



보호계전의 실무 이론

— 2선지락 고장 사고에 대한 해석을 중심으로 —

남 재 경 (주)파워 토스 기술이사, 기술사

김 세 동 두원공과대학 교수/공학박사, 기술사

1. 머리말

지락이라는 것은 흔히 말하고 있는 어스 사고(Earth-fault)로서, 전류를 지니고 있는 선이 사전에 결정되어 있지 않는 통로를 통하여 대지로 전류를 흘리는 것이다 (일반적으로 접지사고라고 불리고 있지만, 사고라는 것을 명확하게 표현하고 있는 용어인 '지락'이 적절하므로 여기에서는 '지락'이라는 용어를 사용한다). 이 대지에 흐르는 전류의 크기를 결정하는 것은 회로의 전압값과 계통의 접지방식(영상 임피던스)이다.

지락 보호를 구상하는 경우 접지방식이 어떠한 방식인 가라는 것이 가장 기본적인 조건이다. 접지방식에는 비접지방식, 직접 접지방식, 저항 접지방식, 소호리액터 접지방식 등이 있으며, 3kV, 6kV의 배전선 계통은 비접지방식이기 때문에 1선지락 사고를 일으켜도 전류는 흐르지 않는다. 충전전류를 제외하면 1선 완전 지락시에 접지면 압기의 중성점을 통하여 흐르는 전류는 불과 0.2~0.3A 정도이다. 실제로는 그것에 선로의 대지 정전용량에 의한 90° 진상의 충전전류가 벡터적으로 합성되어 0.2A에서 1A 정도의 전류가 흐를 뿐이다(물론, 선로가 더 길면 더 흐르게 된다).

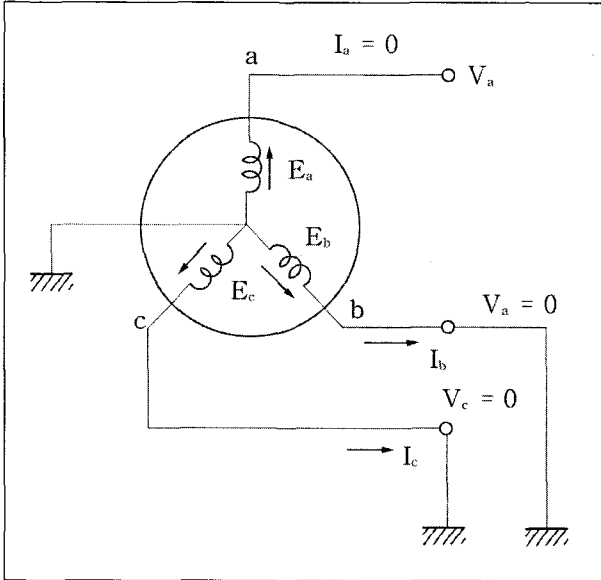
60kV 계통이 되면 저항 접지방식이나 소호리액터 접

지방식(저항 병용이 많다)이 많이 사용되어 100~200A 정도의 지락전류가 흐르게 된다. 따라서 지락계전기로서는 검출이 용이하게 된다. 또한, 직접 접지방식의 경우에는 1선지락이 되면 상 단락을 의미하기 때문에 단락사고와 거의 같은 대전류가 흐른다. 이와 같이 지락전류는 계통의 접지방식에 의해 좌우된다.

일반적으로 송배전선로에서는 3상 단락과 같은 평형 고장이 일어나는 경우는 극히 드물고, 거의 대부분이 1선지락이나 2선지락, 선간 단락과 같은 불평형 고장으로 되기 때문에 각 송배전선에는 비대칭 전류가 흐르게 된다. 따라서 이러한 불평형 고장에 대한 해석법으로서 대칭좌표법이 많이 사용된다. 본고에서는 대칭좌표법을 이용하여 3상 회로에서 2선지락 고장 사고가 발생된 경우의 고장 전류 및 건전상의 전압에 대한 해석에 대해서 설명하고자 한다.

