

**장거리 CABLE 가압과**
**주변압기 단자 전압 상승**

**전 명 수 [No.45]**

일렉컨 설링 대표  
☎ 02)554 · 8787  
018)212 · 4848

E.mail : electricman@channeli.net


**김 정 철 [No.24156]**

(재)한국철도기술공사  
(주)태정시스템 고문

☎ 02)525 · 6473

**G** 공사에서 공사가 완료되어 변압기의 절연저항 내압시험 등을 완료하고 이상이 없으므로 154kV/22kV 변압기를 가압하고 배전선로를 가압하는 과정에서 변압기의 단자 전압이 24.5kV까지 상승하였다. 이때 154kV 수전단자전압은 거의 변동이 없었다.

집필자의 한 사람인 김정철은 그의 저서 「자가용 전기설비의 모든 것」에 이어 「현장 실무를 위한 전기기술」을 저작하였으며, 그 내용은 정상 임피던스와 단락전류, 영상 임피던스와 지락전류, Motor starting Calculation을 포함한 전압강하와 전압 조정 등 좀더 예민한 부분을 기술하였으니 관심이 있는 기술자들의 많은 활용 바랍니다.

**1. 현황**
**가. 현상**

한전으로부터 3 $\phi$  154kV로 수전하여 2차권선은 스코트 결선하여 1 $\phi$ 으로 배전하고 3차권선은  $\Delta$ 결선하여 22kV로 배전하는 계통으로 평상시는 변전소 기준 좌우로 25km 즉 50km 2회선 고장시는 다음 구간 25km 까지 공급하는 배전 계통이다. 이 경우는 시운전 상태로 정상 운전조건에서 발생한 것이므로 고장시 연장 급전 할 경우는 더 높은 전압이 나타날 것으로 예상되며 이는 2차측 최대전압 24kV를 훨씬 초과하게 될 것이므로 각 전력설비의 절연 내력 기기 특성 등 설계 당시 예상하지 못한 문제가 발견되었다.



표 1 탭별 전압 전류

PRIMARY				SECONDARY	
TAP.POS	CONN	VOLTAGE(V)	CUR(A) OA/FA	VOLTAGE(V)	CUR(A) OA/FA
1	12-13	168,000	10.3/13.7	22,000	78.7/104.9
2	12-14	161,000	10.7/14.3	22,000	78.7/104.9
3	11-14	154,000	11.2/14.9	22,000	78.7/104.9
4	11-15	147,000	11.7/15.7	22,000	78.7/104.9

### 나. 각 설비 현황 및 운전 조건

#### 1) 배전선 공급 구간(CV 60mm<sup>2</sup>)

##### 가) 운전상태

- 정상운전시:공급변전소 중심 좌우로 약 25km(상선 25km, 하선 25km, 총 길이 : $25 \times 2 \times 2 = 100$  km)
- 비 정상운전시:최대공급 구간 좌, 우로 다음 변전소 구간까지 약 25km (총 길이 : $50 \times 2 + (25 \times 2) = 150$  km)

### 나) 현재 가압 상태

- ▶ S.CH S/S 변압기만 가압시 단자전압  
- TAP.(NLTC): 3 (154/22kV)  
S.CH S/S 2차 단자전압 측정 값 :22 kV
- ▶ KD 터널 시험부까지 가압시  
(상, 하선 각각 약 25km, 총 50km)  
- TAP.(NLTC): 3 (154/22kV)  
S.CH S/S 2차 단자전압 측정 값 :24.5 kV  
S.CH S/S 2차 단자전류 측정 값 :25.1 A(상, 하선 각각)

