

전력계통 송배전선로 2회선 1선지락사고 고장거리 검출 알고리즘

論 文

52A-1-4

Fault Location Algorithms for the Line to Ground Fault of Parallel-Circuit Line in Power Systems

崔 勉 松* · 李 承 宰* · 姜 相 熙* · 李 翰 雄**

(Myeon-Song Choi · Seung-Jae Lee · Sang-Hee Kang · Han-Woong Lee)

Abstract - This paper presents a fault location algorithm when there are parallel circuits in power system networks. In transmission networks, a fault location method using the distribution factor of fault currents is introduced and in distribution networks a method using direct 3-phase circuit analysis is developed, because the distribution networks are unbalanced. The effect of parallel circuits in fault location is studied in this paper. The effect is important for the range of protecting zones of distance relay in transmission networks and fault location in distribution networks. The result of developed fault location algorithm shows high accuracy in the simulation that using the EMTP.

Key Words : Fault Location, Parallel-circuit line, Direct 3-phase circuit analysis, power systems.

1. 서 론

전력계통에서 전원단과 수용가를 연결하는 중요한 역할을 하는 송배전 선로는 동물의 접촉, 뇌우, 보호기기의 오·부 동작, 그리고 다양한 원인으로 인해 빈번하게 사고가 발생하고 있다. 이러한 사고로부터 건전회선을 보호하기 위해서는 사고 발생 지점을 신속, 정확히 찾아내어 격리, 사고복구를 하는 것이 정전 비용을 최소화하며 전력계통의 신뢰성을 높일 수 있으므로 안정적인 전력 공급의 측면에서 중요하다. 그리고 전력 산업의 구조 개편에 따라 양질의 전력을 공급하는 것이 전력회사들의 중요한 경쟁력으로 작용하게 될 것이다. 전력의 신뢰성에 중요한 역할을 하는 고장점 검출장치가 없다면 실제 고장위치를 찾아내기가 어려워 고장복구를 하는데 많은 시간이 걸려 서비스의 질을 떨어뜨리게 된다.

송배전 선로 상에서 고장발생 시 고장점까지 거리를 계산하는 고장점 검출 알고리즘은 최근 10여년 동안 활발히 연구되어 왔다. 송전계통은 3상평형이므로 고장 검출 방법으로는 전파파를 이용하는 방법[1], 전파방정식을 이용하는 방법[2], 그리고 전압과 전류의 기본파 성분을 사용한 결보기 임피던스 법[3] 등으로 구분할 수 있으며, 세부적으로 기본파 성분을 이용하는 방법의 적용에 있어서 일단 정보를

이용하는 것과 양단 정보를 이용하는 방법으로 구분된다. 그리고 양단 정보를 이용하는 경우 정확한 고장점 검출이 가능하지만 통신장비 등 다양한 장비들이 부가적으로 필요하게 됨으로 일단 정보를 사용하는 고장점 검출방법들이 필요하게 되었다.

송전선로는 모두 평형계통임으로 고장해석에 있어서 대칭좌표법을 사용하기 용이하여 전류분배계수, 보상 등의 방법을 적용한 보다 정확한 고장점 검출방법[4]들이 제안되었다. 그러나 배전계통의 경우 선로의 비동질성, 부하 전류, 영상요소에 의한 상호작용 등의 불평형 요인들이 적지 않다. 이 불평형 요인 때문에 고장해석의 가장 기본이 되는 대칭좌표법을 사용하기가 곤란하여 매우 복잡하고 어려운 문제로 인식되어 왔다[5]. 그러나 최근 3상 직접 계산법을 사용하여 불평형 계통의 고장거리 계산을 할 수 있는 알고리즘이 발표되었다[7].

평행 2회선 선로에 고장이 발생할 경우, 정확한 고장점 검출을 위해서 고장저항, 고장전류, 건전회선의 영상전류 정보 등이 필요하기에 자기 단의 전압, 전류 정보만을 가지고 고장점을 검출하기에는 어려움이 따른다. 그리고, 불평형 2회선 선로의 경우는 양회선 사이의 불평형 상호 인덕턴스 때문에 측정오차가 발생하며, 고장점 검출을 위한 보상계수도 단일회선일때는 효과가 있지만 양회선일 경우는 인근회선의 각 상전류의 보상없이는 정확한 거리측정을 기대할 수 없다. 거리계전기의 경우도 인근회선의 전류보상이 없을 경우 언더리치 현상이 발생하며, 현재 사용하고 있는 Digital 거리계전기의 인근회선 영상전류보상 방식도 인근회선 고장 시 오버리치 현상 때문에 적용하지 못할 것으로 생각된다.[6]

