계통의 고장전류 계산 (Ⅱ) - ①

글 / 강 창 원 (주)피에스디테크 대표이사 · 기술사
이 성 우 (주)서울유일엔지니어링 실장 · 기술사

목 차

1. 접지방식과 지락전류
2. 지락전류 계산
2.1 1선지락시의 지락전류 계산 기본식
2.2 직접접지(다중접지) 계통의 지락전류 계산
2.3 저항접지 계통의 지락전류 계산
2.4 비접지 계통의 지락전류 계산

필자는 '98년 8 ~ 10월호 (계통의 고장전류 계산 ① ~ ③) 3회에 걸쳐 계통의 고장전류에 대하여 연재한 바가 있는데 이 연재를 통하여 많은 기술자에게 격려를 받았으며, 또한 요청에 의하여 수회에 걸쳐 강의를 한 바 있다.

여기서는 그 후속편으로 그 당시 소홀히 다루었던 지락전류 계산에 대하여 중점적으로 기술하고자 한다. 전력기술인 여러분의 충분한 이해를 위하여 이전의 3회 연재(주로 단락전류 계산)를 먼저 볼 것을 권하고 싶다.

1. 접지방식과 지락전류

계통의 접지방식은 직접접지(다중접지), 저항접지 및 비접지(GPT접지)방식으로 나누어지는데 각 방식에 따라 지락전류의 크기 및 계산방식이 상이하므로 지락전류 계산은 각 방식별로 구분 하는게 좋다.

우리나라에서 적용되는 접지방식은 다음과 같다.

i) 직접접지(다중접지)

- ○ 765kV, 345kV, 154kV 송전선로
- ○ 22.9kV 배전선로
- ○ 저압 계통

ii) 저항접지

- ○ 공장 구내 배전 설비
- ○ 발전기 중성점

iii) 비접지

- ○ 66kV 송전선로
- ○ 서울시내 일부 22kV 배전선로
- ○ 공장(빌딩)구내 (22kV, 11kV, 6.6kV, 3.3kV)

1.1 직접접지(Solid Grounding)

이 방식은 변압기의 중성점을 대지에 직접 접지 하기 때문에 1선 지락 사고시의 건전상 전압상승이 가장 적어 전력기기의 절연을 현저히 줄일 수 있으며 지락전류 검출이 용이하

여 지락사고시 보호계전기가 신속하게 동작을 한다. 한편 지락전류가 크기 때문에 지락사고시 설비사고를 일으키는 경우가 많으며 통신선에의 유도전압이 높아 장해를 일으킬 수가 있다. 이 때문에 계통은 충분한 절연설계를 하여 사고를 심하게 발생시키지 않게 함과 동시에 만일의 사고가 발생하면 선로에 유입되는 지락 사고 전류의 지속시간을 최대 단시간으로 하기 위해 확실하고 고속도 선택차단이 가능한 기능의 보호 계전기 및 차단기를 설치하는 등의 대책이 필요하다.

1.2 비접지(Ungrounded System)

계통을 접지하지 않고 비접지 상태로 운전하는 방식으로 지락사고시 지락전류는 충전전류와 GPT를 통한 유효전류이며, 수 [A]정도에 지나지 않는다. 반면 1선 지락시 건전상의 전위는 $\sqrt{3}$ 배 까지 상승된다.

만약 이 지락사고 전류가 간헐적으로 생기거나 계속 흐르도록 방치하면 심각한 과도 이상전압이 대지간에 생길 수 있으며 그 크기가 상전압의 6배 내지 8배에 이른다. 이것이 절연을 파괴시키고 동시다발의 전동기 소손사고를 일으키는 원인이 된다(IEEE 242-1986, p.278).

이 과도 이상전압은 계통 Capacitance의 반복 충전 때문이거나 계통 Capacitance와 기기의 Inductance간의 공진에 의하여 발생된다.