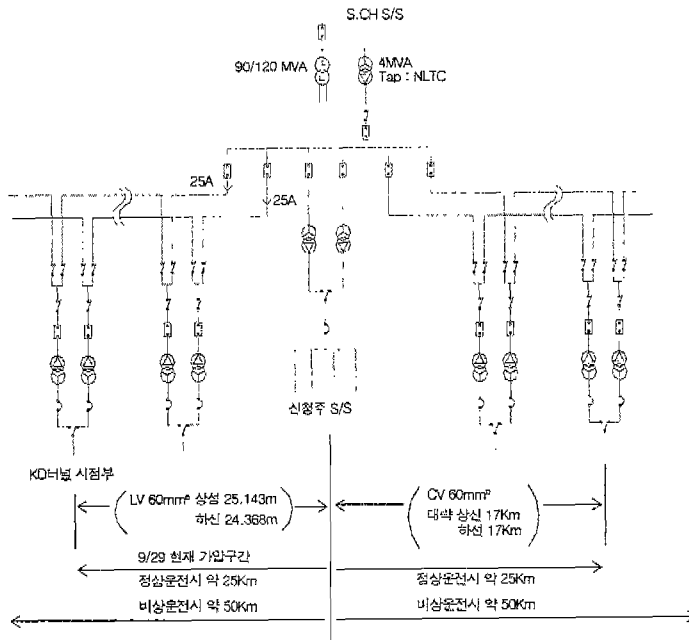


그림 1 전력공급 계통도

## 2) 기기 사양

### 가) 변압기

- 용량 3,000 kVA
- 전압 154/22kV
- 전류 11.2/78.7A
- 임피던스 전압 14,307V
- LOAD LOSS 103,534W
- 효율 LF : 100 % 96.260%
- % Resistance Voltage at 75°C 0.434%
- % Resistance Voltage at 75°C 9.283%
- % Impedance drop at 75°C 9.293 %
- 변압기 결선 Y-△
- 탭별 전압 전류(표 1)

### 나) 선로

- CABLE CV 1C-60mm<sup>2</sup>
- R = 0.389 Ω/km C = 0.21 μF/km
- WL = 0.175 Ω/km WC = 0.0801 × 10<sup>-3</sup> ♂ /km

## 2. 원인 분석

전력계통에는 부하설비에 의해 직접 일로 변환되는 유효전력을 공급하는 유효전류와 부하설비가 원하는 일과는 관계없는 무효전력에 의한 무효전류가 흐르게 된다.

이 무효전류는 전압에 비해 90° 늦은 전류와 90° 빠른 전류가 있으며 일반적으로 사용되는 모터 변압기 에어컨 등의 부하는 늦은 무효 전류가 흐르게 되고 케이블의 충전전류 콘덴서 전류는 공급전압에 비해 90° 빠른 전류가 흐르게 된다.

또한 무효전류는 부하가 필요로 하는 일과는 관계 없으나 발전기, 변압기, 케이블 등 전원측 전력 설비의 이용률을 경감 시키고 전력손실, 전압강하를 증가시키는 역할을 한다. 따라서 전력계통에서는 무효전력(전류) 최소화(역률 100%) 운전을 목표로 운영하고 있으며 전력계통의 직렬 요소에는 저항(R) 성분과 리액턴스(X) 성분이 있으며 늦은 무효전류가 흐를

경우에는 전압강하는 “+”로 발생하므로 공급측보다 부하측 전압이 낮게되고 빠른 전류가 흐를 경우에는 “-” 전압강하가 발생하게되고 공급측보다 부하측 전압이 높게 된다.

장거리 송전선로를 무부하 충전시는 선로의 충전전류(90° 진상전류)로 인해 송전단 전압보다 수전단 전압이 높게 되며 이같은 현상을 페란티(FERANTI) 효과라 한다.

이같은 진상전류는 선로의 전압강하 뿐만 아니라 발전기의 자기여자 현상에 의하여 단자전압이 상승하는 등 위험한 경우도 있다.

그러나 변압기의 전압상승현상에 대하여 언급한 서적을 접해 보지 못하였으나 실제로 현장에서 나타나는 현상은 선로의 페란티 현상보다는 변압기의 전압 상승 현상이 훨씬 큰 값으로 위험한 상태로 나타나고 있으며 전기철도, 대형공항 등과 같이 전력설비의 케이블 개개의 길이는 짧아도 전체 병렬 회로를 총 연장한 케이블 길이가 길 경우 충전전류(90° 진상)가 커서 이 같은 현상은 더욱 심각하게 나타나게 된다.

