

보호계전의 실무 이론

— 1선지락 고장 사고에 대한 해석을 중심으로 —

남 재 경 (주)파워 토스 기술이사, 기술사
김 세 동 두원공과대학 교수/공학박사, 기술사

1. 머리말

3상 단락 고장처럼 각 상이 평형된 고장에서는 고장점을 중심으로 여기에 인가된 전압과 임피던스를 구해서 쉽게 고장 해석을 할 수 있다. 그러나 각 상이 불평형되는 1선지락과 같은 불평형 고장에서는 각 상에 걸리는 전압을 따로 따로 구해야 하는데, 실제적으로 고장 계산이 매우 복잡해서 대칭좌표법을 빌리지 않고서는 3상 회로의 불평형 문제를 다룰 수 없다. 즉, 비대칭성의 불평형 전압이나 전류를 대칭성의 3성분으로 분해하여 해석하는 대칭좌표법(Method of Symmetrical Coordinate)을 이용하면 보다 용이하게 회로 해석을 할 수 있는 경우가 많다.

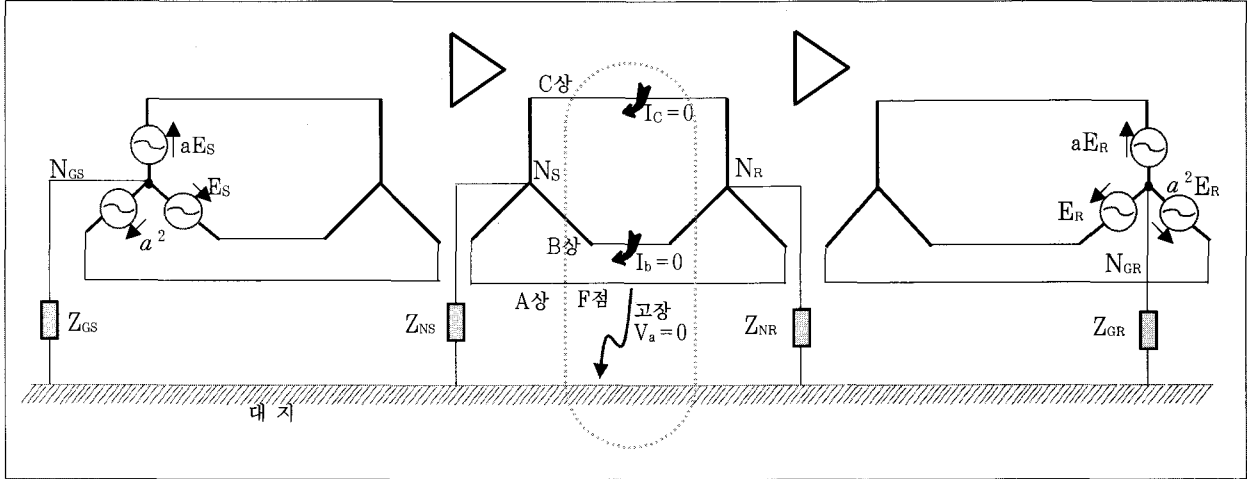
대칭좌표법이란 한마디로 말해서 3상 회로의 불평형 문제를 푸는 데 사용되는 계산법이다. 이것은 불평형인 전류나 전압을 그대로 취급하지 않고, 대칭적인 3개의 성분으로 나누어서 각각의 대칭분이 단독으로 존재하는 경우의 계산을 실시한 다음, 마지막으로 그들 각 성분의 계산 결과를 중첩시켜서 실제의 불평형 값을 알고자 하는 방법이다. 그러므로 계산 도중에는 언제나 평형 회로의 계산만 하게 되고, 각 성분의 계산이 끝난 다음 이들을 중첩함으로써 비로소 불평형 문제의 해가 얻어지게 되는 것이다.

대칭좌표법이 보호 계전의 동작 관계 및 불평형 회로의 고장 계산을 검토하는데 매우 큰 도움을 주고 있으며, 본 고에서는 3상 회로에서 1선지락 고장 사고가 발생된 경우의 고장 전류 및 건전상의 전압에 대한 해석에 대해서 설명하고자 한다.