2. 2선지락 고장 사고시의 해석

송배전계통에서 고장이 일어났을 경우에 고장점에 흐르는 전류라든지 건전상의 전위 상승이 어떻게 될 것인가 하는 고장 계산에 대해서 생각해 본다. 운전중인 송배전선에는 발전기, 변압기, 부하 등이 접속되어 있다. 또, 선



〈그림 1〉 2선지락이 발생된 3상 회로의 예

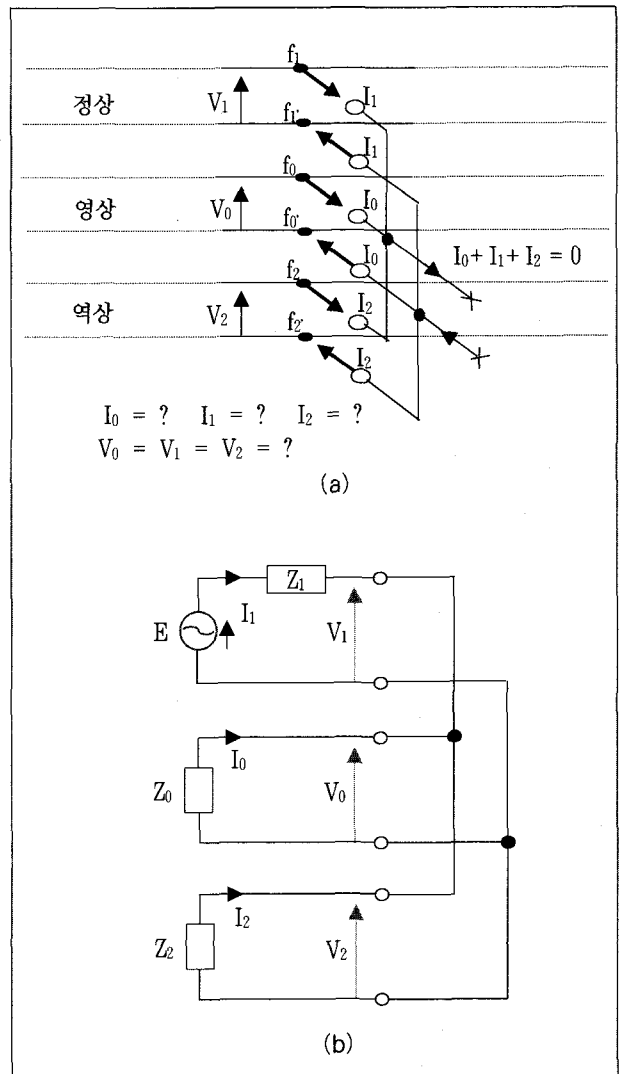
로는 임피던스가 있고, 더 나아가 중성점의 접지방식까지 고려할 필요가 있어서 송전선의 고장 계산은 간단하게 계산할 수 없다.

그림 1은 3상회로에서 2선지락이 발생된 경우를 나타낸 것이다. 일단 고장이 발생하였을 경우에는 그 단자가 고장지점이 되므로 그 단자로부터 이 때의 고장에 해당하는 회로를 만들어주면 된다. 가령 b상과 c상이 지락 되었을 경우 2선지락 고장일 것 같으면, b단자와 c단자로부터 대지까지 전선을 연결해서 접지해 주면 실제의 고장상태와 일치하게 된다.

지금 a, b, c단자로부터 본 영상, 정상 및 역상 임피던스를 각각, Z_0, Z_1, Z_2 라 하고, 고장 발생 직전의 대지전압(상전압)을 E_a 라고 한다면 발전기의 기본식이 그대로 송전망의 고장 계산에도 적용된다. 따라서 이제 필요한 것은 이 고장점에서 바라본 이들 대칭분 임피던스를 어떻게 산정하느냐 하는 문제이다.

