3상회로의 직접해석에 의한 송배전계통 선간단락 사고 고장거리 계산 알고리즘

論 文
51A-9-7

A New Line to Line Fault Location Algorithm in Distribution Power Networks using 3 Phase Direct Analysis

崔 勉 松* · 李 承 宰* · 林 星 日** · 陳 保 建** · 李 德 洙***
(M. S. Choi · S. J. Lee · S. I. Lim · B. G. Jin · D. S. Lee)

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.

Key Words : Line to Line Fault Location, 3 phase direct analysis, Distribution Power System

1. 서 론

전력 계통에서 송배전 선로는 전원단과 수용가를 연결하는 중요한 역할을 하며 대기중에 노출되어 있음으로 해서 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. 편리하고 신속하게 고장점을 검출할 수 없다면 계통 관리자는 고장점을 찾아내기 위하여 광범위한 송배전 선로 구간을 육안으로 확인하여야 하며, 이러한 작업은 많은 비용과 인력, 정전비용이 요구된다. 따라서, 송배전 선로상에서 고장 발생시 고장점까지의 거리를 계산하는 고장점 검출 알고리즘은 최근 10여년 동안 활발히 연구되어 왔다[1-3].

송전계통은 일반적으로 3상 평형회로이므로 기본적으로 대칭좌표법[4]을 이용하는 것이 보통이다. 송전계통에 대한 고장점 검출 방법으로는 진행파를 이용하는 방법, 전압과 전류의 고조파 성분을 이용하는 방법, 그리고 전압과 전류의 기본파 성분을 사용한 겉보기 임피던스 법 등으로 구분할 수 있다. 기본파 성분을 이용하는 방법은 다시 한 끝 정보를 이용하는 것과 고장선로 양 끝 정보를 이용하는 방법으로 구분된다. 양 끝 정보를 사용하는 경우 정확한 고장점 검출은 가능하지만 통신장비 등 다양한 장비들이 부가적으로 필요하다. 따라서, 한 끝 정보를 사용하는 방법이 현실적으로 더 많이 활용되고 있으며, 평형회로의 대칭좌표법을 사용한 전류분배계수, 보상등의 방법을 적용하여 보다 정확한 고장점 검출 방법들이 제안되어 현재 송전계통의 고장점 추정장치로 널리 사용된다.

기존의 고장해석방법은 3상 평형회로를 대칭좌표법에 의존하고 있다. 즉, 대칭좌표법에 의한 변환을 통하여 영상, 정상, 역상분으로 변환하고, 서로 독립적인 영상회로, 정상회로, 역상회로를 해석하여 다시 역 대칭좌표변환을 통하여 3상회로의 전압, 전류, 임피던스를 구한다. 이 방법의 장점은 대칭좌표법으로 변환된 방정식이 간단하여 해석이 용이하다는 것이다. 그러나 대상 계통이 3상 평형회로인 경우에만 서로 독립적인 영상회로, 정상회로, 역상회로 방정식이 구해지며, 불평형 계통에서는 변환된 상 사이에 상호임피던스가 존재하여 문제가 단순화되지 않아 장점을 발휘할 수 없게 된다.

그러나 배전계통은 송전계통과 비교하여 배전 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]. 지금까지 배전계통의 고장점 검출에 관한 연구는 극소수에 불과한 이유가 여기에 있다. 일반적으로 선로사고는 1선 지락과 선간단락 두 가지로 나누어지며 그 외의 모든 사고는 이 두 가지 사고로 표현된다. 그러나 배전계통의 고장검출에 대한 연구는 거의 모두 1

* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 敎授 · 工博
** 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 博士課程
***正 會 員 : P&C Tech. 硏究員
接受日字 : 2002年 4月 19日
最終完了 : 2002年 6月 27日

