

다단자 송전계통에서의 1선지락 고장시 고장점 표정 알고리즘

論 文

52A-2-7

A Fault Location Algorithm for a Single Line Ground Fault on a Multi-Terminal Transmission Line

姜 相 熙* · 盧 載 根** · 權 寧 珍***

(Sang-Hee Kang · Jae-Keun No · Young-Jin, Kwon)

Abstract - This paper presents a fault location algorithm for a single phase-to-ground fault on 3-terminal transmission systems. The method uses only the local end voltage and current signals. Other currents used for the algorithm are estimated by current distribution factors and the local end current. Negative sequence current is used to remove the effect of load current. Five distance equations based on Kirchhoff's voltage law are established for the location algorithm which can be applied to a parallel transmission line having a teed circuit. Separating the real and imaginary parts of each distance equation, final nonlinear equations that are functions of the fault location can be obtained. The Newton-Raphson method is then applied to calculate the estimated fault location. Among the solutions, a correct fault distance is selected by the conditions of the existence of solution. With the results of extensive S/W and H/W simulation tests, it was verified that the proposed algorithm can estimate an accurate fault distance in a 154kV model system.

Key Words : Fault Location, Multi-Terminal Transmission Lines, Current Distribution Factor, Teed Circuit

1. 서 론

송전선에 사고가 발생한 경우 사고 발생지점을 정확히 찾아내는 것은 계통을 안정적으로 유지하기 위한 신속한 고장복구에 필수적 요소이다. 최근 십여년간 고장점 표정 알고리즘은 활발히 연구되어 왔다. 고장에 의해 발생한 썬지(Surge)의 도달시간을 이용하는 진행파방식이 N. C. Pahalawaththa 등에 의해 발표되었으나[1] 고속 샘플링이 가능해야 하며, T. Takagi에 의해 전파방정식을 이용하는 방식이 제안되었으나 오차개선이 되지 못하였다.[2] 한편, 거터계전기에 사용되는 수식 상에서 발생하는 오차를 줄여 보고자 기본 식에 고장저항 항을 추가하고, 병행가설된 송전선로인 경우 상호임피던스 항까지 추가하여 고장거리를 구하는 알고리즘이 발표되고 있다. 알고리즘의 적용대상 계통을 기준으로 구분하면 양단 전원 1회선[1-3] 및 병행 2회선[4-6], 다단자 계통[7-10]으로 나눌 수 있다. 이 중에서 다단자 계통을 대상으로 하는 알고리즘은 아직까지 병행 회선을 고려하지 않거나, 각 분기회선에서의 전압·전류 신호를 필요로 하고 있다[4-5, 7-8]. 이러한 알고리즘들은 별도의 통신시스템을 갖추어야 하는 문제가 있으며 또한 전송된 데이터의 동기를 맞추어야 하는 문제가 있다. 이러한 경제적 기술적 문제를 해결하고자 별도의 통신시스템을 갖추

필요가 없는 알고리즘이 고안되었으며[6], 송전선로가 병행으로 가설되어 있으며 대용량 부하쪽으로 분기회선이 존재하는 계통을 대상으로 자기단의 정보만을 가지고 고장점 표정이 가능한 알고리즘이 제안되었다.[9] 1회선 분기점을 가지는 병행 2회선 선로의 경우 적용선로에 따라 분기된 선로와 분기되지 않은 선로의 고장점 표정 방법이 달라야 한다[10]. 논문 [9]의 경우 분기되지 않은 선로만을 대상으로 하고 있으며 분기된 전원의 경우 실제 선로를 포함하지 않고 있으며, 논문 [10]의 경우에는 분기된 선로의 내부고장만을 판별할 수 있는 한계가 있다. 본 논문에서는 T분기 선로를 갖는 병행 2회선 송전선로 전체를 대상으로 하는 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다.

고장점 표정시 발생하는 주요 문제는 고장점으로 흐르는 고장전류값의 처리, 고장저항의 영향, 병행회선에서 건전회선의 영상전류의 영향, 부하전류 등이다. 본 논문에서는 자기단 정보를 제외한 다른 지점에서의 정보는 모두 전류 분배계수를 사용하여 자기단 정보로부터 계산후 사용하며, 고장저항은 최종방정식을 실·허수부로 분해하여 반복계산을 통해 구함으로써 그 영향을 배제시켰다. 부하전류의 영향은 역상분을 사용하여 영향을 최소화시켰다.

분기선로가 존재하는 병행 2회선 계통에서는 분기되지 않은 선로의 분기점 안쪽에서 고장이 발생한 경우와 분기점 바깥쪽에서 고장이 발생한 경우, 그리고 분기된 선로의 분기점 안쪽, 바깥쪽 및 분기선로에서 고장이 발생한 경우에 적용되는 방정식은 서로 다르며, 분기점 내부 및 외부 고장방정식과 분기선로 고장방정식의 해를 각기 구한 후 해들 중에서 해의 존재조건을 고려하여 만족하는 해를 선택한다.

* 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2003年 10月 31日

最終完了 : 2003年 12月 30日

2. 본 론

본 논문에서 대상으로 하는 송전계통은 그림 1과 같이 병행 2회선중 한 회선이 분기된 계통이다. 그림에서 q는 분기점까지의 단위 거리이고, r은 분기선로 길이이며, p는 고장점까지의 단위 거리이다. 대칭분 등가회로 중 정상회로는 고장 저항만 제외하면 각 경우의 모델 회로와 같고, 역상회로는 정상회로에서 전원만 제거된 것이므로 별도로 표시하지 않도록 한다.

2.1. 분기되지 않은 선로의 경우

분기되지 않은 회선에서 1선 지락 고장이 발생한 경우 분기점 안쪽 고장과 분기점 바깥쪽 고장의 고장거리에 관한 방정식은 다음과 같이 유도된다.

