

전력시스템공학

15장. 과전압 및 절연협조

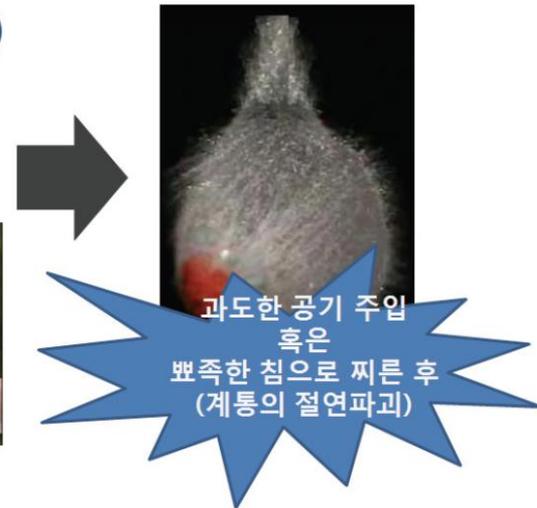
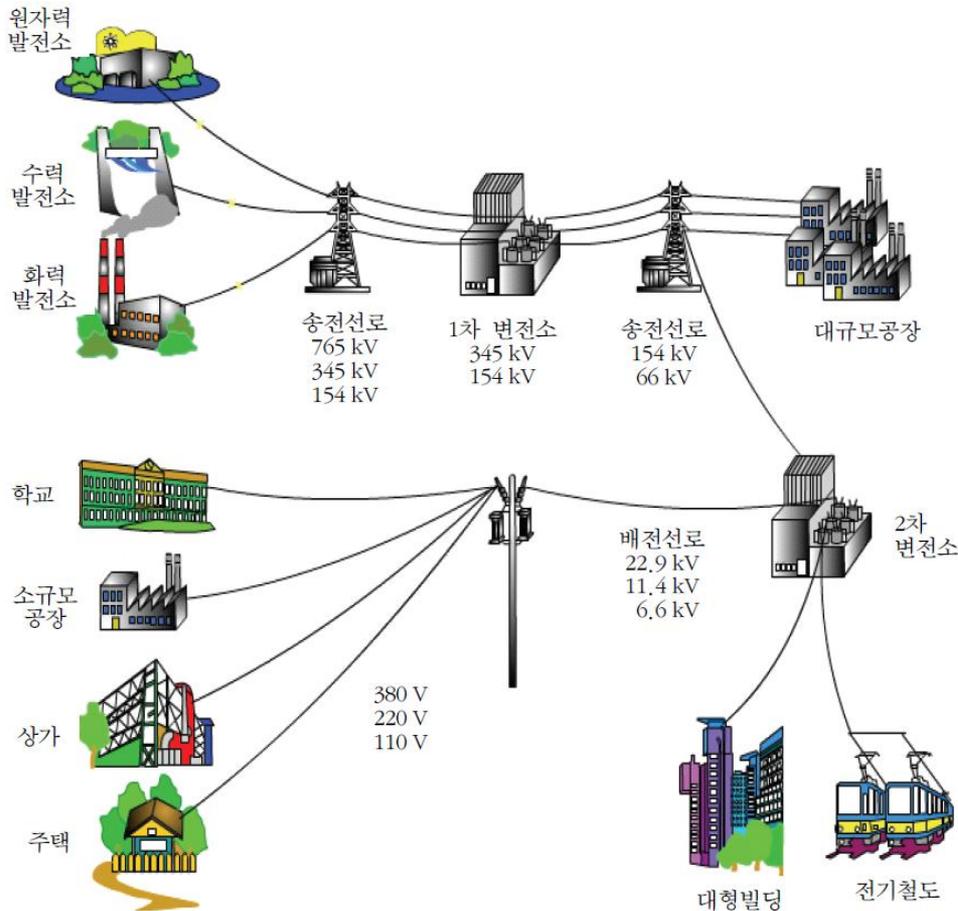
강원대 전기공학과 3학년
2011년 2학기

15.1 전력계통의 과전압

➤ 절연설계

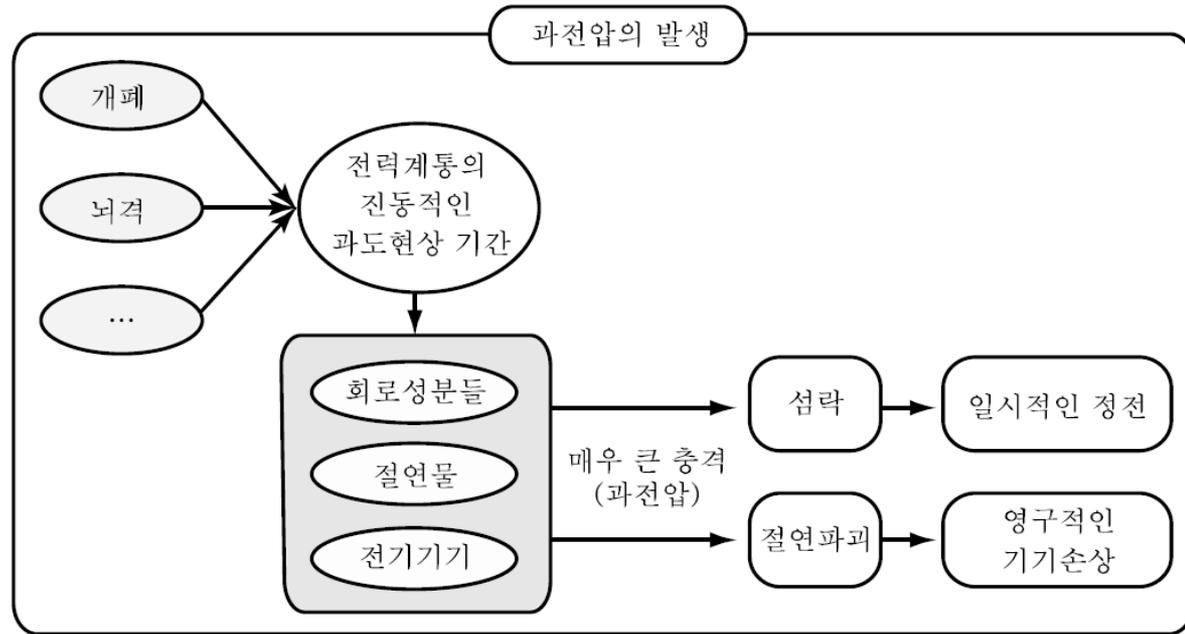
- 공칭전압 외에도 개폐 및 뇌격으로 인해 과전압이 발생하므로 복잡함

➤ 과전압이 발생하면 절연파괴, 설비손상, 수명감소 발생



15.1 전력계통의 과전압

- 과전압 발생과 과전압 해석의 필요성



과도현상(과전압) 해석의 필요성

전력계통의 안정과 고신뢰도의 운전 및 운영을 위한 설비기기 절연설계 및 협조, 개폐 과도현상 및 고장 과도현상 손상효과의 최소화

- 과전압의 수량화

- 최대봉우리상전압에 대한 비율로 표현
- 최대봉우리상전압 : 상전압 순시값의 최대치
 - ✓ 단, 개폐 순간에 전압이 상승할 가능성을 고려하여 1.05를 곱함

$$V_{base} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_n \times 1.05 [V]$$

V_n : 공칭계통전압

15.2 개폐 과전압

➤ 정의

- 차단기 동작이나 고장으로 인해 발생하는 수백 Hz ~ 수십 kHz 과도전압

➤ 원인

차단기 동작	<ul style="list-style-type: none"> ① 선로에 전원 인가 및 재폐로 ② 선로탈락/선로의 전원 제거 ③ 용량성 회로의 스위칭(분로 커패시터 스위칭) ④ 유도성 회로의 스위칭(리액터 및 변압기 단자선로) ⑤ 저전압 스위칭(변압기 저압측 선로의 스위칭)
고 장	<ul style="list-style-type: none"> ① 고장 개시 ② 고장 제거

