

### 3상회로의 직접해석에 의한 배전계통 선간단락 사고 고장거리 계산 알고리즘

진보권 최면송 이승재  
명지대학교 차세대전력기술연구센터

윤남선 정병태 이덕수  
P&C Tech

#### A new line to line fault location algorithm in distribution power networks using 3 phase direct analysis

B.G.Jin M.S.Choi S.J.Lee  
Next-generation Power Technology Center

N.S.Yoon B.T.Jung D.S.Lee  
P&C Tech

**Abstract** - In this paper, a fault location algorithm is suggested for line to line faults in distribution networks. Conventional fault location algorithms use the symmetrical component transformation, a very useful tool for transmission network analysis. However, its application is restricted to balanced network only. Distribution networks are, in general, operated in unbalanced manners, therefore, conventional methods cannot be applied directly, which is the reason why there are few research results on fault location in distribution networks. Especially, the line to line fault is considered as a more difficult subject. The proposed algorithm uses direct 3-phase circuit analysis, which means it can be applied not only to balanced networks but also to unbalanced networks like distribution a network. The comparisons of simulation results between one of conventional methods and the suggested method are presented to show its effectiveness and accuracy.

배전계통에서 1선지락의 경우에서 전압, 전류의 고조파 성분을 이용하는 방법과 기본파 성분, 선로 파라미터를 이용하는 방법으로 나눌 수 있으며, 배전 계통의 다양한 특이성을 고려하기 위해 전압, 전류를 재계산하는 방법이 소개되었다[6].

본 논문에서는 고장 저항을 포함하는 송배전 계통 선간단락 사고시 대칭좌표법을 사용하지 않고 직접 3상회로를 해석하여 고장점을 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 보호계전기가 설치된 위치에서 측정된 기본파 전압, 전류만을 사용하였으며 고장점 저항의 영향을 배제한 알고리즘이다.

EMTP(Electro Magnetic Transient Program)를 이용하여 사례연구를 행하였고 그 결과를 명시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 3상 직접계산에 의한 고장점 검출 알고리즘

그림 1의 계통을 불평형을 포함하는 일반적인 계통으로 가정할 때 계전기 설치점 A상의 전압방정식은 다음과 같다.

## 1. 서 론

전력 계통에서 송배전 선로는 전원단과 수용가를 연결하는 중요한 역할을 하며 대기중에 노출되어 있음으로써 뇌우, 동물의 접촉, 보호기기의 오·부 동작, 그리고 기타 다양한 사고 등의 원인으로 전력계통의 다른 요소들에 비하여 사고가 매우 빈번하게 발생한다. 선로에서 사고가 발생할 경우 사고 발생지점을 빠르고 정확하게 찾아내고 신속한 고장복구를 하는 것이 정전 비용을 최소화하며 더 나아가 서비스 신뢰도와 전력의 질을 높이는 측면에서 매우 중요하다. 정확하고 신속하게 고장점을 검출하는 것이 매우 중요하며, 따라서 송배전 선로 상에서 고장발생시 고장점까지의 거리를 계산하는 고장점 검출 알고리즘은 최근 10여년 동안 활발히 연구되어 왔다.[1-3]

송전계통은 일반적으로 3상 평형회로이므로 대칭좌표법[4]을 널리 이용하고 있으며 이를 사용한 전류분배계수, 보상 등의 방법을 적용하여 보다 정확한 고장점 검출 방법들이 제안되어 현재 송전계통의 고장점 추정장치로 널리 사용된다. 그러나 배전계통은 선로의 비동질성, 부하 전류, 다중의 부하 탭 등의 이유로 불평형 계통이다. 이 불평형 요인 때문에 고장해석의 가장 기본이 되는 대칭좌표법을 배전계통에서는 사용할 수 없어 매우 복잡하고 어려운 문제로 인식되어 왔다[5]. 일반적으로 선로사고는 1선지락과 선간단락 두 가지로 나누어지며 그 외의 모든 사고는 이 두 가지 사고로 표현된다. 그러나 배전계통의 고장검출에 대한 연구는 거의 모두 1선지락에 관한 것으로 한정되어 왔으며 선간 단락사고 알고리즘은 제안되지 않은 것이 사실이다.