선 지락에 관한 것으로 한정되어 왔으며 선간단락사고 알고리즘은 제안되지 않은 것이 사실이다. 가장 큰 이유는 배전계통과 같은 불평형 계통의 해석에서 대칭좌표법을 사용하지 못하므로 해석이 용이하지 않다는 것으로 추정된다. 배전계통에서 1선 지락의 경우에서 전압, 전류의 고조파 성분을 이용하는 방법과 기본파 성분, 선로 파라미터를 이용하는 방법으로 나눌 수 있으며, 배전계통의 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 측정한 기본파 전압, 전류만을 사용하였으며 고장점 저항의 영향을 배제한 알고리즘이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 송배전계통의 선간단락시 고장거리 검출문제에 있어 전통적인 대칭좌표법을 이용하여 3상 평형계통의 선간단락 고장거리를 산출하는 방법을 약술하였다. 그리고 3장에서는 평형이나 불평형에 관계없는 3상 계통의 선간단락 고장거리 해석을 위한 3상 직접계산방법을 제안하였다. 여기서, 제안된 방법은 대칭좌표법을 이용한 고장거리 해석방법보다 더 복잡하지 않음을 보였다. 4장에서는 간단한 모의계통의 선간단락시 고장거리 계산을 위한 EMTP(Electro Magnetic Transient Program)을 이용한 사례연구를 제시하였다. 여기서는 3상 평형계통과 3상 불평형 계통의 고장거리해석에 대하여 두 방법의 결과를 비교하였으며, 3상 불평형 계통에서는 3상 직접계산방법을 사용한 결과가 오차가 훨씬 적음을 보여 본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 대칭좌표법에 의한 고장점 검출

2.1 기본개념

그림 1은 3상 평형 송배전계통의 a상 b상 선간단락 고장시 단선도를 나타낸다.

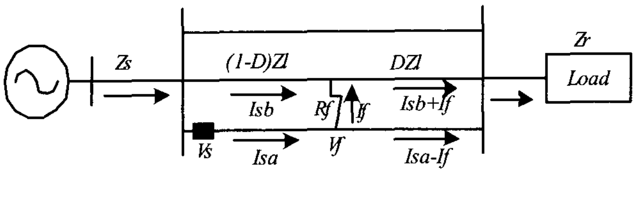


그림 1 3상 평형 모의계통도

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

그림 1과 같은 계통에서 보호계전기 설치점에서 측정된 전압과 전류를 사용할 때 고장상의 상전압차는 식 (1)과 같다.

$$Vs_a - Vs_b = (1-D)((Zl_{aa} - Zl_{ba})Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab})Is_b) + I_f R_f \quad (1)$$

여기서,

$Vs_{abc} = [\,Vs_a,\ Vs_b,\ Vs_c]'$: 계전기 설치점 상전압벡터

$Is_{abc} = [\,Is_a, Is_b, Is_c]'$: 계전기 설치점 상전류벡터

$V_{fabc} = [\,V_{fa},\ V_{fb},\ V_{fc}]'$: 고장지점 상전압벡터

$Zl = \begin{bmatrix} Zl_{aa} & Zl_{ab} & Zl_{ac} \\ Zl_{ba} & Zl_{bb} & Zl_{bc} \\ Zl_{ca} & Zl_{cb} & Zl_{cc} \end{bmatrix}$: 선로 임피던스행렬

$1-D$: 고장거리

$I_{fabc} = [I_{fa}, I_{fb}, I_{fc}]'$: 고장지점 고장전류벡터

I_f : 고장 전류

R_f : 고장 저항

식 (1)에서 고장 저항을 제외한 모든 임피던스는 알고 있는 값이며, 계전기 설치점으로부터 상 전압・전류, 대칭분 전류를 취득할 수 있다. 그러나 고장 전류 I_f는 얻을 수 없으므로 선간단락 고장 시 $I_{fa} = -I_{fb}, I_{fc} = 0$ 이라는 사실을 이용한 대칭좌표변환의 해석결과에서 $I_{f0} = 0, I_{f2} = -aI_{f1}$를 얻고 이로부터 고장전류는 다음과 같이 계산한다.

$$I_f = I_{fa} = I_{f0} + I_{f1} + I_{f2} = (1-a)I_{f2} = (1-a)D_2 Is_2 \quad (2)$$

여기서 $a = e^{\frac{2\pi i}{3}}$ 이고 $D_2 = \frac{I_{f2}}{Is_2}$ 로서 역상전류 분배계수이다. 역상전류 I_{f2}는 역상회로의 구성에 의한 계전기 설치점의 역상전류 Is_2와 이 전류분배계수를 이용하여 구한다.

