

1회선 분기점을 갖는 병행 2회선 송전선로의 고장점 표정 알고리즘

권태원, 강상희, 최면송, 이승재
 명지대학교

Fault Location Algorithm for Parallel Transmission Line with a Teed Circuit

Tae-Won Kwon, Sang-Hee Kang, Myeon-Song Choi, Seung-Jae Lee
 Myongji University

Abstract - A fault location algorithm that is suitable for parallel transmission line which contains a teed circuit is presented. The method uses only the local end voltage and current signals. Zero sequence currents of other lines are calculated by distribution factors, and distance equations are solved by recursive calculation.

1. 서 론

송전선에 사고가 발생한 경우 사고 발생지점을 정확히 찾아내는 것은 계통을 안정적으로 유지하기 위한 신속한 고장복구에 필수적이다. 이러한 역할을 하는 고장점 표정장치가 없다면 관리자는 고장점을 찾기위해 광범위한 송전선로 구간을 육안으로 확인하여야 한다. 이러한 작업은 많은 인력과 비용이 소모되며, 특히 장거리 송전선로나 송전선로가 통과하는 지형이 험난한 경우 더욱 그러하다[1].

송전선로 상에서 고장발생시 고장점까지의 거리를 계산하는 고장점 표정알고리즘은 최근 십여년동안 활발히 연구되어왔다. 적용대상 계통은 크게 1회선 계통[2], 병행 2회선 계통[3], 분기점을 갖는 다단자 계통[1][4]으로 구분할 수 있다. 2회선 또는 다단자 계통의 경우 상호임피던스를 고려하기 위해서는 건전회선의 영상 전류가 필요하다. 별도의 통신선이 필요하지 않다는 장점으로 2회선 계통의 경우 건전회선의 영상분 전류는 분배계수를 사용하여 나타내는 알고리즘이 발표되고 있다[5]. 그러나 분기점이 존재하는 경우나 다단자 계통의 경우는 아직까지 상대단의 정보나 건전회선의 정보를 직접 받아 처리하므로 실제적인 적용에 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 기본적인 3단자 계통에서 다른 회선의 정보를 입력받지 않고 자기단의 정보만을 사용하는 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다. 사고모의는 EMTP를 사용하였다. 입력된 전압·전류 신호는 960(hz) 이득 0.1의 저역필터를 통과하고, 기본파 주파수 성분은 한 주기 이산푸리에변환(DFT)을 이용하여 추출하였으며 상대단의 영상전류와 건전회선의 영상전류는 분배계수를 이용하여 계산한다. 최종적으로 유도된 거리방정식은 반복계산을 통하여 거리가 계산된다. 또한 분기점 안쪽에서 사고가 발생한 경우의 알고리즘과 분기점 바깥쪽에서 사고가 발생한 경우의 알고리즘이 동시에 수행된다.

2. 본 론

2.1 영상분 분배계수 계산

본 논문에서 대상으로 하고있는 송전계통은 그림 1과 같이 병렬 2회선중 한 회선이 분기된 계통이다. 이와 같은 계통에서 분기되지 않은 회선에서 1선 지락 사고가 발생한 경우 분기점 안쪽고장과 분기점 바깥쪽고장의 고장거리에 관한 방정식은 다음 절과 같이 유도된다.

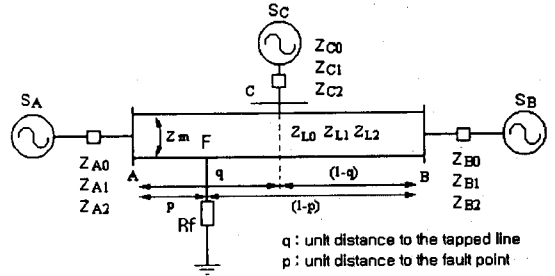


그림 1. 1회선 분기점을 갖는 병행 2회선 송전선로

2.1.1 분기점 안쪽 고장발생시

분기점 안쪽에서 1선 지락사고가 발생한 경우 A모선에서 얻어지는 전압은 식 (1)과 같으며, 영상분회로는 그림 2와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다[6].

$$V_A = p(I_A Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{A0} + Z_m I_{C0}) + 3R_f I_{F0} \quad (1)$$

