİ KESME

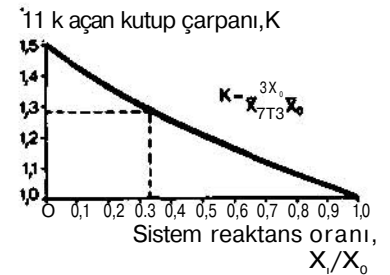
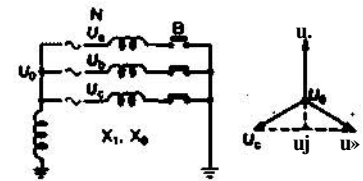
##### 2.1. Düzeltme Gerilimi

2.1.1. Güç frekansı düzeltme gerilimi  
Pratik nedenlerden ötürü, düzeltme gerilimini (recovery voltage) birbirini izleyen iki zaman aralığı için düşünmemiz gerekir. İlk zaman aralığında geçici gerilim, ikinci zaman aralığında ise güç frekansı gerilimi doğar. Güç frekansı düzeltme gerilimi (power frequency recovery voltage) temel olarak sistemin kesicinin bulunduğu noktadaki açık devre gerilimine eşittir. Ancak bazı durumlarda bu gerilim düşer, çünkü kısa devre anında üreticilerin (generatör) manyetik etkisi kalkar (demagnetized). Bu etki üretic reaktansları devrede önemli yer tutuyorsa görülebilir ve devre kesicilerinin anma değerleri saptanırken göz önüne alınmaz.

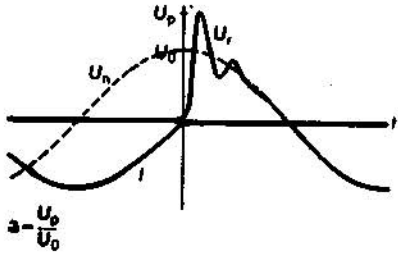
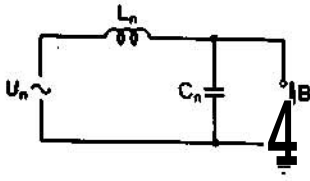
Üç fazlı bir sistemde, kısa devrenin temizlenmesinden hemen sonra doğan güç frekansı gerilimleri her faz için farklıdır. Üç faz toprak kısa devresinin temizlenmesinde, ilk açılan fazdaki gerilim en yüksektir. Üç faz kısa devrede sistemin nötr noktasının gerilimi simetriden ötürü sıfırdır, (Şekil 10). Kesici kutuplarından biri açıldığında (faz a), simetri bozulur. Eğer sistemin nötrü topraklı değilse, üç faz kısa devre iki faz arası arızaya dönüşür ve nötr noktasının gerilimi  $U_0$  a düşer. Açılan ilk kutbun uçları arasındaki gerilim, nötr noktasının gerilimi artı faz gerilimi olur ( $1,5 U_a$ ).

Üç fazlı bir sistemde, kısa devrenin temizlenmesinden hemen sonra doğan güç frekansı gerilimleri her faz için farklıdır. Üç faz toprak kısa devresinin temizlenmesinde, ilk açılan fazdaki gerilim en yüksektir. Üç faz kısa devrede sistemin nötr noktasının gerilimi simetriden ötürü sıfırdır, (Şekil 10). Kesici kutuplarından biri açıldığında (faz a), simetri bozulur. Eğer sistemin nötrü topraklı değilse, üç faz kısa devre iki faz arası arızaya dönüşür ve nötr noktasının gerilimi  $U_0$  a düşer. Açılan ilk kutbun uçları arasındaki gerilim, nötr noktasının gerilimi artı faz gerilimi olur ( $1,5 U_a$ ).

300 kV ve üzerindeki sistemlerin nötrü de tam topraklanmış ve hemen hemen bu sistemlerdeki tüm kısa devreler topraklıdır. Bu sistemlerde ilk açılan kutup çarpanı 1,5 yerine 1,3 alınabilir. Ancak bazı elektrik kuruluşları topraklamalardan bazılarının unutulabileceği gerekçesiyle bu çarpanın daha yüksek tutulmasını istiyor. İlk açılan kutup çarpanının toprak arıza çarpanına (earth-fault-factor) eşit olmadığını belirtmekte yarar var. Sistemdeki dirençleri gözönüne almazsak, toprak arıza çarpanı 1,4 - 1,73 arasında değişmesine karşın, diğer çarpan 1,3 - 1,5 arasında değişir.