1선 지락 사고가 난 상태로 방치하여 두면 두 번째 지락사고시 Phase - to - Ground - to - Phase Fault가 되어 대전류가 흐르면서 상 과전류 계전기에 의하여 Trip된다.

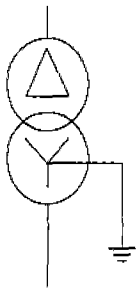
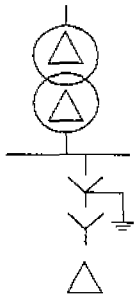
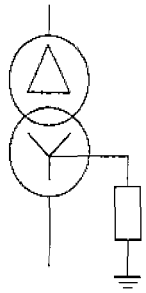
3.3kV 계통은 비접지 방식을 적용하고 있으며 GPT와 ZCT를 조합하여 SGR(선택 지락계전기)로 지락보호를 하고 있다. 이 방식은 지락사고시 수 [A]정도의 적은 전류가 흐르므로 계통에 미치는 영향이 적으며 중요한 부하는 지락사고시 Trip 시키지 않고도 운영할 수 있다.

그러나 이 방식은 결선 및 극성이 맞지 않으면 오동작하거나 부동작하게 되며 GPT, 한류저항 등의 용량이 작아 소손되는 사례가 있으므로 이에 대한 충분한 검토가 필요하다.

1.3 저항접지(Resistance Grounding)

이 방식은 1선 지락전류를 억제하기 위하여 계통의 중성점에 저항기를 접속하여 접지하는 방식으로 저항기의 크기를 조정하여 지락사고시 계통에 흐르는 지락전류의 크기를 조정 할 수 있다. 일반적으로 지락전류가 100A 정도까지 흐르도록 조정하는 계통을 고저항 접지 방식이라 하고 그 이상의 지락전류가 흐르는 계통을 저저항접지 방식이라 한다.

[표-1] 접지방식 비교

구 분	직접(다중)접지	비 접 지	저항접지
결 선 도			
중성점 저항	Z ≒ 0	Z ≒ ∞	Z = R

[표-1] 접지방식 비교

구 분	직접(다중)접지	비 접 지	저항접지
지 락 전 류	수백 ~ 수천 A	수A이하	임의 조정 (5~200A정도)
1선 지락시 건전상 전위상승	1.3 E	$\sqrt{3}$ E	$\sqrt{3}$ E
유 도 장 해	대	소	중
전원 공급 (Service)	Trip at the first fault	No trip at the first fault	Trip at the first fault
장 점	· 보통의 절연강도 · 단순한 보호방식 (OCGR) · 과도전압 감소	· 중단없는 전원공급 · 적은 고장전류	· 적은 고장전류 · 지락보호 용이 · 중간 수준의 절연강도 · 과도 과전압 감소
단 점	· 전원공급 중단 · 큰 고장전류 · 높은 접촉전압	· 과도 과전압 상승 · 높은 절연강도 요구 · 지락보호 난이 (GPT. ZCT. SGR)	· 전원공급 중단 · 열적 스트레스 발생

위의 표-1에서와 같이 각 보호방식별 장·단점이 다르기 때문에 각 수용가의 전기적 특성과 설비규모 등을 파악하여 접지방식을 선택해야 한다. 공장의 경우 처음 비접지 방식을 선택하였다가 공장규모가 커져 뱅크용량이 크게되면 비접지 방식의 보호로 보호가 어려운 경우가 있을 수 있다. 실제로 우리나라의 경우 접지방식을 검토하기보다 종래에 사용하던 방식을 그대로 적용하기 때문에 접지방식이 맞지 않는 경우가 많다.

필자의 현장진단 경험에 의하면 설비규모가 점차 대형화 됨에 따라 접지방식도 비접지〈저항접지〈직접접지 로 변경하는 것이 좋다.

