

# 피뢰기 정격과 절연협조

파워세븐 엔지니어링 | 대표 / 전기안전기술사 이성우

피뢰기란 뇌서지 및 개폐서지로 인한 과도적 이상전압으로부터 전력설비의 기기를 보호하는 장치이다. 종래에는 주로 전력시설물을 그 보호대상으로 하고 있었으나 최근에는 건축물의 내부에 사용하는 정보통신기기를 보호하는 기술도 발달하고 있다. 본 론에서는 고압기기를 보호대상으로 하는 피뢰기에 대하여 살펴보겠다.

## 목 차 CONTENTS

### *Electric Engineers Technology Information*

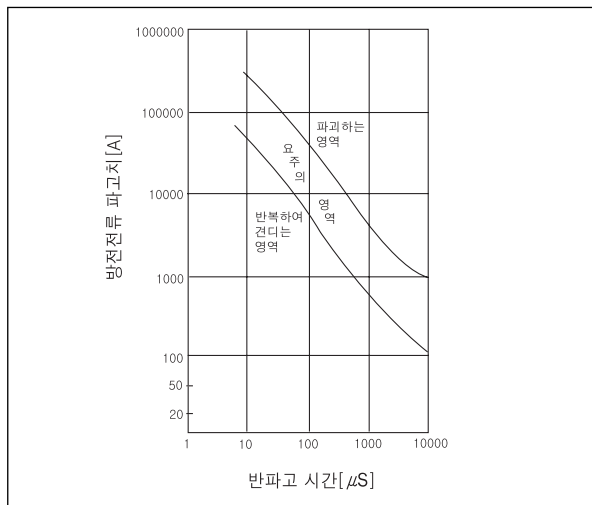
- 1회 : 피뢰기의 주요특성
  - 1.1 방전내량
  - 1.2 보호레벨
  - 1.3 방전특성
  - 1.4 제한전압
- 2회 : 피뢰기의 선정
  - 2.1 정격전압의 선정
  - 2.2 공칭방전전류의 선정
- 3회 : 절연협조의 검토
  - 3.1 기기의 절연강도와 보호레벨
  - 3.2 피뢰기와 피보호 기기의 거리
  - 3.3 가공선과 케이블 접속계통의 절연협조

피뢰기의 특성은 그 단자전압이 이상전압의 침입으로 일정전압 레벨 이상으로 상승하면 신속하게 동작하여 기기 보호레벨 이하로 이상전압을 억제하는 기능과 이상전압을 처리한 후 속류를 신속히 차단하는 기능을 가지고 있다. 따라서 계통의 상태, 피보호기기의 종류, 설치장소 등에 맞는 피뢰기를 선정하는 것이 중요하다. 만일 피뢰기를 잘못 적용하면 오히려 큰 사고를 유발하게 된다.

### 1. 피뢰기의 주요 특성

#### 1.1 방전 내량

피뢰기가 방전했을 때 피뢰기를 통해서 흐르는 전류가 너무나 큰 전류이면 피뢰기가 파괴되거나 일정 정도를 넘는 전류가 반복해서 흐르면 손상을 초래하게 된다.



[그림 1] 발·변전소용 피뢰기의 방전전류 파형과 내량과의 관계

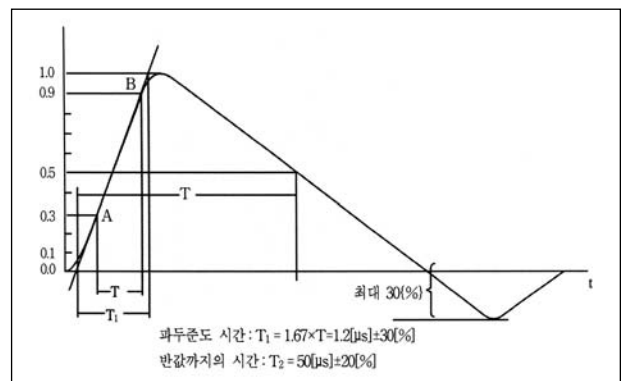
이 한도를 피뢰기의 放電耐量이라 부르며 형식에 따라 발·변전소용, 배전선로용, 저압용으로 구별한다. [그림1]은 발·변전소용에 대해 방전전류 파형과 내량과의 관계를 대략 표시한 것이다.