본 논문에서는 송배전계통 평행 2회선 선로에 고장이 발생할 경우, 정확한 고장점 검출 방법을 제안하였다. 송전계

* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2002年 8月 9日

最終完了 : 2002年 11月 4日

통의 고장점 검출에 있어서는 평형계통이라는 점을 이용하여 대칭좌표법을 사용하여 평형의 양단 전원임피던스, 선로 정수, 고장저항 등으로 구성된 전력계통을 등가하여 계통 고장 시에 고장전류, 건전회선의 영상전류의 분포 등을 예측할 수 있는 전류분배계수를 이용한 1선지락 고장점 검출 알고리즘[7]을 제안하였으며 사례연구를 수행하여 고장점 검출에 있어서 평행회선에 대한 영향을 고찰하였다. 현재 송전계통에 사용되는 거리계전 보호방식에서는 평행회선의 영향을 고려하지 않고 거리계전 방식에서의 보호구간(Zone)을 정하였으므로 평행회선의 영향으로 거리계전기가 오동작할 염려가 있다. 본 논문에서는 평행회선의 영향을 고려하여 적절한 보호구나(Zone)의 영역을 제시하였다. 그리고 배전계통은 불평형 계통이기 때문에 전통적인 고장해석방법인 대칭좌표법을 사용할 수 없으므로 배전계통의 평행2회선에서의 1선지락 고장시 상호 인덕턴스 요소를 고려하여 3상 회로를 직접 해석하고 평형, 불평형에 상관없는 고장점을 검출하는 제안하였다.

사례연구에서는 전력계통 과도현상 해석 프로그램인 EMTF(Electromagnetic Transients Program)을 사용하였다.

2. 고장점 검출 알고리즘

2.1 평행 2회선 송전선로 고장거리 검출 알고리즘

2.1.1 사고시 전류분배계수

평행 2회선 송전선로에 1선 지락고장이 발생하면 고장점에서의 전류의 분포는 그림 1에 나타난 계통의 임피던스의 분포에 따라 변화한다.

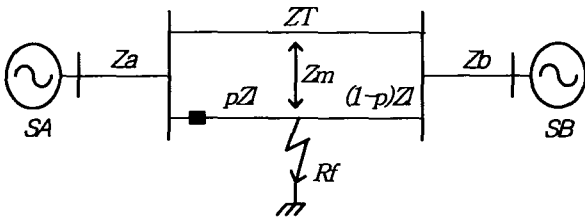


그림 1 평행 2회선 등가회로(1선 지락시)

Fig. 1 Simplified diagram of a parallel circuit (Single-Phase to Ground Fault)

전류분배계수는 그림 2의 a상 지락고장 시의 대칭분 회로에서 A경로와 B경로에서 얻어지는 전류방정식에서 구하고자하는 전류항을 제외한 나머지항을 소거하면, 자기단과 상대단의 전류비와 자기단과 건전회선의 전류비를 유도하여 구할 수 있다. 역상분, 영상분 전류분배계수는 식(1),식(2)와 같다.

그림 2에서 각 변수들은 다음과 같다.

Z_{a012} :전원SA의 영상, 정상, 역상임피던스 [Ω]

Z_{b012} :전원SB의 영상, 정상, 역상임피던스 [Ω]

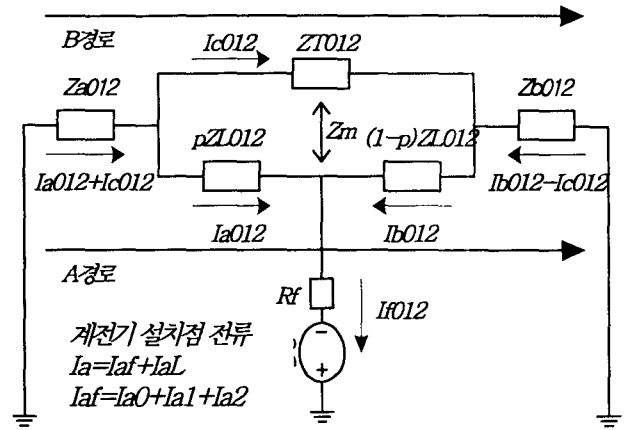


그림 2 대칭분 회로(a상 지락고장 시)

Fig. 2 Symmetric circuit (Single-Phase to Ground Fault)