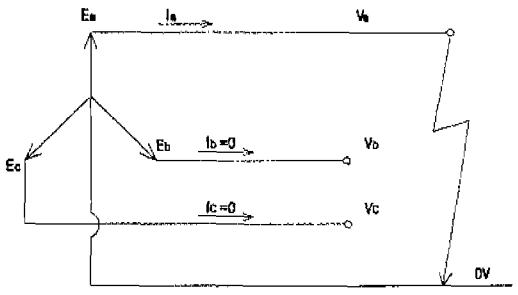


그림 2.1

2. 지락고장 계산

2.1 1선지락시의 지락전류 계산 기본식

그림 2.1에서 a상이 지락한 경우, 단자에서의 조건은 다음과 같다.

$$I_b = I_c = 0, \quad V_a = 0 \qquad \langle 식\ 2.1 \rangle$$

a상에 흐르는 전류가 구해야 할 지락전류는 I_g 이다.

$$I_a = I_g \qquad \langle 식\ 2.2 \rangle$$

여기서, 발전기의 기본식은 다음과 같다.

$$V_0 = -Z_0 I_0 \qquad \langle 식\ 2.3 \rangle$$
$$V_1 = E_a - Z_1 I_1 \qquad \langle 식\ 2.4 \rangle$$
$$V_2 = -Z_2 I_2 \qquad \langle 식\ 2.5 \rangle$$

〈식 2.1〉의 조건을 대칭분전류, 전압으로 나타내면

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = 0 \qquad \langle 식\ 2.6 \rangle$$
$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = 0 \qquad \langle 식\ 2.7 \rangle$$
$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = 0 \qquad \langle 식\ 2.8 \rangle$$

이 된다.

이상 8개의 식에서 I_a 를 구할 수가 있다.

〈식 2.8〉에 〈식 2.3〉 〈식 2.4〉 〈식 2.5〉를 대

입한다.

$$V_a = (-Z_0 I_0) + (E_a - Z_1 I_1) + (-Z_2 I_2) = 0$$

$$\therefore E_a = E_0 I_0 + Z_1 I_1 + Z_2 I_2 \quad \langle 식\ 2.9 \rangle$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_a$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2 I_c) = \frac{1}{3} I_a$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) = \frac{1}{3} I_a$$

$$\therefore I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_a \quad \langle 식\ 2.10 \rangle$$

〈식 2.9〉와 〈식 2.10〉에서,

$$I_0 = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad \langle 식\ 2.11 \rangle$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 3I_0 = \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad \langle 식\ 2.12 \rangle$$

이때의 등가회로를 그림 2.2에 표시한다.

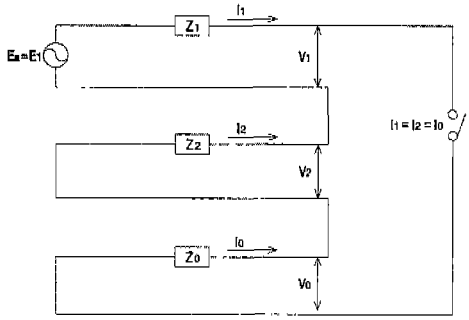


그림 2.2

여기서, I_g : 1선지락전류(a상)

I_0 : 영상전류

E_a : 지락 발생전의 a상의 대지전압

Z_0 : 지락점에서 계통을 본 영상임피던스

Z_1 : 지락점에서 계통을 본 정상임피던스

Z_2 : 지락점에서 계통을 본 역상임피던스

죽, 〈식 2.12〉 $I_g = 3I_0 = \frac{3E}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$ 가 지락전류를 계산하는 기본식이며, 지락점 저항 R_f 를 고려하면 상기식은

$$I_g = 3I_0 = \frac{3E}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_f} \text{ 가 된다.} \quad \langle 식\ 2.13 \rangle$$

또한, 위의 식은 Base MVA 개념을 도입한 식으로 환산하면 다음과 같다.