2.1.1 분기점 안쪽 고장시

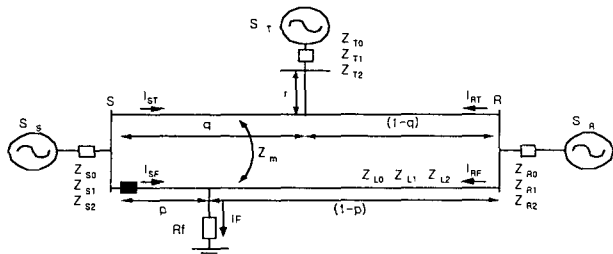


그림 1 분기되지 않은 선로의 분기점 안쪽 고장시 모델
Fig. 1 Inner fault of tap in parallel T/L with no teed circuit

2.1.1.1 대칭분 회로 및 기본 방정식

분기점 안쪽에서 1선 지락고장이 발생한 경우 S모션에서 얻어지는 전압은 식 (1)과 같다.

$$V_S = V_{S0} + V_{S1} + V_{S2} = p(I_{SF}Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{SF0} + Z_m I_{ST0}) + 3R_F I_{F2} \quad (1)$$

2.1.1.2 분배계수의 계산

자기단의 영상전류(I_{SF0})를 이용해 타회선 자기단의 영상전류(I_{ST0})를 구하기 위해 그림 2의 영상분 회로에서 3개의 루프를 따라 전압방정식을 세우면 식 (2)와 같다. 여기서 (I_{RF0})는 상대단 영상전류를 (I_{RT0})는 타회선 상대단 영상전류이다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SF0} \\ I_{RF0} \\ I_{ST0} \\ I_{RT0} \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

각 계수항(a_{11}, a_{12}, \dots)을 연산의 편의성을 위해 p 항과 상수항으로 분리하면,

$$\begin{aligned} a_{11} &= pZ_{L0} + Z_{S0} = pa_{110} + a_{111} & a_{13} &= Z_{S0} + qZ_m \\ a_{12} &= pZ_{L0} - Z_{L0} - Z_{R0} = pa_{120} + a_{121} & a_{21} &= pZ_m + Z_{S0} = pa_{210} + a_{211} \\ a_{14} &= -\{(1-q)Z_m + Z_{R0}\} & a_{22} &= pZ_m - Z_m - Z_{R0} = pa_{220} + a_{221} & a_{23} &= Z_{S0} + qZ_{L0} \\ a_{22} &= pZ_m - Z_m - Z_{R0} = pa_{220} + a_{221} & a_{24} &= -\{(1-q)Z_{L0} + Z_{R0}\} & a_{31} &= 0 \\ a_{24} &= -\{(1-q)Z_{L0} + Z_{R0}\} & a_{32} &= (1-q)Z_m + Z_{R0} & a_{33} &= Z_{T0} \\ a_{32} &= (1-q)Z_m + Z_{R0} & a_{34} &= Z_{T0} + (1-q)Z_{L0} + Z_{R0} \end{aligned}$$

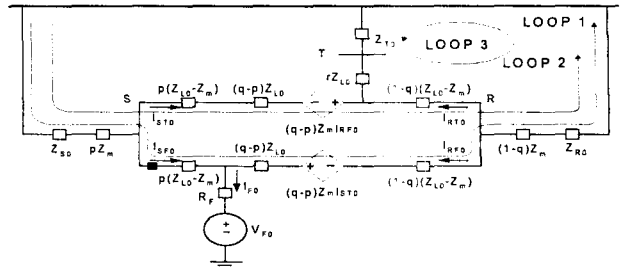


그림 2 분기점 안쪽 고장시 영상분 회로
Fig. 2 Zero sequence network with a tap inner fault of no teed T/L

식 (2)에서 상대단의 영상전류(I_{RF0}) 및 타회선 상대단 영상전류(I_{RT0})를 소거하고 자기단 영상전류(I_{SF0})와 타회선 영상전류(I_{ST0})의 비를 구해보면 식 (3)과 같다.

$$\frac{I_{ST0}}{I_{SF0}} = \frac{pB_{01} + B_{02}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (3)$$

여기서,

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

자기단의 역상전류(I_{SF2})를 이용해 상대단의 역상전류(I_{RF2})를 구하기 위해 역상분 회로에서 영상분에서와 같은 동일 경로를 따라 전압방정식을 세우면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SF2} \\ I_{RF2} \\ I_{ST2} \\ I_{RT2} \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= pZ_{L2} + Z_{S2} = pa_{110} + a_{111} & a_{13} &= Z_{S2} \\ a_{12} &= pZ_{L2} - Z_{L2} - Z_{R2} = pa_{120} + a_{121} & a_{21} &= Z_{S2} \\ a_{14} &= -Z_{R2} & a_{22} &= -Z_{R2} \\ a_{22} &= -Z_{R2} & a_{23} &= Z_{S2} + qZ_{L2} \\ a_{24} &= (q-1)Z_{L2} - Z_{R2} & a_{31} &= 0 \\ a_{32} &= Z_{R2} & a_{33} &= Z_{T2} \\ a_{34} &= Z_{T2} + (1-q)Z_{L2} + Z_{R2} \end{aligned}$$

식 (4)에서 각 방정식에 포함된 타회선 자기단 역상전류(I_{ST2}) 및 타회선 상대단 역상전류(I_{RT2}) 성분을 소거하고 자기단 역상전류(I_{SF2})와 상대단 역상전류(I_{RF2})의 비는,

$$\frac{I_{RF2}}{I_{SF2}} = \frac{pA_{11} + A_{12}}{pA_{13} + A_{14}} \quad (5)$$

이다. 여기서,

$$\begin{aligned} A_{11} &= a_{110}a_{34}(a_{24}a_{33} - a_{23}a_{34}) \\ A_{12} &= a_{111}a_{34}(a_{24}a_{33} - a_{23}a_{34}) + a_{21}a_{34}(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) \\ A_{13} &= a_{120}a_{34}(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\ A_{14} &= (a_{121}a_{34} - a_{14}a_{32})(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\ &\quad - (a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33})(a_{22}a_{34} - a_{24}a_{32}) \end{aligned}$$

2.1.1.3 고장 거리 방정식

S단에서의 전압방정식인 식 (1)에 앞에서 구한 분배계수를 대입하면 식 (6)과 같은 분기되지 않은 선로에서 분기점 안쪽 고장에 대한 고장거리(p)에 관한 방정식을 얻을 수 있다.