2.2 대칭좌표법을 이용한 고장전류 소거

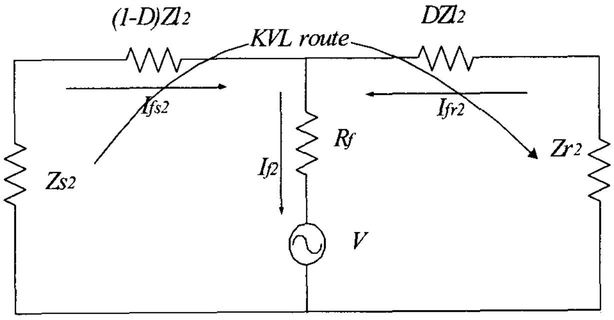


그림 2 평형계통에서의 고장시 역상 시퀀스 회로

Fig. 2 Negative sequence diagram after a line to ground fault in a balanced network

3상 평형계통의 고장 후 회로를 대칭좌표변환하면 3상회로를 서로 독립적인 영상, 정상, 역상회로로 나타낼 수 있으며 그림 2는 역상회로를 나타낸다.

그림의 KVL route 에 KVL을 적용하면 식 (3)과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$Is_2(Zs_2 + (1-D)Zl_2) - Ir_2(Zr_2 + DZl_2) = 0 \quad (3)$$

여기서, Zs_2, : 등가 전원단 역상 임피던스

Zr_2 : 등가 부하단 역상 임피던스

Zl_2 : 선로의 역상 임피던스

Is_2, Ir_2 : 고장점으로 유입되는 송수전단 역상 전류

식 (3)에서 $\frac{Ir_2}{Is_2}$를 구하고 이를 이용하여 $D_2 = \frac{I_{f2}}{Is_2}$를 구하면 다음과 같다.

$$D_2 = \frac{I_{f2}}{Is_2} = \frac{Is_2 + Ir_2}{Is_2} = 1 + \frac{Ir_2}{Is_2} = \frac{Zr_2 + Zl_2 + Zs_2}{Zr_2 + DZl_2} \quad (4)$$

식 (4)에서, 전류분배계수는 측정 전류와 고장 전류의 비로 표현될 수 있고, 이는 다시 모두 알 수 있는 임피던스로 구성된다.

2.3 고장점 검출 알고리즘

식 (4)에서 구할 수 없는 고장전류 I_f를 식 (2)와 식(4)를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$(Vs_a - Vs_b - (1-D)((Zl_{aa} - Zl_{ba})Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab})Is_b)) \times (Zr_2 + DZl_2) - R_f(1-a)Is_2(Zr_2 + Zl_2 + Zs_2) = 0 \quad (5)$$

그리고 식 (5)를 거리 D의 이차 방정식이며, 이 때 각 항의 계수를 복소 상수로 정의하여 간단히 하면 다음과 같다.

$$D^2(a_r + ja_i) + D(b_r + jb_i) + (c_r + jc_i) + R_f(d_r + jd_i) = 0 \quad (6)$$

여기서

$$a_r + ja_i = ((Zl_{aa} - Zl_{ba})Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab})Is_b)Zl_2$$
$$b_r + jb_i = ((Zl_{aa} - Zl_{ba})Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab})Is_b)Zr_2 + (Vs_a - Vs_b - ((Zl_{aa} - Zl_{ba})Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab})Is_b))Zl_2$$
$$c_r + jc_i = (Vs_a - Vs_b - ((Zl_{aa} - Zl_{ba})Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab})Is_b))Zr_2$$
$$d_r + jd_i = -(1-a)Is_2(Zr_2 + Zl_2 + Zs_2)$$