2. 1선지락 고장 사고시의 해석

송전계통에서 고장이 일어났을 경우에 고장점에 흐르는 전류라든지 건전상의 전위 상승이 어떻게 될 것인가 하는 고장계산에 대해서 생각해 본다. 운전중인 송전선에는 발전기, 변압기, 부하 등이 접속되어 있다. 또, 선로에는 임피던스가 있고, 더 나아가 중성점의 접지방식까지 고려할 필요가 있어서 송전선의 고장계산은 간단하게 계산할 수 없다.

그림 1은 3상 회로의 F점에서 1선지락이 발생된 경우를 나타낸 것이다. 일단 고장이 발생하였을 경우에는 그 단자가 고장지점이 되므로 그 단자로부터 이 때의 고장에 상당하는 회로를 만들어 주면 된다. 가령 a상만이 지락하였을 경우의 1선지락 고장일 것 같으면 a단자로부터 대지까지 전선을 연결해서 접지해 주면 실제의 고장상태와 일치하게 된다.

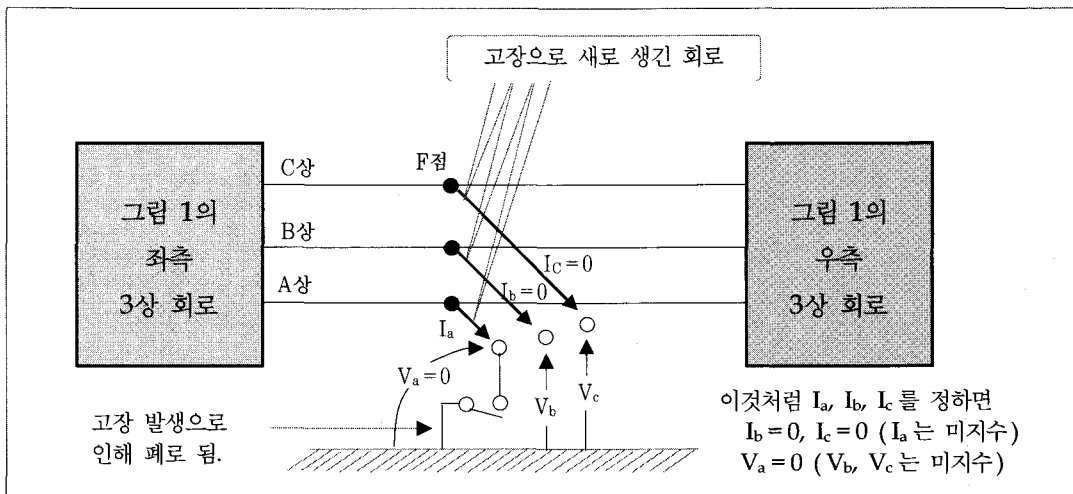


〈그림 1〉 1선지락이 발생된 3상 회로의 예

지금 a, b, c 단자로부터 본 영상, 정상 및 역상 임피던스를 각각 Z_0 , Z_1 , Z_2 라 하고, F점의 고장 발생 직전의 대지전압(상전압)을 E_a 라고 한다면 발전기의 기본식이 그대로 송전망의 고장 계산에도 적용된다. 가령 송전선로의 F점에서 1선지락 고장이 발생하였다면, 이때의 1선지락 전류 I_e 는 $I_0 + I_1 + I_2 = \frac{3 E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$ 로

쉽게 계산할 수 있다.

따라서, 이제 필요한 것은 이 고장점에서 바라본 이들 대칭분 임피던스를 어떻게 산정하느냐 하는 문제이다. 고장점의 단자로부터 본 계통 전체의 영상, 정상 및 역상 임피던스를 구하기 위해서는 먼저 송전계통을 영상전류가 흐르는 영상회로, 정상전류가 흐르는 정상회로, 그리고



〈그림 2〉 고장점의 고찰

역상전류가 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 1의 회로를 고찰하여 새로 그린 것이며, 그림 1의 지락 사고점인 F점(a상)에서 외부로 새로 쏘는 화살표선으로 된 회로가 생기게 된다. 이 고장으로 3상 회로에서 외부로 빠져 나온 새로운 회로에 대응하는 영상, 정상 및 역상 회로를 검토해야 한다. 따라서 그림 3과 같이 그림 2에 대응하는 대칭분에 대한 고장점을 나타낼 수 있다.

가. 고장 조건

1선지락 사고의 경우(그림 1에서) F점의 쏘는 선에 흐르는 전류는 다음과 같다.

A상 : I_a 가 흐른다(이 전류 값은 모르지만 어쨌든

흐를 수 있는 가능성은 있다).