$$a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + s_1R_Fp + a_0 + s_0R_F = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a_3 &= A_{13}(Z_m I_{SF0} B_{01} + I_{SF} A_{03}) \\ a_2 &= A_{14}(Z_m I_{SF0} B_{01} + I_{SF} A_{03}) \\ &\quad + A_{13}(Z_m I_{SF0} B_{02} + I_{SF} A_{04}) - V_S A_{03} A_{13} \\ a_1 &= A_{14}(Z_m I_{SF0} B_{02} + I_{SF} A_{04}) - V_S (A_{03} A_{14} + A_{04} A_{13}) \\ s_1 &= 3I_{SF2}(A_{04}(A_{13} + A_{11}) + A_{03}(A_{14} + A_{12})) \\ a_0 &= -V_S A_{04} A_{14} \\ s_0 &= 3I_{SF2} A_{04} (A_{14} + A_{12}) \end{aligned}$$

2.1.2 분기점 바깥쪽 고장시

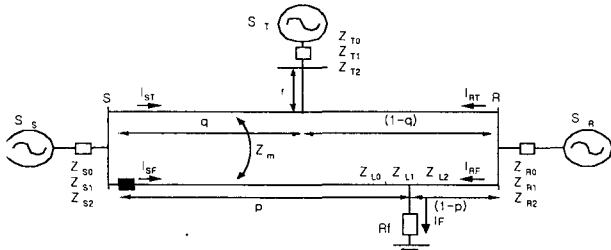


그림 3 분기되지 않은 선로의 분기점 바깥쪽 고장시 모델
Fig. 3 Outer fault of tap in parallel T/L with no teed circuit

2.1.2.1 대칭분 회로 및 기본 방정식

분기점 바깥쪽에서 1선 지락고장이 발생한 경우 계전점에서 얻어지는 전압은 식 (7)과 같다.

$$V_S = p(Z_{L1} I_{SF} + (Z_{L0} - Z_{L1}) I_{SF0}) + qZ_m I_{S70} - (p-q)Z_m I_{R70} + 3R_F I_{F2} \quad (7)$$

자기단의 정보만을 가지고 식 (7)를 풀기 위해서는 타회선의 영상전류(I_{S70} , I_{R70})와 고장점 전류(I_{F2})를 알아야 한다. 이 때 고장전류의 크기는 분기점 안쪽 고장시와 마찬가지로 정상분 전류 대신 역상분 전류(I_{F2})를 사용한다. 따라서 자기단의 영상전류와 타회선의 영상전류의 비 두 가지와 자기단의 역상전류와 상대단의 역상전류의 비가 필요하게 된다.

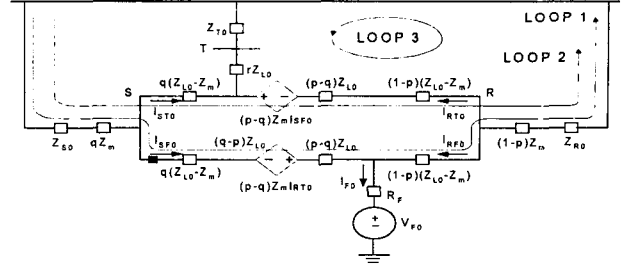


그림 4 분기점 바깥쪽 고장시 영상분 회로
Fig. 4 Zero sequence network with a tap outer fault of no teed T/L

2.1.2.2 분배계수의 계산

자기단의 영상전류(I_{SF0})를 이용해 상대단의 영상전류(I_{RF0})를 구하기 위해 그림 4의 영상분 회로에서 3개의 루프를 따라 전압방정식을 세우면 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SF0} \\ I_{RF0} \\ I_{S70} \\ I_{R70} \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= pZ_{L0} + Z_{S0} = pa_{110} + a_{111} & a_{13} &= Z_{S0} + qZ_m \\ a_{12} &= pZ_{L0} - Z_{L0} - Z_{R0} = pa_{120} + a_{121} & a_{21} &= pZ_m + Z_{S0} = pa_{210} + a_{211} \\ a_{14} &= -\{(1-q)Z_m + Z_{T0}\} & a_{23} &= Z_{S0} + qZ_{L0} \\ a_{22} &= pZ_m - Z_m - Z_{R0} = pa_{220} + a_{221} & a_{24} &= -\{(1-q)Z_{L0} + Z_{R0}\} \\ a_{24} &= -\{(1-q)Z_{L0} + Z_{R0}\} & a_{31} &= -pZ_m + qZ_m = pa_{310} + a_{311} \\ a_{31} &= -pZ_m + qZ_m = pa_{310} + a_{311} & a_{32} &= -pZ_m + Z_m + Z_{R0} = pa_{320} + a_{321} \\ a_{32} &= -pZ_m + Z_m + Z_{R0} = pa_{320} + a_{321} & a_{33} &= Z_{T0} \\ a_{34} &= Z_{T0} + (1-q)Z_{L0} + Z_{R0} & a_{34} &= Z_{T0} + (1-q)Z_{L0} + Z_{R0} \end{aligned}$$

식 (8)에서 I_{S70} 와 I_{R70} 를 소거하고 자기단 영상전류(I_{SF0})와 상대단 영상전류(I_{RF0})의 비를 구해보면 식 (9)와 같다.

$$\frac{I_{RF0}}{I_{SF0}} = \frac{pA_{01} + A_{02}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (9)$$

여기서,

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

또한 식 (8)에서 같은 방법으로 자기단의 영상전류(I_{SF0})와 타회선의 영상전류(I_{S70})의 비는 식 (10)과 같다.

$$\frac{I_{S70}}{I_{SF0}} = \frac{pB_{01} + B_{02}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (10)$$

여기서,

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

식 (8)의 첫번째 방정식에 식 (9), (10)를 대입하면 식 (11)과 같이 자기단의 영상전류(I_{SF0})와 타회선의 상대단 영상전류(I_{RT0})의 비를 얻을 수 있다.

$$\frac{I_{RT0}}{I_{SF0}} = \frac{pC_{01} + C_{02}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (11)$$