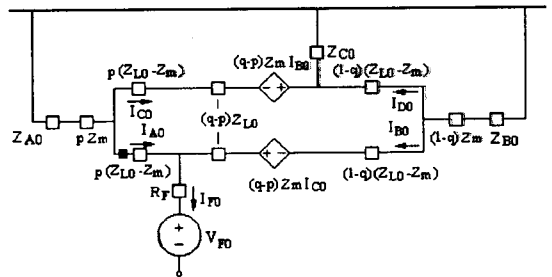


그림 2. 분기점 안쪽 고장시 영상분 회로

그림 2의 회로에서 얻어지는 전류방정식에서 구하고자 하는 전류항을 제외한 나머지 항을 소거하면 자기단의 영상전류(I_{A0})와 상대단의 영상전류(I_{B0})간의 관계는 식 (2)와 같으며, 타회선의 영상전류(I_{C0})간의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\frac{I_{B0}}{I_{A0}} = \frac{pA_{01} + A_{02}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{01} &= a_{210}a_{34}(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) - a_{110}a_{34}(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\ A_{02} &= -a_{111}a_{34}(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) + a_{211}a_{34}(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) \\ A_{03} &= a_{120}a_{34}(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) - a_{220}a_{34}(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) \\ A_{04} &= (a_{121}a_{34} - a_{14}a_{32})(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\ &\quad - (a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33})(a_{221}a_{34} - a_{24}a_{32}) \end{aligned}$$

$$\frac{I_{C0}}{I_{A0}} = \frac{p^2 B_{01} + pB_{02} + B_{03}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B_{01} &= a_{34}^2(a_{110}a_{220} - a_{210}a_{120}) \\ B_{02} &= a_{34}(a_{220}a_{111}a_{34} + a_{110}(a_{221}a_{34} - a_{24}a_{32}) \\ &\quad - a_{120}a_{211}a_{34} - a_{210}(a_{121}a_{34} - a_{14}a_{32})) \\ B_{03} &= a_{111}a_{34}(a_{221}a_{34} - a_{24}a_{32}) + a_{211}a_{34}(a_{14}a_{32} - a_{121}a_{34}) \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_{11} &= pZ_{L0} + Z_{A0} = pa_{110} + a_{111} & a_{12} &= pZ_{L0} - Z_{L0} - Z_{B0} = pa_{120} + a_{121} \\ a_{13} &= Z_{A0} + qZ_m & a_{14} &= -((1-q)Z_m + Z_{B0}) \\ a_{21} &= pZ_m + Z_{A0} = pa_{210} + a_{211} & a_{22} &= pZ_m - Z_m - Z_{B0} = pa_{220} + a_{221} \\ a_{23} &= Z_{A0} + qZ_{L0} & a_{24} &= -((1-q)Z_{L0} + Z_{B0}) \\ a_{31} &= 0 & a_{32} &= (1-q)Z_m + Z_{B0} \\ a_{33} &= Z_{C0} & a_{34} &= Z_{C0} + (1-q)Z_{L0} + Z_{B0} \end{aligned}$$

따라서 식 (2), (3)을 식 (1)에 대입하면 식 (4)와 같은 거리 p 에 관한 3차 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + s_1R_Fp + a_0 + s_0R_F &= 0 \quad (4) \\ a_3 &= Z_m I_{A0} B_{01} & a_2 &= Z_m I_{A0} B_{02} + I_A A_{03} \\ a_1 &= Z_m I_{A0} B_{03} + I_A A_{04} - V_A A_{03} & s_1 &= 3I_{A0}(A_{01} + A_{03}) \\ a_0 &= -V_A A_{04} & s_0 &= 3I_{A0}(A_{04} + A_{02}) \\ I_A &= I_A Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{A0} \end{aligned}$$

2.1.2 분기점 바깥쪽 고장발생시

분기점 바깥쪽에서 1선 지락사고가 발생한 경우 A모선에서 얻어지는 전압은 식 (5)와 같으며, 영상분회로는 그림 3과 같이 구성된다.

$$V_A = pZ_{L1}I_A + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{A0} + qZ_m I_{C0} - (p-q)Z_m I_{D0} + 3R_F I_{F0} \quad (5)$$

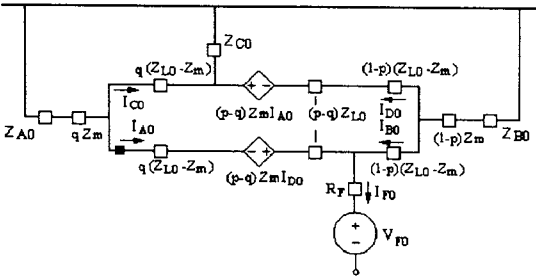


그림 3. 분기점 바깥쪽 고장시 영상분 회로

2.1.1절과 동일한 방법으로 그림 3의 회로에서 자기단의 영상전류(I_{A0})와 상대단의 영상전류(I_{F0})와의 관계는 식 (6)와 같으며, 타회선의 영상전류(I_{C0} , I_{D0})간의 관계는 식 (7), (8)과 같다.