B상 : I_b 는 0이다.

C상 : I_c 는 0이다.

또, 각 상의 전압은 다음과 같다.

A상 : V_a 는 0이다.

B상 : V_b 가 나타날 수 있다(전압의 크기는 모르지만 전압이 나타날 수 있다).

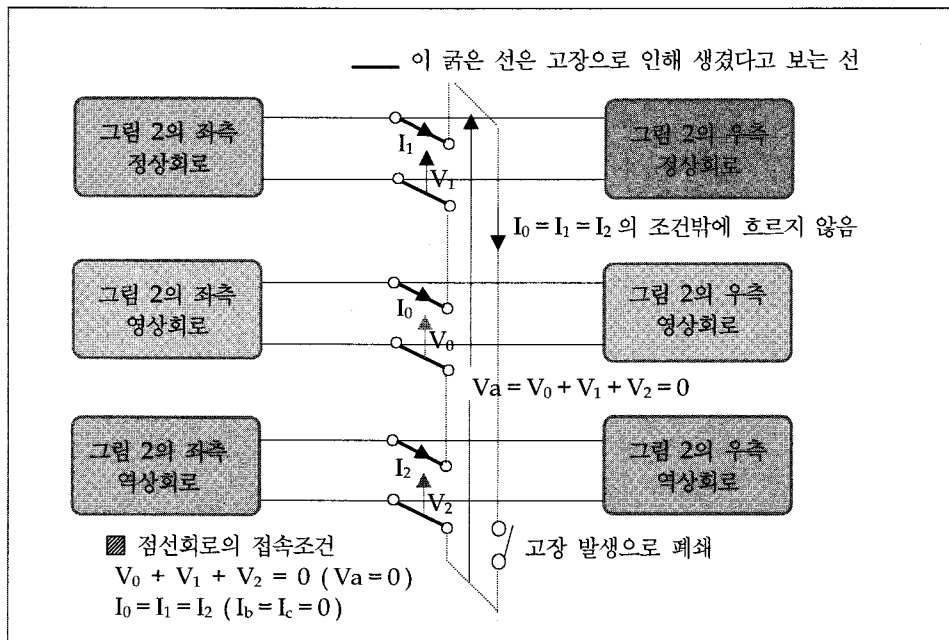
C상 : V_c 가 나타날 수 있다(전압의 크기는 모르지만 전압이 나타날 수 있다).

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

나. 대칭분의 전류

I_b 및 I_c 를 대칭분으로 나타내면

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = 0$$



〈그림 3〉 대칭분에 의한 고장점

$$I_c = I_0 + aI_1 + a^2I_2 = 0$$

로 된다. 이로부터

$$\begin{aligned} I_b - I_c &= (a^2 - a)I_1 + (a - a^2)I_2 \\ &= (a^2 - a)(I_1 - I_2) = 0 \end{aligned}$$

한편 $a^2 - a \neq 0$ 이므로

$$I_1 - I_2 = 0, \quad \therefore I_1 = I_2$$

이 관계를 I_b 의 식에 대입하면

$$I_b = I_0 + (a^2 + a)I_1 = I_0 - I_1 = 0$$

$$\therefore I_0 = I_1 = I_2$$

이것으로 3개의 대칭분 전류의 관계가 밝혀졌다. 즉, 1선지락 고장일 경우에는 3개의 대칭분 전류(영상전류, 정상전류, 역상전류)의 크기와 위상각은 모두 같다는 것을 알 수 있고, 1선지락시에는 동일한 방향으로 밖에는 흐를 수 없는 조건임을 알 수 있다.