$$I_g = 3 \times \frac{100}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_f} \times \text{기준전류}$$

$$= \frac{3 \times 100}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_f} \times \frac{\text{Base MVA}}{\sqrt{3} \times V} \quad \langle 식\ 2.14 \rangle$$

2.2 직접접지(다중접지)계통의 지락전류 계산

직접접지 계통의 고장전류의 계산식은 다음과 같다.

$$I_g = \frac{3 \times 100}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} \times \text{기준전류(A)}$$

$$= \frac{3 \times 100}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} \times \frac{100{,}000}{\sqrt{3} \times V} \text{ (A)}$$

단, 여기에서

I_g : 1선지락전류(A), V : 선간전압(kV)

Z_1, Z_2, Z_0 : 고장회로의 정상, 역상, 영상 % Impedance로서

$Z_1 = Z_S + Z_t + Z_{L1}$ $Z_2 = Z_1$

$Z_0 = Z_t + Z_{L0}$

Z_S : 전원측 % Impedance (100MVA 기준)

Z_t : 주변압기의 % Impedance (100MVA 기준)

Z_{L1} : 선로의 정상 % Impedance (100MVA 기준)

Z_{L0} : 선로의 영상 % Impedance (100MVA

기준)

R_f : 고장점의 고장저항치 100MVA로 환산한 % Impedance 치

(예 1)

아래와 같은 배전계통의 고장점 A에서 3상 단락전류와 1선 지락전류를 구한다. 단, 전원측(계통) Impedance는 5%(100MVA 기준), 주변압기의 Impedance는 14.5%(자기 용량에서), 또 3상단락의 고장 저항은 무시하며 1선 지락의 고장저항치는 7.5Ω이다.

■ 풀 이

① 3상 단락전류 I_{3s} 를 구하면

$$I_{3s} = \frac{100}{Z_1} \times \frac{100,000}{\sqrt{3}\,V} = \frac{100}{Z_1} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9}$$

$$= \frac{100}{Z_1} \times 2.521\ (A)$$

$Z_1 = Z_S + Z_t + Z_{L1}$

$Z_S = j\,5\%$

$Zt = j14.5 \times \frac{100}{60} = j24.2\%$ (100MVA 기준)

$Z_{L1} = (5.8 + j\,8.41) \times 9 = 52.2 + j\,75.7$

$Z_1 = j5 + j24.2 + 52.2 + j75.7$

$= 52.2 + j104.9$

$$I_{3s} = \frac{100}{Z_1} \times 2.521 = \frac{100 \times 2.521}{52.2 + j104.9}$$

$$= \frac{252.100}{52.2 + j104.9} = 2403.2\ (A)$$

② 1선 지락전류

$$I_g = \frac{3 \times 100}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times V}$$

$$= \frac{3 \times 100}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9}$$

$$= \frac{3 \times 100}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} \times 2.521\ (A)$$

또, $Z_1 = Z_2 = Z_S + Z_t + Z_{L1}$

$Z_0 = Z_t + Z_{L0}$

이므로 $Z_1 = 52.2 + j104.9 = Z_2$

$Z_t = j24.2$

$Z_{L0} = (14.02 + j32.36) \times 9$

$= 126.2 + j291.2$

$Z_0 = 126.2 + j(24.2 + 291.2)$

$= 126.2 + j315.4$

또, R_f 는 7.5를 100MVA 기준 % Impedance로 환산하면

$$R_f = 7.5 \times \frac{100,000}{10V^2} = 7.5 \times \frac{100,000}{10 \times 22.9^2}$$