➤ 크기와 형상

- 계통 파라미터와 구성, 차단기의 특성, 개폐동작 순간 등에 의해 달라지므로 확률적이나 통계적인 방법으로 접근



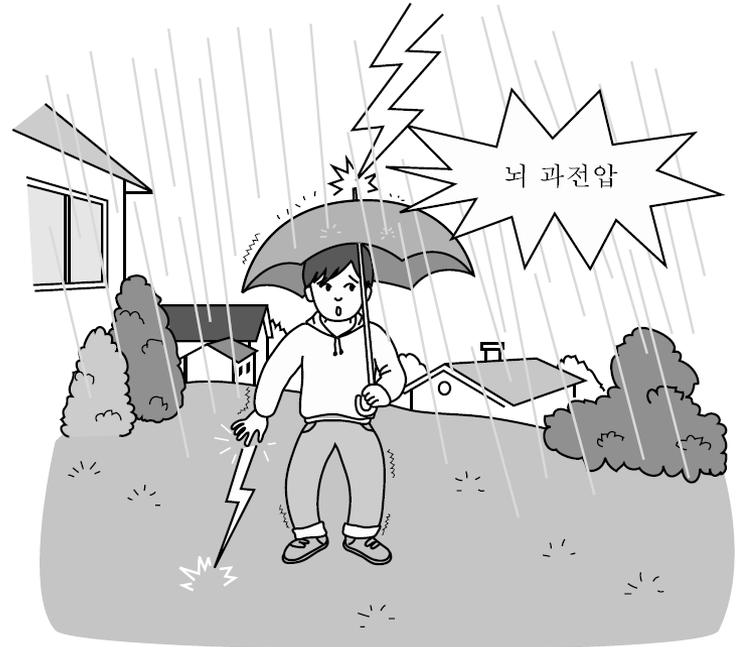
댐의 수문개방
(차단기 동작 혹은 고장)



과도한 수문개방의 결과
(개폐 과전압 발생)

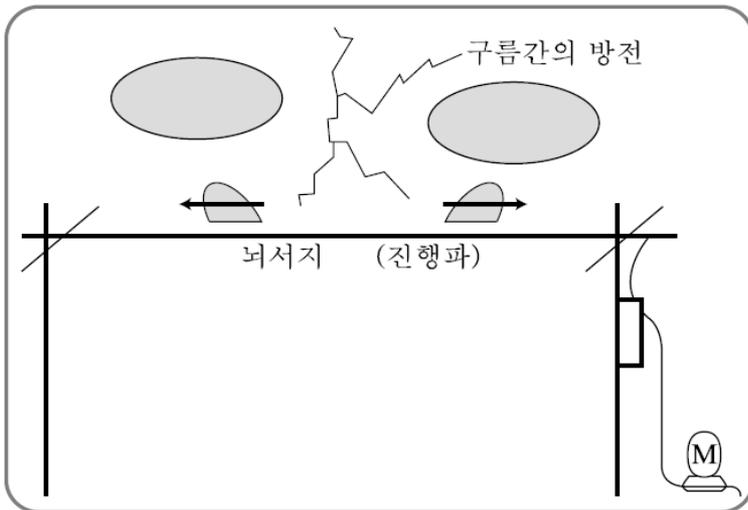
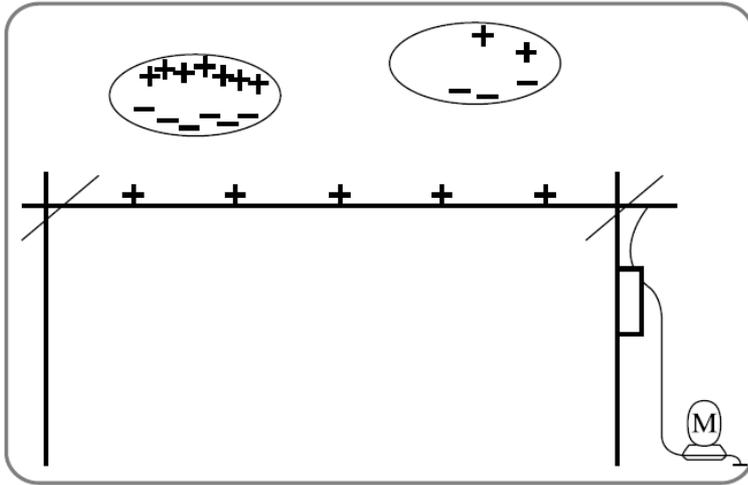
15.3 뇌 과전압

- 정의 : 뇌 방전에 의해 발생하는 100 kHz ~ 10 MHz 과도전압
- 분류
 - ① 직격낙뢰 : 전력선에 대한 뇌의 직격
 - ② 역섬락 : 첩탑이나 가공지선에 대한 뇌격으로 첩탑전압이 상승하여 전력선과의 사이에서 방전
 - ✓ 송전선로 절연설계의 주요 고려대상
 - ③ 유도낙뢰 : 전력설비 근방에서의 뇌격에 의한 이상전압
 - ✓ 배전선로 절연설계에서만 고려
- 뇌 과전압의 원인
 - ① 차폐 실패
 - ② 역섬락