위 식은 복소항등식이므로, 허수부에서 고장저항 R_f를 구할 수 있다.

$$-(D^2 a_i + Db_i + c_i)/d_i = R_f \quad (7)$$

이를 다시 실수부에 대입하여 소거하면 고장거리에 대한 2차 방정식이 나타난다.

$$D^2\left(a_r - \frac{d_r}{d_i}a_i\right) + D\left(b_r - \frac{d_r}{d_i}b_i\right) + c_r - \frac{d_r}{d_i}c_i = 0 \quad (8)$$

고장거리 $(1-D)$는 식(8)의 2차 방정식의 해를 이용하여 구한다.

3. 3상 직접계산에 의한 고장점 검출 알고리즘

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

$$Vs_a - Vs_b = I_f R_f + (1-D)(Zl_{aa}Is_a + Zl_{ab}Is_b + Zl_{ac}Is_c - Zl_{bb}Is_b - Zl_{bc}Is_a - Zl_{bc}Is_c)$$
$$= (1-D)((Zl_{aa} - Zl_{ba})Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab})Is_b + (Zl_{ac} - Zl_{bc})Is_c) + I_f R_f \quad (9)$$

이를 상수를 정의하여 간단하게 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &A_1 - (1-D)(B_1 Is_a + B_2 Is_b + B_3 Is_c) - I_f R_f = 0 \\ &A_1 = Vs_a - Vs_b \\ &B_1 = Zl_{aa} - Zl_{ba} \\ &B_2 = Zl_{ab} - Zl_{bb} \\ &B_3 = Zl_{ac} - Zl_{bc} \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\begin{pmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} DZl_{aa} + Zr_{aa} & DZl_{ab} + Zr_{ab} & DZl_{ac} + Zr_{ac} \\ DZl_{ba} + Zr_{ba} & DZl_{bb} + Zr_{bb} & DZl_{ba} + Zr_{bc} \\ DZl_{ca} + Zr_{ca} & DZl_{cb} + Zr_{cb} & DZl_{cc} + Zr_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Is_a - I_f \\ Is_b + I_f \\ Is_c \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Is_a - I_f \\ Is_b + I_f \\ Is_c \end{pmatrix} \quad (11)$$

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 전압차는 고장전류와 고장저항의 곱과 같다.

$$V_{fa} - V_{fb} = I_f R_f \quad (12)$$

이를 이용하여 식 (12)에서 고장전류에 관한 식을 구하면 다음과 같다.

$$I_f R_f = a_{11}(Is_a - I_f) + a_{12}(Is_b + I_f) + a_{13}Is_c - a_{21}(Is_a - I_f) - a_{22}(Is_b + I_f) - a_{23}Is_c \quad (13)$$

이를 고장전류에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$(R_f + a_{11} - a_{21} + a_{22} - a_{12})I_f = (a_{11} - a_{21})Is_a + (a_{12} - a_{22})Is_b + (a_{13} - a_{23})Is_c \quad (14)$$

이로부터 $I_f R_f$ 를 구하면 다음과 같다.

$$I_fR_f = R_f\frac{(a_{11}-a_{21})Is_a+(a_{12}-a_{22})Is_b+(a_{13}-a_{23})Is_c}{(R_f+a_{11}-a_{21}+a_{22}-a_{12})} \quad (15)$$

이를 다시 상수를 정의하고 간단하게 표시하면 다음과 같다.

$$I_fR_f = R_f\frac{(DB_1Is_a+C_1Is_a+DB_2Is_b+C_2Is_b+DB_3Is_c+C_3Is_c)}{R_f+DB_1-DB_2+C_1-C_2} \quad (16)$$

$$C_1 = Zr_{aa}-Zr_{ba}$$
$$C_2 = Zr_{ab}-Zr_{bb}$$
$$C_3 = Zr_{ac}-Zr_{bc}$$

그리고 식(15)를 식(10)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&(A_1-(1-D)(B_1Is_a+B_2Is_b+B_3Is_c))\\&\times(R_f+DB_1-DB_2+C_1-C_2)\\&-R_f(DB_1Is_a+C_1Is_a+DB_2Is_b+C_2Is_b+DB_3Is_c+C_3Is_c)=0\end{aligned} \quad (17)$$