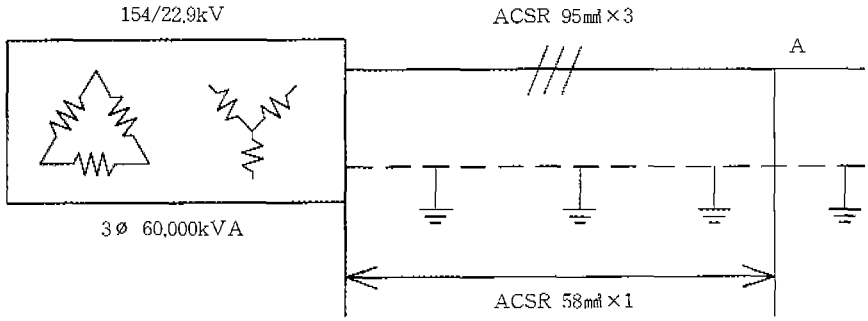


그림 2.3

$= 7.5 \times 19.1 = 143.3(\%)$

$$I_g = \frac{3 \times 100 \times 2{,}521}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f}$$

$$= \frac{3 \times 100 \times 2{,}521}{2(52.2+j104.9)+(126.2+j315.4)+(143.3\times 3)}$$

$$= \frac{3\times 100\times 2{,}521}{660.5 + j525.2} = \frac{756{,}300}{660.5 + j536.8}$$

$\fallingdotseq$ 896 (A)

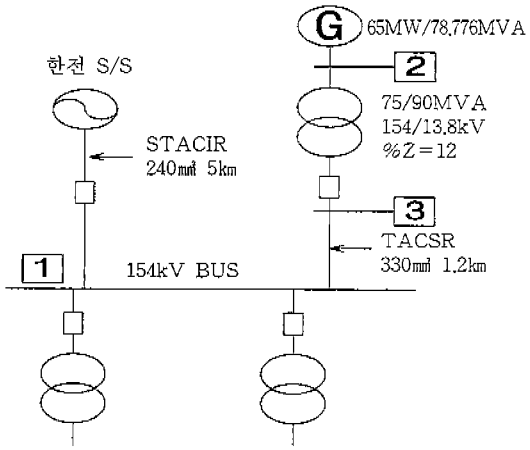


그림 2.4

(예 2)

① 단선결선도 및 임피던스도

한전 154kV 변전소 임피던스(ON 100MVA)