여기서,

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

자기단의 역상전류(I_{SF2})를 이용해 상대단의 역상전류(I_{RF2})를 구하기 위해 역상분 회로에서 동일 경로를 따라 전압방정식을 세우면 식 (12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SF2} \\ I_{RF2} \\ I_{ST2} \\ I_{RT2} \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= pZ_{L2} + Z_{S2} = pa_{110} + a_{111} & a_{13} &= Z_{S2} \\
 a_{12} &= pZ_{L2} - Z_{L2} - Z_{R2} = pa_{120} + a_{121} & a_{21} &= Z_{S2} \\
 a_{14} &= -Z_{R2} & a_{23} &= Z_{S2} + qZ_{L2} \\
 a_{22} &= -Z_{R2} & a_{32} &= Z_{R2} \\
 a_{24} &= (q-1)Z_{L2} - Z_{R2} & a_{33} &= Z_{T2} \\
 a_{34} &= Z_{T2} + (1-q)Z_{L2} + Z_{R2} & a_{34} &= 0
 \end{aligned}$$

식 (12)에서 I_{ST2} 와 I_{RT2} 를 소거하고 자기단 역상전류(I_{SF2})와 상대단 역상전류(I_{RF2})의 비를 구해보면 식 (13)과 같다.

$$\frac{I_{RF2}}{I_{SF2}} = \frac{pA_{11} + A_{12}}{pA_{13} + A_{14}} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= a_{110}a_{34}(a_{24}a_{33} - a_{23}a_{34}) \\
 A_{12} &= -a_{111}a_{34}(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\
 &\quad + a_{21}a_{34}(a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33}) \\
 A_{13} &= a_{120}a_{34}(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\
 A_{14} &= (a_{121}a_{34} - a_{14}a_{32})(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33}) \\
 &\quad - (a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33})(a_{22}a_{34} - a_{24}a_{32})
 \end{aligned}$$

2.1.2.3 고장 거리 방정식

분기점 바깥쪽 고장시 S단에서의 전압방정식인 식 (7)을 2.1.2.2절에서 구한 분배계수를 사용하여 정리하면 식 (14)와 같이 된다.

$$a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + s_1R_Fp + a_0 + s_0R_F = 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 a_3 &= -Z_m I_{SF0} A_{13} C_{01} + I_{SF} A_{03} A_{13} \\
 a_2 &= I_{SF} (A_{04} A_{13} + A_{03} A_{14}) + qZ_m I_{SF0} A_{13} B_{01} \\
 &\quad - C_{02} Z_m I_{SF0} A_{13} - C_{01} (Z_m I_{SF0} A_{14} - qZ_m I_{SF0} A_{13}) \\
 &\quad - V_S A_{03} A_{13} \\
 a_1 &= I_{SF} A_{04} A_{14} + qZ_m I_{SF0} (A_{13} B_{02} + B_{01} A_{14}) \\
 &\quad - C_{02} (Z_m I_{SF0} A_{14} - qZ_m I_{SF0} A_{13}) + C_{01} qZ_m I_{SF0} A_{14} \\
 &\quad - V_S (A_{03} A_{14} + A_{04} A_{13}) \\
 s_1 &= 3I_{SF2} (A_{04} (A_{13} + A_{11}) + A_{03} (A_{14} + A_{12})) \\
 a_0 &= qZ_m I_{SF0} B_{02} A_{14} + C_{02} qZ_m I_{SF0} A_{14} - V_S A_{04} A_{14} \\
 s_0 &= 3I_{SF2} A_{04} (A_{14} + A_{12})
 \end{aligned}$$

2.2. 분기된 선로의 경우

분기된 회선에서 1선 지락 고장이 발생한 경우 분기점 안쪽 고장, 분기점 바깥쪽 및 분기선로에서의 고장시 고장 거리에 관한 방정식은 다음과 같이 유도된다. 고장점 전류는 고장점 좌우의 전류합이므로 분기점과 고장점 사이의 전류(I_{TS})를 추정하였다.

2.2.1 분기점 안쪽 고장시

2.2.1.1 대칭분 회로 및 기본 방정식

그림 5의 회로에서 계전기 설치점으로부터 고장지점까지의 전압 방정식을 전개하면 식 (15)와 같다.

$$V_S = p[I_{SF}Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{SF0} + Z_m I_{SN0}] + 3R_F I_{F2} \quad (15)$$

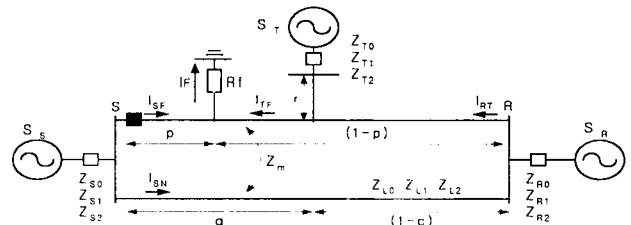


그림 5 분기된 선로의 분기점 안쪽 고장시 모델
Fig. 5 Inner fault of tap in parallel T/L with a teed circuit

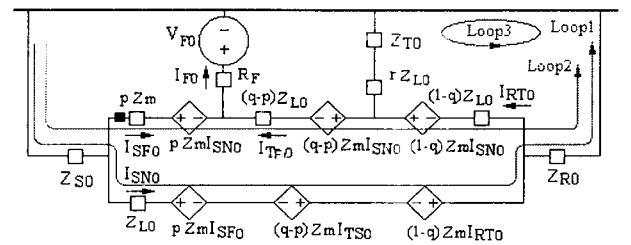


그림 6 분기된 선로의 분기점 안쪽 고장시 영상분 회로
Fig. 6 Zero sequence network with a tap inner fault of a teed T/L

식 (15)의 전압방정식을 풀기 위해서는 타회선 영상전류(I_{SN0})와 고장전류(I_{F2})를 알아야 한다. 이 두 전류값을 자

기단 전류값으로부터 추정하기 위해서는 자기단 영상전류 (I_{SF0})와 타회선 영상전류(I_{SM0})의 비와 자기단 역상전류 (I_{SF2})와 분기점에서 고장점으로 흐르는 역상전류(I_{TF2})의 비 즉, 해당 전류 분배계수를 구해야 한다.

