

계통확장을 고려한 송전선로 1선지락 고장전류의 계산

최종기*, 신복현**, 김재준***, 김태영***, 이동일*
 한국전력공사 *전력연구원, **경영혁신실, ***송변전건설계획처

Calculation of Ground Fault Current considering Optional Increase of Power System Capacity

Jong-kee Choi, Bok-hyun Shin, Jae-joon Kim, Tai-young Kim, Dong-il Lee
 Korea Electric Power Corp.

Abstract - 전력계통의 고장계산에는 상호 결합된 삼상회로를 결합이 없는 단상회로 3개, 즉 영상, 정상, 역상의 대칭요소로 변환하여 해석하는 대칭좌표법이 널리 사용되고 있다. PSS/E는 국내 전력회사에서 고장계산을 위해 널리 사용되어온 상용 프로그램이며, 고장계산 결과는 차단기 등 각종 기기의 정격의 결정 등에 이용된다. 특수한 경우에 지락사고 해석시 과도한 안전여유를 고려하는 것이 필요한 경우가 있다. 본 논문에서는 송전선로 지락시 등가 전원단 용량이 임의로 증가했을 때에 송전선로 중간의 임의 지점의 지락고장전류를 계산하는 수식을 유도하였으며, PSS/E 계산값과의 비교를 통해 계산방법의 신뢰성을 검증하였다.

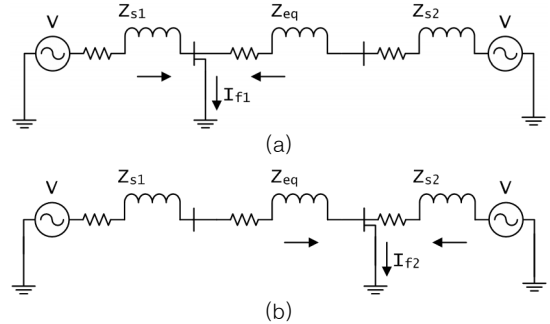
$$\frac{V}{I_f} = Z_{eq} = Z_s + Z_p - \frac{Z_m^2}{Z_n} \quad (3)$$

그림 2는 송전선로 양단에 전원단(변전소)이 있는 경우를 상정하고 각 변전소 모선의 지락사고를 표현한 것이다. 각 변전소의 지락고장전류 I_{f1} , I_{f2} 는 식 (3)과 식 (4)로 기술된다. 이 식들을 각 전원단의 전원임피던스 Z_{s1} , Z_{s2} 로 정리한 것이 식 (6)과 식 (7)이다.

1. 서 론

송전선로의 지락사고시 접지체, 즉 송전철탑의 탑각접지를 통해 전원단으로 귀환하는 전류는 해당 탑각 뿐 아니라 탑각 부근의 대지전위도 상승시키게 된다. 이러한 대지전위의 상승으로부터 철탑 인근에 매설된 가스배관을 보호하기 위해서는 배관의 전위, 즉 배관이 매설된 대지의 전위값을 평가하는 것이 필요해진다. 문제는 대지전위가 해당 지역의 대지저항율과 지락점에서 고장전류의 접지 분류계수에 크게 의존적이라는 것이다. 따라서 배관전위 억제에 위한 일률적인 기준, 예를 들면 송전철탑과 매설배관간 적정 이격거리 등의 제시는 곤란하며, 해당 건 발생시마다 현장의 대지저항율 측정과 계통해석을 근거로 적정 이격거리가 산정되어야 한다[1,2,3,4].

본 논문은 송전철탑과 매설배관 간 적정 이격거리 평가를 위해서 필요한 지락전류의 계산방법에 관하여 기술하였다. 기본적인 방법은 PSS/E의 SCMU activity를 이용해서 송전선로 임의점의 지락전류를 계산하는 것이나, 본 논문에서 제안한 수식을 이용하면 각 전원단(변전소)의 1선지락 고장전류값을 토대로 별도의 PSS/E 수행없이도 지락전류를 계산할 수 있다. 본 논문의 제안된 수식 방법의 장점은 전원임피던스를 일정 비율로 임의 조정함으로써 지락고장전류 측면에서 가혹한 조건을 쉽게 고려할 수 있다는 점이다. 예를 들어 154 kV 전원단(변전소)의 지락전류를 최대 50 kA로 상정함으로써 가혹한 지락전류를 산정할 수 있다. 이처럼 특정 전원단의 고장용량을 조절함으로써 안전여유를 충분히 고려함으로써 적정 이격거리 산정에 있어서 특정 지락점의 최대 지락고장전류를 상수로 간주할 수 있게 된다.