고장점의 단자로부터 본 시스템 전체의 영상, 정상 및 역

상 임피던스를 구하기 위해서는 먼저 송배전 계통을 영상 전류가 흐르는 영상 회로, 정상 전류가 흐르는 정상 회로, 그리고 역상 전류가 흐르는 역상 회로의 3개의 대칭분 회로로 분해해서 계산해 주지 않으면 안된다. 이 대칭분 회로로부터 고장점에서 본 대칭분 임피던스가 산출되면 고장점의 대칭분 전압과 전류를 계산할 수 있다. 그림 2는



〈그림 2〉 등가 대칭분 회로

그림 1의 회로를 고찰하여 등가 대칭분 회로를 나타낸 것이다.

(1) 고장 조건

2선지락 사고의 경우 그림 1에서 고장점에 흐르는 전류는 다음과 같다.

A상 : I_a 는 0이다.

B상 : I_b 는 흐른다(이 전류값은 모르지만 흐를 수 있는 가능성은 있다).

C상 : I_c 는 흐른다(이 전류값은 모르지만 흐를 수 있는 가능성은 있다).

또 각 상의 전압은 다음과 같다.

A상 : V_a 는 나타날 수 있다(전압의 크기는 모르지만 나타날 수 있다).

B상 : V_b 는 0이다.

C상 : V_c 는 0이다.

이상과 같은 관계가 있으므로 이것과 같은 전류, 전압에 대응하는 영상, 정상, 역상이 어떤 관계가 되는지를 검토해 보면 된다.

(2) 대칭분의 전압

V_b 및 V_c 를 대칭분으로 나타내면

$$V_b = V_0 + a^2V_1 + aV_2 = 0$$

$$V_c = V_0 + aV_1 + a^2V_2 = 0$$

로 된다. 이로부터

$$\begin{aligned} V_b - V_c &= (a^2 - a)V_1 + (a - a^2)V_2 = 0 \\ &= (a^2 - a)(V_1 - V_2) = 0 \end{aligned}$$

한편, $a^2 - a \neq 0$ 이므로

$$V_1 - V_2 = 0, \therefore V_1 = V_2$$

를 얻는다. 이 관계를 V_b 의 식에 대입하면

$$V_b = V_0 + (a^2 + a)V_1 = V_0 - V_1 = 0$$

(여기서, $1 + a + a^2 = 0$ 의 관계를 사용한다.)

$$\therefore V_0 = V_1 = V_2 \dots\dots\dots (1)$$

이것으로 대칭분 전압의 관계가 밝혀졌다. 즉, 2선지락 고장일 경우에는 3개의 대칭분 전압(영상전압, 정상전압, 역상전압)의 크기와 위상각은 모두 같다는 것을 알 수 있다.

(3) 대칭분의 전류

3상 교류발전기의 기본식(3상 교류발전기의 유기전압은 3상 대칭이므로 영상전압과 역상전압은 0이다)은 다음과 같다.

$$V_0 = -Z_0I_0$$

$$V_1 = E_1 - Z_1I_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$V_2 = -Z_2I_2$$

따라서, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면

$$-Z_0I_0 = E_1 - Z_1I_1 \therefore I_0 = \frac{Z_1I_1 - E_1}{Z_0} \dots\dots\dots (3)$$

$$-Z_2I_2 = E_1 - Z_1I_1 \therefore I_2 = \frac{Z_1I_1 - E_1}{Z_2} \dots\dots\dots (4)$$

의 관계가 성립된다.

그리고 상기의 고장 조건에서 A상의 전류 I_a 는 0이므로 다음과 같다.

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \dots\dots\dots (5)$$

식 (3)과 식 (4), (5)를 3원 연립방정식으로서 풀면

$$I_0 = \frac{-Z_2E_a}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1Z_2}$$

$$I_1 = \frac{(Z_0 + Z_2)E_a}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1Z_2} \dots\dots\dots (6)$$

$$I_2 = \frac{-Z_0E_a}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1Z_2}$$

이 된다.

(4) 각 상의 전류와 전압

각 상의 전류와 전압은 위에서 구한 각 상의 대칭 성분을 사용해서 다음과 같이 계산한다. 먼저 실제의 지락 전

류 I_b 와 I_c 는 다음과 같다.