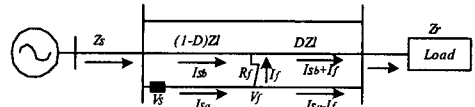


그림 1. 3상 평형 모의계통도

Fig. 1. Simplified diagram of a 3 phase balanced power network

$$V_{s_a} - V_{s_b} = I_f R_f + (1-D)(Zl_{aa}I_{s_a} + Zl_{ab}I_{s_b} + Zl_{ac}I_{s_c} - Zl_{bb}I_{s_b} - Zl_{bc}I_{s_a} - Zl_{bc}I_{s_c}) = (1-D)((Zl_{aa} - Zl_{bb})I_{s_a} - (Zl_{bb} - Zl_{ab})I_{s_b} + (Zl_{ac} - Zl_{bc})I_{s_c}) + I_f R_f \quad (1)$$

이를 상수를 정의하여 간단하게 표시하면 다음과 같다.

$$A_1 - (1-D)(B_1 I_{s_a} + B_2 I_{s_b} + B_3 I_{s_c}) - I_f R_f = 0 \quad (2)$$

$$A_1 = V_{s_a} - V_{s_b}$$

$$B_1 = Zl_{aa} - Zl_{bb}$$

$$B_2 = Zl_{ab} - Zl_{bb}$$

$$B_3 = Zl_{ac} - Zl_{bc}$$

그리고 고장지점의 전압을 부하쪽 임피던스와 부하전류로 나타내고 간단하게 변수 행렬을 정의하여 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} DZl_{aa} + Zr_{aa} & DZl_{ab} + Zr_{ab} & DZl_{ac} + Zr_{ac} \\ DZl_{ba} + Zr_{ba} & DZl_{bb} + Zr_{bb} & DZl_{bc} + Zr_{bc} \\ DZl_{ca} + Zr_{ca} & DZl_{cb} + Zr_{cb} & DZl_{cc} + Zr_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{s_a} - I_f \\ I_{s_b} + I_f \\ I_{s_c} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{s_a} - I_f \\ I_{s_b} + I_f \\ I_{s_c} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서  $Zr_{abc} = \begin{bmatrix} Zr_{aa} & Zr_{ab} & Zr_{ac} \\ Zr_{ba} & Zr_{bb} & Zr_{bc} \\ Zr_{ca} & Zr_{cb} & Zr_{cc} \end{bmatrix}$ : 부하 임피던스 행렬이며 고장점 전압 차는 고장전류와 고장저항의 곱과 같다.

$$V_{f_a} - V_{f_b} = I_f R_f \quad (4)$$

이를 이용하여 식 (3)에서 고장전류에 관한 식을 구하면 다음과 같다.

$$I_f R_f = a_{11}(I_{s_a} - I_f) + a_{12}(I_{s_b} + I_f) + a_{13}I_{s_c} - a_{21}(I_{s_a} - I_f) - a_{22}(I_{s_b} + I_f) - a_{23}I_{s_c} \quad (5)$$

이를 고장전류에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$(R_f + a_{11} - a_{21} + a_{22} - a_{12})I_f = (a_{11} - a_{21})I_{s_a} + (a_{12} - a_{22})I_{s_b} + (a_{13} - a_{23})I_{s_c} \quad (6)$$

이로부터  $I_f R_f$ 를 구하면 다음과 같다.

$$I_f R_f = R_f \frac{(a_{11} - a_{21})I_{s_a} + (a_{12} - a_{22})I_{s_b} + (a_{13} - a_{23})I_{s_c}}{(R_f + a_{11} - a_{21} + a_{22} - a_{12})} \quad (7)$$