ZL_{012} :고장회선 선로의 영상,정상,역상임피던스 [Ω]

ZT_{012} :건전회선 선로의 영상,정상,역상임피던스 [Ω]

Z_m :평행회선간 상호 임피던스 [Ω]

R_f : 고장점 저항 [Ω]

I_{f012} :고장점에서의 영상,정상,역상전류 [A]

I_{a012} :계전기설치점에서의 영상,정상,역상전류 [A]

I_{af} : 계전기설치점에서의 a상 순수고장전류 [A]

I_{aL} :계전기설치점에서의 a상 부하전류 [A]

p :계전기 설치점에서 고장점까지의 거리 [PU]

$$Da2 = \frac{I_{a2}}{I_{f2}} = \frac{pB_{a2} + C_{a2}}{A_{a2}} \quad (1)$$

여기서,

$$A_{a2} = ZL_2(Z_{a2} + Z_{b2}) + ZT_2(Z_{a2} + Z_{b2} + ZL_2)$$

$$B_{a2} = -ZL_2(Z_{a2} + Z_{b2} + ZT_2)$$

$$C_{a2} = ZL_2(Z_{a2} + Z_{b2} + ZT_2) + (ZT_2)(Z_{b2}) \text{ 이다.}$$

$$Dca = \frac{I_{a0}}{I_{f0}} = \frac{pA_{ac} + B_{ac}}{pC_{ac} + D_{ac}} \quad (2)$$

여기서,

$$A_{ac} = ZL_0(Z_{a0} + Z_{b0} + ZT_0) - Zm(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm)$$

$$B_{ac} = Zm(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) - ZL_0(Z_{a0} + Z_{b0} + ZT_0) + Z_{b0}(Zm - ZT_0)$$

$$C_{ac} = (Zm - ZL_0)(Z_{a0} + Z_{b0})$$

$$D_{ac} = Z_{a0}(ZL_0 - Zm)$$

이다.

2.1.2 고장거리 검출 알고리즘

그림 1에서 계전기 설치점에서의 전압은 다음과 같다.

$$V_{S_a} = p[I_a ZL_1 + (ZL_0 - ZL_1)I_{a0}] + I_f R_f + I_{a0} p Zm \quad (3)$$

식(3)에서 I_f 와 I_{a0} 는 구할 수 없으므로 전류분배계수를 이용하여 계전기 설치점에서의 전류로 나타내면 다음과 같다.

$$V_{S_a} = p[I_a ZL_1 + (ZL_0 - ZL_1)I_{a0}] + \frac{3I_{a2}}{Da2} R_f + \frac{I_{a0}}{Dca} p Zm \quad (4)$$

식(1)와 (2)를 식 (4)에 대입하여 고장거리 p 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$(a_3 + jb_3)p^3 + (a_2 + jb_2)p^2 + [a_1 + jb_1 + (c_1 + jd_1)R_f]p + [a_0 + jb_0 + (c_0 + jd_0)R_f] = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a_3 + jb_3 &= IZL_2 B_{a2} A_{ac} + B_{a2} C_{ac} I_{a0} Zm \\ a_2 + jb_2 &= IZL_2 B_{a2} B_{ac} + IZL_2 C_{a2} A_{ac} - V_a B_{a2} A_{ac} \\ &\quad + B_{a2} D_{ac} I_{a0} Zm + C_{a2} C_{ac} I_{a0} Zm \\ a_1 + jb_1 &= IZL_2 C_{a2} B_{ac} - V_a B_{a2} B_{ac} - VC_{a2} A_{ac} \\ &\quad + C_{a2} D_{ac} I_{a0} Zm \\ a_0 + jb_0 &= -V_a C_{a1} B_{ac} \\ c_1 + jd_1 &= 3A_{ac} A_{a2} I_{a2} \\ c_0 + jd_0 &= 3C_{ac} A_{a2} I_{a2} \\ I &= I_a + \frac{(ZL_0 - ZL_2)}{ZL_2} I_{a0} \end{aligned}$$

