

22.9kV 다중접지계통의 주변압기 중성점 개방시 파급사고



전명수 [No.45]
일렉컨설팅 대표
TEL (02)554-8787
018-212-4848



김정철 [No.24156]
(재)한국철도기술공사
(주)태정시스템 고문
TEL.(02)525-6473

H공사에서 변압기 보수공사후 여러곳의 수용장소에서 단상부하에 심한 전압불평형이 발생하여 전기설비가 가동되지 않거나 소손되는 사고가 다량으로 발생하였다. 배전용 변압기는 이상을 발견할 수 없었으며 H공사 공급용변전소나 수전용변전소의 전압계는 각상 공히 22.9kV로 이상이 없었다. 본 내용은 독자의 이해를 돕기위해 현장 확인을 못한 일부 내용은 추정 보완 하였음을 알려 둔다.

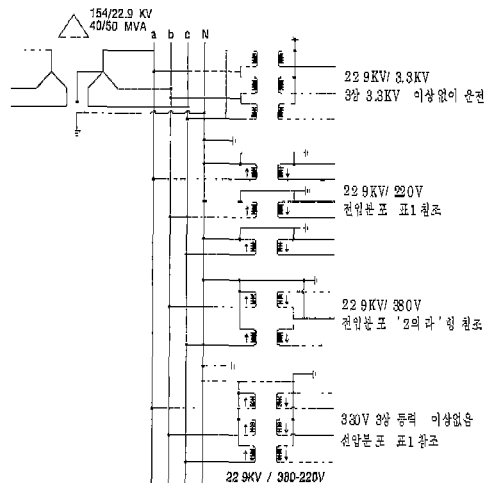
1. 현황

가. 발생 상황

154kV/22.9kV 40/60MVA 배전용변압기를 교체후 변압기를 가압하고 각선간 전압을 확인한 결과 22.9kV로 평형되고 변압기 소리도 양호하여 배전선로를 가압하였다.

전력공급을 시작한지 수 분후 과전압 또는 저전압으로 전력설비가 정상적인 작동을 하지 못하거나 또는 소손되었다는 내용이 접수되었다.

시간이 경과할수록 이 같은 상태는 점점 심각한 상태로 확산되었으며 저압 단상부하의 전압이 정격전압 220V에서 110 ~ 292V 까지 나타났다.



나. 전력공급 계통 및 전압상태

<그림1>

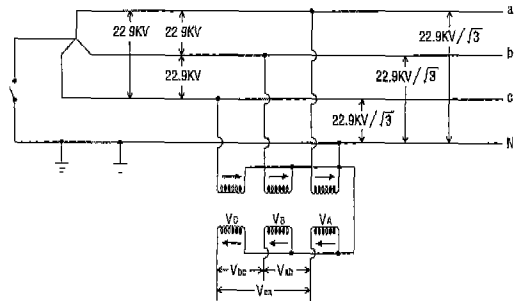
다. 부하상태 및 변압기 교체공사 내용

22.9kV 계통이 3φ4w식 다중접지계통으로 구성되어 있으나 다중접지된 중성선과 각상의 전압선과에 3상부하 또는 단상부하가 연결되어 있고 농어촌 또는 군용설비가 많아 부하불평형이 심한 계통이었다.

변압기 교체공사후 변압기의 절연축정을 완료하고 중성점에 접지선이 분리된 것을 망각하고 수전하였으며 수전후 Tr 1, 2차측 전압이 154kV, 22.9kV로 각상 공히 이상이 없었으므로 22.9kV 선로를 배전하게 된것임.

의 상전압은 선간전압의 0.5배에 접근하게되며 이는 부하전력에 반비례하여 임피던스가 변화하고 중성점이 임피던스에 비례해서 이동되기 때문이다.

다. 22.9kV 배전선로의 Y-Y결선 또는 단상변압기의 전압변화 상태 (중성점 개방시)



2. 원인분석

중성점 다중접지계통은 각상과 중성점간에 부하(변압기등)가 연결되어 운전되며 중성점이 안정되어 부하불평형은 물론 1선지락시에 도 중성점이 거의 불변이므로 전원측의 전압강하 불평형 만큼만 부하단의 각상전압차이가 발생하게 되지만 이 경우는 변압기 중성점이 개방되어 각상과 중성선간 부하의 크기에 반비례하는 전압이 부하단에 인가되어 경부하인 상은 과전압, 중부하인 쪽은 저전압으로 기기가 손상되거나 작동할 수 없게되며 이는 3상 부하가 평형될때는 중성점이 중앙에 있으므로 각상전압이 평형되게 되나 부하가 불평형될때는 중성점이 중부하인 쪽으로 이동되기 때문이다.