$$\frac{I_{F0}}{I_{A0}} = \frac{pA_{01} + A_{02}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_{01} &= (a_{110}a_{34} - a_{310}a_{14})(a_{24}a_{33} - a_{23}a_{34}) \\ &\quad + (a_{210}a_{34} - a_{310}a_{24})(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) \\ A_{02} &= (a_{111}a_{34} - a_{311}a_{14})(a_{24}a_{33} - a_{23}a_{34}) \\ &\quad + (a_{211}a_{34} - a_{311}a_{24})(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) \\ A_{03} &= (a_{120}a_{34} - a_{14}a_{320})(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\ &\quad - (a_{220}a_{34} - a_{24}a_{320})(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) \\ A_{04} &= (a_{121}a_{34} - a_{14}a_{321})(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\ &\quad - (a_{221}a_{34} - a_{24}a_{321})(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) \end{aligned}$$

$$\frac{I_{C0}}{I_{A0}} = \frac{p^2B_{01} + pB_{02} + B_{03}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B_{01} &= (a_{220}a_{34} - a_{24}a_{320})(a_{110}a_{34} - a_{310}a_{14}) \\ &\quad - (a_{210}a_{34} - a_{310}a_{24})(a_{120}a_{34} - a_{14}a_{320}) \\ B_{02} &= (a_{220}a_{34} - a_{24}a_{320})(a_{111}a_{34} - a_{311}a_{14}) \\ &\quad + (a_{221}a_{34} - a_{24}a_{321})(a_{110}a_{34} - a_{310}a_{14}) \\ &\quad - (a_{210}a_{34} - a_{310}a_{24})(a_{121}a_{34} - a_{14}a_{321}) \\ &\quad - (a_{211}a_{34} - a_{311}a_{24})(a_{120}a_{34} - a_{14}a_{320}) \\ B_{03} &= (a_{221}a_{34} - a_{24}a_{321})(a_{111}a_{34} - a_{311}a_{14}) \\ &\quad - (a_{211}a_{34} - a_{311}a_{24})(a_{121}a_{34} - a_{14}a_{321}) \end{aligned}$$

$$\frac{I_{D0}}{I_{A0}} = \frac{p^2C_{01} + pC_{02} + C_{03}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_{01} &= -\frac{a_{110}A_{03} + a_{120}A_{01} + a_{13}B_{01}}{a_{14}} \\ C_{02} &= -\frac{a_{111}A_{03} + a_{110}A_{04} + a_{121}A_{01} + a_{120}A_{02} + a_{13}B_{02}}{a_{14}} \\ C_{03} &= -\frac{a_{111}A_{04} + a_{121}A_{02} + a_{13}B_{03}}{a_{14}} \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_{11} &= pZ_{L0} + Z_{A0} = pa_{110} + a_{111} & a_{12} &= pZ_{L0} - Z_{L0} - Z_{B0} = pa_{120} + a_{121} \\ a_{13} &= Z_{A0} + qZ_m & a_{14} &= -((1-q)Z_m + Z_{B0}) \\ a_{21} &= pZ_m + Z_{A0} = pa_{210} + a_{211} & a_{22} &= pZ_m - Z_m - Z_{B0} = pa_{220} + a_{221} \\ a_{23} &= Z_{A0} + qZ_{L0} & a_{24} &= -((1-q)Z_{L0} + Z_{B0}) \\ a_{31} &= -pZ_m + qZ_m = pa_{310} + a_{311} & a_{32} &= -pZ_m + Z_m + Z_{B0} = pa_{320} + a_{321} \\ a_{33} &= Z_{C0} & a_{34} &= Z_{C0} + (1-q)Z_{L0} + Z_{B0} \end{aligned}$$

따라서 식 (6), (7), (8)을 식 (5)에 대입하면 식 (9)와 같은 거리 p 에 관한 3차 방정식이 얻어진다.