〈그림 2〉 좌우 전원단 지락시 고장전류 계산모델

$$I_{f1} = \frac{V}{Z_{s1}} + \frac{V}{Z_{s2} + Z_{eq}} \quad (4)$$

$$I_{f2} = \frac{V}{Z_{s1} + Z_{eq}} + \frac{V}{Z_{s2}} \quad (5)$$

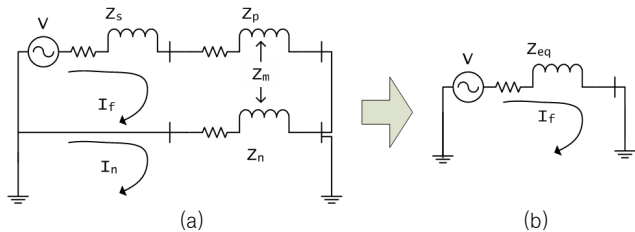
$$Z_{s1} = \frac{V - I_{f1} \cdot (Z_{eq} + Z_{s2})}{V - I_{f1} \cdot (Z_{eq} + Z_{s2})} \quad (6)$$

$$Z_{s2} = \frac{V - I_{f2} \cdot (Z_{eq} + Z_{s1})}{V - I_{f2} \cdot (Z_{eq} + Z_{s1})} \quad (7)$$

2. 본 론

2.1 송전선로 지락고장전류 계산식의 유도

그림 1은 부하전류를 무시했을 때 간단한 1선지락 회로모델을 보인 것이다. 그림 1(a)에서 키르히호프 전압법칙을 적용하여 식 (1)~식 (2)의 방정식을 기술할 수 있다. 이 방정식을 전원전압(V)와 고장전류(I_f)에 대해 정리하면 식 (3)을 유도할 수 있으며, 등가회로는 그림 1(b)와 같이 표현된다.



〈그림 1〉 1선지락전류 계산을 위한 등가회로

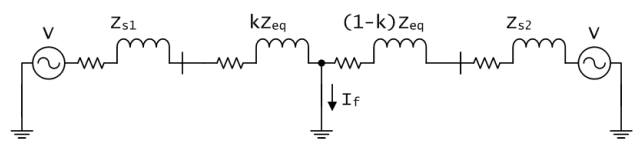
$$V = (Z_s + Z_p)I_f + Z_n(I_f - I_n) - Z_m(I_f - I_n) - Z_n I_f \quad (1)$$

$$0 = (I_f - I_n)Z_n - Z_m I_f \quad (2)$$

식 (7)을 식 (6)의 Z_{s1} 에 대입하여 Z_{s2} 로 정리하면 한 쪽 전원단의 임피던스를 식 (8)과 같이 구할 수 있으며, 이렇게 구한 Z_{s2} 를 식 (6)에 다시 대입하면 나머지 전원단의 임피던스(Z_{s1})도 구할 수 있다.

$$Z_{s2} = \frac{Z_{eq}(-I_{f1}I_{f2}Z_{eq} + 2VI_{f1} \pm \sqrt{I_{f2}^2 Z_{eq}^2 I_{f1}^2 + 4V^2 I_{f1}I_{f2}})}{2(I_{f1}I_{f2}Z_{eq} + VI_{f2} - VI_{f1})} \quad (8)$$

송전선로 전체 길이를 1.0으로 보고 선로 임의위치를 k라고 하면 k점의 지락고장 회로모델과 그 점의 지락전류 I_f 는 그림 3과 식 (9)로 표현할 수 있다. (단, $0 \leq k \leq 1$)