가. a, b, c상 평형부하중 a상의 부하를 서서히 증가시키면 부하단의 a상 전압은 점점 감소되고 b, c상의 전압은 점점 증가되게 되며 a상 부하가 ∞에 접근하면 부하단의 a상 전압은 "0"에 접근하고 b, c상의 전압은 선간전압에 접근한다.

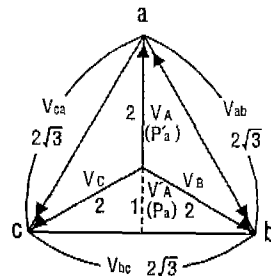
나. a상의 부하가 점점 감소하면 부하단의 a상의 전압은 점점 증가하고 b, c상의 전압은 점점 감소하게 되며 a상의 부하가 "0"에 접근하면 부하단의 a상전압은 상전압의 1.5배 접근하고 b, c상

1) $P_a = 3 - P_a'$

$V_A'^2 = V_B^2 - 3$

부하의 크기와 전압배분은 반비례하므로

$$\frac{P_a}{P_a'} = \frac{V_A'}{V_A} = \frac{\sqrt{V_B^2 - 3^2}}{V_A}$$



〈그림2-1〉

평형부하의 경우 즉

$P_a = P_b = P_c$ 의 경우 V_A 와 V_B 의 크기는 아래와 같다.

$$\frac{V_A'^2}{V_A^2} = \frac{V_B^2 - \sqrt{3^2}}{V_A^2}$$

$V_A = V_B = V_C = 2pu$ 로 가정

$V_A + V_A' = 3pu$

$P_a = P_b = P_c = 2pu$
 로 가정해서 계산함
 이때 P_b' 및 $V_A' = 1pu$

$$\frac{P_a}{P_a'} = \frac{V_A'}{V_A} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{V_A'^2}{V_A^2} = \frac{V_B^2 - \sqrt{3}^2}{V_A^2} = \frac{1}{2^2}$$

$$V_A'^2 = \frac{1^2}{2^2} = V_A^2 = \frac{4}{4}$$

$$V_A' = 1$$

$$V_B = V_C = \sqrt{3^2 + 1^2} = 2pu$$

2) A상 부하 P_a 가 150% 즉 1.5pu로 증가할 경우 V_A 와 V_B 의 크기는 아래와 같다.

$$\frac{P_a}{P_a'} = \frac{V_A'}{V_A} =$$

$$\frac{V_b'^2}{V_A^2} = \frac{V_B^2 - \sqrt{3}^2}{V_A^2} = 2^2$$

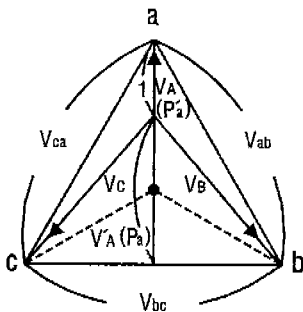
$$V_A'^2 = 2^2 \times V_A^2 = 2^2 \times 1$$

$$V_A' = 4 = 2$$

$$V_B^2 = \sqrt{3^2 + V_b'^2} = 3 + 4$$

$$V_B = V_C = \sqrt{7} = 2.65pu$$

$$V_A = 3 - V_A' = 1pu$$



<그림2-2>

이때의 각 상전압을 실제값으로 환산하면 아래와 같다.

$$2pu가 22.9kV/\sqrt{3} = 13.2kV이므로$$

$$V_A = 1pu$$

$$= 13.2 \times \frac{1}{2} = 6.6kV$$

$$V_B = V_C = 2.65pu$$

$$= 13.2 \times \frac{2.65}{2} = 17.49kV$$

3) A상 부하 P_a 가 50%로 감소될 경우 V_A 와 V_B 의 크기는 아래와 같다.