Şekil 10. İlk açılan kutup çarpanı



Şekil 11. Geçici düzelme gerilimi

### 2.1.2. Geçici düzelme gerilimi

Geçici düzelme gerilimi, GDG (transient recovery voltage, TRV) kısa devrenin kesilmesinden sonra, kesici kontakları arasında oluşan gerçek gerilimdir. Şekil 11'de basit bir devre için gösterilmiş olan, salınım biçimindeki GDG, giderek sistemin açık devre gerilimine dönüşür. Sistemin gerçek yapısının çok karmaşık oluşu, çok sayıda salınım frekansının doğmasına yol açar.

Daha önceki kesici standartlarında; geçici düzelme gerilimi (çoğunlukla tekrardan atlama gerilimi diye anılırdı), salınım frekansı (temel frekans) ve genlik çarpanı (tepe gerilimin güç frekansı geriliminin tepe değerine oranı) ile tanımlanırdı. Geçici düzelme geriliminin yükselme hızı, GDGYH (rate-of-rise of recovery voltage, RRRV) aşağıdaki bağıntıdan bulunurdu:

$$S : K \times a \times 2f \times \frac{U_1}{T}$$

- S : GDGYH (V/ys)
- K : İlk açan kutup çarpanı
- a : Genlik çarpanı
- f : Salınım frekansı (kHz)
- U<sub>n</sub> : Sistem gerilimi (kV)

Kısa devre güçlerinin büyük olduğu sistemlerde; salınım frekansı, genlik çarpanı ve GDGYH değerleri oldukça düşüktür ve devre kesicisinin değerlerine çok yakındır. Sistemlerde gücün büyük bir bölümü uzun hatlarda iletiildiğinden, büyük değerli kapasitanslar salınım frekansını düşürür. Hatların ayrıca salınımları sönümleme etkisi vardır.

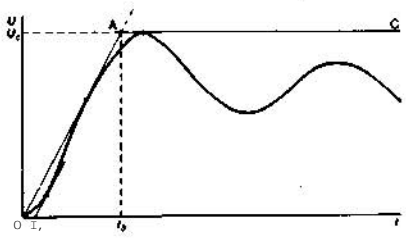
145 ve 420 kV'luk sistemlerin tipik salınım frekansları 1,5 - 0,7 kHz, genlik çarpanı 1,4, ilk açan kutup çarpanı 1,3-1,5 ve GDGYH 600-1000 V/ys dolayındadır.

Kısa devre güçleri düşürülmüş sistemlerde (özellikle bazı hatların servis dışı olması halinde) salınım frekansları ve genlik çarpanları daha da büyür. Kısa devre akımları düşürülmüş testlerde (% 10, % 30, % 60 testleri) bu durum gözönüne alınmalıdır.

Transformatör ve seri reaktörler ile kısa devre akımları sınırlanmış sistemlerde, çok büyük salınım frekansları ve genlik çarpanları oluşur. Devre kesicisi tasarımında bu durumun üzerinde önemle durulması gerekir.

### 2.1.3. Değişkenlerle benzetme

Mevcut sistemlerin geçici düzelme gerilimleri üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış ve basit benzetmelerin, gerçek sistem koşullarını yeterince yansıttığı görülmüştür. GDG'nin biçimi,



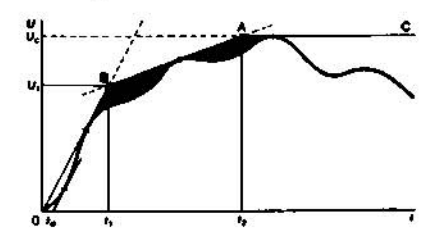
Şekil 12. Geçici düzelme geriliminin iki değişkenle benzetilmesi

bazı durumlarda çok karmaşıklaşıyor ve yalnız iki değişkenle benzetilmesi yeterli olmuyor. Yeni IEC devre kesicisi standardında (yayın 36, 1971, 1972) GDG'ni tanımlamak için, iki değişken ve dört değişken yöntemleri önerilmiştir.