2.2.1.2 분배계수의 계산

그림 6 영상분 회로에서 그림에 표시된 3개의 루프에 따라 전압방정식을 세우면 식 (16)과 같다

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SF0} \\ I_{RT0} \\ I_{SM0} \\ I_{TF0} \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= pZ_{L0} + Z_{S0} = pa_{110} + a_{111} \\ a_{12} &= Z_{L0}(q-1) - Z_{R0} & a_{13} &= Z_{S0} + Z_m + Z_{R0} \\ a_{14} &= pZ_m + Z_{S0} = pa_{140} + a_{141} \\ a_{21} &= pZ_m + Z_{S0} = pa_{210} + a_{211} \\ a_{22} &= (q-1)Z_m - Z_{R0} \\ a_{24} &= pZ_m - qZ_m = pa_{240} + a_{241} & a_{31} &= 0 \\ a_{32} &= (q-1)Z_{L0} - Z_{R0} - Z_{T0} + Z_{L2} \times r \\ a_{33} &= (1-q)Z_m + Z_{R0} & a_{34} &= Z_{T0} + Z_{L2} \times r \end{aligned}$$

식 (16)에서 I_{RT0} 및 I_{TS0} 를 소거 후 타회선 영상전류(I_{SM0})와 자기단 영상전류(I_{SF0})의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{SM0}}{I_{SF0}} = \frac{pA_{01} + A_{02}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (17)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_{01} &= (a_{32})^2 a_{140} a_{24} - a_{32} a_{34} a_{110} a_{22} + a_{111} a_{240} (a_{32})^2 \\ &\quad - a_{210} a_{141} (a_{32})^2 + a_{210} a_{12} a_{32} a_{34} - a_{211} a_{140} (a_{32})^2 \\ A_{02} &= a_{11} a_{421} (a_{32})^2 - a_{111} a_{22} a_{32} a_{34} - a_{211} a_{141} (a_{32})^2 \\ &\quad + a_{211} a_{32} a_{12} a_{34} \\ A_{03} &= a_{140} a_{23} (a_{32})^2 - a_{140} a_{32} a_{22} a_{33} \\ &\quad - a_{13} a_{240} (a_{32})^2 + a_{12} a_{240} a_{33} a_{32} \\ A_{04} &= a_{141} a_{23} (a_{32})^2 - a_{141} a_{32} a_{22} a_{33} - a_{12} a_{34} a_{23} a_{32} \\ &\quad + a_{12} a_{34} a_{22} a_{33} - a_{13} a_{241} (a_{32})^2 + a_{13} a_{22} a_{32} a_{34} \\ &\quad + a_{12} a_{33} a_{241} a_{32} - a_{12} a_{33} a_{22} a_{34} \end{aligned}$$

자기단 역상전류 (I_{SF2})를 이용해 분기점으로부터 고장점으로 흐르는 역상전류(I_{TF2})를 구하기 위해 역상분 회로에서 영상분회로에서와 같은 3개의 루프에 따라 전압방정식을 세우면 식 (18)과 같다

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SF2} \\ I_{RT2} \\ I_{SN2} \\ I_{TF2} \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

여기서,

$$\begin{aligned} b_{11} &= pZ_{L2} + Z_{S2} = pb_{110} + b_{111} \\ b_{12} &= (q-1)Z_{L2} - Z_{R2} \\ b_{13} &= Z_{S2} + Z_{R2} \\ b_{14} &= pZ_{L2} - qZ_{L2} = pb_{140} + b_{141} \\ b_{21} &= Z_{S2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{22} &= -Z_{R2} \\ b_{23} &= Z_{S2} + Z_{R2} + Z_{L2} \\ b_{32} &= qZ_{L2} - Z_{T2} - Z_{L2} - Z_{R2} \\ b_{33} &= Z_{R2} \\ b_{34} &= Z_{T2} \end{aligned}$$

식 (18)에서 I_{RT2} 및 I_{SN2} 를 소거 후 I_{TF2} 와 I_{SF2} 의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{TF2}}{I_{SF2}} = \frac{pA_{11} + A_{12}}{pA_{13} + A_{14}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} A_{11} &= b_{110} b_{33} (b_{22})^2 - b_{110} b_{22} b_{32} b_{23} \\ A_{12} &= (b_{13} b_{22} - b_{12} b_{23}) b_{33} b_{21} + (b_{111} b_{22} - b_{12} b_{21}) b_{33} b_{22} \\ &\quad - (b_{111} b_{22} - b_{12} b_{21}) b_{32} b_{23} \\ A_{13} &= b_{140} b_{32} b_{23} b_{22} - b_{140} b_{33} (b_{22})^2 \\ A_{14} &= (b_{13} b_{22} - b_{12} b_{23}) b_{34} b_{22} - b_{141} b_{33} (b_{22})^2 + b_{141} b_{32} b_{23} b_{22} \end{aligned}$$

2.2.1.3 고장 거리 방정식

식 (15)에 식 (17)과 (19)를 대입하면 다음과 같은 고장거리 (p)에 대한 방정식 식 (20)를 얻을 수 있다.

$$x_3 p^3 + x_2 p^2 + x_1 p + w_1 p^2 R_F + w_2 p R_F + w_3 R_F + w_4 = 0 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} x_3 &= Z_{L1} A_{03} A_{13} I_{SF} + (Z_{L0} - Z_{L1}) A_{03} A_{13} I_{SF0} \\ &\quad + Z_m A_{03} A_{13} I_{SF0} \\ x_2 &= (A_{03} A_{14} + A_{04} A_{13}) (Z_{L1} I_{SF} + (Z_{L0} - Z_{L1}) I_{SF0}) \\ &\quad + Z_m (A_{01} A_{14} + A_{02} A_{13}) I_{SF0} + A_{03} A_{13} V_S \\ x_1 &= A_{03} A_{14} Z_{L1} I_{SF0} + (Z_{L0} - Z_{L1}) A_{04} A_{14} I_{SF0} \\ &\quad + Z_m A_{02} A_{14} I_{SF0} - (A_{03} A_{14} + A_{04} A_{13}) V_S \\ w_1 &= 3(A_{11} + A_{13}) A_{03} I_{SF2} \\ w_2 &= 3\{ (A_{11} + A_{13}) A_{04} + (A_{12} + A_{14}) A_{03} \} I_{SF2} \\ w_3 &= 3(A_{12} + A_{14}) A_{04} I_{SF2} \\ w_4 &= -A_{04} \cdot A_{14} V_S \end{aligned}$$