식 (5)을 실수 부와 허수 부로 분리하면 고장거리 p 에 관한 두 개의 3차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} a_3 p^3 + a_2 p^2 + (a_1 + c_1 R_f) p + (a_0 + c_0 R_f) &= 0 \\ b_3 p^3 + b_2 p^2 + (b_1 + d_1 R_f) p + (b_0 + d_0 R_f) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 고장저항 R_f 를 소거하면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} p^4 - k_1 p^3 + k_2 p^2 + k_3 p + k_4 &= 0 \quad (7) \\ k_1 &= (a_2 d_1 - b_2 c_1 + a_3 d_0 - b_3 c_0) / (a_3 d_1 - b_3 c_1) \\ k_2 &= (a_1 d_1 - b_1 c_1 + a_2 d_0 - b_2 c_0) / (a_3 d_1 - b_3 c_1) \\ k_3 &= (a_0 d_1 - b_0 c_1 + a_1 d_0 - b_1 c_0) / (a_3 d_1 - b_3 c_1) \\ k_4 &= (a_0 d_0 - b_0 c_0) / (a_3 d_1 - b_3 c_1) \end{aligned}$$

고장거리 p 와 고장저항 R_f 는 식 (6)에서 뉴턴랩슨법을 이용하여 구할 수 있다. 또는 두 식에서 R_f 를 소거시킨 식 (7)에서 p 에 관한 4차 근의 공식을 이용하여 구할 수도 있다.

2.2 평행 2회선 배전선로 고장거리 검출 알고리즘

2.2.1 기본 개념

그림 3은 방사상의 평행 2회선 배전계통의 1선지락 고장시 단선도를 나타낸다.

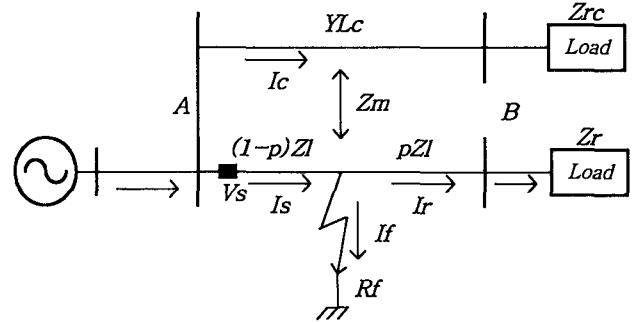


그림 3 평행 2회선 등가회로(1선 지락시 단선도)

Fig. 3 Simplified diagram of a parallel circuit (Single-Phase to Ground Fault)

계통의 캐패시턴스를 무시할 경우 계전기 설치 지점에 측정된 전압과 전류는 다음의 행렬식을 만족한다.

$$V_{S_{abc}} = (1-p)(Zl_{abc} \cdot Is_{abc} + Zm_{abc} \cdot Ic_{abc}) + Vf_{abc} \quad (8)$$

$V_{S_{abc}} = [Vs_a, Vs_b, Vs_c]'$: 계전기설치점에서 상전압 벡터

$Is_{abc} = [Is_a, Is_b, Is_c]'$: 계전기설치점에서 상전류 벡터

$Vf_{abc} = [Vf_a, Vf_b, Vf_c]'$: 고장점 상전압 벡터

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

$(1-p)$: 고장 거리

$Ic_{abc} = [Ic_a, Ic_b, Ic_c]'$: 건전회선의 상전류 벡터

Zm_{abc} : 타회선 상호임피던스

여기서 고장지점의 고장점의 고장 상전압 $Vf_a = I_f R_f$ 이고 I_f 는 고장 전류이며 R_f 는 고장 저항이다.

식 (8)에서는 선로 임피던스는 알고 있으며, 계전기 설치점에서 측정된 상 전압 · 전류는 얻을 수 있으나 고장 전류 I_f 와 고장저항 R_f 는 얻을 수 없으므로 직접 3상 회로 해석으로부터 구한다.

2.2.2 고장거리 검출 알고리즘

고장시 계전기 설치 지점의 a상의 전압은 다음과 같이 표시된다.

$$V_{S_a} = (1-p)(Zl_{aa}I_{S_a} + Zl_{ab}I_{S_b} + Zl_{ac}I_{S_c} + Zm_{aa}I_{C_a} + Zm_{ab}I_{C_b} + Zm_{ac}I_{C_c}) + I_f R_f \quad (9)$$

식 (9)에서 건전회선이 고장회선에 미치는 영향은 다음과 같다.