따라서 그 실제의 값을 적용해서 계산해 보려고 한다.

### 가. 등가회로

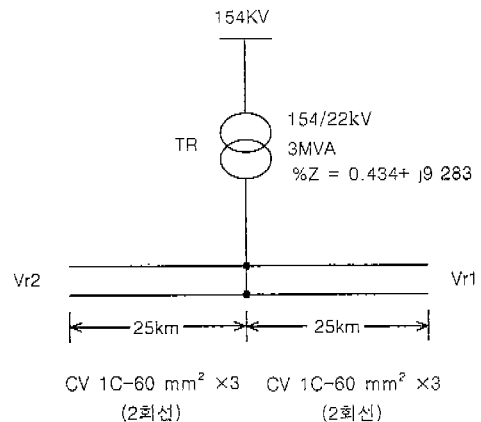


그림 2 전력계통 개략도

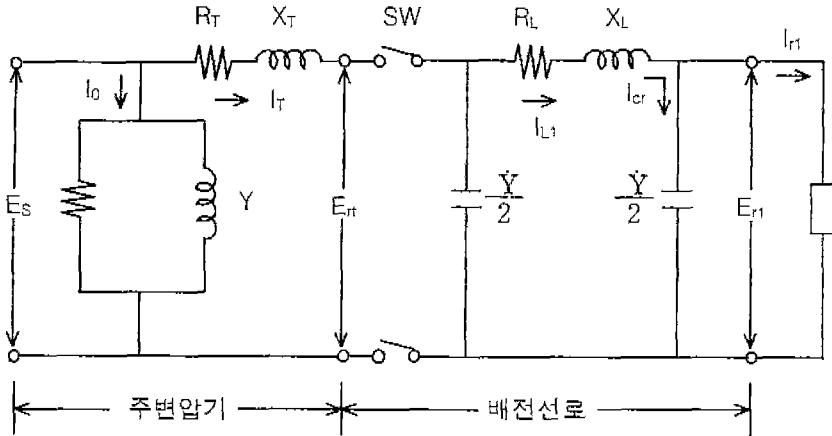


그림 3 등가회로

**(주 의)**

▶ 편의상 계산을 간략하게 하기 위하여 변압기의 여자회로는 변압기의 1차측으로 하고 변압기의 1, 2차 임피던스를 여자회로(Y)의 2차측으로 집중시켰다.

▶ 송전선로 25~50km 정도는 분포정수회로로 하지 않아도 큰 오차가 없으므로  $\pi$ 회로로 계산한다.

$V_s$ : 송전단 전압 또는 변압기만 가압하였을 때(스위치 개방)의 변압기 2차측 단자전압  $V_s = V_{\pi} = 22kV$ (무부하시)  
 $V_{rT}$  = 변압기 2차측 단자전압  
 변압기만 가압(스위치 개방)한 경우는  $V_s = V_{rT}$

배전선로 가압(스위치 투입)한 경우는  $V_s \neq V_{rT}$   
 $V_{rT}$  = 배전선로 우측 수전단 전압

**나. 변압기 2차측 전압( $V_{rT}$ )으로 계산**

무부하로 배전선로를 충전할 경우 변압기 단자 전압  $V_{rT}$ 와 우측 부하단  $V_{r1}$ 의 전압을 구해 본다(그림 4).