2.2.2 분기점 바깥쪽 고장시

그림 7의 회로에서 계전기 설치점으로부터 고장지점까지의 전압 방정식을 전개하면 식 (21)과 같다.

$$V_S = q[I_{ST} Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1}) I_{ST0} + Z_m I_{SM0}] + (p-q)[I_{TF} Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1}) I_{TF0} + Z_m I_{SM0}] + 3R_F I_{F2} \quad (21)$$

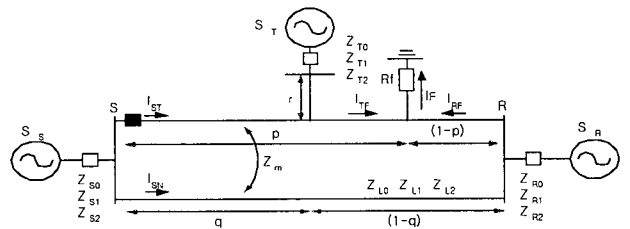


그림 7 분기된 선로의 분기점 바깥쪽 고장시 모델
Fig. 7 Outer fault of tap in parallel T/L with a teed circuit

2.2.2.1 대칭분 회로 및 기본 방정식

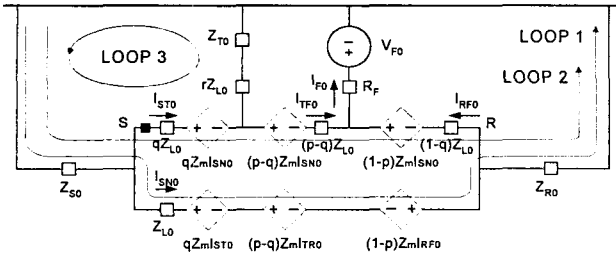


그림 8 분기된 선로의 분기점 바깥쪽 고장시 영상분 회로
Fig. 8 Zero sequence network with a tap outer fault of a teed T/L

식 (21)의 전압방정식을 풀기 위해서는 타회선 영상전류 (I_{SNO})와 고장전류(I_{RF}), 그리고 자기단 영상전류(I_{STO})와 분기선로로부터 유입되는 전류를 합한 합성전류(I_{TF})를 알아야 한다. 고장전류는 역상분을 사용하고, 자기단 영상전류 (I_{STO})와 타회선 영상전류(I_{SNO})의 비, 자기단 영·정·역상전류 ($I_{STO}, I_{ST1}, I_{ST2}$)와 분기선로 유입전류를 포함한 영·정·역상 합성전류($I_{TF0}, I_{TF1}, I_{TF2}$)와의 비, 그리고 자기단 역상전류(I_{ST2})와 고장점으로 흐르는 상대단 역상전류 (I_{RF2})의 비로 나타내어지는 각 전류 분배계수를 구한다.

2.2.2.2 분배계수의 계산

영상분 회로에서 3개의 루프에 따라 전압방정식을 세우면 식 (22)와 같다

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{STO} \\ I_{RF0} \\ I_{SNO} \\ I_{TF0} \end{vmatrix} = 0 \quad (22)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_{11} &= Z_{S0} + qZ_{L0} & a_{12} &= pZ_{L0} - (Z_{L0} + Z_{R0}) = pa_{120} + a_{121} \\ a_{13} &= Z_{S0} + Z_m + Z_{R0} & a_{14} &= pZ_{L0} - qZ_{L0} = pa_{140} + a_{141} \\ a_{21} &= Z_{S0} + qZ_m & a_{22} &= pZ_m - (Z_m + Z_{R0}) = pb_{220} + b_{221} \\ a_{23} &= Z_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0} & a_{24} &= pZ_m - qZ_m = pa_{240} + a_{241} \\ a_{31} &= Z_{S0} + qZ_{L0} + Z_{T0} + Z_{L0} \times r & a_{32} &= 0 \\ a_{33} &= Z_{S0} + qZ_m & a_{34} &= -(Z_{T0} + Z_{L0} \times r) \end{aligned}$$

식 (22)에서 I_{RF0} 및 I_{TF0} 를 소거 후 타회선 영상전류(I_{SNO})와 자기단 영상전류(I_{STO})의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{SNO}}{I_{STO}} = \frac{p^2 C_{01} + pC_{02} + C_{03}}{p^2 C_{04} + pC_{05} + C_{06}} \quad (23)$$

여기서,

$$\begin{aligned} C_{01} &= a_{31}(a_{120}a_{240} - a_{140}a_{220}) \\ C_{02} &= a_{31}(a_{120}a_{241} + a_{121}a_{240} - a_{140}a_{221} - a_{141}a_{220}) \\ &\quad + a_{34}(a_{11}a_{220} - a_{120}a_{21}) \\ C_{03} &= a_{31}(a_{121}a_{241} - b_{141}b_{221}) + a_{34}(a_{11}a_{221} - a_{121}a_{21}) \\ C_{04} &= a_{33}(a_{140}a_{220} - a_{120}a_{240}) \\ C_{05} &= a_{33}(a_{140}a_{221} + a_{141}a_{220} - a_{120}a_{241} - a_{121}a_{240}) \\ &\quad - a_{13}a_{34}a_{220} - a_{120}a_{23}a_{34} \\ C_{06} &= a_{33}(a_{141}a_{221} + a_{121}a_{241}) - a_{13}a_{34}a_{221} + a_{121}a_{23}a_{34} \end{aligned}$$

같은 방법으로 I_{TF0}/I_{STO} 를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{TF0}}{I_{STO}} = \frac{pD_{01} + D_{02}}{p^2 C_{04} + pC_{05} + C_{06}} \quad (24)$$

여기서,

$$\begin{aligned} D_{01} &= a_{33}(a_{220}a_{11} - a_{120}a_{21}) - a_{31}(a_{13}a_{220} - a_{120}a_{23}) \\ D_{02} &= a_{33}(a_{11}a_{221} - a_{121}a_{21}) - a_{31}(a_{13}a_{221} - a_{121}a_{23}) \end{aligned}$$