$$Vm_c = (1-p)(Zm_{abc} \cdot I_{C_{abc}}) \quad (10)$$

식 (10)에서 $I_{C_{abc}}$ 는 고장회선의 상호임피던스에도 영향을 받으므로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{C_{abc}} &= Y_{C_{abc}}[V_{C_{abc}} - Zm_{abc}I_{S_{abc}} - p[Zm_{aa}, Zm_{ba}, Zm_{ca}]^T I_f] \\ I_{C_a} &= Y_{C_{aa}}[V_{C_a} - Zm_{aa}I_{S_a} - Zm_{ab}I_{S_b} - Zm_{ac}I_{S_c} + pZm_{aa}I_f] \\ &\quad + Y_{C_{ab}}[V_{C_b} - Zm_{ba}I_{S_a} - Zm_{bb}I_{S_b} - Zm_{bc}I_{S_c} + pZm_{ba}I_f] \\ &\quad + Y_{C_{ac}}[V_{C_c} - Zm_{ca}I_{S_a} - Zm_{cb}I_{S_b} - Zm_{cc}I_{S_c} + pZm_{ca}I_f] \\ &= Y_{C_{aa}}[A1 + pZm_{aa}I_f] + Y_{C_{ab}}[A2 + pZm_{ba}I_f] \\ &\quad + Y_{C_{ac}}[A3 + pZm_{ca}I_f] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I_{C_b} &= Y_{C_{ba}}[A1 + pZm_{aa}I_f] + Y_{C_{bb}}[A2 + pZm_{ba}I_f] \\ &\quad + Y_{C_{bc}}[A3 + pZm_{ca}I_f] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} I_{C_c} &= Y_{C_{ca}}[A1 + pZm_{aa}I_f] + Y_{C_{cb}}[A2 + pZm_{ba}I_f] \\ &\quad + Y_{C_{cc}}[A3 + pZm_{ca}I_f] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A1 &= V_{C_a} - Zm_{aa}I_{S_a} - Zm_{ab}I_{S_b} - Zm_{ac}I_{S_c} \\ A2 &= V_{C_b} - Zm_{ba}I_{S_a} - Zm_{bb}I_{S_b} - Zm_{bc}I_{S_c} \\ A3 &= V_{C_c} - Zm_{ca}I_{S_a} - Zm_{cb}I_{S_b} - Zm_{cc}I_{S_c} \\ Y_{C_{abc}} &= (Zl_{C_{abc}} + Zr_{C_{abc}})^{-1} \end{aligned}$$

이다.

식 (9)에 식(11),(12),(13)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{S_a} &= (1-p)(Zl_{aa}I_{S_a} + Zl_{ab}I_{S_b} + Zl_{ac}I_{S_c} + A4 + DI_f A5) + I_f R_f \\ V_{S_a} - (1-p)(Zl_{aa}I_{S_a} + Zl_{ab}I_{S_b} + Zl_{ac}I_{S_c} + A4) - I_f(R_f \\ &\quad + (p-p^2)A5) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} A4 &= Zm_{aa}(Y_{C_{aa}}A1 + Y_{C_{ab}}A2 + Y_{C_{ac}}A3) \\ &\quad + Zm_{ab}(Y_{C_{ba}}A1 + Y_{C_{bb}}A2 + Y_{C_{bc}}A3) \\ &\quad + Zm_{ac}(Y_{C_{ca}}A1 + Y_{C_{cb}}A2 + Y_{C_{cc}}A3) \\ A5 &= Zm_{aa}(Y_{C_{aa}}Zm_{aa} + Y_{C_{ab}}Zm_{ba} + Y_{C_{ac}}Zm_{ca}) \\ &\quad + Zm_{ab}(Y_{C_{ba}}Zm_{aa} + Y_{C_{bb}}Zm_{ba} + Y_{C_{bc}}Zm_{ca}) \\ &\quad + Zm_{ac}(Y_{C_{ca}}Zm_{aa} + Y_{C_{cb}}Zm_{ba} + Y_{C_{cc}}Zm_{ca}) \end{aligned}$$

계전기 설치 지점 a상의 전압방정식은 식 (14)과 같게 된다. 그리고 고장지점에서의 고장 전압은

$$\begin{aligned} V_{f_a} &= (pZl_{aa} + Zr_{aa})(I_{S_a} - I_f) + (pZl_{ab} + Zr_{ab})I_{S_b} \\ &\quad + (pZl_{ac} + Zr_{ac})I_{S_c} + pA4 + pI_f A5 \end{aligned} \quad (15)$$

이며, $V_{f_a} = I_f R_f$ 이므로 식 (15)에 대입하여 정리하면

$$I_f = \frac{(pZl_{aa} + Zr_{aa})I_{S_a} + (pZl_{ab} + Zr_{ab})I_{S_b} + (pZl_{ac} + Zr_{ac})I_{S_c} + pA4}{R_f + pZl_{aa} + Zr_{aa} - p^2 A5} \quad (16)$$

고장전류는 계전기 설치점의 측정전류와 임피던스 식으로 표현이 가능하며 식 (16)과 같이 된다.