#### 1.2 보호 레벨

피뢰기의 보호레벨이란 피뢰기에 의해 어느 정도의 절연기까지 보호할 수 있는지를 나타내는 것으로 피뢰기의 방전특성과 제한전압특성으로 결정되는데 이것은 피뢰기의 정격전압(허용단자전압)이 정해지면 결정할 수 있다.

#### 1.3 방전 특성

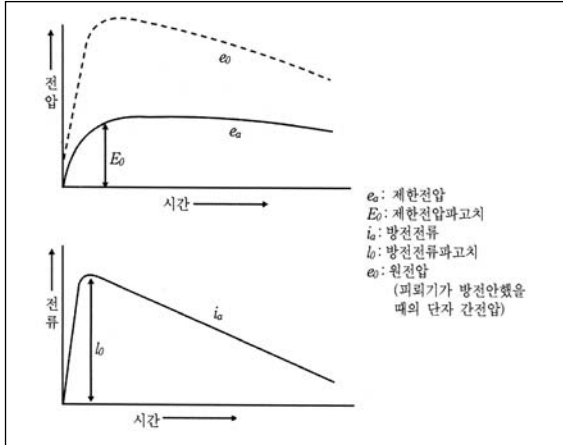
과도 이상전압이 피뢰기에 인가된 경우에 방전을 개시하는 전압은 파형에 따라서 달라지며 IEC 60-1에 따르는 표준 전압파형은 [그림2]와 같다. 피뢰기의 정격전압 실효값을 P라 하면 표준파에 대한 방전전압 파고값은 (1.6~3.6)P의 범위에 있다. 방전특성은 외부 기상 조건의 영향을 받기 쉬우며 극심한 오손, 습윤 상태에서는 50% 가까이 떨어지는 수가 있으므로 애관(碍管)의 표면은 깨끗하게 유지하는 것이 중요하다.



[그림 2] 표준 전압파형 V-t 곡선

#### 1.4 제한전압

제한전압이란 피뢰기에 방전전류가 흐르는 경우의 피뢰기 단자전압이며 침입해 오는 서어지를 방전중 그 값으로 제한하는 전압이란 의미이다. 규정값은 파고치로 하고 있다. 특히 제한전압은 방전전류의 파고치와 파형에 따라 정해지며 방전전류가 증가하면 제한전압도 높아지게 된다. [그림3]은 피뢰기의 제한전압 예를 나타낸다.



[그림 3] 피뢰기의 제한전압

## 2. 피뢰기의 선정

피뢰기는 계통전압, 계통의 이상전압, 계통기기의 절연강도 등을 고려하여 정격을 선정하여야 한다.

### 2.1 정격전압의 선정

피뢰기의 정격전압은 이 전압을 피뢰기의 단시간에 인가한 상태에서 단위 뇌서지 동작책무로 규정된 회수를 반복하여 수행할 수 있는 정격 주파수의 상용주파 전압을 말하며 그 값은 실효치로 나타낸다. 피뢰기의 정격전압은 계통전압 및 그 과전압에 의해 정해진다. 즉 계통의 과전압에는 뇌서지와 개폐서지에 의한 과전압과 상용주파의 단시간 과전압이 있다. 특히 계통의 지락사고, 부하차단, 공진 등 때문에 발생하는 상용주파의 과전압은 지속 시간이 뇌서지에 비해 비교적 길어서 피뢰기로 모든 것을 보호하기는 사실상 곤란하다. 따라서 뇌서지나 개폐서지는 피뢰기가 보호해야 할 대상이며 원칙적으로 피뢰기의 정격전압은 상용주파 과전압 이상으로 할 필요가 있고 계통의 최고 허용전압에서 1선 지락사고가 발생했을 때의 건전상 대지전압에 약간의 여유도를 준 전압으로 하고 있다. 즉 JEC