다. 대칭분의 전압

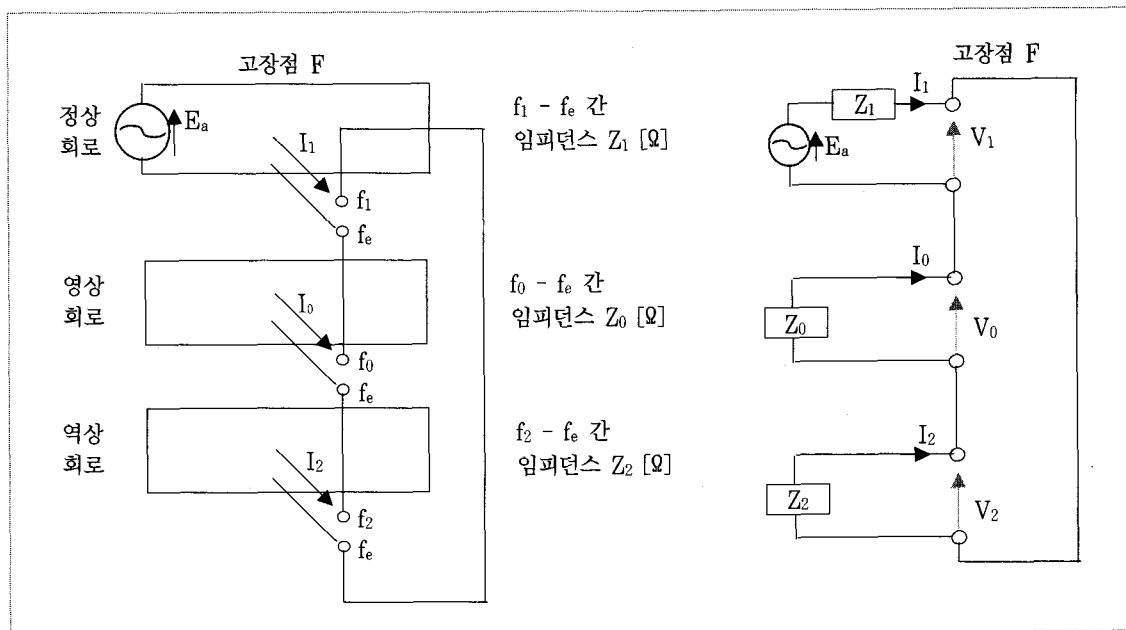
a상이 접지되고 있으므로 ($V_a = 0$) 다음의 식과 같다.

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = 0$$

위의 식에서 보는 바와 같이 전압에 대해서는 그림 4에서 영상회로의 f_0 와 f_e 단자 간의 전압(V_0), 정상회로의 f_1 과 f_e 단자 간의 전압(V_1) 및 역상회로 f_2 와 f_e 단자 간의 전압(V_2)를 서로 더해(이것이 f_a 와 f_e 단자 간의 전압 V_a 와 같게 된다) 이것을 단락하여 그 전압을 0[V]로 하면 된다. 이와 같이 그림 4와 같은 대칭분 회로를 이해한다면, 전원이 1개소만 존재하므로 옴의 법칙에 의해 전류의 흐름도 쉽게 구할 수 있다.

발전기의 기본식을 여기에 대입하면

$$\begin{aligned} V_a &= -Z_0I_0 + E_a - Z_1I_1 - Z_2I_2 \\ &= E_a - (Z_0 + Z_1 + Z_2)I_0 = 0 \end{aligned}$$



〈그림 4〉 1선지락시의 대칭분 회로

$$I_0 = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = I_1 = I_2$$

로 되어 고장 직전의 고장점 전압 E_a 만 알면 I_0, I_1, I_2 의 크기를 계산할 수 있다.

다음에 건전상의 전압 V_b, V_c 는 위의 대칭분 전류를 발전기의 기본식에 대입해서 구하면 다음과 같다.

$$V_0 = -Z_0 I_0 = -\frac{Z_0 E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

$$V_1 = E_a - Z_1 I_1 = E_a - \frac{Z_1 E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

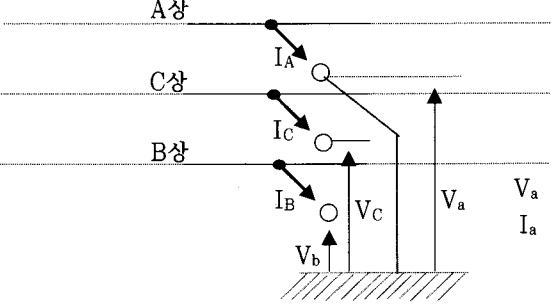
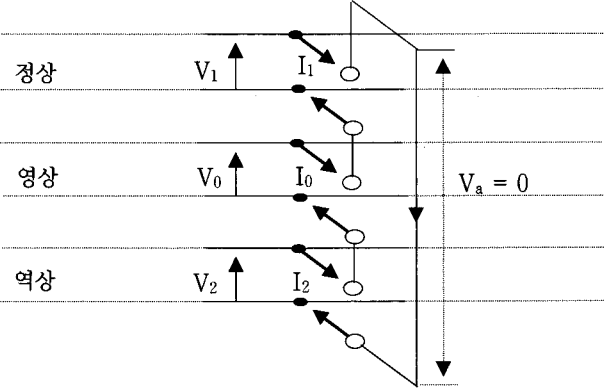
$$= \frac{(Z_0 + Z_2)}{Z_0 + Z_1 + Z_2} E_a$$