〈그림 3〉 송전선로 임의점의 지락시 고장전류 계산모델

$$I_f(k) = \frac{V}{Z_{s1} + kZ_{eq}} + \frac{V}{Z_{s2} + (1-k)Z_{eq}} \quad (9)$$

2.2 등가 선로임피던스 Z_{eq} 의 산정

식 (10)~(13)은 대칭좌표법으로 1선지락 전류(I_f)를 계산하는 절차와 그림 1 우측회로의 등가 선로임피던스(Z_{eq})와의 관계를 보인 것이다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$V = (V_0 + V_1 + V_2) \quad (11)$$

$$I_f = 3I_0 = \frac{3V}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = \frac{V}{Z_{eq}} \quad (12)$$

$$Z_{eq} = \frac{1}{3}(Z_0 + 2Z_1) \quad (\text{단, } Z_1 = Z_2) \quad (13)$$

(단, V_0, V_1, V_2 : 영상, 정상 및 역상전압 [pu]

Z_0, Z_1, Z_2 : 영상, 정상 및 역상임피던스 [pu]

I_0, I_1, I_2 : 영상, 정상 및 역상전류 [pu]

Z_{eq} : 등가 선로임피던스 [pu], V : 상-대지간 계통전압 [pu]

식 (14)~(17)은 2회선 송전선로(c1, c2)에서 선로간 상호임피던스(Z_m)를 고려했을 때의 등가임피던스(Z_{eq}) 계산식의 유도과정을 보인 것이다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \\ - \\ V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 & | & Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 & | & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & + & - & - & - \\ Z_m & 0 & 0 & | & Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1,0} \\ I_{c1,1} \\ I_{c1,2} \\ - \\ I_{c2,0} \\ I_{c2,1} \\ I_{c2,2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_0 + Z_m}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z_1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z_2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

(단, $I_0 = I_{c1,0} + I_{c2,0}, I_1 = I_{c1,1} + I_{c2,1}, I_2 = I_{c1,2} + I_{c2,2}$)

$$I_f = 3I_0 = \frac{3V}{\left(\frac{Z_0 + Z_m}{2} + \frac{Z_1}{2} + \frac{Z_2}{2}\right)} = \frac{V}{Z_{eq}} \quad (16)$$

$$Z_{eq} = \frac{1}{3} \left(\frac{Z_0 + Z_m}{2} + Z_1 \right) \quad (\text{단, } Z_1 = Z_2) \quad (17)$$

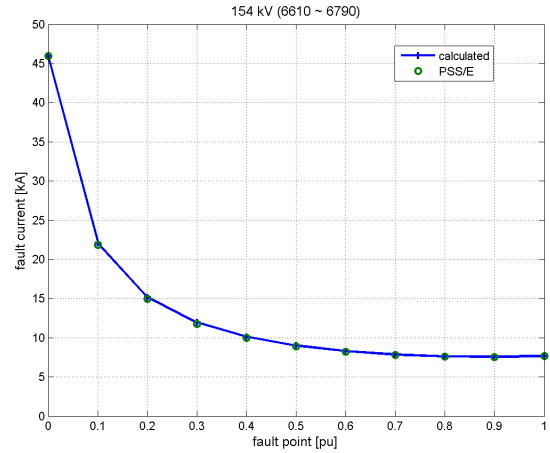
2.3 선로정수와 전원임피던스 추출

154 kV 이상 국내 전 계통의 전원단 임피던스를 산정하기 위하여 PSS/E의 ASCC activity와 PSS/E에서 기본으로 제공되는 python 인터프리터를 이용한 일괄처리로 154 kV 이상 전 변전소의 1선지락 고장전류를 계산하였다. 2.1절에 기술한 절차에 따라 전 모선에서의 전원임피던스를 산정하였으며, PSS/E 입력데이터(*.raw, *.seq)로부터 영상, 정상 및 상호임피던스를 추출하여 2.2절의 계산방법에 의해 154 kV 이상 전 송전선로의 등가 임피던스(Z_{eq})를 계산하였다. 단, 선로임피던스와 지락고장전류가 지나치게 작은 데이터는 제외하였다. 본 논문의 계산식과의 비교를 위해서 PSS/E의 SCMU activity와 python을 이용한 일괄처리를 통해 해당 선로의 10%~90% 지점(총 700여 선로, 한 선로당 9개, 총 약 6,300여 지점)의 지락전류를 계산하였다.