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = \frac{(a^2 - a)Z_0 + (a^2 - 1)Z_2}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} E_a \dots (7)$$

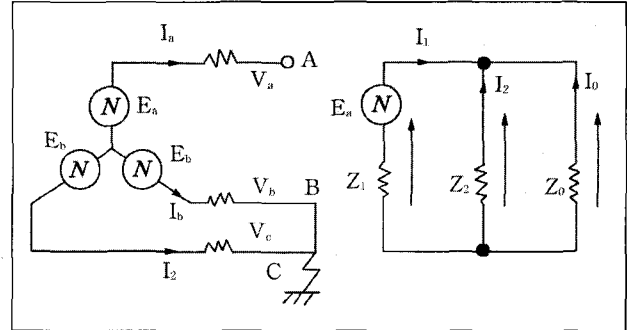
$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = \frac{(a - a^2)Z_0 + (a - 1)Z_2}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} E_a \dots (8)$$

건전상의 전압 V_a 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_a &= V_0 + V_1 + V_2 = 3V_0 \\ &= -3I_0 Z_0 = \frac{3Z_0 Z_2}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} E_a \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

식 (6)에서 I_1 은 식 (10)과 같이 바꾸어 쓸 수 있으며, 이것은 Z_0 와 Z_2 의 병렬 회로에 Z_1 이 직렬로 연결된 회로이므로 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_a}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_0 + Z_2} + \frac{Z_1 Z_0}{Z_0 + Z_2} + \frac{Z_2 Z_0}{Z_0 + Z_2}} \\ &= \frac{E_a}{\frac{Z_1(Z_0 + Z_2)}{Z_0 + Z_2} + \frac{Z_2 Z_0}{Z_0 + Z_2}} \end{aligned}$$



<그림 3> 2선지락의 대칭분 등가회로

$$= \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_0 + Z_2}} \dots \dots \dots (10)$$

지금까지 설명한 자료를 토대로 2선지락 고장이 3상회로에 발생하였을 때의 등가인 영상, 정상 및 역상의 회로 조건과 고장점에서의 전압, 전류를 정리하여 나타낸 것이 표 1이다.

<표 1> 모델 계통에서의 2선 지락 고장시의 등가회로와 전압, 전류의 관계

고장 양상	2 선 지 락 고 장 시
3상회로의 고장상태	<div style="margin-left: 200px;"> $V_a = ? \quad V_b = 0 \quad V_c = 0$ $I_a = 0 \quad I_b = ? \quad I_c = ?$ </div>
대칭회로의 등가조건	$V_b = 0, V_c = 0$ 그러므로 $V_0 = V_1 = V_2$ $I_a = 0$ 그러므로 $I_0 + I_1 + I_2 = 0$ 이 되지 않으면 안된다.

고장 양상	2 선 지락 고장 시	
<p>등가 대칭분 회로</p>		<p>$I_0 = ? \quad I_1 = ? \quad I_2 = ?$ $V_0 = V_1 = V_2 = ?$</p>
<p>고장점에서의 전압, 전류</p>		$I_1 = \frac{E}{Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}}$ $= \frac{(Z_0 + Z_2) E}{Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2}$ $= \frac{Z_0 + Z_2}{\Delta} E$ <p>단, $\Delta = Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2$</p> $I_0 = -\frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} I_1 = -\frac{Z_2}{\Delta} E$ $I_2 = -\frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} I_1 = -\frac{Z_0}{\Delta} E$ $V_1 = E - I_1 Z_1 = \frac{Z_0 Z_2 E}{\Delta}$ $= V_0 = V_2$ <p>초고압계통에서는 대체로</p> $I_1 = \frac{2}{3} \frac{E}{Z_1} \quad I_0 = -\frac{1}{3} \frac{E}{Z_1} \quad I_2 = -\frac{1}{3} \frac{E}{Z_1} \quad V_1 = V_2 \cong \frac{1}{3} E$ <p>특별고압계통에서는 대체로</p> $I_1 = -I_2 \cong \frac{1}{2} \frac{E}{Z_1} \quad I_0 \cong \frac{1}{2} \frac{E}{Z_0} \quad V_1 = V_0 = V_2 \cong \frac{1}{2} E$