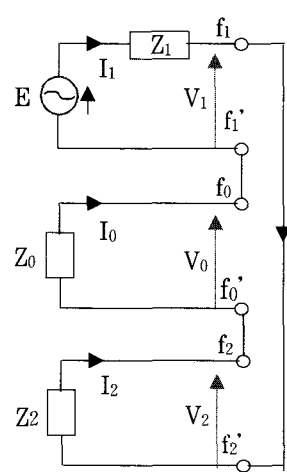
$$V_2 = -Z_2 I_2 = -\frac{Z_2 E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

라. 각 상의 전류와 전압

각 상의 전압과 전류는 위에서 구한 각 상의 대칭 성분

〈표 1〉 모델 계통에 있어서의 1선지락 고장시의 등가회로와 전압, 전류의 관계

고장 양상	1선 지락 고장시
3상회로의 고장상태	
대칭회로의 등가조건	$V_a = 0$ 에서 $V_0 + V_1 + V_2 = 0$ $I_b = I_c = 0$ $I_0 = I_1 = I_2$ 가 되지 않으면 안된다.
등가 대칭분 회로	

고장 양상	1선 지락 고장 시	
고장점에서의 전압, 전류	대칭 회로	 $V_0 = -I_0 Z_0 = \frac{-Z_0}{Z_0 + Z_1 + Z_2} E$ $V_2 = -I_2 Z_2 = \frac{-Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} E$ <p>초고압 계통에서는 대체로 $Z_0 \approx Z_1 \approx Z_2$ 이므로</p> $I_1 = I_0 = I_2 = \frac{1}{3} \frac{E}{Z_1} \quad V_1 = \frac{2}{3} E$ $V_0 = \frac{1}{3} E \quad V_2 = \frac{1}{3} E$ <p>특별고압 계통에서는 대체로 $Z_0 \gg Z_1$ 혹은 Z_2 이므로</p> $I_1 = I_0 = I_2 = \frac{E}{Z_0}$ $V_1 = E \quad V_0 = -E \quad V_2 = 0$ <p>윗 그림에서</p> $I_1 = I_0 = I_2 = \frac{E}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad V_1 = E - I_1 Z_1 = \frac{Z_0 + Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} E$
	3상 회로	$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = \frac{3E}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$ $V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 = \frac{(a^2 - 1)Z_0 + (a^2 - a)Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} E$ $V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 = \frac{(a - 1)Z_0 + (a - a^2)Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} E$ <p>초고압계통에서는</p> $I_a \approx \frac{E}{Z_1}$ $V_b = a^2 E \quad V_c = aE$ <p>특고압 계통에서는</p> $I_a \approx \frac{3E}{Z_0}$ $V_b = (a^2 - 1)E$ $V_c = (a - 1)E$

을 사용해서 다음과 같이 계산한다. 먼저, a상의 접지전류 I_a 는 다음과 같다.

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

건전상의 전압 V_b, V_c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 = \frac{(a^2 - 1)Z_0 + (a^2 - a)Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} E_a$$

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

$$= \frac{(a-1)Z_0 + (a-a^2)Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} E_a$$

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

3. 맺음말

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

송전선로에서 발생하는 사고중 가장 많은 것은 1선지

락이지만, 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 크기의 지락전류 또는 단락전류가 흐를 것인가 하는 것을 미리 알아둔다는 것은 매우 중요한 일이다. 왜냐하면 고장에 대비한 차단기의 용량 결정 또는 차단기를 동작시키기 위한 보호계전기의 정정 등에 이를 전류값이 사용되기 때문이다.

또, 지락전류가 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 지락전류라든지 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) 송길영, 최신 송배전공학, 동일출판사, 2001
- (5) 백영기 외, 전력계통 보호계전 시스템 기술의 현황과 전망, 대한전기학회 기술조사보고서, 1999
- (6) 신대승 편저, 보호계전 시스템 기술, 기다리출판사, 1993
- (7) 이종률 편저, 보호계전기 독본, 성안당, 1999
- (8) 植木久之, 모선과 전력기기의 보호계전 시스템, 일본전기서원, 1976