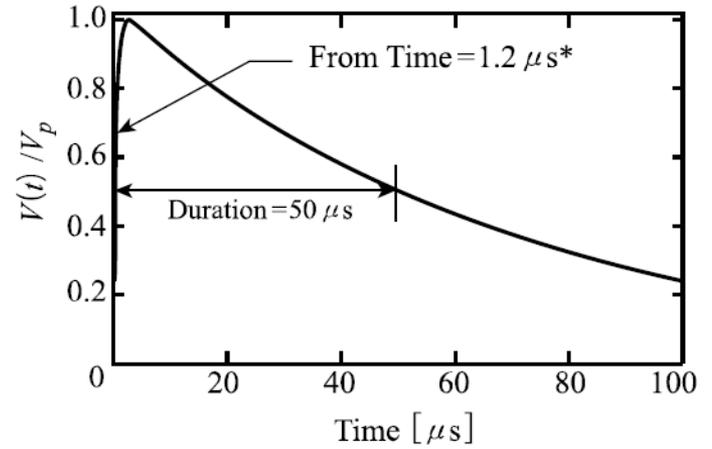


15.3 뇌 과전압

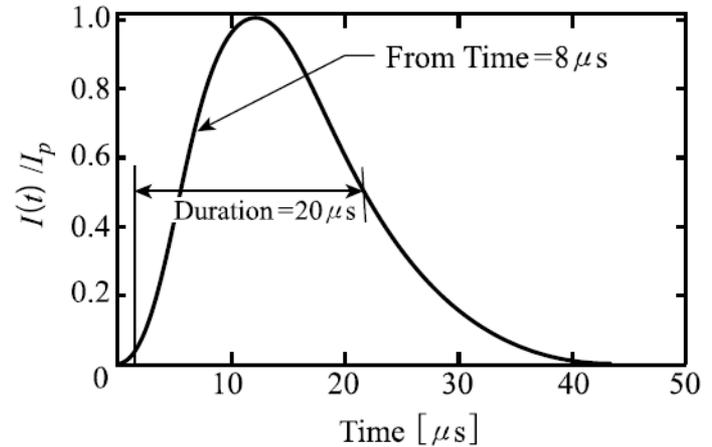
➤ 뇌 과전압의 발생 원리



➤ 뇌에 기인한 전형적인 파형



(a) 전압파형



(b) 전류파형

15.4 일시 과전압

➤ 정의

- 과도적 현상에 의해 발생하는 수십 Hz 이하의 진동적인 과전압

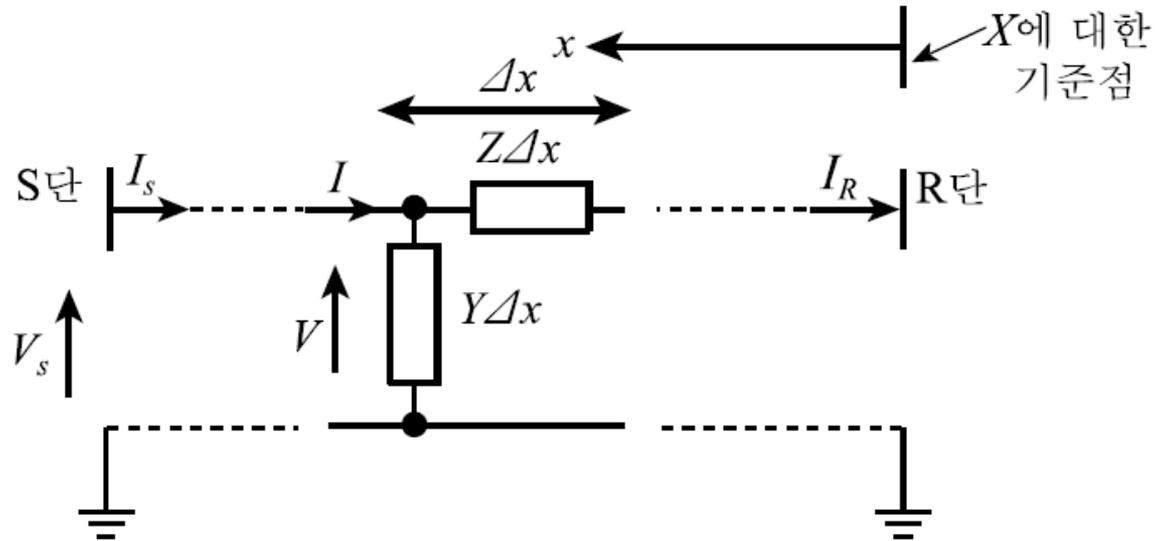
➤ 원인

-
- ① 페란티 효과
 - ② 철 공진
 - ③ 부하의 급격한 큰 변화
 - ④ 고장
 - ⑤ 차단기의 동작
-

15.5 진행파 이론

15.5.1 진행파의 정의

- 선로의 전압과 전류는 약간의 시간지연을 가지면서 파의 형태로 전달
 - ✓ 분포정수 선로모델의 해석을 통해 파의 전파를 이해



- ✓ 송전선로가 무손실이라고 가정
 - 직렬성분 L과 병렬성분 C 만 존재

$$Z = j\omega L, \quad Y = j\omega C$$

15.5 진행파 이론

- 전류진행파 : dx 구간에 전압진행파 v 가 도달했을 때의 전류
 - ✓ dx 구간의 C에 축적되어야 할 전하

$$dq = vCdx$$

$$q = Cv$$

- ✓ 충전하기 위해 dx 구간을 흐르는 전류

$$i = \frac{dq}{dt} = vC \frac{dx}{dt} = vCW$$

- W : 진행파의 전파속도 [m/s]

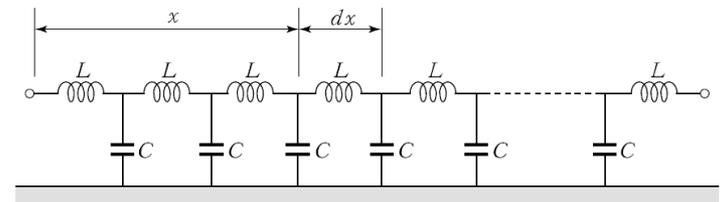
- 전압진행파 : dx 구간에 전류진행파 i 가 도달했을 때의 전압
 - ✓ dx 구간의 L에 흐르는 전류에 의한 쇄교자속

$$d\phi = iLdx$$

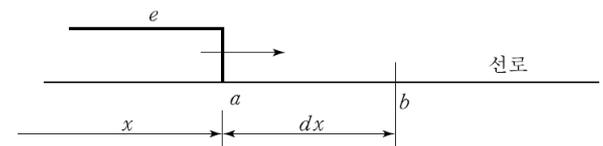
$$n\phi = Li$$

- ✓ 쇄교자속 변화에 의한 dx 구간의 전압

$$v = \frac{d\phi}{dt} = iL \frac{dx}{dt} = iLW$$



(a)



(b)

15.5 진행파 이론

- 특성(파동) 임피던스와 전파정수

✓ 특성 임피던스 : 전류진행파 크기와 전압진행파 크기의 비율

▪ 선로의 길이와는 무관한 값

$$Z_0 = \frac{v}{i} = \frac{v}{vCW} = \frac{1}{CW} \quad \text{or} \quad Z_0 = \frac{v}{i} = \frac{iLW}{i} = LW$$

$$\frac{1}{CW} = LW \rightarrow W = \sqrt{\frac{1}{LC}} [m/s]$$

$$\therefore \Gamma = \frac{1}{W} = \sqrt{LC}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega]$$

- 입사파(전진파)와 반사파의 특성

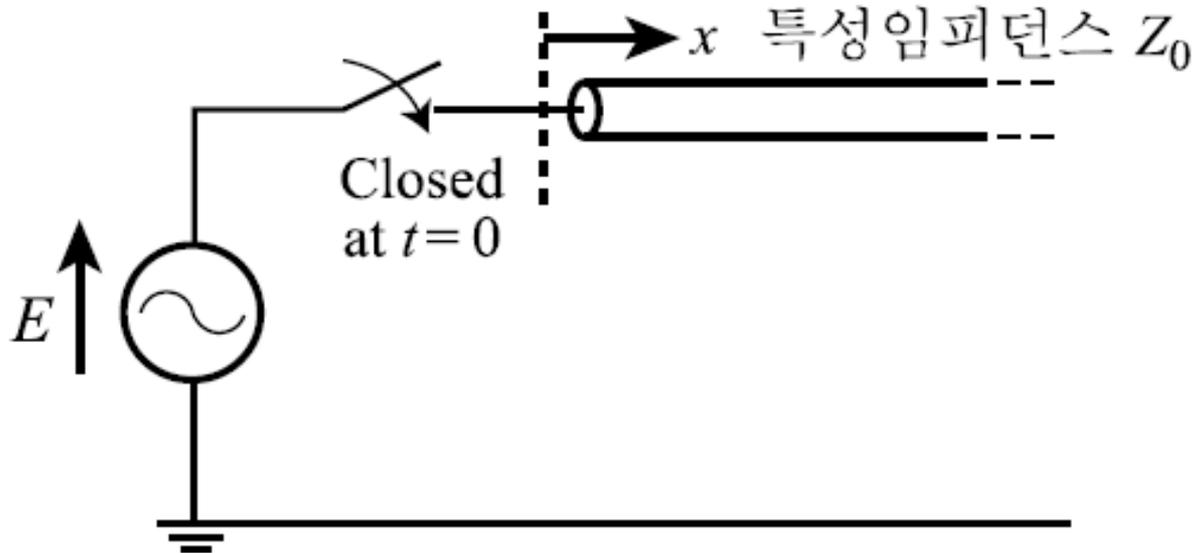
전파방향	전파방향	어느 순간에서의 총합
$e_f = i_f Z_0$ 전진 전압파 (Forward voltage wave)	$e_r = -i_r Z_0$ 반사 전압파 (Reflected voltage wave)	$e = e_f + e_r$
전진 전류파 (Forward current wave)	반사 전류파 (Reflected current wave)	$i = i_f + i_r$

15.5 진행파 이론

15.5.2 송전선로에서 파동의 움직임

1. 수전단이 개방된 경우

- ✓ 무한히 긴 선로에 크기 E 의 전압파 파두가 주입된다고 가정
- ✓ 전압파의 크기는 E , 전류파의 크기는 E/Z_0
- ✓ 입사파는 $1/v$ 의 속도로 영원히 이동하고, 반사파는 발생되지 않음