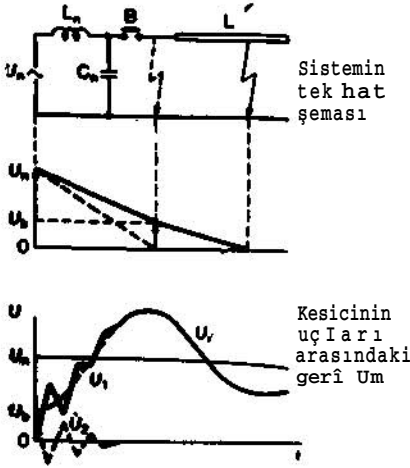
tki değişken yöntemi, ilke olarak önceki bölümde anlatılanın aynıdır. Ancak GDG'nin benzetimi için, tepe gerilimi (U<sub>e</sub>, kV) ile tepe gerilimine ulaşma süresi (t<sub>3</sub>, µs) kullanılmış ve salınım frekansı ile genlik çarpanına yer verilmemiştir (Şekil 12). Bir sistemde sürekli bulunan terminal kapasitanslarının etkisini içermesi için, zaman gecikmesi (t<sub>d</sub> > ys) de gözönüne alınmıştır. GDG benzetiminde iki değişken yönteminin kullanılması, 100 kV'un altındaki sistemler ve kısa devre güçleri sınırlanmış ya da gücün çok az bir bölümünün uzun hatlardan iletiildiği daha yüksek gerilimli sistemler için yeterli oluyor.

Çok yüksek gerilimli ve kısa devre güçleri büyük olan sistemlerin geçici düzelme gerilimini belirlemek için dört değişkenli yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde, GDG'nin benzetimi için iki tepe gerilimi (U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>; KV) ile bu gerilimlerin karşılığı olan iki tepe gerilimine ulaşma süresinden (t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> ps) yararlanılmıştır. Ayrıca iki değişkenli yöntemdeki gibi,

zaman gecikmesi (t<sub>j</sub>, ys) de gözönüne alınmıştır. Şekil 13'de tipik bir örnek verilmiş ve



Şekil 13. Geçici düzelme geriliminin dört değişkenle benzetilmesi



Şekil 14. Kısa hat arızaları

dört değişkenin nasıl bulunacağı gösterilmeye çalışılmıştır. Devre kesicisi standartlarında (IEC, yayın 56, 1971/1972) daha çok örneklemeler, daha ayrıntılı benzetmeler ve farklı sistem durumları için değişkenlerin değerleri de verilmiştir. Dört değişken yöntemi, kesici şartnamelerini karmaşıklıklaştırmış ve test devrelerinin tasarımı daha güçlükler çıkarmıştır. Bu kadar ayrıntıya girmenin yararlı olup olmadığı sorusu da akla gelebilir. Ancak, günümüzde genel eğilim, daha fazla ayrıntıya inmek ve özellikle ilk geçici düzelleme gerilimini, İGDG (initial transient recovery voltage, ITRV) -iyicc belirlemektir. İGDG'nin belirlenmesi, bazı kesiciler için, özellikle SF<sub>6</sub> gazını ark söndürme ortamı olarak kullanan kesiciler için önem kazanmıştır.

## 2.2. Kısa Hat Arızaları

### 2.2.1. Olayın tanıtımı

Kısa hat arızalarında (short line faults) daha da özel durumlarla karşılaşılır. Kısa hat arızası deyimi hat üzerinde, kesiciden 1T5 km uzağındaki arızaları tanımlamak için kullanılır. Şekil 14'de, sistem tek fazlı çizilmiş ve arıza anındaki gerilimin dağılımı gösterilmiştir. Kesici uçlarındaki bir arızada (terminal faults)

gerilim düşümünün tamamı kesicinin kaynak tarafındadır. (Şekilde noktalı doğru ile gösterilmiştir) ve kesici üzerinden en büyük kısa devre akımı geçer. Arıza, hat üzerinde bir yerde olsaydı, hattaki gerilim düşümünden ötürü kısa devre akımı daha az olacak ve kesicinin olduğu noktada belirli bir gerilim ( $U_t$ ) görülecekti.