이 고장 전류식 (16)을 고장지점 전압식 (14)에 대입하고 상수를 다음과 같이 정의하여 간단하게 나타내면 식(17)과 같다.

$$\begin{aligned} (aa2 + paa1)(Zr_{aa} + pZl_{aa} - p^2 A5) - (aa3 + paa1)(pA5 \\ - p^2 A5) + R_f(aa2 - aa3) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$aa_1 = Zl_{aa}I_{S_a} + Zl_{ab}I_{S_b} + Zl_{ac}I_{S_c} + A4$$

$$aa_2 = V_{S_a} + aal$$

$$aa_3 = Zr_{aa}I_{S_a} + Zr_{ab}I_{S_b} + Zr_{ac}I_{S_c}$$

이를 고장 거리에 관한 이차방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$p^2(a_2 + jb_2) + p^1(a_1 + jb_1) + (a_0 + jb_0) + (c_0 + jd_0)R_f \quad (18)$$

여기서,

$$a_0 + jb_0 = aa_2 \cdot Zr_{aa}$$

$$a_1 + jb_1 = aa_2 \cdot Zl_{aa} - aa_3 \cdot A5 + aal \cdot Zr_{aa}$$

$$a_2 + jb_2 = aal \cdot Zl_{aa} - aa_2 \cdot A5 - aal \cdot A5 + aa_3 \cdot A5$$

$$c_0 + jd_0 = aa_2 - aa_3$$

이다.

그리고 식 (18)의 허수부분의 식에서 고장저항 R_f 는 다음과 같이 구해진다.

$$R_f = \frac{p^2 b_2 + p^1 b_1 + b_0}{-d_0} \quad (19)$$

이를 식 (18)의 실수부분 시기에 대입하여 소거하면 고장 거리에 대한 2차 방정식이 나타난다.

$$p^2(a_2 - b_2 \frac{c_0}{d_0}) - p^1(a_1 - b_1 \frac{c_0}{d_0}) + (a_0 - b_0 \frac{c_0}{d_0}) = 0 \quad (20)$$

고장거리 (1-p)는 식 (20)의 2차 방정식의 해를 이용하
 ○ 구한다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 제한한 알고리즘을 검증하기 위하여 EMTP를 이용하여 사례연구를 수행하였다. 그림 1과 같은 114[kV], 25[km] 평행 2회선 송전선로와 그림 3과 같은 219[kV], 5km 평행 2회선 배전선로를 사례연구 대상 계통으로 모의하였다

고장거리계산 알고리즘에 대하여 송전계통에서는 고장지점을 변화시켜가며 고장거리를 추정하였고, 배전계통에서는 50형 계통과 불평형 계통에 대한 사례연구를 하였으며, 각각의 사례계통에 대하여 고장거리를 변화시키면서 사고를 모의하여 고장거리를 추정하였다. 고장 거리는 0.1[pu]~0.9[pu], 고장저항은 40[Ω]으로 모의하였다. 데이터 취득을 위한 샘플링 주파수로는 1920Hz 사용하였다. 그리고 전압, 전류 순시 데이터로부터 페이지를 추출하기 위하여 한 주기 데이터 윈도우를 사용하는 DFT를 사용하였다.

표 1 모의 계통 데이터
 Table 1 Model System Data

구분		정상분(역상분) 임피던스	영상분 임피던스		
			self	mutual	
송전계통	전원 [Ω]	SS	0.5331 + 4.1106j	1.8699 + 10.089j	-
		SR	2.2631 + 13.226j	17.658 + 45.774j	-
	선로 [Ω/km]		0.0436 + 0.3445j	0.2380 + 1.0443j	0.1948 + 0.5630j
배전계통	전원 [Ω]		6.8280 + 29.814j	0.5331 + 4.1106j	-
	선로 [Ω/km]		0.56 + 0.8313j	0.6552 + 1.4684j	0.0952 + 0.6371j

고장거리 계산 에러는 다음 식을 사용하여 산정 하였다.

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

3.1 송전계통 평행 2회선 계통에 대한 사례연구

사례연구 대상은 그림 1.과 같으며 고장거리 변화시켜 가며 1선 지락사고를 모의하였다.