15.5 진행파 이론

2. 수전단이 임피던스로 종단된 경우

✓ 입사파와 반사파의 전압, 전류 관계

$$V_i = Z_0 i_i, \quad V_r = -Z_0 i_r$$

✓ 선로 말단에서 전체 전압과 전체 전류의 관계

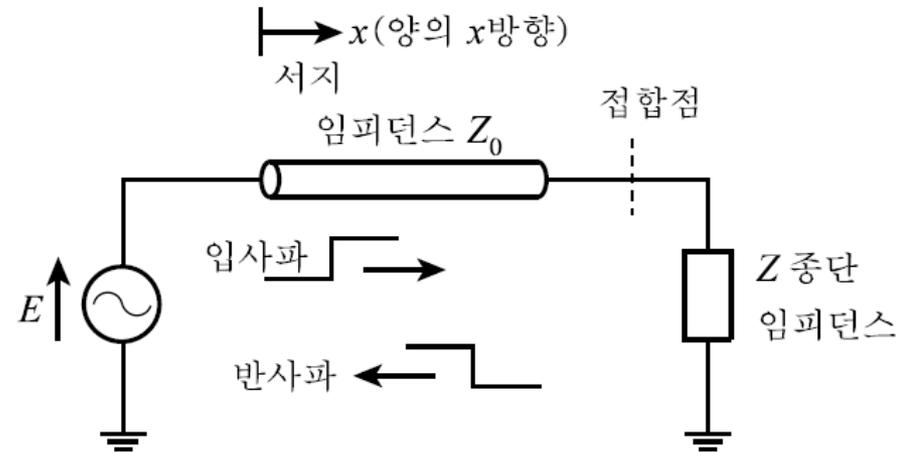
$$V = Zi \rightarrow V_i + V_r = Z(i_i + i_r) = Z \left(\frac{V_i}{Z_0} - \frac{V_r}{Z_0} \right) = \frac{Z}{Z_0} (V_i - V_r)$$

✓ 전압 반사계수 α_v , 전류 반사계수 α_j

$$V_i + V_r = \frac{Z}{Z_0} (V_i - V_r) \rightarrow Z_0 V_i + Z_0 V_r = Z V_i - Z V_r \rightarrow Z V_r + Z_0 V_r = Z V_i - Z_0 V_i$$

$$\therefore V_r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} V_i = \alpha_v V_i$$

$$\begin{aligned} \therefore i_r &= -\frac{V_r}{Z_0} = -V_r \times \frac{1}{Z_0} = -V_r \times \frac{i_i}{V_i} \\ &= -\alpha_v V_i \times \frac{i_i}{V_i} = -\alpha_v i_i = \alpha_j i_i \end{aligned}$$



15.5 진행파 이론

✓ 선로 말단의 전압 및 전류에 대한 식

$$V = V_i + V_r = V_i + \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} V_i = \frac{Z + Z_0}{Z + Z_0} V_i + \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} V_i = \frac{2Z}{Z + Z_0} V_i$$

$$i = i_i + i_r = i_i + \left(-\frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} i_i \right) = \frac{Z + Z_0}{Z + Z_0} i_i - \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} i_i = \frac{2Z_0}{Z + Z_0} i_i$$

3. 종단되는 임피던스가 단락회로(short-circuit)인 경우

✓ $Z = 0$ 이므로, 전압입사파는 부반사, 전류입사파는 정반사

$$V_r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} V_i = \frac{-Z_0}{Z_0} V_i = -V_i, \quad i_r = -\frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} i_i = -\frac{-Z_0}{Z_0} i_i = i_i$$

$$V = \frac{2Z}{Z + Z_0} V_i = 0, \quad i = \frac{2Z_0}{Z + Z_0} i_i = \frac{2Z_0}{Z_0} i_i = 2i_i$$

4. 종단되는 임피던스가 개방회로(open-circuit)인 경우

✓ $Z = \infty$ 이므로, 전압입사파는 정반사, 전류입사파는 부반사

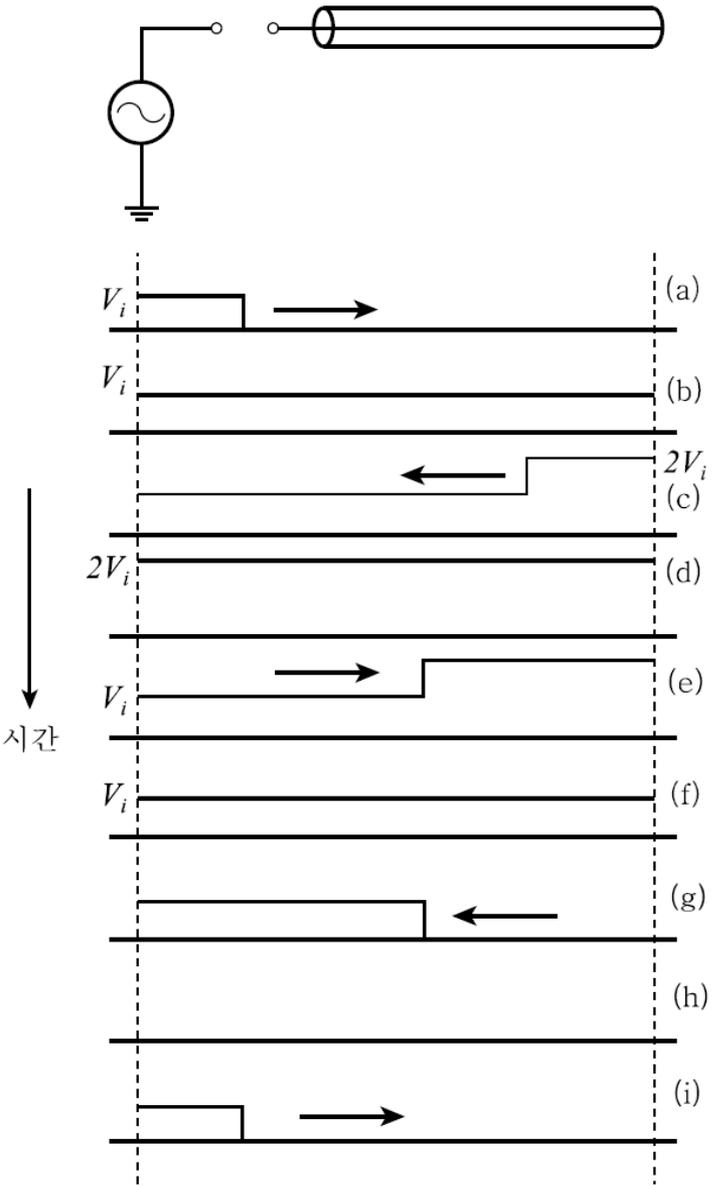
$$V_r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} V_i = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} V_i = \frac{\infty}{\infty} V_i = V_i, \quad i_r = -\frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} i_i = -\frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} i_i = -\frac{\infty}{\infty} i_i = -i_i$$

$$V = V_i + V_r = V_i + V_i = 2V_i, \quad i = i_i + i_r = i_i + (-i_i) = 0$$

15.5 진행파 이론

✓ 개방회로에 전원이 접속한 경우 전압파의 예

- 전원측은 진행파에 대해 단락회로로 작용한다고 가정
- 입사전압의 2배까지 상승하므로 충분한 절연이 필요
- 실제로는, 선로의 감쇠(직렬저항이나 코로나 손실)로 인해 급격히 소멸



- (a) 차단기 닫히고, 입사파가 개방회로쪽으로 진행
- (b) 입사파가 개방회로에 도달
- (c) 입사파는 개방회로에서 $2V_i$ 가 되어 반사됨
- (d) 반사파가 전원에 도달. 전체 선로전압은 $2V_i$ 가 됨
- (e) 전원은 개방회로쪽으로 진행하는 $-V_i$ 의 반사파를 생성함
- (f) 반사파가 개방회로에 도달. $-V_i$ 로 반사됨
- (g) $-V_i$ 가 전원으로 진행
- (h) 파형이 전원에 도달. 선로는 $0V$ 가 됨
- (i) (-)로 반사되어, $-V_i$ 는 $+V_i$ 가 됨
- (j) (b)부터 반복됨