에서 추천하고 있는 피뢰기의 정격전압 선정은 다음과 같다.

$$E_{Rk} = \alpha \cdot \beta \frac{V_m}{\sqrt{3}} = k V_m$$

단,  $\alpha$ : 접지계수

$\beta$ : 여유도

$V_m$ : 계통의 최고허용전압 = 공칭전압 (1.2/1.1)

$k$ :  $V_m$ 인 계통에  $E_{Rk}$ 대해서의 피뢰기를  $k\%$ 피뢰기라 한다.

#### ① 비유효접지계

즉 저항접지 또는 비접지계에서의 피뢰기 정격전압은 접지계수  $\alpha$ 는  $\sqrt{3}$  전후이므로 여유도  $\beta$ 를 1.15라고 하면, 상기 수식에서  $k = 1.15$ 가 되어 계통 최고허용전압의 115% 피뢰기가 된다.

#### ② 유효접지계

유효접지계에서는 접지계수  $\alpha$ 는  $(0.65 \sim 0.81) \times \sqrt{3}$ 의 범위에 있으므로  $\beta$ 를 1.15라 하면 는 대략 0.8~1.0이 되어 80~100%의 피뢰기가 적용된다.

또한 계통의 최고 허용전압에서 1선 지락사고가 발생했을 때의 건전상 대지전압 상승은 실용상 다음과 같이 적용하여 피뢰기의 정격전압을 선정할 수 있다.

- 직접접지 계통 : 대지전압의 1.25~1.4배 정도(유효 접지계통)
- 저항접지 및 비접지 계통 : 대지전압의 1.7~2배 정도(비유효접지 계통)

즉 유효접지계통은 비유효접지계통보다 피뢰기의 정격전압을 다소 낮게 선정할 수 있다. [표] 피뢰기의 정격참조

### 2.2 공칭 방전전류의 선정

피뢰기의 공칭 방전전류는 뇌격빈도, 선로의 뇌차폐

상황 등으로 정해진다. 방전전류를 계산으로 구하면 다음 식이 된다.

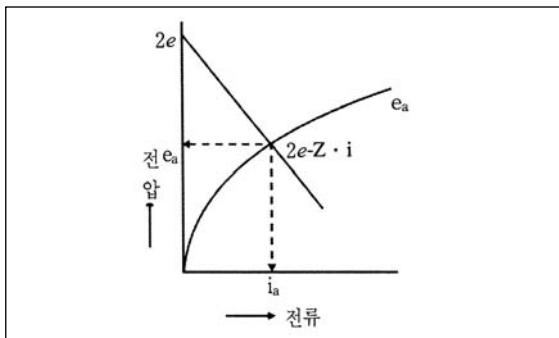
$$i_{\alpha} = \frac{2e - e_{\alpha}}{Z}$$

단,  $e$ : 진입 서지의 파고치

$e_{\alpha}$ : 제한전압

$Z$ : 선로의 서지 임피던스

실제로는  $e_{\alpha}$  제한전압가 [그림4]처럼 비직선 함수이므로 위 식으로 계산하는 것은 곤란하다. 따라서 식을 변형해서  $e_{\alpha} = 2e_{\alpha} - iZ$ 로 하고 그림에서 방전전류와 제한전압의 곡선과 종축의  $2e$ 의 점에서 그은 구배  $-Z$ 인  $2e_{\alpha} - iZ$ 선의 교점에서 방전전류와 제한전압을 구하는 도해법이 사용된다.



[그림 4] 피뢰기 방전전류의 도해법

그러나 근접뢰의 경우는 피뢰기와 뇌적점과의 사이에 서지의 반사가 일어나 피뢰기에 가해지는 전압은 더욱 상승하고 방전전류가 커진다. 보통 수변전 설비에 사용하는 피뢰기의 공칭 방전전류는 [표1] 피뢰기의 정격을 적용한다.