변압기 내부 저항  $R_T$

$$R_T = R_{Tpu} \times \frac{V_{\pi}^2}{P_n} = \frac{0.434}{100} \times \frac{22,000^2}{3,000,000} = 0.7(\Omega)$$

변압기 내부 리액턴스  $X_T$

$$X_T = \frac{9.283}{100} \times \frac{22,000^2}{3,000,000} = 14.97(\Omega)$$

배전선로 1회선당 캐패시턴스

$$\frac{1}{X_c} = j\omega c \times 25km = 2\pi \times 6 \times 0.21 \times 10^{-9} \times 25 = 1.88 \times 10^{-3}$$

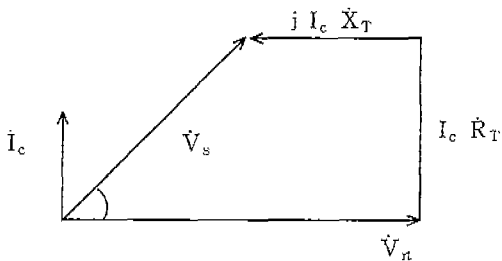


그림 4 변압기 전압강하 벡터도

$$I_c = j\omega C V$$

$$= 1.88 \times 10^{-3} \times \frac{22,000}{\sqrt{3}} = 23.87 \text{ [A]}$$

좌, 우 2회선씩 4회선의 충전전류  
 $I_{c0} = 23.87 \times 4 = 95.5 \text{ [A]}$

$$E_s^2 = \left( \frac{V_r}{\sqrt{3}} - I_c X_T \right)^2 + (I_c R_T)^2$$

$$E_{rt} = \frac{V_r}{\sqrt{3}} = \sqrt{\left( \frac{V_s}{\sqrt{3}} \right)^2 - (I_c R_T)^2 + I_c X_T}$$

$$= \sqrt{\left( \frac{22,000}{\sqrt{3}} \right)^2 - (95.5 \times 0.7)^2}$$

$$+ 95.5 \times 14.97 = 14,132$$

선간 전압으로 환산  
 $V_{rt} = \sqrt{3} \times 14,132 = 24,475 \text{ [V]}$

변압기 2차 단자전압이 24,475 [V]로 되어 무부하 전압 22,000[V]보다 2,475 [V]의 전압 상승이 발생 했으며 다음에 열거하는 것과 같은 여러 가지 문제를 야기하게 된다. 또한 위 어느 한쪽에 문제가 발생하여 25km를 연장 급전할 경우 더욱 높은 전압이 발생 될 수 있다. 이 경우 총 케이블 연장은  $25 \times 6 = 150 \text{ km}$  가 된다.

충전전류 =  $23.87 \times 6 = 143$   
 변압기 2차측 단자전압

$$E_s^2 = \left( \frac{V_r}{\sqrt{3}} - I_c \times X_T \right)^2 + (I_c \times R_T)^2$$

$$E_{rt} = \frac{V_r}{\sqrt{3}} = \sqrt{\left( \frac{V_s}{\sqrt{3}} \right)^2 - (I_c R_T)^2 + I_c X_T}$$

$$E_{rt} = \sqrt{\left( \frac{22,000}{\sqrt{3}} \right)^2 - (143 \times 0.7)^2 + 143 + 14.97}$$

$$= 14,842$$

선간 전압으로 환산

$$V_{rt} = \sqrt{3} \times 14,842 = 25,707 \text{ [V]}$$

무부하 전압 - 선로 충전시 전압

$$15,707 - 22,000 = 3,707 \text{ [V]}$$

즉, 변압기 2차 단자전압이 3,707[V] 상승 되어 위험하게 된다.

### 다. 배전선로 수전단 전압 ( $V_{r1}$ ) 계산

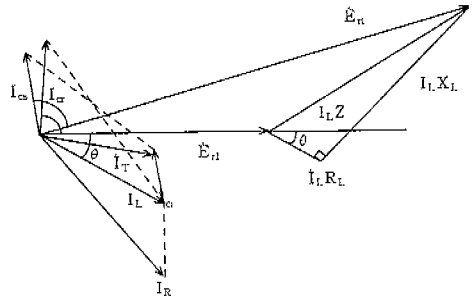


그림 5 선로 전압강하 벡터도

그림 3으로부터

$$\dot{I}_{cr} = E_{r1} \frac{\dot{Y}}{2}$$

$$\dot{I}_{L1} = \dot{I}_R + \dot{I}_{cr} = \dot{I}_R + E_{r1} \frac{\dot{Y}}{2}$$