15.5 진행파 이론

- 종단되는 임피던스가 특성 임피던스와 동일한 경우

✓ $Z = Z_0$ 이므로, 반사파가 발생하지 않는 이상적인 상황

$$V_r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} V_i = \frac{Z_0 - Z_0}{Z_0 + Z_0} V_i = 0, \quad i_r = -\frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} i_i = -\frac{Z_0 - Z_0}{Z_0 + Z_0} i_i = 0$$

$$V = V_i, \quad i = i_i$$

- 접속부에 서로 다른 특성 임피던스 선로가 연결된 경우

✓ 수전단이 임피던스로 종단된 경우와 유사

- 두번째 선로 특성임피던스 = 종단 임피던스

$$V_r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} V_i = \alpha_v V_i$$

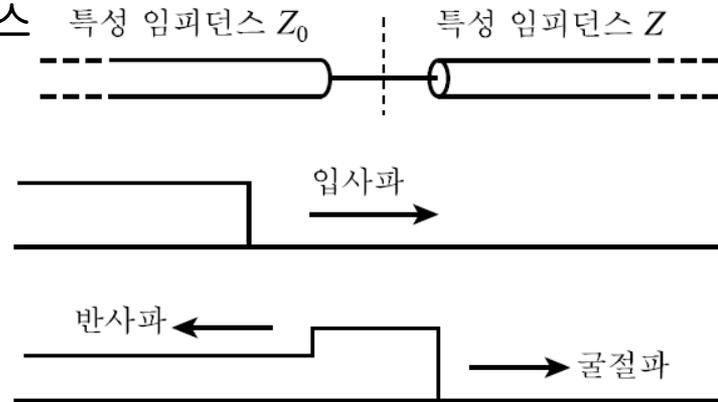
$$i_r = -\frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} i_i = -\alpha_v i_i = \alpha_i i_i$$

✓ 두번째 선로로 계속되는 전송파

- 키르히호프의 법칙

$$V_t = V_i + V_r = V = \frac{2Z}{Z + Z_0} V_i = \left(\frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} + 1 \right) V_i = (\alpha_v + 1) V_i = \beta_v V_i$$

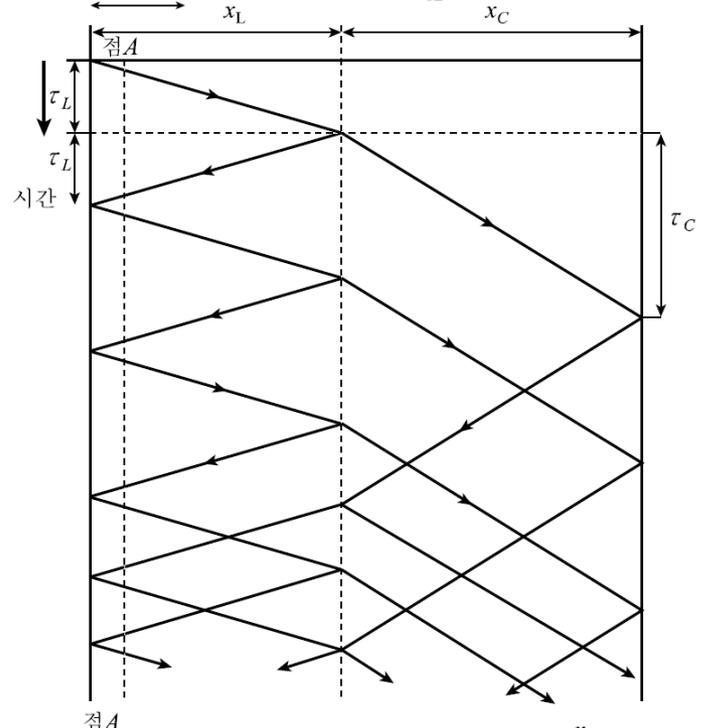
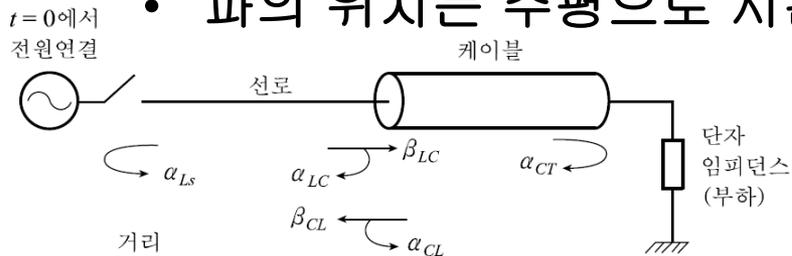
$$i_t = i_i + i_r = i = \frac{2Z_0}{Z + Z_0} i_i = \left(1 - \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right) i_i = (1 - \alpha_v) i_i = (\alpha_i + 1) i_i = \beta_i i_i$$



15.5 진행파 이론

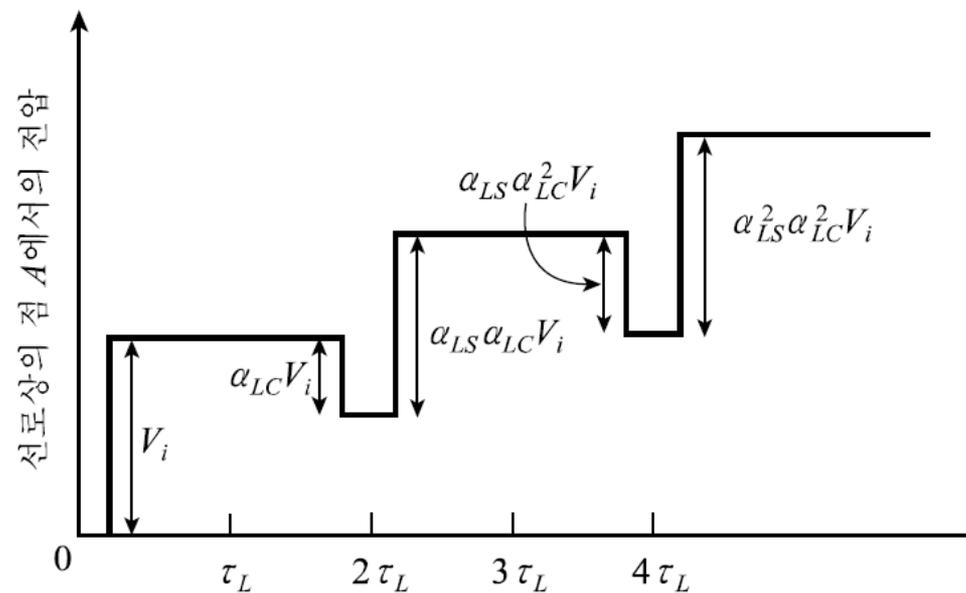
15.5.3 Bewley 격자도(lattice diagram)

- 파의 위치는 수평으로 시간변화는 수직으로 나타낸 격자도



파의 전파속도(선로) = $\frac{x_L}{\tau_L}$
 파의 전파속도(케이블) = $\frac{x_C}{\tau_C}$

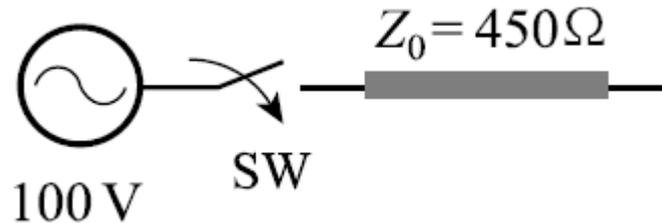
1단계	2단계	3단계
네트워크의 모든 접속부에서의 반사 및 전송계수 유도	수평축 : 선로 및 케이블의 거리	원하는 관측점 : 수직선 그림
	파의 전파속도 : 각 구간에서의 파의 경사	전압파형 : 적당한 순간, 각 파들을 더하여 계산
	파가 불연속점에 도달할 때 : 대응하는 반사파 및 전송파 표시	



15.5 진행파 이론

➤ 예제 15-5

- ✓ 우측 개방회로 측 진행파 전압의 크기와 진행파 도달시간은?
- ✓ 전파속도 : 1.78×10^5 km/s, 선로길이 : 20 km



• 풀이

- ✓ 종단측 전압의 크기
 - 종단이 개방회로인 경우에 해당하므로, 전압입사파는 정반사
 - 따라서, 종단측 전압은 입사파 전압의 2배이므로 200 V
- ✓ 진행파 도달 시간