Kısa devre akımının kesilmesinden sonra, kesicinin kaynak ve hat tarafındaki gerilimler, birbirinden bağımsız olarak salınmaya başlar ve kesicinin uçları arasındaki geçici düzelleme gerilimi, bu iki gerilimin farkı olur. Her iki gerilim, kesmeden önce devre kesicisinin bulunduğu noktadaki gerilimin ( $U_f$ ) ani değerinden başlayarak salınır. Kaynak tarafındaki gerilim, sistem frekansı ile salınır ve giderek açık devre gerilimine yükselir. Gerilim düşümünün bir bölümünün kaynak tarafında olması (diğer bölümü hat tarafındadır), salınımın genliğini azaltır. Kesicinin açılmasından sonra hat üzerinde kalan yük, gerilim dalgaları üretir ve hat üzerinde ışık hızı ile yürüyen bu dalgalar her iki uçtan geriye yansır. Yürüyen ve yansıyan dalgalar kesicinin hat tarafındaki gerilimini oluşturur (Şekil 14'deki testere dişi biçimindeki gerilim). Bu tarafta herhangi bir gerilim kaynağı olmadığından ve hattaki kayıplar nedeniyle, gerilim bir güre sonra kaybolur.

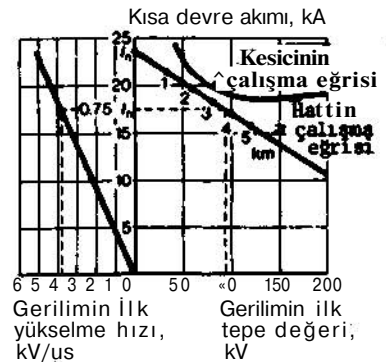
### 2.2.2. Geçici düzelleme gerilimi

Kesici uçlarındaki geçici gerilimin ilk tepe değerinin genliği düşük olduğu halde, yükselme hızı çok yüksektir ve gerilim daha sonra, yavaş salınımlarla açık devre gerilimine ulaşır. Gerilimin ilk tepe değerine çıkma süresi, dalganın hat üzerinde gidip karşı uçtan yansımaya kadar geçecek samandır. Kısa hat arızalarında, bu süre çok kısadır ve ilk tepe değerine ulaşma hızı çok yüksektir. Yeni devre kesicisi standartlarında (IEC, yayın 56) kısa hat arızalarında değişkenlerin nasıl bulunacağı anlatılmış ve çeşitli durumlar için gerilim genlikleri ile tepe değerine ulaşma süreleri verilmiştir.

### 2.2.3. Devre kesicisinin durumu

Kısa hat arızalarında görülen, gerilimin çok büyük yükselme hızı (10 000 kV/ys 'y'<\* kadar), bazı kesicilerde, özellikle basınçlı hava ile çalışanlarda ciddi zorluklar yaratır. Bu yüzden havalı kesicilerde, küçük açma dirençlerinin kullanılması kısa devreyi kesme yönünden yararlı olur. Kısa hat arızalarındaki koşullar, Şekil 15'teki gibi özel bir durum için akım ve gerilimin büyüme hızları çizilerek daha iyi gözlenebilir. Devre kesicisinin çalışma eğrisini (testlerle saptanan), hattın hesaplama ile bulunan akım ve gerilim eğrileriyle karşılaştırarak, kesicinin çalışma niteliği üzerinde bir karara varılabilir. Bu tür çalışmalarda; hattın birkaç kilometre uzağındaki bölge, kritik bölge bulunmuştur. Daha kısa hatlarda, gerilimin yükselme hızı daha fazladır, ancak gerilimin tepe değeri düşük olduğundan, devre kesicileri, arızaları daha kolay temizler. Uzun hatlarda gerilimin tepe değeri artar, ancak yükselme hızı düşüktür.