[표 1] 피뢰기의 정격

중성점	계통전압 (kV rms)	BIL(kV)	피뢰기의 정격	
			정격전압(kV)	방전전류(kA)
비유효 또는 비접지	3.3	45/30	45/30	2.5/5
	6.6	60/45	60/45	2.5/5
	22	150	150	2.5/5/10
유효접지	22.9	125	125	2.5/5/10
	154	650	650	10 이상

만일 개폐서지를 적극적으로 억제하고자 할 때는 10kA를 선정한다. JEC에서는 10kA 피뢰기에 대해 개폐서지에 관한 동작책무를 규정하고 있다. 이것은 계통의 무부하 충전전류를 차단과 함께 재점화가 발생하고 그 개폐서지에 의해 피뢰기가 방전했을 때 계통의 대지정전용량에 충전되어 있던 에너지에 의한 방전을 처리하는 책무이다.

**예제1) 상용주파의 이상전압은 부하차단, 지락고장, 단선, 동기 탈조의 경우에 발생하는 기본 주파성분의 이상전압이며 장시간 계속되므로 계통의 기기 절연은 기본적으로 이런 종류의 이상전압에 충분히 견뎌야 한다. 이 중에 계통사고의 80% 정도를 점유하는 1선 지락 사고시 이상전압에 대하여 설명하여라.**

**해설)** 3상 계통에서 a상 지락 고장시 건전상 b, c 상의 대지전압은 다음 식으로 구해진다.

$$V_b = \frac{(\alpha^2 - 1)Z_0 + (\alpha^2 - \alpha)Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \times E_{\alpha}$$

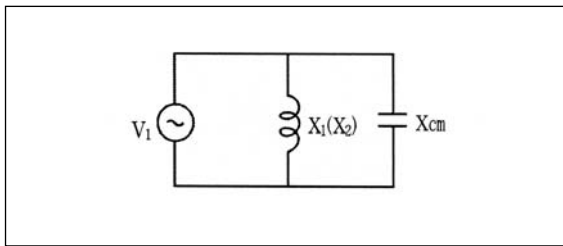
$$V_c = \frac{(\alpha - 1)Z_0 + (\alpha - \alpha^2)Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \times E_{\alpha}$$

단,  $E_{\alpha}$ : 고장점에서의 고장 직전의 상 대지전압

$Z_1$ : 고장점에서 본 계통의 정상임피던스

$Z_2$ : 고장점에서 본 계통의 역상임피던스

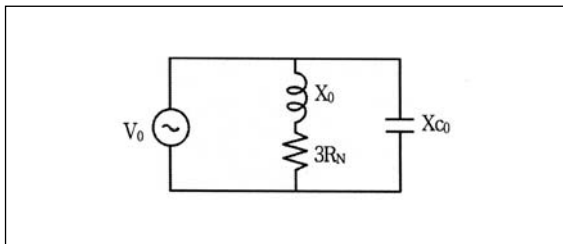
$Z_0$ : 고장점에서 본 계통의 영상임피던스  
 정상임피던스  $Z_1$  및  $Z_2$ 역상임피던스는 [그림5]와 같이  
 발전기, 변압기, 부하, 선로 등의 정상 또는 역상리액  
 텐스  $X_1, X_2$ 와 상간-용량리액텐스  $X_{cm}$ 의 병렬회로로  
 표시된다.



[그림 5] 정상 및 역상 등가회로

일반적으로  $X_1, X_2$ 는 유도성으로 비교적 작은 값이  
 되고, 사고 직후에는 정상리액텐스와 역상리액텐스는  
 같으므로  $Z_1 = Z_2$ 라 볼 수 있다.

영상임피던스  $Z_0$ 는 [그림6]과 같이 기기, 선로의 영  
 상리액텐스  $X_0$  및 중성점의 접지저항과 계통의 대지용  
 량리액텐스  $X_{c0}$ 의 병렬회로로 표시된다.