자기단 역상전류(I_{ST2})와 자기단 역상전류에 분기선로에서 유입되는 역상전류를 합한 합성전류(I_{TF2})와의 비, 그리고 고장점으로 흐르는 상대단 역상전류(I_{RF2})와의 비를 구하기 위해 역상분 회로에서 방정식 3개를 세우면 식 (25)와 같다.

$$\begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{ST2} \\ I_{RF2} \\ I_{SN2} \\ I_{TF2} \end{vmatrix} = 0 \quad (25)$$

여기서,

$$\begin{aligned} b_{11} &= Z_{S2} + qZ_{L2} \\ b_{12} &= (p-1)Z_{L2} - Z_{R2} = pZ_{L2} - (Z_{L2} + Z_{R2}) = pb_{120} + b_{121} \\ b_{13} &= Z_{S2} + Z_{R2} & b_{14} &= pZ_{L2} - qZ_{L2} = pb_{140} + b_{141} \\ b_{21} &= Z_{S2} & b_{22} &= -Z_{R2} \\ b_{23} &= Z_{S2} + Z_{R2} + Z_{L2} \\ b_{31} &= Z_{S2} + qZ_{L2} + Z_{T2} + Z_{L2} \times r \\ b_{32} &= 0 & b_{33} &= Z_{S2} & b_{34} &= -(Z_{T2} + Z_{L2} \times r) \end{aligned}$$

식 (25)에서 I_{RF2} 및 I_{SN2} 를 소거 후 I_{TF2} 와 I_{ST2} 의 비를 구하면 식 (26)으로 나타나고,

$$\frac{I_{TF2}}{I_{ST2}} = \frac{pB_{01} + B_{02}}{pB_{11} + B_{12}} \quad (26)$$

여기서,

$$\begin{aligned} B_{01} &= b_{120}b_{33}b_{23}b_{21} - b_{21}b_{120}(b_{23})^2 \\ B_{02} &= b_{22}b_{33}(b_{13}b_{21} - b_{11}b_{23}) - b_{121}b_{23}(b_{31}b_{21} - b_{33}b_{13}) \\ &\quad + b_{13}b_{22}(b_{31}b_{23} - b_{21}b_{33}) \\ B_{11} &= b_{120}(b_{23})^2 b_{34} + b_{140}b_{22}b_{23}b_{33} \\ B_{12} &= b_{23}b_{34}(b_{121}b_{23} - b_{13}b_{22}) + b_{141}b_{22}b_{23}b_{33} \end{aligned}$$

같은 방법으로 I_{RF2}/I_{ST2} 를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{RF2}}{I_{ST2}} = \frac{pE_{01} + E_{02}}{pB_{11} + B_{12}} \quad (27)$$

여기서,

$$\begin{aligned} E_{01} &= -b_{140}b_{23}(b_{23}b_{31} - b_{21}b_{33}) \\ E_{02} &= (b_{11}b_{23} - b_{13}b_{21}) + b_{23}b_{34} - b_{141}b_{23}(b_{31}b_{23} - b_{21}b_{33}) \end{aligned}$$

분배계수는 임피던스의 함수이므로 정상분 임피던스와 역상분 임피던스가 같다고 가정하면 정상분 분배계수와 역상분 분배계수는 같다.

2.2.2.3 고장 거리 방정식

식 (21)의 전압 방정식에 식 (23), (24), (26), (27)을 대입

차면 다음과 같은 고장거리 (p)에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$z_5 p^4 + z_4 p^3 + z_3 p^2 + z_2 p + z_1 + y_1 p^3 R_F + y_2 p^2 R_F + y_3 p R_F + y_4 = 0 \quad (28)$$

여기서,

$$\begin{aligned} z_5 &= z_{11} + z_{21} \\ z_4 &= z_{01} + z_{12} + z_{22} - z_{41} & z_3 &= z_{02} + z_{13} + z_{23} - z_{42} \\ z_2 &= z_{03} + z_{14} + z_{24} - z_{43} & z_1 &= z_{04} + z_{15} + z_{25} - z_{44} \\ y_1 &= z_{31} & y_2 &= z_{32} & y_3 &= z_{33} & y_4 &= z_{34} \\ z_{01} &= q(T \cdot B_{11} C_{04} + Z_m I_{S70} C_{01} B_{11}) \\ z_{02} &= q[T(B_{11} C_{05} + B_{12} C_{04}) + Z_m I_{S70}(C_{01} B_{12} + C_{02} B_{11})] \\ z_{03} &= q[T(B_{11} C_{06} + B_{12} C_{05}) + Z_m I_{S70}(C_{02} B_{12} + C_{03} B_{11})] \\ z_{04} &= q(T \cdot B_{12} C_{06} + Z_m I_{S70} C_{02} B_{12}) \\ z_{11} &= Z_{L1} B_{01} C_{04} (I_{S71} + I_{S72}) \\ z_{12} &= Z_{L1} [(B_{01} C_{05} + B_{02} C_{04})(I_{S71} + I_{S72}) - (D_{01} B_{11}) I_{S70} \\ &\quad - q(B_{01} C_{04})(I_{S71} + I_{S72})] \\ z_{13} &= Z_{L1} [(B_{01} C_{06} + B_{02} C_{05})(I_{S71} + I_{S72}) \\ &\quad - (D_{01} B_{12} + D_{02} B_{11}) I_{S70} - q((B_{01} C_{05} + B_{02} C_{04}) \\ &\quad (I_{S71} + I_{S72}) - (D_{01} B_{11}) I_{S70})] \\ z_{14} &= Z_{L1} [(B_{02} C_{06} + B_{02} C_{05})(I_{S71} + I_{S72}) - D_{02} B_{12} I_{S70} \\ &\quad - q((B_{01} C_{06} + B_{02} C_{05})(I_{S71} + I_{S72}) \\ &\quad - (D_{01} B_{12} + D_{02} B_{11}) I_{S70})] \\ z_{15} &= -q Z_{L1} (B_{02} C_{06} (I_{S71} + I_{S72}) - D_{02} B_{12} I_{S70}) \\ z_{21} &= Z_m (I_{S70}) C_{01} B_{11} \\ z_{22} &= Z_m I_{S70} (C_{02} B_{11} + C_{01} B_{12}) - I_{S70} (Z_{L0} - Z_{L1}) (D_{01} B_{11}) \\ &\quad - q(Z_m I_{S70} C_{01} B_{11}) \\ z_{23} &= Z_m I_{S70} (C_{03} B_{11} + C_{02} B_{12}) - I_{S70} (Z_{L0} - Z_{L1}) \\ &\quad (D_{02} B_{11} + D_{01} B_{12}) - q[Z_m I_{S70} (C_{02} B_{11} + C_{01} B_{12}) \\ &\quad - I_{S70} (Z_{L0} - Z_{L1}) (D_{01} B_{11})] \\ z_{24} &= Z_m I_{S70} C_{03} B_{12} - I_{S70} D_{02} B_{12} (Z_{L0} - Z_{L1}) \\ &\quad - q[Z_m I_{S70} (C_{03} B_{11} C_{02} B_{12}) - I_{S70} (Z_{L0} - Z_{L1}) \\ &\quad (D_{02} B_{11} + D_{01} B_{12})] \\ z_{25} &= -q[Z_m I_{S70} C_{03} B_{12} - I_{S70} D_{02} B_{12} (Z_{L0} - Z_{L1})] \\ z_{31} &= 3 * I_{S72} (B_{01} C_{04} - E_{01} C_{04}) \\ z_{32} &= 3 * I_{S72} (B_{01} C_{06} + B_{02} C_{04} - E_{01} C_{05} - E_{02} C_{04}) \\ z_{33} &= 3 * I_{S72} (B_{01} C_{06} + B_{02} C_{05} - E_{01} C_{06} - E_{02} C_{05}) \\ z_{34} &= 3 * I_{S72} (B_{02} C_{06} - E_{02} C_{06}) & z_{41} &= V_S (C_{04} B_{11}) \\ z_{42} &= V_S (C_{04} B_{12} + C_{05} B_{11}) \\ z_{43} &= V_S (C_{05} B_{12} + C_{06} B_{11}) & z_{44} &= V_S C_{06} B_{12} \end{aligned}$$