Devre kesicilerinin kısa hat arızalarını karşılayabilecek biçimde tasarlanmasının ekonomik olup olmayacağı sorunu ile karşılaşılabilmektedir. Çünkü bu tür arızalara pratikte çok az rastlanır. Yine de birçok elektrik kuruluşu kesicilerin bu niteliği üzerinde önemle duruyor.



Sistem: 245 kV  
Kısa devre gücü: 10 000MVA  
Hat: Tek iletkenli

Şekil 15. Kısa hat arızası

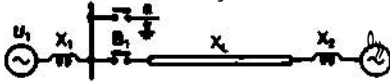
### 2.3. Fazlar Kayıkken Kapatma

Herhangi bir nedenden, senkronize edilmemiş iki enterkonnekte sistem birleştirilmek istenirse, fazları kayık kapatma (out-of-phase switching) ile karşılaşırız. Şekil 16'da genel bir sistem bölümü verilmiştir. Devre kesicileri, baradaki toplam kısa devre gücüne göre (örneğin "a" noktasındaki bir kısa devreye göre) seçilmiş ise, fazları tam kayık (180° out-of-phase) ilci sistemi birleştiren noktadaki en yüksek akım, kesicinin kesme akımının X 50'sine ulaşır.

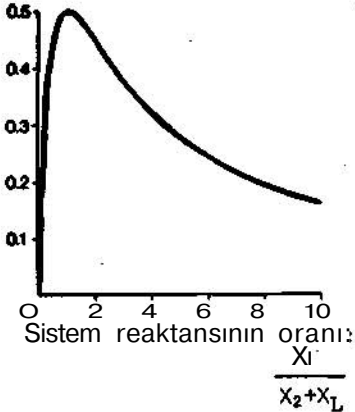
Merkez I'deki devre kesicisi için  $X_1 = X_L + X_2$  ise, "a" noktasındaki kısa devrede, sistem 1 ve sistem 2'den gelen kısa devre güçleri eşittir. Ancak bu, gerçek bir durumu yansıtmıyor, çünkü bat, sistem 2'den gelecek güç ve akımı oldukça düşürür.

Birçok ülkelerde yapılan araştırma, fazları kayık sistemlerde doğacak akımın, normal kısa devre akımının ancak Z 25'ine ulaşacağını göstermiştir. IEC 8tan-

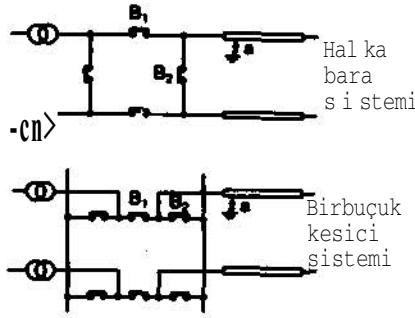
Sistemtek hat şeması



Hat akımının oranı



Şekil 16. Fazlar kayıkken kapatma



Şekil 17. Paralel devre kesicilerinin açılıp kapatılması

dartlarında da (yayın 267, 1968) devre kesicilerinin, anma kısa devre akımının % 25 değerindeki akımı, bir fazdaki gerilim normal faz geriliminin, nötrü topraklı sistemlerde 2 katına, topraklı sistemlerde de 2,5 katına çıktığında kesmesi öngörülmüştür. Fazlar kayık durumunda yapılan açma ve kapamalarda; doğacak geçici düzelme geriliminin tepe değeri ve yükselme hızı oldukça düşüktür. Sistemlerde olanağı varsa fazlar kayıkken açma ve kapamalarından kaçınılmalıdır.

### 2.4. Paralel Kesicilerin Açılıp Kapatılması

Bazı durumlarda, bir kısa devreyi temizlemek için iki kesicinin de paralel ( aynı anda) çalışması gerekebilir. Böyle bir duruma halka baralı (ring bus) ve birbuçuk kesicili (one-and-a-half breaker bus) merkezlerde rastlanır. Bu merkezlerde, bir çıkış hattındaki (a noktasındaki) kısa devre, B1 ve B2 kesicilerinin paralel çalışmasıyla temizlenir.