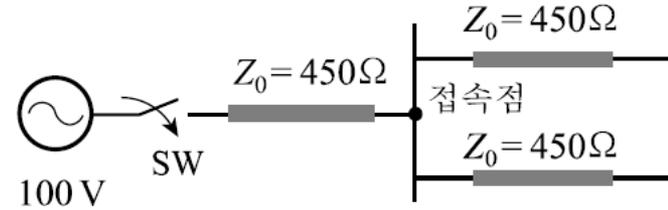
$$\text{속도} \times \text{시간} = \text{거리}$$

$$\therefore \text{시간} = \frac{\text{거리}}{\text{속도}} = \frac{20}{1.78 \times 10^5} = 0.00011 [\text{s}]$$

15.5 진행파 이론

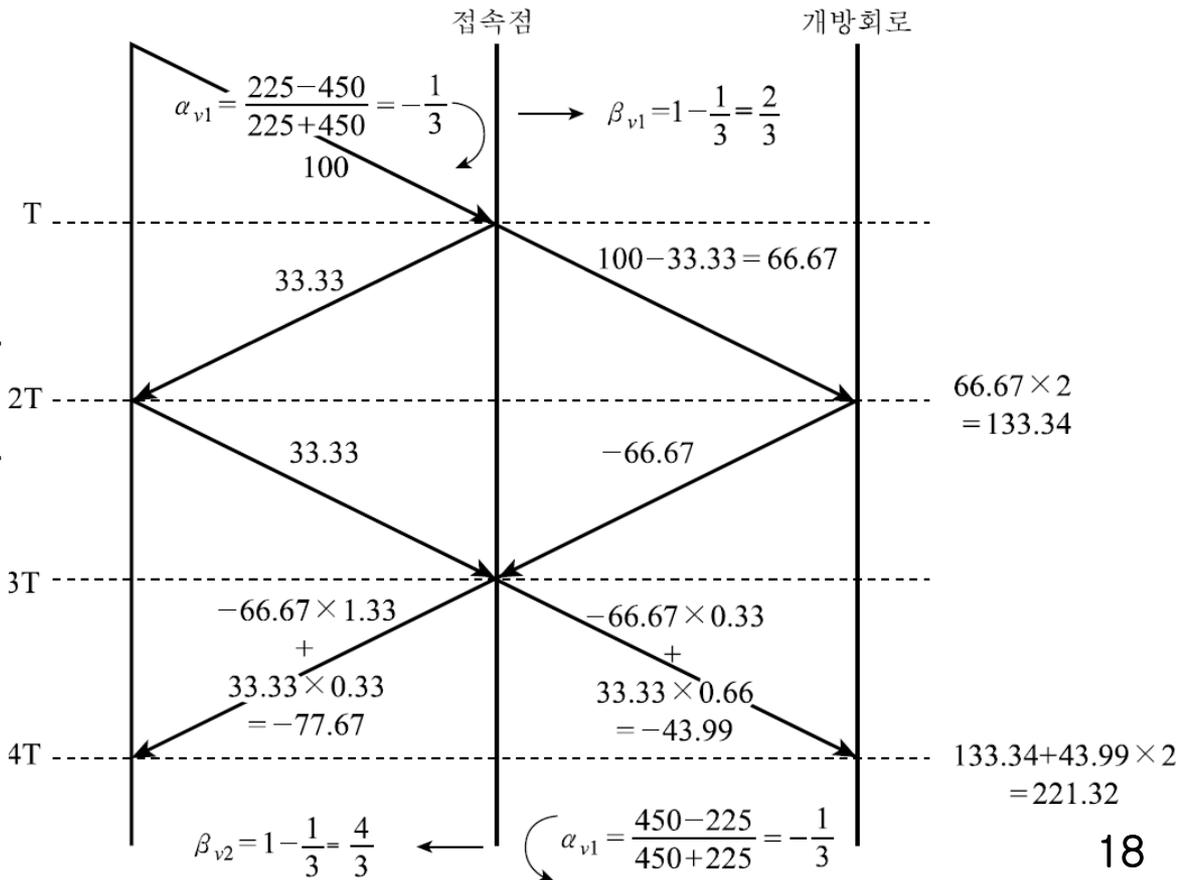
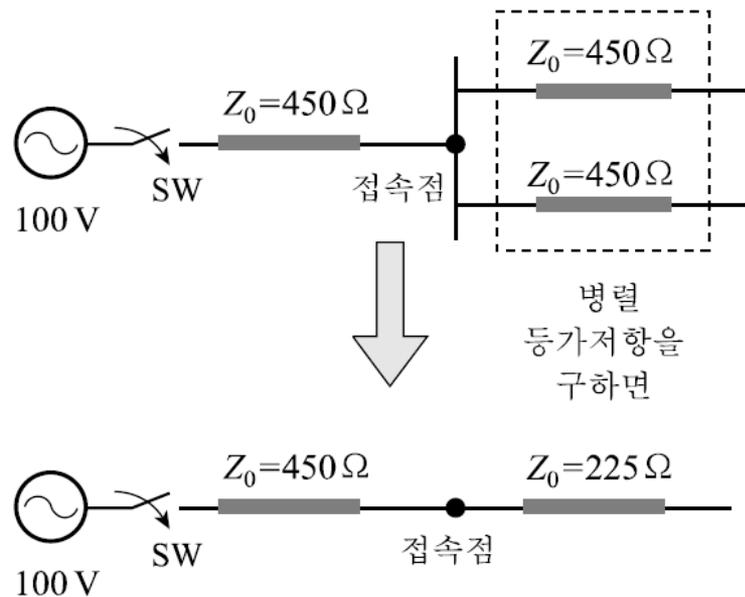
▶ 예제 15-6