이를 다시 상수를 정의하고 간단하게 표시하면 다음과 같다.

$$I_f R_f = R_f \frac{(DB_1 I_{s_a} + C_1 I_{s_b} + DB_2 I_{s_b} + C_2 I_{s_b} + DB_3 I_{s_c} + C_3 I_{s_c})}{R_f + DB_1 - DB_2 + C_1 - C_2} \quad (8)$$

$$C_1 = Zr_{aa} - Zr_{ba}$$

$$C_2 = Zr_{ab} - Zr_{bb}$$

$$C_3 = Zr_{ac} - Zr_{bc}$$

그리고 식(8)을 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$(A_1 - (1-D)(B_1 I_{s_a} + B_2 I_{s_b} + B_3 I_{s_c})) \times (R_f + DB_1 - DB_2 + C_1 - C_2) - R_f (DB_1 I_{s_a} + C_1 I_{s_b} + DB_2 I_{s_b} + C_2 I_{s_b} + DB_3 I_{s_c} + C_3 I_{s_c}) = 0 \quad (9)$$

식(9)를 복소수의 상수를 정의하여 고장거리  $D$ 와 고장저항  $R_f$ 에 관한 이차 방정식으로 간단하게 표시하면 다음과 같다.

$$D^2(a_r + ja_i) + D(b_r + jb_i) + c_r + jc_i + R_f(d_r + jd_i) = 0 \quad (10)$$

여기서 복소수로 정의된 상수는 다음과 같다.

$$a_r + ja_i = (B_1 I_{s_a} + B_2 I_{s_b} + B_3 I_{s_c})(B_1 - B_2)$$

$$b_r + jb_i = (A_1 - (B_1 I_{s_a} + B_2 I_{s_b} + B_3 I_{s_c}))(B_1 - B_2)$$

$$+ (B_1 I_{s_a} + B_2 I_{s_b} + B_3 I_{s_c})(C_1 - C_2)$$

$$c_r + jc_i = (A_1 - (B_1 I_{s_a} + B_2 I_{s_b} + B_3 I_{s_c}))(C_1 - C_2)$$

$$d_r + jd_i = (A_1 - (B_1 I_{s_a} + B_2 I_{s_b} + B_3 I_{s_c}) - C_1 I_{s_a} - C_2 I_{s_b} - C_3 I_{s_c})$$

그리고 허수부분의 식에서 고장저항  $R_f$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$-(D^2 a_i + Db_i + c_i)/d_i = R_f \quad (11)$$

이를 실수부분의 식에 대입하여 소거하면 고장거리에 대한 2차 방정식이 나타난다.

$$D^2(a_r - \frac{dr}{dt} a_i) + D(b_r - \frac{dr}{dt} b_i) + c_r - \frac{dr}{dt} c_i = 0 \quad (12)$$

실제 고장거리  $(1-D)$ 는 식(12)의 2차 방정식의 해를 구하는 방법을 이용하여 계산한다.

## 2.2. 사례 연구

제한한 알고리즘을 검증하기 위하여 각각의 고장거리 계산 알고리즘에 대하여 3상 평형계통과 3상 불평형 계통에 대한 사례연구를 하였다. 각각의 사례계통에 대하여 고장거리, 고장저항을 변화시키면서 사고를 모의하고 고장거리를 추정하였다. 고장 거리는 고장구간에서 0.1[pu] ~ 0.9[pu]의 거리에서, 고장저항은 0[Ω], 30[Ω], 50[Ω]으로 변화시켰다. 각각의 계통에 대한 사고 모의는 EMTP를 사용하였다. 데이터 취득을 위한 샘플링 주파수로는 1920Hz, 알리아싱 에러를 방지하기 위해 960Hz 차단 주파수 특성을 갖는 2차 Butterworth 저역 통과 필터를 사용하였다. 그리고 전압, 전류 순시 데이터로부터 페이저를 추출하기 위하여 한 주기 데이터 윈도우를 사용하는 DFT를 사용하였다. 고장거리 계산 에러는 다음 식을 사용하여 산정 하였다.

$$\%Error = \frac{|계산된거리 - 실제고장거리|}{전체선로길이} \times 100 \quad (13)$$

### 2.2.1. 3상 평형계통에 대한 사례연구

사례연구 대상인 3상 평형계통은 그림 2와 같으며 A와 B 구간에서 1선 지락사고를 모의하였다.