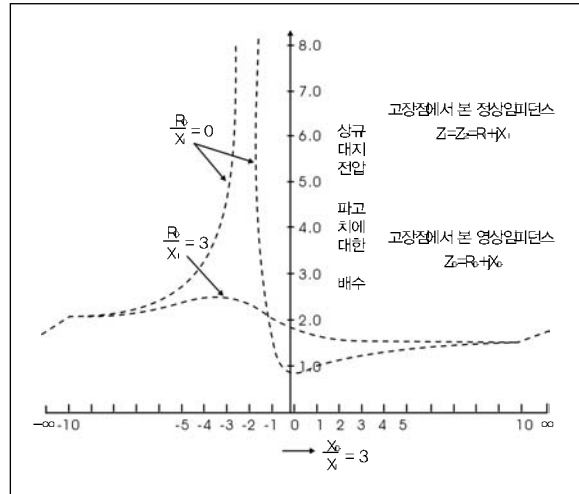


[그림 6] 영상 등가회로

① 비접지 계통

비접지 계통에서는  $R_N = \infty$ 이고,  $Z_0 = X_{c0} = -\frac{1}{\omega C_0}$  (단, 는  
 대지 커패시턴스)이 된다. 일반적으로 용량성의  $Z_0$ 는  
 유도성의  $Z_1 + Z_2$ 에 비해 크고  $V_b, V_c$ 는 상규 대지전압  
 의 3배 이하다 된다. 그러나 사고 양상에 따라서는  $Z_1 +$   
 $Z_2 + Z_0$ 는 0에 접근하고  $V_b, V_c$ 는 매우 큰 값이 되어이

상전압이 발생한다. [그림7]은 1선 지락시의 건전상 전  
 압과 각종 임피던스와의 관계를 횡축에  $X_0/X_1$ 를 잡고  
 $X_0/X_1 = -2$ 을 파라미터로 해서 표시한 것이다. 이상전  
 압은 정상시의 배수로 구해지며 근방에 공진점이 있다  
 는 것을 알 수 있다. 공진점에서는 과도 이상전압이 상  
 규 대지전압의 7~8 이상 높게 발생하게 되므로 동시  
 다발적으로 기기의 절연이 손상되는 경우도 발생한다.  
 또 이상전압은  $R_0/X_1$ 이 클수록 작아진다. 이것은 회로  
 의 저항분  $R_0$ 가 이상전압을 억제하기 때문이다.



[그림 7] 1선 지락시 건전상 전압 상승

② 직접접지 계통

직접접지 계통에서는  $X_0/X_1$ 은 양의 값을 나타내고 1  
 선 지락사고시 건전상 전압은 상규 대지전압의 1.89 배  
 이하다 된다.

③ 저항접지 계통

a. 저저항접지 계통

저저항접지 계통에서는 고장점에서 본 영상임피던  
 스는 계통 중성점의 접지위치 및 저항값, 선로의  
 상태에 따라 변하지만 보통은 유도성이 되고 이상  
 전압은 직접접지 계와 마찬가지로 그다지 커지지

않는다.

b. 고저항접지 계통

고저항접지 계통에서는  $R_N = X_C$ , 즉  $R_N = \frac{1}{3\omega C_S}$  (단,  $C_S$ 는 1상당대지 커패시턴스) 이라 하면  $V_c = 2.75E_a$ 가 되어 이상전압은 2.75 배 이하로 억제할 수 있다. 따라서 중성점 저항기의 저항값은 1선 지락시 충전전류 보다 큰 유효전류를 흐르게 하는 것을 목표로 해서 정해진다. 중성점 저항기의 선정방법은 다음 기회에 해설하기로 한다.

예제2) 계통 지락사고시 피뢰기의 정격전압과 접지계수의 관계를 설명하여라.

해설) 계통조작 및 고장시에 지속성 이상전압이 생기는 원인으로서 다음과 같은 것들을 들 수 있으며, 이외에도 과도적 내부전압으로서 개폐서지가 있다.