$$\frac{P_a}{P_a'} = \frac{V_A'}{V_A} = \frac{0.5}{2.5}$$

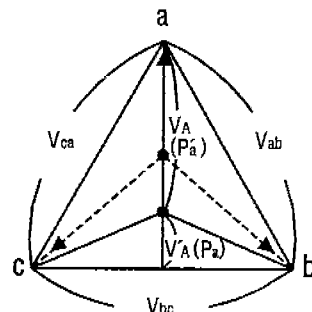
$$\frac{V_A'^2}{V_A^2} = \frac{V_B^2 - \sqrt{3}^2}{V_A^2} = \frac{0.5^2}{2.5^2}$$

$$= V_A'^2 \times \frac{0.5^2}{2.5^2} = V_A^2$$

$$= \frac{0.5^2}{2.5^2} \times 2.5^2$$

$$V_A' = 0.5pu$$

$$V_A = 3 - V_A' = 2.5pu$$



<그림2-3>

$$V_B = V_C = \sqrt{3^2 - V_B'^2}$$

$$= \sqrt{3^2 - 0.5^2}$$

$$= 1.80 \text{ pu}$$

이때의 각 상전압을 실제값으로 환산하면

$$V_B = 13.2 \times \frac{2.5}{2} = 16.5 \text{ kV}$$

$$V_B = V_C = 13.2 \times \frac{1.8}{2} = 11.88 \text{ kV}$$

4) A상부하 P_a 가 "0"으로 접근 즉 임피던스가 ∞ 로 접근할 경우 V_A 와 V_B , V_C 의 크기

$$\frac{P_a}{P_a'} = \frac{V_A'}{V_A} \cong \frac{0}{3}$$

$$\frac{V_A'^2}{V_A^2} = \frac{V_B^2 - \sqrt{3^2}}{V_A^2}$$

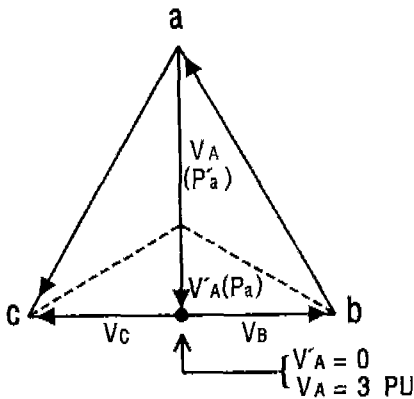
$$V_A'^2 = V_B^2 - \sqrt{3^2} = 0$$

$$\therefore V_B = V_C = \sqrt{3} \text{ pu}$$

$$= 13.2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 11.43 \text{ kV}$$

$$V_A = 3 \text{ pu}$$

$$= 13.2 \times \frac{3}{3} = 19.8 \text{ kV}$$



<그림2-4>

5) A상부하 P_a 가 ∞ 로 접근
즉 임피던스가 "0"으로 접근할 경우 V_A ,
 V_B , V_C 의 크기

$$\frac{P_a}{P_a'} = \frac{V_A'}{V_A} \cong \frac{3}{0}$$

$$V_A' = V_B^2 - \sqrt{3^2} = 3^2$$

$$V_B = V_C = \sqrt{3^2 + 3}$$

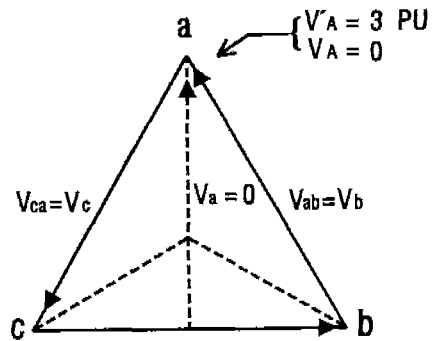
$$= 3.464 \text{ pu}$$

$$= 13.2 \times \frac{3.464}{2} = 22.86 \text{ kV}$$

$$V_A = 0$$

$$= 13.2 \times \frac{3}{3} = 19.8 \text{ kV}$$

$$V_A = 0$$



<그림2-5>

6) 변압기 결선별로 저압측에 나타나는 전압
위 5가지 경우를 분석한 결과 선간전압에는
변화가 없으며 상전압 값만 변동되므로 저압측
에도 3상 Y-Y, 4-4결선 380V계통에는 문제가
없으며 단상계통 및 역V결선 3상계통은 상
전압의 변화에 비례하는 이상전압이 저압측
380V 및 220V 계통에 나타나게 된다.