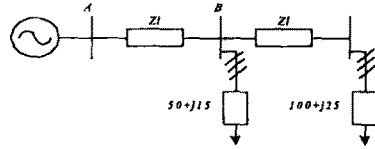


그림 2. 평형 계통의 1선 지락 고장 계통도  
Fig. 2. Simplified diagram of a balanced power network with a line to ground fault

그림 2는 간단한 3상 평형회로의 배전계통이며 선로  $Zl$ 의 선로 자기 임피던스가  $Zl_s = 0.6552 + 1.4684j$ 이고 상호 임피던스  $Zl_m = 0.0952 + 0.6371j$ 이다. 고장구간은 A와 B 구간의 10[km]선로이며 고장거리별 고장저항별 고장거리 계산결과를 표에서 실제 고장거리와 고장저항별 추정거리를 나타내었으며 거리별 오차를 그림으로 나타내었다.

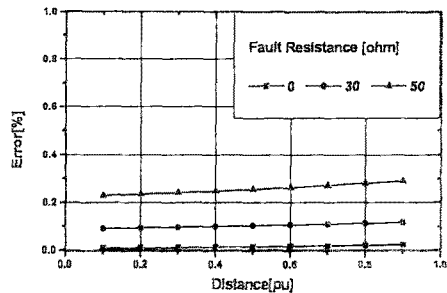


그림 3. 평형계통의 직접계산을 이용한 고장거리 계산 오차  
Fig. 3. Fault location errors in the balanced network using the proposed direct calculation method

3상 직접해석방법을 사용하여 고장점 추정을 한 결과의 오차는 그림 3에서 볼 수 있듯이 고장저항이 50[Ω]

에서 가장 크지만 그 값은 0.03% 정도로 매우 정확하게 고장지점을 찾아내는 것을 알 수 있다. 3상 평형계통에서는 선간단락 시 고장거리 해석에서 그 결과는 매우 신뢰할 수 있으며 실제 고장점을 찾는 데 매우 유용함을 알 수 있다.

### 2.2.2. 3상 불평형 계통에 대한 고장거리 계산 결과

사례연구 대상인 3상 불평형 평형계통은 그림 4와 같으며 A와 B 구간에서 1선 지락사고를 모의하였다.

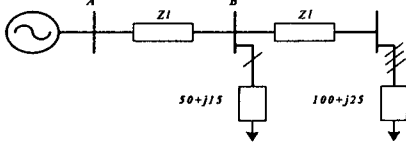


그림 4. 불평형 계통의 1선 상간단락 고장 계통도

Fig. 4. Simplified diagram of an unbalanced power network with a line to line fault

그림 4는 그림 1과 같은 계통에서 선로 임피던스 불평형과 B 점에 b 상 단상부하가 있어 불평형이 된 계통이다. 선로 임피던스  $Zl_{abc}$ 와 B점에서 등가 임피던스  $Z_{Babc}$ 는 다음과 같다.

$$Zl_{abc} = \begin{bmatrix} 0.6552 + 1.4684j & 0.1904 + 1.274j & 0.0952 + 0.6371j \\ 0.1904 + 1.274j & 1.3104 + 2.9368j & 0.1904 + 1.274j \\ 0.0952 + 0.6371j & 0.1904 + 1.274j & 0.6552 + 1.4684j \end{bmatrix}$$

선간단락 사고모의는 평형계통의 경우와 동일하게 하였으며 두 방법의 고장거리 계산결과 표에서 실제 고장거리와 고장저항별 추정거리를 나타내었으며 그 오차를 그림으로 나타내었다.