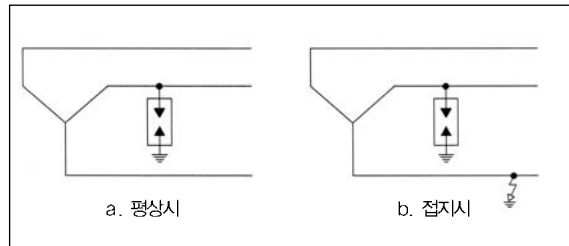
- ① 지락시의 건전상의 전압상승
- ② 부하차단에 의한 과전압
- ③ 무부하 송전선의 페란티 효과
- ④ 탈조에 의한 과전압

피뢰기의 임무는 계통의 절연을 위협하는 뇌서지 혹은 개폐서지에 대해서 전력설비를 보호하는 것이지만, 상기와 같은 지속성의 이상전압은 물론 고장시 긴 시간에 걸쳐서 전압상승이 계속되는 이상전압에서 피뢰기가 동작하면 피뢰기는 소손된다. 이와 같은 지속성 이상전압에 대해서는 우선 계통의 개선, 계통 조작방법의 변경 등에 의하여 그 발생을 극력 방지해야 하지만 이와 같은 수단을 취해도 막을 수 없는 지속성 이상전압에 대해서는 피뢰기가 이것에 견딜 것이 요망된다.

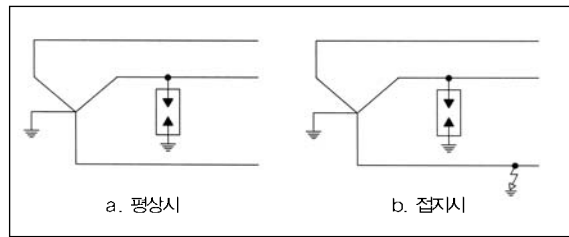
이 견딘다는 의미는 피뢰기가 이와 같은 지속성 이상전압에서 동작하지 않는다는 것뿐만이 아니고 이상전압이 가해졌을 때 뇌서지 또는 개폐서지가 내습하여 피뢰기가 동작하여도 속류를 차단하여 원래의 상태로 복귀하는 것도 의미하고 있다.

그러나, 위와 같은 많은 종류의 이상전압 전부에 대해서도 견딜 수 있는 피뢰기를 선정한다는 것은 기술적으로 곤란한 경우가 많고 또 가능하다해도 대단히 비경제적일 수 있다. 따라서 계통에 적합한 피뢰기를 선정하는 경우는

- ① 비교적 발생의 기회가 많은 1선 지락시 건전상의 전압
  - ② 단시간 최고 전압으로서 부하차단시의 전압상승
- 위 두 가지를 검토하여 이들 전압보다 높은 정격전압의 피뢰기를 선정하는 것이 보통이며, 여기서는 1선 지락시 피뢰기의 정격전압에 대하여 알아보고자 한다.



[그림 8] 중성점 비접지식 계통(피뢰기는 1상분만 표시됨)



[그림 9] 중성점 직접접지식 계통(피뢰기는 1상분만 표시됨)

① 중성점 비접지

3상 교류회로의 경우 피뢰기에 상시 인가되어 있는 전압은 [그림8]의 a와 같이 상시 대지전압, 소위 상전압이며 이것은 선간 전압의  $1/\sqrt{3}$  이다.

이 경우 계통의 1상이 지락고장이 일어난 경우 간단히 하기 위해서 과도상태를 고려치 않고 금속과 같은

저항이 적은 것으로 접지 되었다고 하면 중성점이 비 접지 일 때에는 45의 b와 같이 중성점 전위가 상전압으로 상승하여 건전상의 피뢰기에 걸리는 전압은 선간 전압이 된다.

② 중성점 직접 접지

중성점이 직접 접지되어 있는 경우에는 [그림9]와 같이 중성점 전위가 억제될 수 있기 때문에 건전상에 걸리는 전압은 역시 상전압이다.

이와 같이 3상 교류회로의 경우에는 계통의 중성점 접지방식에 따라서 사고시에는 피뢰기에 걸리는 전압에 커다란 차이가 있다.