$$a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + s_1R_Fp + a_0 + s_0R_F = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a_3 &= -C_{01}Z_m I_{A0} \\ a_2 &= I_A A_{03} + qZ_m I_{A0}(B_{01} + C_{01}) - Z_m I_{A0}C_{02} \\ a_1 &= I_A A_{04} + qZ_m I_{A0}B_{02} - Z_m I_{A0}C_{03} + qZ_m I_{A0}C_{02} - V_A A_{03} \\ s_1 &= 3I_{A0}(A_{01} + A_{03}) \\ a_0 &= qZ_m I_{A0}(B_{03} + C_{03}) - V_A A_{04} \\ s_0 &= 3I_{A0}(A_{04} + A_{02}) \\ I_A &= I_A Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{A0} \end{aligned}$$

2.1.3 고장거리 계산

식 (4)와 식 (9)를 각각 실수부와 허수부로 나누어 2개의 방정식으로 분리하고 이를 Newton-Raphson 반복계산 방법을 통하여 단위길이로 표시되는 고장거리를 계산한다. 사고신호가 입력되면 두 가지 방정식에 의한 고장거리가 모두에 계산된다. 이때 식 (4)에 의해 얻어진 고장거리는 0~ q (분기점까지의 거리)사이에서 존재하여야 하며, 식 (9)에 의해 얻어진 고장거리는 q (분기점까지의 거리)~1 사이에서 존재해야 한다. 이를 이용해 현재 입력되고있는 사고신호가 분기점 안쪽고장에 의한 것인지 분기점 바깥쪽 고장에 의한 것인지 판단한다.

2.2 사례연구

본문의 알고리즘을 검증하기위해 EMTP를 사용하여 그림 1과 같은 154[kV] 병행회선길이 25[km]의 계통에서 사고모의를 하였다.

그림 4는 분기점의 위치를 변화시켜가며 동일한 거리에서 고장이 발생한 경우 오차의 변화추이를 나타내는 것으로, 분기점의 위치가 멀어질 수록 오차가 커짐을 알 수 있다. 그림에서 골목이 나타나는 이유는 분기점 안쪽에 고장이 발생한 경우와 분기점 바깥쪽에 고장이 발생한 경우 사용된 식이 다르기 때문이며, 또한 분기점의 위치와 사고발생 지점의 위치가 가까울 수록 오차가 증가함을 알 수 있다.

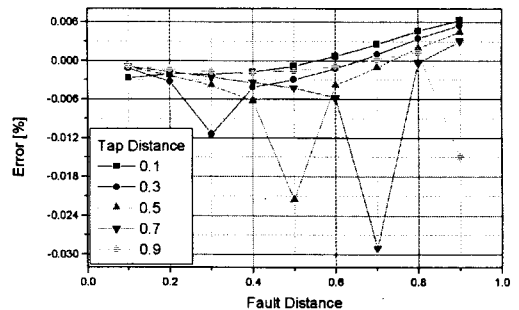


그림 4. 분기점 위치에 따른 오차

그림 5는 고장발생 위치를 변화시켰을 때 오차의 변화를 나타내는 그림이다.

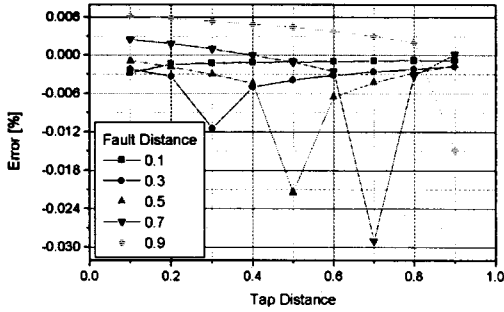


그림 5. 고장거리에 따른 오차

그림 6과 그림 7은 고장저항이 개입된 경우 오차를 나타내는 것으로, 그림 6은 분기점의 위치 0.1에서 고장저항이 개입된 사고발생시 고장저항의 크기에 따른 오차의 변화를 나타내는 그림이다. 고장저항의 크기가 클수록 고장점 위치가 멀수록 오차가 커짐을 나타낸다. 그림 7은 분기점의 위치가 0.5인 경우 고장저항이 개입된 사고발생시 오차의 변화이다. 두가지 경우 모두 50[Ω]까지 고장 저항이 개입되더라도 오차가 0.2[%]미만으로 정확도를 유지하고 있다.