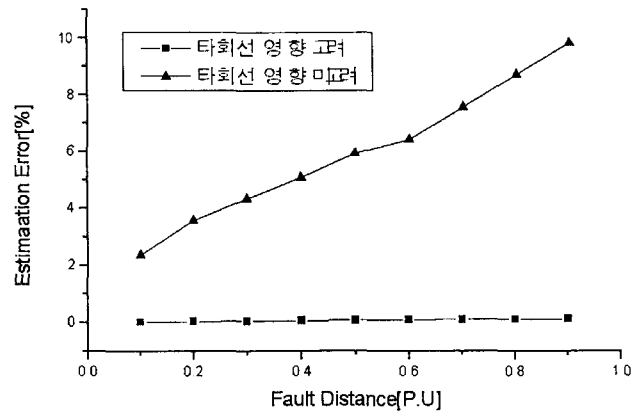


그림 4 평행 2회선 송전계통 고장거리 검출 결과
 Fig. 4 Fault location detection result in the parallel transmission lines

평행2회선 고장거리 검출에 있어서 타회선의 영향을 고려했을 때의 최대 오차는 0.029[%]이다. 이론상 오차가 정확하게 0% 이어야 하지만 DFT 수행과 계산오차 때문에 이와 같은 오차가 나왔지만 이 정도 오차면 고장거리 검출 알고리즘이 정확하다고 할 수 있다. 그러나 타회선의 영향을 고려하지 않았을 때의 오차는 9.817[%]이다. 이와 같이 평행 2회선 계통에 대해서 타회선 상호 임피던스를 고려하지 않으면 고장 거리 오차가 제법 클을 알 수 있다.

현재 우리나라 송전계통에 사용되는 거리계전방식에서는 평행회선의 영향을 고려하지 않고 있다. 그리고 이 거리계전 보호방식의 Zone1의 영역은 차단을 넘지 않아야 다음 단 사고에 오동작하지 않아야 하므로 Zone1은 오차를 15%로 보아 보통 차단 임피던스의 85%를 정한다[8]. 여기서의 15%는 오차를 고려한 양으로 CT오차, 임피던스 오차, 계전기 계산오차를 포함한 양이다. 그러나 사례연구 결과 평행 회선에 의한 오차가 최대 약 10% 정도 있으므로 이를 고려하여 Zone1의 영역을 75% 정도로 수정하는 것이 다음단 사고 오동작 억제에 바람직하리라 사료된다.

3.2 배전계통 평행 2회선 계통에 대한 사례연구

사례연구 대상인 2회선 평행 계통은 그림 3.과 같으며 A와 B 구간에서 고장거리와, 2회선과 3회선에서의 1선 지락 사고를 모의하였다.

3.2.1 평행 배전계통 2회선 모의

그림 3.과 같은 3상 평행2회선 계통에서 직접 해석 방법을 사용하여 고장거리를 계산한 결과를 그림 5.에 나타내었다.

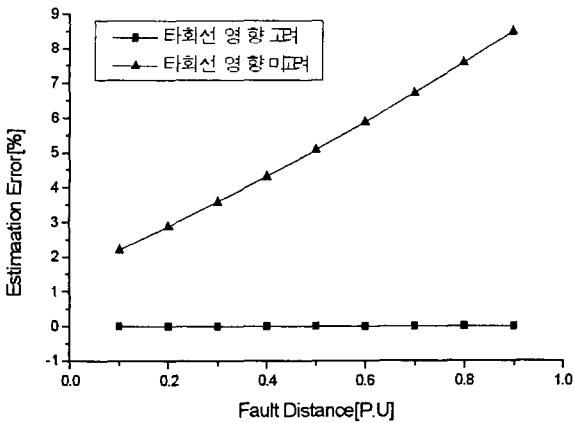


그림 5 평형 2회선 배전계통의 고장거리 검출 결과

Fig. 5 Fault location detection result in the balanced parallel distribution system

3상 직접해석방법을 사용한 고장거리 검출에 있어서 타회선의 영향을 고려했을 때의 최대 오차는 0.0072[%]이므로 역시 이것도 계산오차로 정확하게 고장거리를 검출함을 보여주고 있다. 그러나 타회선의 영향을 고려하지 않았을 때는 오차가 8.48[%]로 제법 큼을 알 수 있다. 이와 같이 3상 평행2회선 계통에 대해서는 본 논문에서 타회선의 영향을 고려한 1선지락 고장 거리계산 알고리즘이 정확하다는 것을 보여준다.

3.2.2 불평형 배전계통 2회선 모의

불평형 배전계통에서 직접 해석 방법을 사용하여 고장거리를 계산한 결과를 그림 6.에 나타내었다.