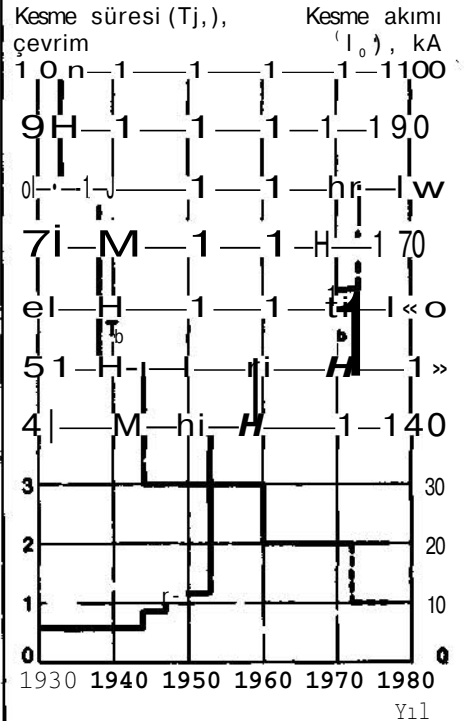
Arkı söndürmek için gerekli basıncı kendisi üreten devre kesicilerinde (tam yağlı ve az yağlı devre kesicileri) kısa devrenin paralel kesilmesi, özellikle kesme süresi uzun ise tehlikeli olabilir. Kısa devre akımı devre kesicileri üzerinde kendiliğinden ikiye bölünmez ve kesicilerde üretilmesi gereken basınç farklı olur. Bir kesicideki ark önce söner ve diğer kesicideki ark, akımın bir sonraki sıfır geçişinde söndürülmeye çalışılırsa, tekrardan at-

lama (restrike) olayı ile karşılaşılır. Bu durumda birinci kesici, kontakları önceden ayrılmış olduğu halde daha büyük bir akımı kesme durumunda kalır. Böyle bir durumu, daha önce incelediğimiz yayılan arıza olayına benzetebiliriz.

### 2.5. Kısa Devre Akımı

Günümüzün birçok sistemlerinde, kısa devre güçlerinin hızla artması, yalnız devre kesicileri için değil, baralar, hatlar ve diğer aygıtlar için de önemli sorunlar yaratmıştır. Kısa devre güçlerini sınırlayacak etkin ve ekonomik bir yolun olmaması, daha büyük kesme güçlü devre kesicileri talebini artırmıştır.

Şekil 18'de, 1930-1972 arası ABD pazarında bulunan EYG devre kesicilerinin kesme akımı ve kesme süreleri verilmiştir. Bugün 63 kA'lık devre kesicileri kullanılıyor ve 80 kA'lıkler de

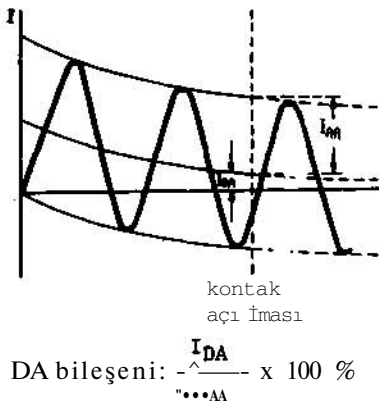


Şekil 18. 1930-1972 arası ABD piyasasındaki devre kesicisi anma değerleri (230-765 kV)



yapılmakta. Günümüz devre kesicilerindeki en düşük kesme süresi 2 çevrimdir (cycle), ancak 1 çevrimlik devre kesicilerin de yakında gerçekleştirileceği sanılıyor.