$$E_{rt} = E_{r1} + \dot{I}_L \dot{Z}$$

$$= E_{r1} + \left( \dot{I}_R + E_{r1} \frac{\dot{Y}}{2} \right) \dot{Z}$$

$$= E_{r1} \left( 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + \dot{I}_R \dot{Z}$$

$$\dot{E}_{r1} = \frac{\dot{E}_{rt} - \dot{I}_R \dot{Z}}{1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}}$$

1선당의 선로정수 (누설전류는 무시한다)



저항  $R = 0.389 \times 25 = 9.725 (\Omega)$

Reactance  $X_L = 0.175 \times 25 = 4.375 (\Omega)$

Susceptance  $B = 0.0801 \times 10^{-3} \times 25$   
 $= 2.003 \times 10^{-3} (\text{S})$

Impedance  $\dot{Z} = R + jX$   
 $= 9.725 + j4.375 (\Omega)$

Admittance  $Y = jB = j 2.003 \times 10^{-3} (\text{S})$

부하전류  $I_{r1}$  이 없는 경우  $E_{r1}$ 은 위식으로 부터

$$\dot{Z} \dot{Y} = (9.725 + j4.375) j 2.003 \times 10^{-3}$$

$$= -0.00876 + j 0.01947$$

$$\therefore 1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2} = 0.986 + j 0.0974$$

$$E_{r1} = \frac{E_{r1}}{1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2}}$$

$$E_{r1} = \frac{14,132}{0.986 + j 0.0974} = \frac{14,132}{0.991}$$

$$= 14,260$$

선간전압

$$V_{r1} = \sqrt{3} \times 14,260 = 24,698 [\text{V}]$$

전압상승

$$V_{r1} - V_{r1} = 24,698 - 24,475 = 223 [\text{V}]$$

선로의 페란티 효과에 의한 전압 상승은 223[V] (1.01%)에 비해 변압기 내부에서 발생하는 전압강하는 2,475[V] (11.25%)로 되므로 선로 상승은 무시할 수 있는 정도이나 변압기의 전압 상승효과는 심각한 문제를 야기할 수 있다.

### 3. 예상되는 문제점

가. 154kV 수전측 및 2차측 전압 상승에 따른 주 변압기 절연내력에 문제 예상

나. 22kV측 각종 전력설비(변압기, CT, PT 기타 보조설비)절연내력에 문제 예상

다. 각종 개폐설비 GLBS, VCB의 개폐능력 상 진상 전류 개폐에 문제가 예상됨

라. GLBS, VCB의 개폐가 실패될 경우는 재점호에 의한 폭발 및 계통에 이상 전압 발생(약 5 ~ 7배)에 따른 동일 계통에 연결된 타 기기의 동시 다발적인 연쇄 소손 사고가 예상됨

마. 각종 보호 계전기 및 제어 설비의 고조파 증폭 현상에 다른 이상 동작이 우려됨

바. 주변압기의 과부하로 실재부하의 부담 불가 정상운전 좌우 25km 운전시 총전류류 예상치 95.5[A]는 변압기 3MVA의 정격전류 (78A)보다 크므로 변압기 과열

사. 과도한 전력손실 발생

### 4. 대책

이같은 문제는 전력선에 흐르는 전류의 위상을 조정하므로서 적정전압을 유지시킬 수 있으며 전류의 위상이 너무 늦으면 전압강하가 심각하게 나타나며 전류의 위상이 너무 앞서면 전압상승현상이 나타나므로 가장 간단한 방법인 정전용량과 반대의 특성을 갖는 분포 리액터를 선로의 적당한 곳에 병렬로 설치하는 방법과 FACTS(Flexible Ac Transmission System)을 채택할 수 있겠다.