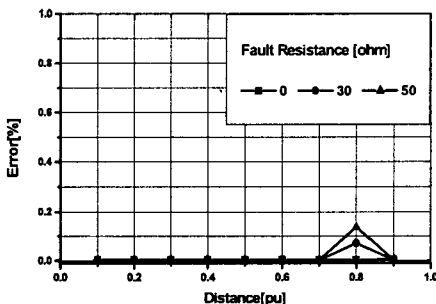


그림 5. 불평형계통의 직접계산을 이용한 고장거리 계산 오차

Fig. 5. Fault location errors in the unbalanced network using the proposed direct calculation method

불평형 계통에서 동일한 상간 단락사고를 상정하여 본 논문에서 제안한 방법에 의하여 해석한 결과는 그림 5에 제시되어 있다. 그림 5는 3상 불평형 계통에 대한 선간단락 고장거리 계산에서 3상 직접계산방법을 이용하였을 때 계산오차를 나타내며 최대오차는 0.15%이다. 직접계산에 의한 고장점 추정 방법은 계통의 평형·불평형에 상관없이 정확한 고장지점을 찾을 수 있음을 보여주고 있어, 실제 배전계통의 선간단락 고장해석에서 이 방법이 사용 가능하다는 것을 보여준다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 일반적인 송·배전 계통의 상간단락 고장에 대하여 적용이 가능한 고장거리 산출 알고리즘을 제안하였다. 제시한 알고리즘은 기존의 방법들이 사용하는 대칭 좌표변환을 사용하지 않고 3상 회로를 직접 해석하여 상간단락의 고장거리를 산출하는 방법으로, 따라서, 대칭 좌표변환이 가정하고 있는 평형 계통은 물론, 배전계통과 같은 불평형 계통에도 별도의 보상기법이 필요 없이 적용 가능하도록 하였다. 사례연구를 통하여, 대칭좌표 변환에 의한 방법은 불평형 계통에서는 적용에 한계가 있음을 보이고, 이에 반하여 제안된 방법은 평형, 불평형을 막론하고 일반적인 3상 계통에 공히 적용될 수 있는 알고리즘임을 보였다. 그리고 전통적인 대칭 좌표법과 3상 직접계산 방법의 결과를 비교하여, 이 방법이 대칭좌표법을 이용한 고장거리 해석방법보다 더 복잡하지 않으면서도 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

본 논문에서 개발된 방법은 불평형이 존재하는 배전계통의 선간단락 사고 고장거리 해석에 있어서 유용하게 사용되리라 사료되며, 추후의 연구내용은 배전계통의 부하는 시시각각으로 변동하므로 부하변동에 대한 이 알고리즘의 강인성을 연구하는 것이다.

### [감사의 글]

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] G. B. Ancell, N. C. Pahalawaththa, "Maximum Likelihood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves", IEEE Transactions on PWRD, Vol. 9, No. 9, 1994, pp. 680-689
- [2] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, T. Sakaguchi, "A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines : Part I - Fourier Transform Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 3, 1988, pp. 1316-1323
- [3] Yong-Jin Ahn, Myeon-Song Choi, Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee, "An Accurate Fault Location Algorithm For Double-Circuit Transmission Systems", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, IEEE, Volume: 3, 2000 pp 1344 -1349
- [4] J. Lewis Blackburn, "Symmetrical Components for Power Systems Engineering", New York, Marcel Dekker, 1993.
- [5] Jun Zhu, Lubkeman, D.L., Girgis, A.A., "Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders", Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 12 2, April 1997, Page(s): 801 -809
- [6] R. Das, M.S. Sachdev, T.S. Sidhu, "A Fault Locator for Radial Sub-transmission and Distribution Lines", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, IEEE Volume: 1, 2000, Page(s): 443-448