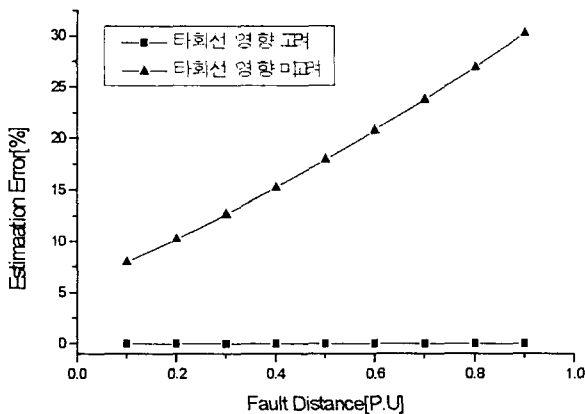


그림 6 불평형 2회선 배전계통의 고장거리 검출 결과

Fig. 6 Fault location detection result in the unbalanced parallel distribution system

불평형 계통에서의 3상 직접해석 사용하였을 때 고장거리 검출에 있어서 최대 오차는 타회선 상호임피던스를 고려했을 때 0.0044[%]이고 고려하지 않았을 때는 30.20[%]로 오차가 크게 나타남을 알 수 있다. 그러므로 배전계통에서 평행회선의 영향을 고려하지 않은 고정거리 검출 알고리즘은 오차가 커서 사용하기가 곤란하다는 결론을 유추할 수 있다.

결과적으로 본 논문에서 개발한 3상 직접해석을 이용한 평행회선의 영향을 고려한 배전계통 1선지락사고 고장거리 검출 알고리즘은 계통의 평형 불평형에 관계없이 모두 사용될 수 있으며 그 결과가 정확하다는 것을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 타회선 상호 임피던스를 고려한 송배전 계통 평행 2회선 계통의 1선 지락 시 고장거리를 계산하는 알고리즘을 연구하였다. 먼저 평형 송전계통의 경우는 대칭좌표법에 의한 분배계수를 사용한 알고리즘을 제안하였고 그 사례연구를 하여 고장거리 계산 시 평행회선에 대한 영향을 검토하였다. 이 결과는 송전계통의 거리계전 보호방식의 보호구간1(Zone1) 영역 결정시 계통의 공급신뢰도를 향상시키기 위하여 필수적일 것이며방사상 불평형인 배전계통에서 1선지락사고 시 평행회선의 영향을 고려하여 3상 직접 계산방법을 사용한 고장점 검출 알고리즘을 개발하였으며 사례연구에서 그 방법의 정확함을 보였다. 이 방법은 평행회선이 많은 배전계통의 고장점 검출에서 아주 유용하게 사용되리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] G. B. Ansell, 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] M. S. Sachdev, R. Agarwal, "A Technique For Estimating Transmission Line Fault Locations form Digital Impedance Relay Measurements", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 3. No. 1, 1988, pp 121-129

- [4] 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
- [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 No2 , April 1997, pp 801 -809
- [6] Soon-Kyo Seo, Sei-Il Oh, Myoung-Ho Kim, " A Study of the distance relay and fault location accuracy in case of un-transposed transmission line", 전력계통 보호제어연구회, 2001. PSPES, pp 82-89
- [7] Myeon-Song Choi, Seung-Jae Lee, Duck-Su Lee, Bo-Gun Jin, Byung-Woong Min "A New Fault Location Algorithm for a Line to Ground Fault Using Direct 3-phase Circuit Analysis in Distribution Power Networks" The Korean Institute of Electrical Engine August 2002 pp 409-416
- [8] Seong-Jin Cho, Myeong-Song Choi, Ho-Seung Hyun, Jung-Wook Kim, Joo-Wang Lee, Bum-Sub Cho, Young-Sik Yoo, "Examination with transmission line distance relay setting rule considering error" 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 12-15

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(공학). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기정보제어공학부 부교수.
Tel:031-330-6367, Fax:031-330-6815
E-mail : mschoi@mju.ac.kr



강 상 희 (姜相熙)

1962년 8월 15일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 부교수.
Tel:031-330-6364, Fax:031-330-6815
E-mail : shkang@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(공학). 1994년 Univ. of Washington 교환교수. 현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 교수.
Tel:031-330-6362, Fax:031-330-6815
E-mail : sjlee@mju.ac.kr



이 한 응 (李翰雄)

1975년 7월 4일 생. 2001년 명지대 공대 전기전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel:031-336-3290, Fax:031-330-6815
E-mail : ruben94@mju.ac.kr