고 장 양 상		2 선 지 락 고 장 시
고장점에서의 전압, 전류	3상 회로	$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = \frac{(a^2 - a)Z_0 + (a^2 - 1)Z_1 + Z_2}{\Delta} E$ $I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = \frac{(a - a^2)Z_0 + (a - 1)Z_2}{\Delta} E$ $V_a = V_0 + V_1 + V_2 = \frac{3Z_0 Z_2}{\Delta} E$
		<p>초고압계통에서는 대체로 $I_b \approx a^2 \frac{E}{Z_1}$ $I_c \approx a \frac{E}{Z_1}$ $V_a = E$</p> <p>특별고압계통에서는 대체로 $I_b \approx -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E}{Z_1} \approx I_c$ $V_a \approx \frac{3}{2} E$</p>

3. 맺음말

가공송전선로 또는 지중송전선로이건 간에 사고를 전혀 일으키지 않고 운전한다는 것은 불가능한 일이다. 특히 가공송전선로는 직접 자연에 노출되어 모든 기상조건의 영향을 받게 되므로 뇌해, 풍수해, 설해, 염진해, 기타 등으로 사고를 일으킬 우려가 많다.

송전선로에서 발생하는 사고중 가장 많은 것은 1선지락이지만, 이밖에 선간 단락, 2선지락, 심할 경우에는 3선지락(단락)으로까지 진전되는 사고가 있을 뿐만 아니라 때에 따라서는 단선 사고까지 발생하는 경우도 있다.

송전선에 지락 또는 단락 사고가 발생하면 얼마만한 크기

의 지락 전류 또는 단락 전류가 흐를 것인가 하는 것을 미리 알아둔다는 것은 매우 중요한 일이다. 왜냐 하면 고장에 대비한 차단기의 용량 결정 또는 차단기를 동작시키기 위한 보호계전기의 정정 등에 이를 전류값이 사용되기 때문이다.

또, 지락 전류가 대지에 흐르게 되면 이 전류에 의해서 전력선 부근을 통과하고 있는 통신선에 유도 장애를 일으키기 때문에 사전에 그 영향이 어느 정도에 달할 것인가도 알아둘 필요가 있다.

이러한 의미에서 고장 계산은 송전계통에서 고장시의 상태를 해석하여 지락 전류라든지 건전상의 전압 상승 등을 수치 계산으로 구함으로써 고장시의 상황에 대처할 수 있게 하는 것이라 하겠다. ■

<참고문헌>

- (1) 남재경, 김세동, 보호계전의 실무 이론(대칭좌표법에서 3상 각 상과 정상, 영상, 역상과의 관계), 전기저널, 통권 307호, No.7, 대한전기협회, 2002
- (2) 남재경, 김세동, 보호계전의 기초(고장사고시 전류의 흐름 관계), 전기저널, 통권 298호, No.10, 대한전기협회, 2001
- (3) 남재경, 김세동, 보호계전의 기초(대칭좌표법에서 영상 및 역상 회로의 이용 관계), 전기저널, 통권 303호, No.3, 대한전기협회, 2002
- (4) 남재경, 김세동, 보호계전의 실무 이론(1선 지락고장 사고에 대한 해석을 중심으로), 전기 저널, 통권312호, NO.12, 대한전기협회, 2002
- (5) 송길영, 최신 송배전공학, 동일출판사, 2001
- (6) 백영기 외, 전력계통 보호계전 시스템 기술의 현황과 전망, 대한전기학회 기술조사보고서, 1999
- (7) 신대승 편저, 보호계전 시스템 기술, 기다리출판사, 1993
- (8) 이종률 편저, 보호계전기 독본, 성안당, 1999
- (9) 植木久之, 모선과 전력 기기의 보호계전 시스템, 일본전기서원, 1976