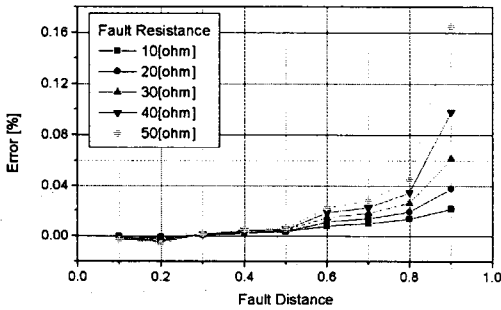


그림 6. 분기점의 위치 0.1인 경우 저항지락 사고시 오차

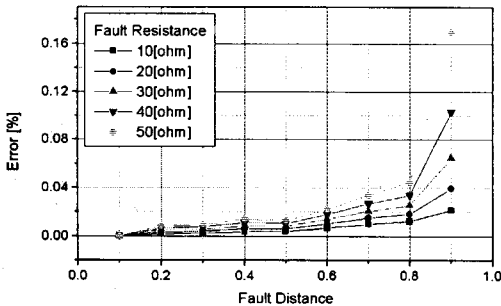


그림 7. 분기점의 위치 0.5인 경우 저항지락 사고시 오차

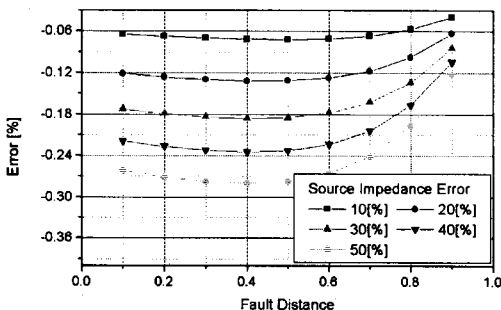


그림 8. 분기점의 위치 0.1인 경우 전원임피던스 변화시 오차

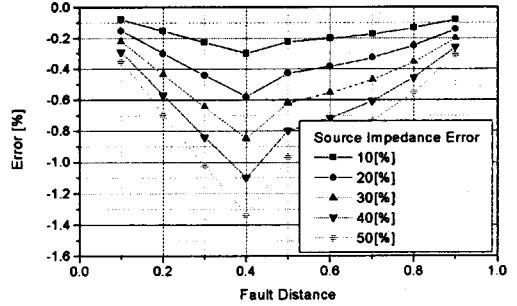


그림 9. 분기점의 위치 0.5인 경우 전원임피던스 변화시 오차

그림 8과 그림 9는 A모선의 전원 임피던스가 변화하였을 경우 고장 거리에 따른 오차의 변화를 나타낸다. 전원임피던스가 많이 변화할 수록, 분기점의 위치가 멀 수록, 고장점이 분기점의 위치와 가까울수록 오차가 커지는 것을 보여주고 있다.

3. 결 론

자기단의 전압·전류 신호만을 이용한 병렬 2회선 송전계통 중 한 회선이 분기된 계통에서의 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다. 분기점 안쪽 고장과 바깥쪽 고장의 경우 거리방정식이 서로 다르게 나타나며, Newton-Raphson 반복계산을 통해 거리를 구하였다. 임의의 사고신호 입력시 분기점 안쪽 고장시의 방정식과 바깥쪽 고장시의 방정식에 대한 해가 모두 구해지며, 해의 존재 조건을 고려하여 어느 구간에서 발생한 사고인지 판단한다. EMTP 모의결과 제안된 알고리즘은 저항지락 사고시나 전원임피던스의 변화에도 불구하고 적은 오차 범위내에서 거리를 추정할 수 있었다. 자기단의 정보만을 사용하고 대 수용가 쪽으로 분기회로가 많이 존재하며 대부분이 병렬회로인 우리나라 송전 계통 운용상황을 볼 때 본 논문에서 개발한 고장점표정 방법은 아주 유용하리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. Nagasawa, M. Abe, N. Otsuzuki, T. Emura, Y. Jikihara, M. Takeuchi, "Development of a New Fault Location Algorithm for Multi-Terminal Two Parallel Transmission Lines", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 3, pp.1516-1532, 1992
- [2] M. S. Sachdev, R. Agarwal, "A Technique for Estimating Transmission Line Fault Locations from Digital Impedance Relay Measurements", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 3, No. 1, pp.121-129, 1988
- [3] A. Wiszniewski, "Accurate Fault Impedance Locating Algorithm", IEE Proceedings, Vol. 130, pt. C, No. 6, pp.311-314, 1983
- [4] R. K. Aggarwal, D. V. Coury, A. T. Johns, A. Kalam, "A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No. 3, pp.874-883, 1993
- [5] 박홍규, 이명수, 이재규, 유석규, "송전선에서의 고저항 지락사고시 고장거리 추정에 관한 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1363-1365, 1999
- [6] J. L. Blackburn, Protective Relaying Principles and Applications, Marcel Dekker, pp.428-430, 1997