가) 단상변압기의 발생 예상전압

<표 1>

부하량	상별	전압			비고
		pu	고압측kV	저압측kV	
평형부하	A	2	13.2	220	2pu를 정격 전압으로 한다.
	B	2	13.2	220	
	C	2	13.2	220	
A상부하 150%	A	1	6.6	110	2pu를 정격 전압으로 한다.
	B	2.65	2.65	292	
	C	2.65	2.65	292	
A상부하 50%	A	2.5	16.5	275	2pu를 정격 전압으로 한다.
	B	1.8	11.88	198	
	C	1.8	11.88	198	
A상부하 0	A	3	19.8	330	2pu를 정격 전압으로 한다.
	B	1.732	11.43	191	
	C	1.732	11.43	191	
A상부하 ∞	A	0	0	0	2pu를 정격 전압으로 한다.
	B	3.464	22.86	380	
	C	3.464	22.86	380	

$$V_{ac}' = V_{ac}$$

$$V_{ba}' = \frac{1}{2} V_{ba}$$

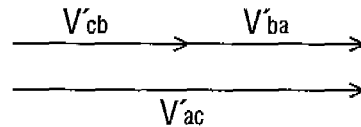
$V_{ac}' = V_{ba}' + V_{cb}'$: 중성점 개방시 선간전압

$$V_{ba}' = \frac{1}{2} V_{cb}$$

$V_{ac}' = V_{ba}' + V_{cb}'$: 정상상태의 선간전압

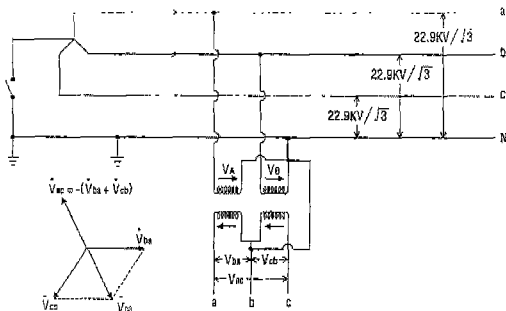
$V_{ac}' = V_{ba}' + V_{cb}'$
 V_{ac}' , V_{ba}' , V_{cb}' 는 동상을 가지며, V_{ba}' 및 V_{cb}' 의 크기는 $\frac{1}{2}$ 의 이 된다.

정상상태(중성점 접지)에서는 V_{ac}' , V_{ba}' , V_{cb}' 는 크기가 같고 위상이 120° 상차를 갖는 대칭분이 된다.



<그림3-2 1자측 중성점 개방시 2자측 선간전압 벡터>

나) 역V결선의 경우



<그림3-1 1자측 중성점 연결시 2자측 선간전압 벡터>

중성점이 접지(중성선에 연결)된 경우는 그림 3-1과 같이 변압기 2차측 a, b, c선에 V_{ba} , V_{cb} , V_{ac} 의 평형 3상 전압이 나타나게 되지만 중성점이 개방될 경우는 그림 3-2와 같이 a, b 선간전압에 단상변압기 2대가 직렬로 연결된 상태로 된다.

1) 평형부하일 경우(3상 동력이므로)

2) 불평형 부하일 경우

- 가) ac상의 부하 변화에는 전압 분포 비율은 거의 변화가 없으며
- 나) ab상 bc상 부하가 동일하지 않을 경우는 V_{ac} 는 변동이 없으나 V_{cb}' , V_{ba}' 는 부하 크기에 반비례해서 전압 크기가 달라진다.

3. 결론 및 대책

전력설비의 변경 및 교체 등 작업시는 무부하 상태 및 부하의 증가 상태에 따른 선간전압은 물론 각 상전압을 측정하여 정상상태를 확인하여야 하며, 변압기의 순환전류 또는 선전류의 평형상태 등도 확인하여야 대형사고를 예방할 수 있다. 3상 4선식 중성점 다중 접지 계통에서 중성점이 개방 되면 부하 불평형이 심한 경우 중성점 전위가 0[V]에서 선간전압까지 상승할 수 있으므로 단절연 변압기의 경우 절연 파괴의 원인이 될 수도 있다.