식(17)을 복소수의 상수를 정의하여 고장거리 D와 고장저항 R_f에 관한 이차 방정식으로 간단하게 표시하면 다음과 같다.

$$D^2(a_r+ja_i)+D(b_r+jb_i)+c_r+jc_i+R_f(d_r+jd_i)=0 \quad (18)$$

여기서 복소수로 정의된 상수는 다음과 같다.

$$a_r+ja_i=(B_1Is_a+B_2Is_b+B_3Is_c)(B_1-B_2)$$
$$b_r+jb_i=(A_1-(B_1Is_a+B_2Is_b+B_3Is_c))(B_1-B_2)+(B_1Is_a+B_2Is_b+B_3Is_c)(C_1-C_2)$$
$$c_r+jc_i=(A_1-(B_1Is_a+B_2Is_b+B_3Is_c))(C_1-C_2)$$
$$d_r+jd_i=(A_1-(B_1Is_a-B_2Is_b-B_3Is_c)-C_1Is_a-C_2Is_b-C_3Is_c)$$

그리고 허수부분의 식에서 고장저항 R_f 는 다음과 같이 구해진다.

$$-(D^2a_i+Db_i+c_i)/d_i=R_f \quad (19)$$

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

$$D^2(a_r-\frac{dr}{di}a_i)+D(b_r-\frac{dr}{di}b_i)+c_r-\frac{dr}{di}c_i=0 \quad (20)$$

실제 고장거리 (1- D) 는 식(20)의 2차 방정식의 해를 구하는 방법을 이용하여 계산한다.

4. 사례 연구

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 각각의 고장거리계산 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]로 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.

$$\%Error=\frac{|계산된거리-실제고장거리|}{전체선로길이}\times 100 \quad (21)$$

4.1 3상 평형 계통에 대한 사례연구

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

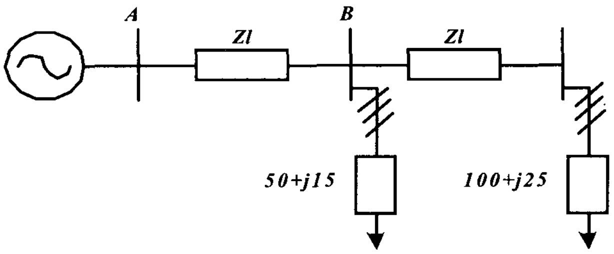


그림 3 평형 계통의 1선 지락 고장 계통도
Fig. 3 Simplified diagram of a balanced power network with a line to ground fault

그림 3은 간단한 3상 평형회로의 배전계통이다. 여기서 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 계산결과는 표에서 실제 고장거리와 고장저항별 추정거리를 나타내었으며 거리별 오차를 그림으로 나타내었다.

4.1.1 대칭좌표법을 사용한 고장거리 계산결과

간단한 3상 평형계통에 대한 선간단락 고장거리 해석에서 대칭좌표법을 사용한 방법의 사례연구 결과에서 오차는 그림 4에서 볼 수 있듯이 고장저항이 50[Ω]에서 가장 크지만, 그 값은 0.03% 정도로 매우 정확하게 고장지점을 찾아내는 것을 알 수 있다. 고장거리 계산결과를 분석해 보면 전체 10km의 계통에서 각 지점마다 사고를 내고 그 고장지점 표정 결과 60m 이내의 오차가 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.1.2 3상 직접해석에 의한 고장거리 계산 결과

동일한 계통에서 동일한 사고에 대하여 3상 직접해석방법을 사용한 사례연구 결과에서 오차는 그림 5에서 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 대칭좌표법을 사용하거나 3상 직접해석방법을 사용할 때 그 결과는 매우 신뢰할 수 있으며 실제 고장점을 찾는데 매우 유용함을 알 수 있다.