- ✓ Bewley 격자도 해석으로 전압진행파 해석
- ✓ 전파속도 : 1.78×10^5 km/s
- ✓ 선로길이 : 20 km



• 풀이

- ✓ 병렬회로 부분의 등가 특성임피던스
- ✓ 격자도 해석



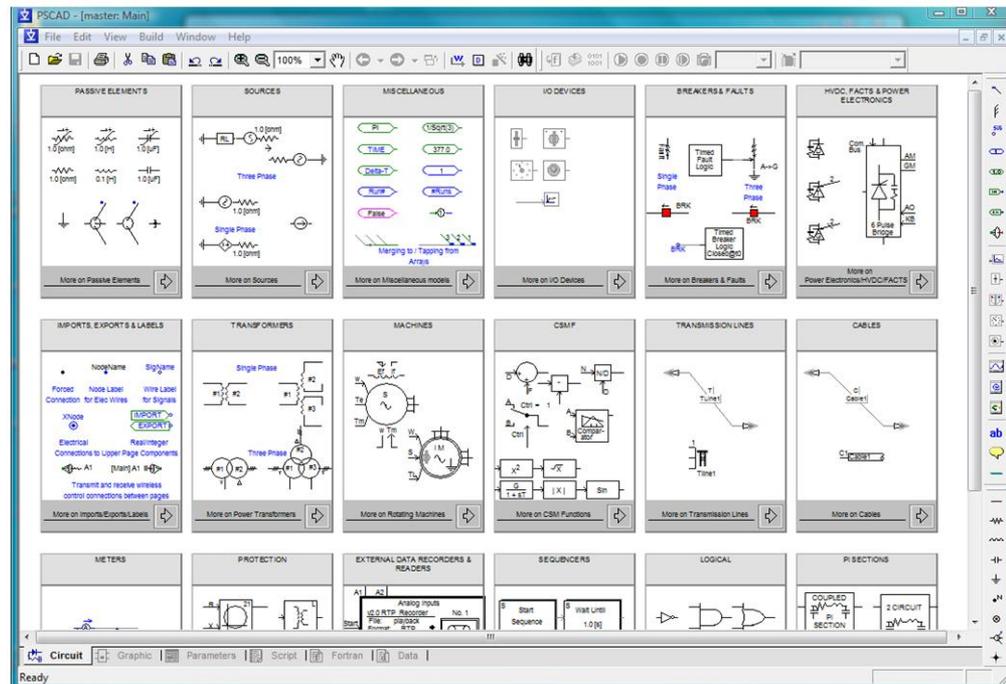
15.6 과전압 해석 도구

15.6.1 하드웨어 방식 도구

- TNA : 실제 설비에 대응하는 하드웨어 소자들을 상호연결하여 구성

15.6.2 소프트웨어 방식 도구

- EMTP : 정확한 설비 모델링을 통해 과도현상 컴퓨터 시뮬레이션



15.7 과전압 보호대책

➤ 과전압 보호대책의 원칙

- 뇌 과전압의 계통 침입을 방지하도록 노력
- 침입한 뇌 과전압의 영향을 최소화

15.7.1 송전선로에 대한 보호대책

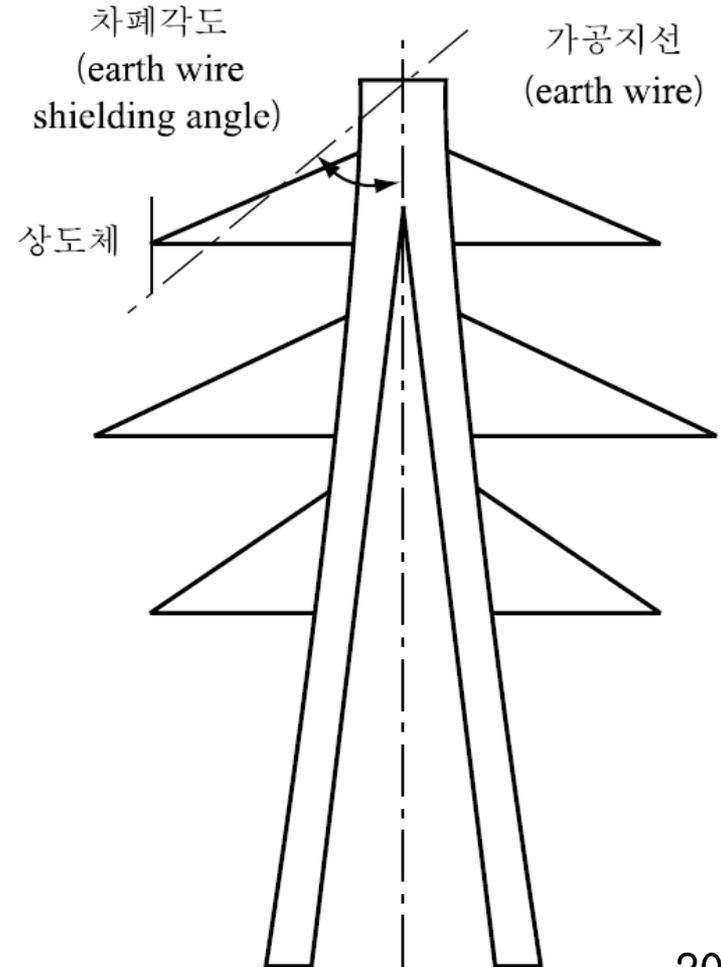
1. 뇌에 대한 송전선로의 보호

✓ 가공지선

- 도체로의 직접 뇌격을 저지
- 간접뇌격에 의한 유도과전압(유도뢰)의 영향 감소

✓ 자동재폐로

- 대부분의 섬락은 영구적인 설비고장과 무관하므로, 지속적으로 회로를 차단할 필요는 없음



15.7 과전압 보호대책

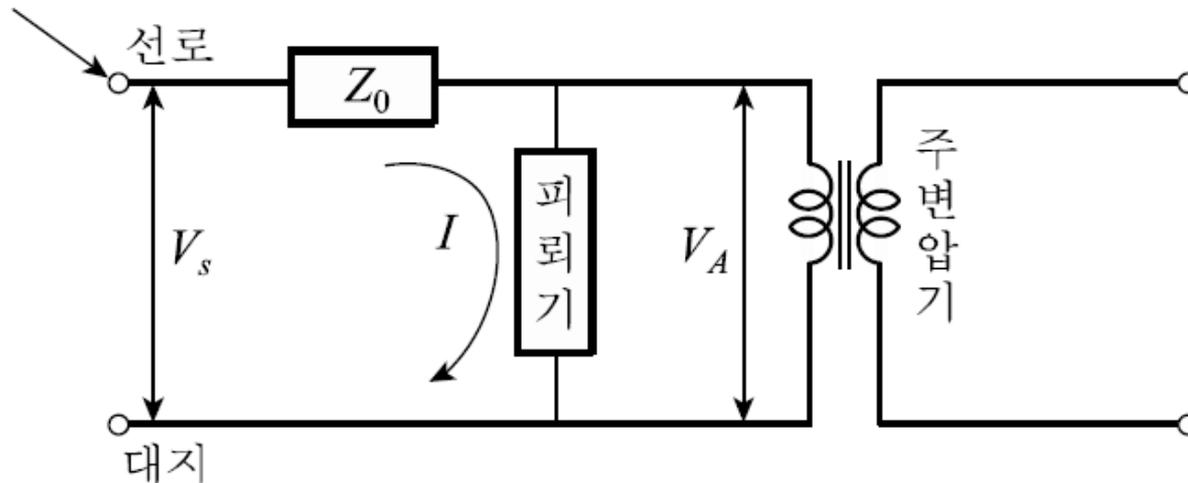
2. 피뢰기(lightning arrester)

✓ 2가지 기능

- 과전압시 선로와 대지 사이를 단락시켜 전압을 일정치 이하로 저감

$$V_s = IZ_0 + V_A$$

뇌 및 개폐과전압 유입

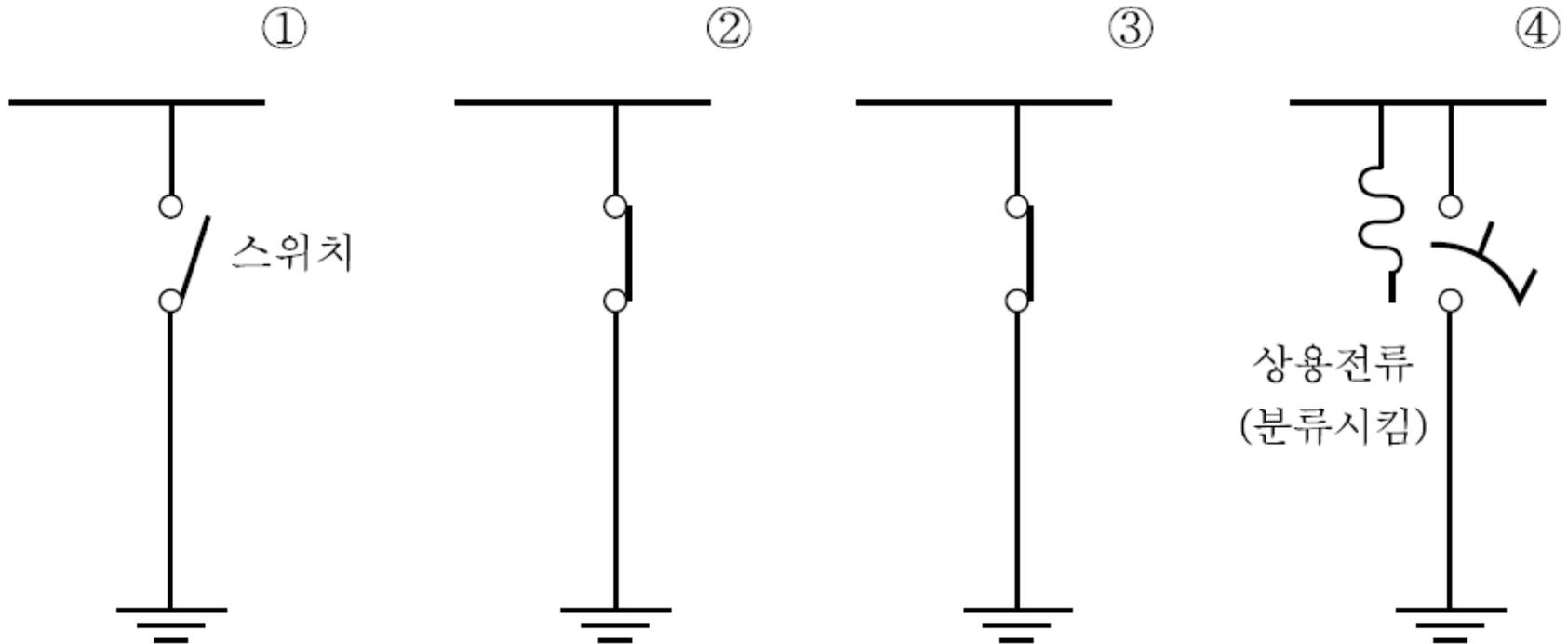


- 방전 후 60 Hz 전류(속류)를 신속히 차단하여 정상계통 상태로 유지
 - ❖ 속류 : 방전현상이 끝난 후에도 계속 계통에서 공급되어 피뢰기로 흐르는 전류