Devre kesicilerinde, asimetrik kesme gücü gereği de giderek artıyor. Bunun nedeni hem kısa devre güçlerinin, hem de kısa devre akımındaki DA (doğru akım) bileşenlerinin artmasıdır. Şekil 19'da tipik bir asimetrik akım dalgasının biçimi ve AA, DA bileşenlerinin tanımlamaları gösterilmiştir. DA bileşeni daha çabuk sönümlenir ve genliği devre kesicisinin açma süresine bağlıdır. DA bileşeninin sistemin X/R oranı ile belirlenen çeşit sönümlenme düzeylerine göre nasıl değiştiği, Şekil 20'de gösterilmiştir. Şekilde ayrıca, IEC standartında (IEC 56, 1971/1972) devre kesicisini belirleyen eğri de verilmiştir. IEC eğrisi günümüz sistemlerinin genel bir ortalamasını yansıtır ve her durum için geçerli olmayabilir. Günümüzde X/R oranı 30 olan sistemler vardır ve geleceğin çok büyük sistemlerinde bu oranın 50'ye çıkması bekleniyor. Buradan şu sonuca kolaylıkla varılabilir; devre kesicilerinde, kesme süreleri daha da düşürülmeli ve.



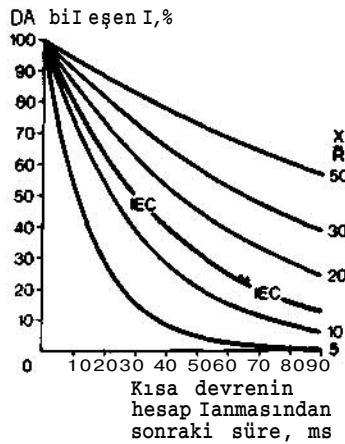
Şekil 19. Asimetrik akım

asimetrik akımları kesme gücü daha da artırılmalıdır.

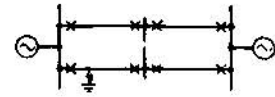
## 2.6. Kesme Süreleri

Devre kesicilerinde, kesme sürelerinin daha da düşürülmesi gereği yukarıda belirtilmişti. Birçok durumlar için 5 çevrimlik kesicilerin yeterli olduğu görüşü çok eski değildir. Şimdi ise, 3 çevrimlik, hatta 2 çevrimlik devre kesicileri istemi ile sık sık karşılaşıyor ve 1 çevrimlikler üzerinde de tartışmalar sürdürülmekte.

Arızanın toplam temizlenme süresinin, bir sistemin kararlılık sınırı üzerindeki etkisi büyüktür. Şekil 21'den, belirli bir sistem bölümünde kararlılık sınırları içerisinde iletilebilecek en büyük gücün, çeşitli arızalar için arızanın temizlenme süresine nasıl bağlı olduğu görülebilir. Bu tür hesaplamalarda, sistemin niteliği de sonucu etkiler. Burada örnek olarak, gelecekte kurulacak olan 800 kv'luk İsveç sistemi anılabilir. Bu sistemde, üç faz arızalarının temizlenme süresi 100 ms'den 70 ms'ye düşürüldüğünde, üretim merkezlerinden birinin üretimi 3000 MW'tan 3500 MW'a çıkarılabiliyor.



Şekil 20: Asimetrik kısa devre akımının DA bileşeni



Kararlılık sınırı, MW



Şekil 21. Arızanın temizlenme süresine göre kararlılık sınırı

Yeni sistemlerin başlangıçtaki kısa devre güçleri, daima düşüktür. Böyle olduğu halde, büyük kesme güçlü kesicilerin kullanılma nedeni geleceğin gereksinmelerini karşılamak içindir. Bu tür kesicilerde, anma değerinden daha düşük anza akımlarını kesme r.uresi de önemlidir. Aynı şey, düşük üretim ve yükte çalışan eski sistemler için de söylenebilir. Her iki durumda da, sistem kararlılık sınırına yakın çalışıyorsa, arızanın temizlenme süresinin kısa oluşu daha da önem kazanır.

Tekrar kapama (reclosing) işlemlerinde ölü süresinin (dead time) kararlılık sınırı üzerindeki etkisi büyüktür. Bu süre, devre kesicisinin durumuna göre değil, kısa devre arkının sönümlenmesine (deionisation) göre belirlenir. Ancak, arızanın temizlenme süresinin kısıllığı, arkın sönümlenme süresini etkilediğinden, tekrar kapama ölü süresinin biraz daha düşürülebileceği sanılıyor.

(ASEA, Pamphlet KT 90-102 E System Aspects of Circuit-Breaker Requirements)