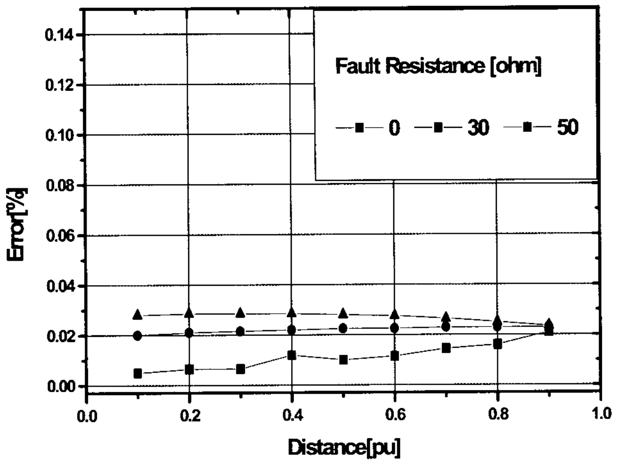


그림 4 평형계통의 대칭좌표법을 이용한 고장거리 계산 오차
그림 4 Fault location errors in the balanced network using the sequence transformation

표 1 평형계통의 대칭좌표법을 이용한 고장거리 계산 결과
Table 1 Fault location results in the balanced network using the sequence transformation

실제거리	추정거리		
km (pu)	고장저항 0[Ω]	고장저항 30[Ω]	고장저항 50[Ω]
1 (0.1)	0.1001	0.1004	0.10056
2 (0.2)	0.20013	0.20042	0.20057
3 (0.3)	0.30013	0.30043	0.30057
4 (0.4)	0.40024	0.40044	0.40057
5 (0.5)	0.5002	0.50045	0.50056
6 (0.6)	0.60023	0.60045	0.60055
7 (0.7)	0.70029	0.70046	0.70053
8 (0.8)	0.80032	0.80046	0.8005
9 (0.9)	0.90042	0.90046	0.90047

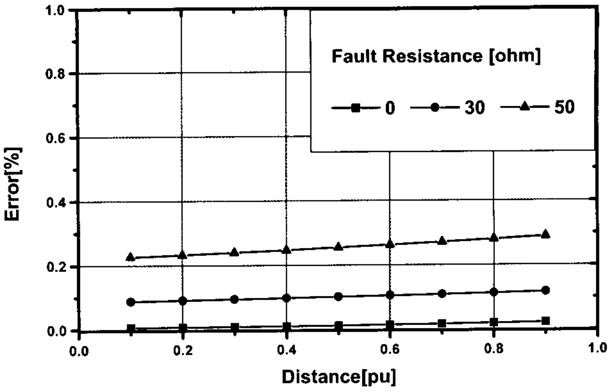


그림 5 평형계통의 직접계산을 이용한 고장거리 계산 오차
Fig. 5 Fault location errors in the balanced network using the proposed direct calculation method

표 2 평형계통의 직접계산을 이용한 고장거리 계산 결과
Table 2 Fault location results in the balanced network using the proposed direct calculation method

실제거리	추정거리		
km (pu)	고장저항 0[Ω]	고장저항 30[Ω]	고장저항 50[Ω]
1 (0.1)	0.10013	0.09823	0.09547
2 (0.2)	0.20015	0.19817	0.19534
3 (0.3)	0.30018	0.2981	0.29519
4 (0.4)	0.40021	0.39804	0.39505
5 (0.5)	0.50025	0.49796	0.49489
6 (0.6)	0.60029	0.59789	0.59473
7 (0.7)	0.70034	0.69782	0.69456
8 (0.8)	0.80039	0.79774	0.79439
9 (0.9)	0.90045	0.89766	0.89421

4.2 3상 불평형 계통에 대한 고장거리 계산 결과

사례연구 대상인 3상 불평형 평형계통은 그림 6과 같으며 A와 B 구간에서 1선 지락사고를 모의하였다.