15.7 과전압 보호대책

✓ 동작과정

- ① 피뢰기가 동작하지 않는 평상시 상태
- ② 과전압이 침입하여 피뢰기가 동작한 상태
- ③ 피보호설비에 가해지는 전압은 피뢰기 양단자간 전압강하와 접지상승전압의 합
- ④ 과전압의 전류가 없어진 후 속류를 차단한 상태
 - ❖ 피뢰기가 계속 단락상태로 있으면 지락전류가 흘러 피뢰기 손상



15.7 과전압 보호대책

15.7.2 변전소에 대한 보호대책

- 과전압을 막거나 줄이지 못한 경우, 과전압에 견디기 위한 장치

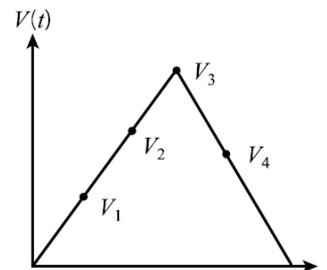
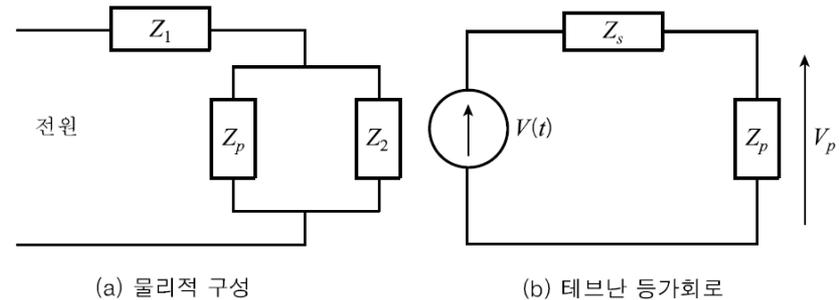
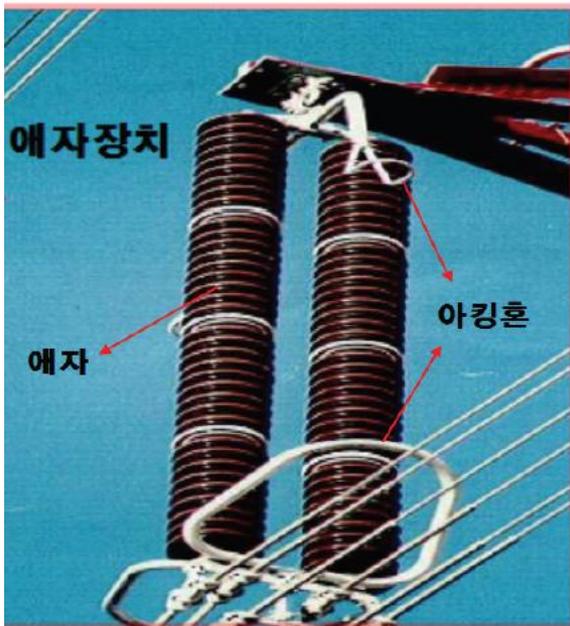
1. 막대간극 및 저항 억제기(resistance suppressors)

✓ 막대간극(아킹혼)

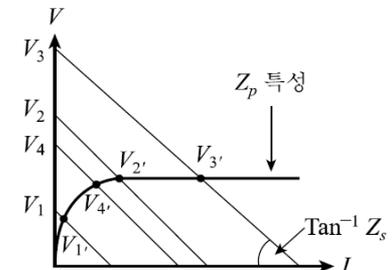
- 송전선로 애자와 병렬로 설치
- 과전압이 방전된 후에도 지속되는 아크는 차단기 재폐로로 해결

✓ 비선형 저항기

- 과전압시, 저항값이 감소하여 설비에 걸리는 전압을 감소 감소시킴



(c) 시간에 따른 전압의 변화



(d) Z_p 의 $V-I$ 특성

15.7 과전압 보호대책

- 과전압 커패시터 및 과전압 리액터
 - ✓ 스파이크 형태의 단기지속 과전압에 대하여 유효
 - 다른 보호기기가 동작할 때까지 일시적인 보호
 - ✓ 과전압 커패시터
 - 피보호기기와 병렬로 설치
 - 충전과정 동안 과전압 억제
 - ✓ 과전압 리액터
 - 피보호기기와 직렬로 설치
 - 급격하게 변하는 과전류에서 임피던스가 높으므로 과전압을 분담

15.7.3 가옥환경에 대한 과전압 보호대책

1. 과도전압과 접지

- ✓ 적절한 접지를 통해 기기 손상, 오동작, 감전 위험을 최소화
- ✓ 인체에 과전압의 유도를 막기 위해 접지된 전위장벽 설치

15.8 절연협조

15.8.1 절연협조

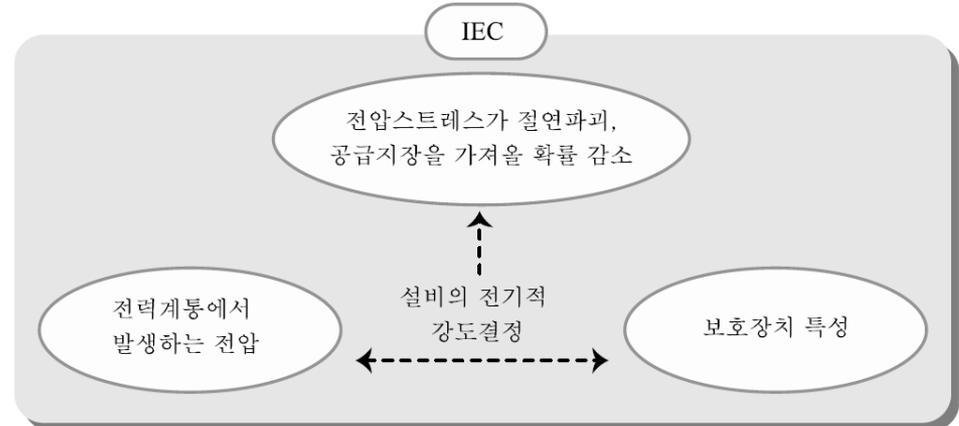
1. 절연협조의 정의

- ① ANSI의 정의 : 이상전압, 보호장치 특성, 설비 절연강도와의 적당한 관계를 검토
- ② IEC의 정의 : 절연파괴나 공급지장을 적절한 수준으로 감소시키기 위해, 이상전압과 보호장치 특성을 고려하여 설비의 절연강도를 결정

✓ 뇌전압 이외의 이상전압에서는 섬락이나 절연파괴 방지

✓ 절연협조의 또 다른 정의

- 기기의 중요도와 보호장치로부터의 거리에 따라 적절한 절연강도 설정



15.8 절연협조

2. 절연계급과 기준충격절연강도(BIL)

✓ 절연계급 : 단계별로 구분한 절연강도의 계급

▪ 절연구성의 표준화, 통일성

✓ 기준충격절연강도 : 절연강도를 시험하기 위한 임펄스 전압

공칭회로전압 [kV]	절연계급 (號)	기준충격절연강도 [kV]	충격시험전압 [kV]	상용주파시험전압 [kV]
66	60	350	350	140
154	140	750	750	325