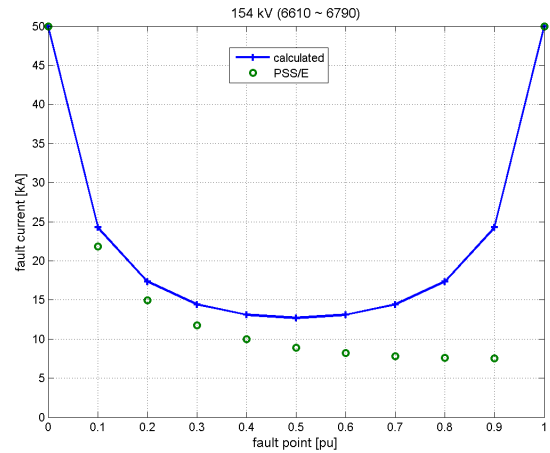
2.4 사례연구

그림 4는 154 kV 송전선로의 10%~90% 지점에서 1선지락시 PSS/E로 계산한 고장전류와 식 9를 이용한 계산값을 비교한 사례를 보인 것이며, 그림 5는 각 전원단의 고장용량이 차단기 최대용량인 50 kA인 경우를 상정했을 때의 고장전류와 원래 PSS/E 계산값을 비교한 것이다.

전원단(변전소)까지 고려한 총 7,000여개 고장점의 PSS/E 1선지락 고장전류 계산값을 기준으로 식 9로 계산한 값들의 오차분포를 계산한 결과, 총 고장점의 85%가 오차범위 5% 이내이며, 오차범위 10% 이내인 경우가 총 고장점의 97.5%를 차지하는 것으로 나타났다. 식 9의 계산 결과 오차가 커지는 주요한 원인은 두 모선간 2회선 선로를 회선 1,2로 구분하지 않고 각각 다른 모선번호를 사용한 경우에 2회선 선로의 각 회선을 동일 선로로 인식하지 못하기 때문이다. 이 경우 등가 선로임피던스(Z_{eq})를 계산할 때 회선간 상호임피던스가 고려되지 않으므로, 이 해결을 위하여 모선번호가 다르면서도 상호임피던스를 고려해야 하는 경우를 식별하기 위한 알고리즘이 추가가 필요하였다.



<그림 4> 송전선로 1선지락시 고장전류



<그림 5> 전원단 고장용량 증가시 1선지락시 고장전류

3. 결 론

본 논문에서는 PSS/E ASCC activity로 계산한 변전소 지락전류와 송전선로의 대칭요소 임피던스를 이용하여 송전선로 임의지점의 1선지락시 고장전류를 계산하는 계산식을 유도하였으며, 이 식을 이용하여 구한 7,000여 지점의 고장전류값과 PSS/E SCMU activity로 구한 고장전류값과의 비교를 통해 제안한 계산방법의 신뢰성을 확인하였다. 제안한 방법은 송전철탑-매설배관간 적정 이격거리의 초기 검토시 가혹한 고장조건을 상정하기 위하여 활용할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] BC Hydro and Power Authority, Study of Problems associated with Pipelines occupying Joint-Use Corridors with AC Transmission Lines, CEA No.75-02, 1975
- [2] Powertech Labs Inc., Powerline Ground Fault Effects on Pipelines, CEA 239-T-817, 1994
- [3] ITT Research Institute, Mutual Design Considerations for Overhead AC Transmission Lines and Gas Transmission Pipelines, Vol. 1, PRCI No. PR-132-80, 1978
- [4] Ontario-Hydro & Welding Institute of Canada, Effect of Powerline Faults on Pipelines in a Common Corridor (PHASE I), CEA 239-T-532, 1987
- [5] Power Technologies, Inc., PSS/E Program Application Guide, 2002
- [6] 산업자원부, 전력선 접지점과 매설배관의 이격거리 표준화 (1차년도 중간보고서), 2006