그림 6은 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.

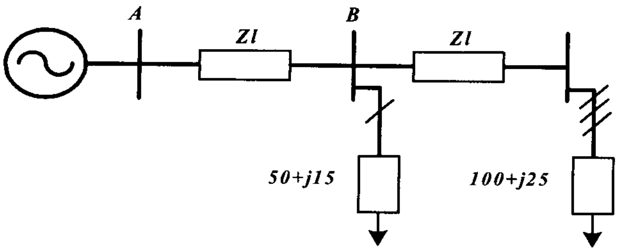


그림 6 불평형 계통의 1선 상간단락 고장 계통도
Fig. 6 Simplified diagram of an unbalanced power network with a line to line fault

4.2.1. 대칭좌표법을 사용한 고장거리 계산결과

3상 불평형 계통에서 대칭좌표법을 사용한 선간단락 고장거리 해석에 있어서 오차는 표 3 및 그림 7과 같이 최대 8% 정도 나타난다. 그러나 실제 배전계통은 가지가 많은 방사상 계통이며 부하 임피던스도 정확하게 알 수 없으며 시간에 따라서 그 값도 변화하므로 오차는 더 커지리라 사료되므로 일반적인 배전계통에서 대칭좌표법을 사용한 선간단락 고장거리 해석 방법은 별도의 보상방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

4.2.2. 3상 직접해석에 의한 고장거리 계산 결과

동일한 불평형 계통에서 동일한 상간 단락사고를 상정하여 본 논문에서 제안한 방법에 의하여 해석한 결과사 표 4에 제시되어 있다. 그림 8은 3상 불평형 계통에 대한 선간단락 고장거리 계산에서 3상 직접계산방법을 이용하였을 때 계산오차를 나타내며 최대오차는 0.15% 이다. 이로써 이 방법은 계통의 평형·불평형에 상관없이 정확한 고장지점을 찾을 수 있음을 보여주고 있어, 실제 배전계통의 선간단락 고장해석에서 이 방법이 사용 가능하다는 것을 보여준다.

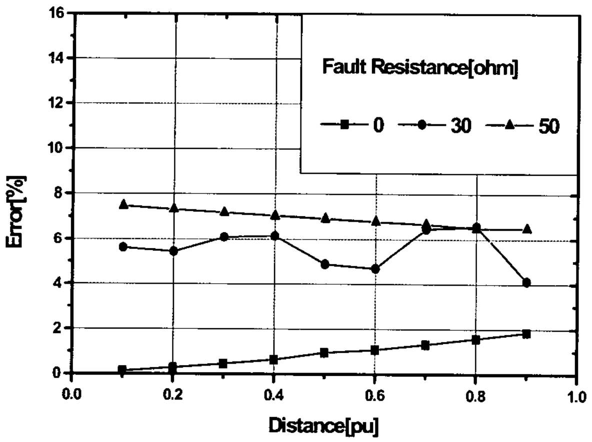


그림 7 불평형계통의 대칭좌표법을 이용한 고장거리 계산 오차
Fig. 7 Fault location errors in the unbalanced network using the sequence transformation

표 3 불평형계통의 대칭좌표법을 이용한 고장거리 계산 결과
Table 3 Fault location results in the unbalanced network using the sequence transformation

실제거리	추정거리		
km (pu)	고장저항 0[Ω]	고장저항 30[Ω]	고장저항 50[Ω]
1 (0.1)	0.10128	0.15609	0.17469
2 (0.2)	0.20282	0.25432	0.2732
3 (0.3)	0.30453	0.36101	0.37179
4 (0.4)	0.40642	0.46158	0.47041
5 (0.5)	0.50947	0.54874	0.56917
6 (0.6)	0.61078	0.64683	0.66801
7 (0.7)	0.71318	0.76485	0.76691
8 (0.8)	0.8158	0.86598	0.86519
9 (0.9)	0.91863	0.94136	0.96515