이상의 설명에서는 고장점에서의 저항, 즉 고장저항이나 송전선의 상태 등에 대해서 생각해 보았지만, 실제의 경우에는 고장점에서 본 고장저항을 포함한 정상 임피던스  $Z_1$ , 역상 임피던스  $Z_2$ , 영상 임피던스  $Z_0$ 의 값에 따라서 1선 지락시의 상용 주파전압은 여러 가지 형태로 변화한다.

1선 지락고장시의 건전전압 상승은 회로조건에 따라서 달라지므로 피뢰기가 설치되어 있는 장소에서 어떠한 전압이 될 것인가를 검토할 필요가 있으며 이 때문에 접지계수라는 것이 사용된다.

피뢰기 설치점의 접지계수는 1선 지락사고시에 피뢰기 설치점에 있어서 건전상의 대지전압이 달할 수 있는 실효치를, 사고를 제거한 후의 선간전압의 백분율로 표시한 것을 말한다.

$$\text{접지계수} = \frac{\text{1선지락시 고장점에서 건전상의 최고 실효치 대지전압}}{\text{고장 제어후의 선간전압}} \times 100$$

여기서 대지전압을  $V_f$ , 사고제거 후의 선간전압을  $V_L$ , 상전압을  $V_0$ 라고 하면 접지계수  $\phi$ 는

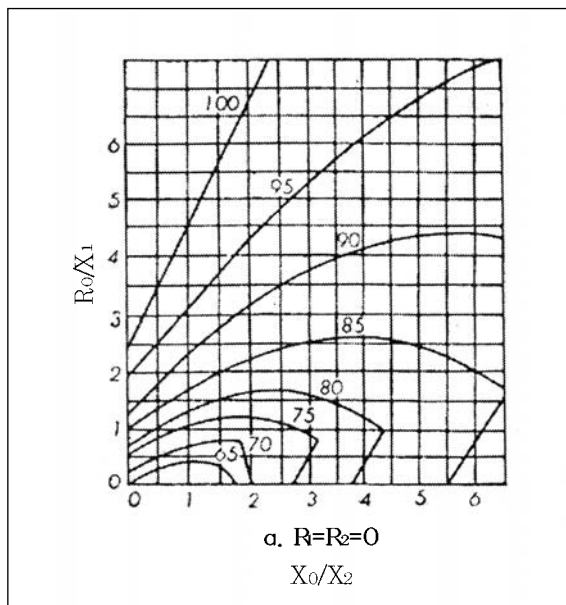
$$\phi = \frac{V_f}{V_L} \times 100 = \frac{V_f}{\sqrt{3} V_0} \times 100[\%] \text{이므로}$$

$$\therefore \frac{V_f}{V_L} = \sqrt{3} \times \frac{\phi}{100} \text{ 이다.}$$

예를 들어 유효 접지권에서 사용하는 접지계수 80[%]인 경우 1선 지락사고가 발생했을 때 고장시 대지전압은 정상시 선간전압의 0.8배 또는 상전압의 1.385배( $0.8 \times \sqrt{3}$ ) 유지된다는 것을 의미한다. 154[kV] 경우 계통 최고전압이 170[kV]이므로 고장시 대지전압은  $170 \times 0.8 = 136[\text{kV}]$ 이다.

이 접지계수는 계통의 임피던스에 따라 계산이나 컴퓨터 등을 사용해서 구하면 좋으나 그림으로부터 도식적으로 개략치를 구할 수 있다. [그림10]의 (a)~(c)는 문헌에서 자주 인용되는 것으로서 정상 리액턴스  $X_1$ 에 대한 영상 리액턴스의 비  $X_0/X_1$ 을 횡축, 정상 리액턴스  $X_1$ 에 대한 영상저항  $R_0$ 의 비  $R_0/X_1$ 을 종축으로 잡아 접지계수 값을 그림 중에 기입한 것이다.

이 그림은 전압상승이 최대로 될 수 있는 접지저항을 고려한 것이기 때문에 곡선이 불연속으로 되어 있다.



다음호에 계속 ➡