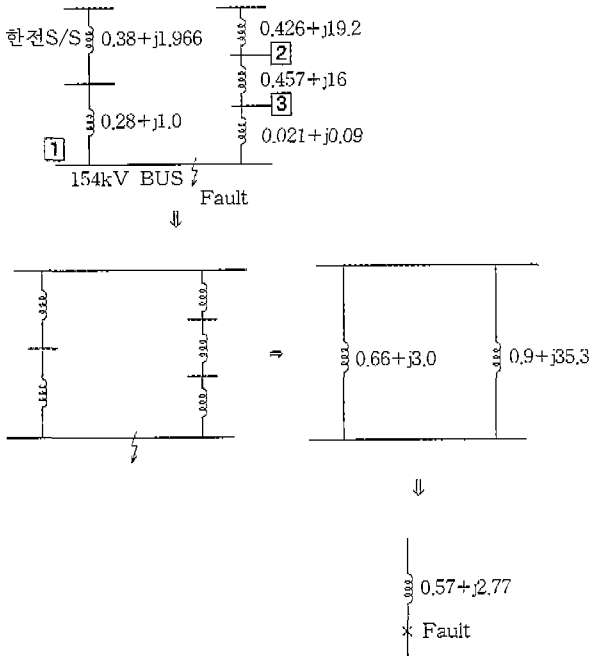
② Impedance Conversion

Base : 100MVA, Unit : %

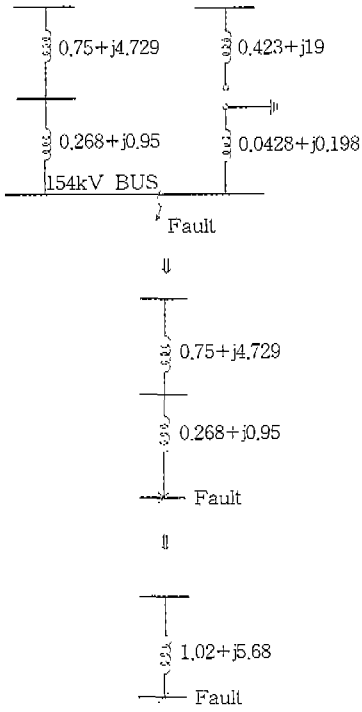
Node명	Feeder Name	Fundamental Data	Calculation	Conversion Data
Kepco	154kV S/S	$Z_1=0.38+j1.966$ $Z_2=0.37+j1.92$ $Z_0=0.75+j4.729$	-	$Z_1=0.38+j1.966$ $Z_2=0.37+j1.92$ $Z_0=0.75+j4.729$
Kepco ~ ①	STACIR 240㎟×5km	0.134+j0.475 (Ω/km)	$\frac{100{,}000 \times (0.134+j0.475)}{10 \times 154^2} \times 5$	0.28+j1.0
Gen.	Co-Gen.	78.776MVA Xd″ : 15.1 X/R : 45	$(0.3356+j15.1) \times \frac{100}{78.776}$	0.426+j19.2
② ~ ③	Step-up TR.	75/90MVA %Z = 12% X/R : 35	$(0.3429+j12) \times \frac{100}{75}$	0.457+j16
③ ~ ①	TACSR 330㎟×1.2km	0.0424+j0.1975	$\frac{100{,}000\times(0.0424+j0.1975)}{10 \times 154^2} \times 1.2$	0.0214+j0.099

③ Impedance Map

〈Positive & Negative Phase Impedance Map〉



〈Zero Phase Impedance Map〉



④ 임피던스 합성 및 고장전류 계산

ⅰ) 3상 단락전류

$$I_{sc} = \frac{100}{Z_1} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 154}$$

$$= \frac{100}{0.57+j2.77} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 154}$$

$$= 13.4(kA)$$

ⅱ) 1선 지락전류

$$Z_1 + Z_2 = 2(0.57 + j2.77) = 1.14 + j5.54$$

$$Z_0 = 1.02 + j5.68, \quad 3R_f = 0$$

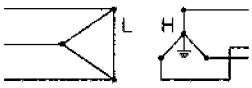
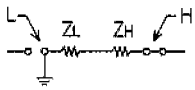
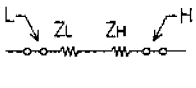
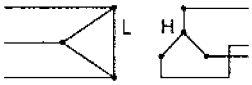
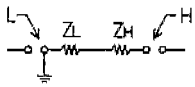
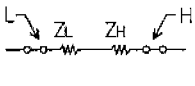
$$I_g = \frac{3 \times 100}{Z_1+Z_2+Z_0+3R_f} \times \frac{\text{Base MVA}}{\sqrt{3} \times V}$$

$$= \frac{3 \times 100}{(1.14+j5.54)+(1.02+j5.68)} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 154}$$

$$= \frac{3 \times 100}{2.16 + j11.22} \times 374.9$$

$$= 9865.8 \fallingdotseq 9.87[kA]$$

⑤ 변압기의 결선과 대칭분 등가회로

Two Winding Transformers		
Three Phase Connection	Zero Sequence Circuit	Positive or Negative Sequence
		
		

다음호에 계속 됩니다

칼로 벤 상처는 치료해서 나을 수도 있고, 독에는 해독제가 있지만, 말이란 사람 마음 속에서 눈물로 얼룩지게 된다. 마치 젖은 시멘트 위에 뿌려진 모래처럼 단단하게 박히게 된다. 말은 그 사람의 마음 속에 들어가서 근심하게 만들고, 그 사람이 아무리 그 말의 부정성에 대해서 저항하려 해도 뿌리를 내려 마침내는 그 말을 믿게 만들고야 만다. 그러면 끝이다. 말로 인한 상처가 나 버리는 것이다.

♡ 해뜨는 나라, 조지 클레비스 외