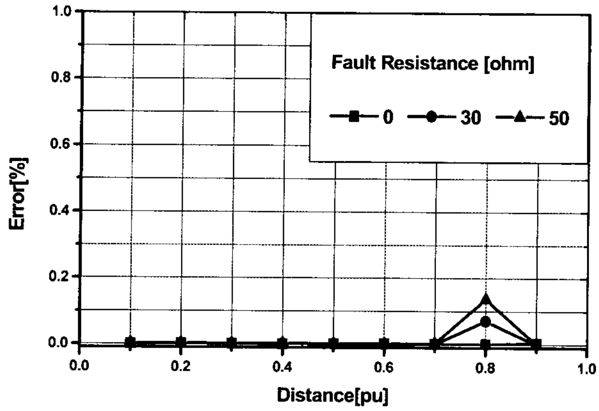


그림 8 불평형계통의 직접계산을 이용한 고장거리 계산 오차
Fig. 8 Fault location errors in the unbalanced network using the proposed direct calculation method

표 4 불평형계통의 직접계산을 이용한 고장거리 계산 결과
Table 4 Fault location results in the unbalanced network using the proposed direct calculation method

실제거리	추정거리		
km (pu)	고장저항 0[Ω]	고장저항 30[Ω]	고장저항 50[Ω]
1 (0.1)	0.10002	0.09997	0.09995
2 (0.2)	0.20003	0.19997	0.19995
3 (0.3)	0.30003	0.29998	0.29996
4 (0.4)	0.40002	0.39996	0.39994
5 (0.5)	0.50004	0.49999	0.49996
6 (0.6)	0.60006	0.6	0.59998
7 (0.7)	0.70003	0.69997	0.69995
8 (0.8)	0.80003	0.79858	0.79727
9 (0.9)	0.90008	0.90002	0.90002

5. 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 대칭좌표법과 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 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] G.B. Ancell, N. C. Pahalawaththa, "Maximum Likelyhood 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.

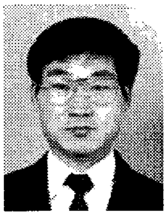
[3] Yong-Jin Ahn, Myeon-Song Choi, Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee, "An Accurate Fault Location Algorithm For Double-Circuit Transmission Systems", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE , Volume: 3, 2000 pp 1344 -1349.

[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.

저 자 소 개



최 면 송 (崔 勉 松)

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공박). 1995년 Pensylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학공동연구소 전임연구원. 현재 명지대 학교 공대 전기정보제어공학부 부교수.

Tel : 031-336-6367, Fax : 031-321-0271

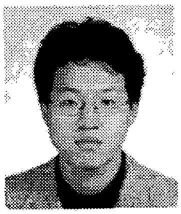
E-mail : mschoi@mju.ac.kr

이 승 재(李 承 宰)

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공박). 1994년 Univ. of Washington 교환교수. 현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 교수.

Tel : 031-336-6362, Fax : 031-330-6816

E-mail : sjlee@mju.ac.kr



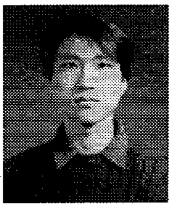
이 덕 수(李 德 洙)

1977년 11월 19일생. 2000년 명지대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 P&C Tech. 연구원.

Tel : 031-455-5791,

Fax : 031-456-7923,

E-mail : suness@hanmail.net

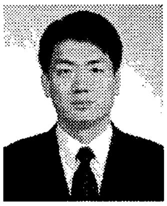


진 보 건(陳 保 建)

1976년 9월 28일 생. 2000년 명지대 공대 전기전자공학부 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 031-335-2068, Fax : 031-330-6816

E-Mail : sinato@mju.ac.kr



임 성 일 (林 星 日)

1967년 7월 10일 생. 1994년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~2002년 대전 전력연구원. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 031-335-2068, Fax : 031-330-6816

E-Mail : lim7610@hotmail.com