여기서,

$$T = Z_{L1} * I_{ST} + (Z_{L0} - Z_{L1}) * I_{S70}$$

2.3. 분기 선로 고장시

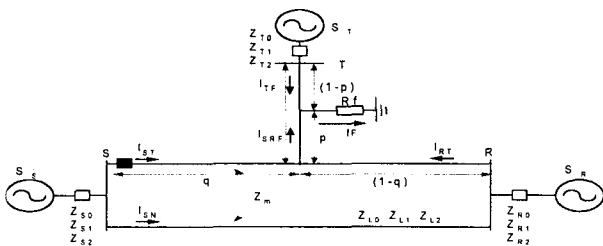


그림 9 분기선로 고장시 모델
Fig. 9 Model of a teed T/L fault

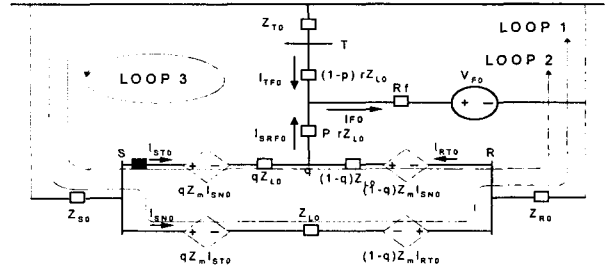


그림 10 분기선로 고장시 영상분 회로
Fig. 10 Zero sequence network of a teed T/L fault

분기 선로 고장시 고장거리 p는 분기점부터 시작하여 분기선로 전체길이를 1pu로 분 단위거리가 된다. 고장점 전류는 역상분 전류를 사용하며, 분기단 역상고장전류 (I_{TF2})와 S, R 양단에서 흘러 들어오는 자기단 역상전류 (I_{ST2})와 상대단 역상전류 (I_{RT2})의 합 전류 (I_{SRF2})가 고장점으로 흘러 들어가게 된다.

타회선 영상 전류 I_{SN0} 와 병행선로의 상호 임피던스 성분을 고려하였고 영상, 정상, 역상 회로를 이용하여 고장 전류의 분배계수를 구하였다.

2.3.1 대칭분 회로 및 기본 방정식

그림 9의 회로에서 식 (29)의 전압방정식을 구할 수 있다.

$$V_S = q[I_{ST} Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1}) I_{S70} + Z_m I_{SN0}] + p[I_{SRF} Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1}) I_{SRF0}] + 3R_F I_{F2} \quad (29)$$

식 (29)의 전압방정식을 풀기 위해서는 타회선 영상전류 (I_{SN0})와 고장전류 (I_{F2}), 그리고 양단으로부터 유입되는 상전류 (I_{ST} , I_{RT})를 합한 대칭분 전류성분 (I_{SRF0} , I_{SRF1} , I_{SRF2})의 추정이 필요하다. 고장전류는 역상분을 사용하고, 합성 상전류 (I_{SRF})의 역상분과 분기선로의 역상분전류 (I_{TF2})를 추정하여 사용한다.

2.3.2 분배계수의 계산

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S70} \\ I_{TF0} \\ I_{SN0} \\ I_{SRF0} \end{bmatrix} = 0 \quad (30)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_{11} &= Z_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0} & a_{12} &= 0 \\ a_{13} &= Z_{S0} + Z_m + Z_{R0} & a_{14} &= (q-1)Z_{L0} - Z_{R0} \\ a_{21} &= Z_{S0} + Z_m + Z_{R0} & a_{22} &= 0 \\ a_{23} &= Z_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0} & a_{24} &= (q-1)Z_m - Z_{R0} \\ a_{31} &= Z_{S0} + qZ_{L0} \\ a_{32} &= p(Z_{L0} \times r) - (Z_{L0} \times r) - Z_{T0} = pa_{320} + a_{321} \\ a_{33} &= Z_{S0} + qZ_m & a_{34} &= p(Z_{L0} \times r) = pa_{340} + a_{341} \end{aligned}$$

식 (30)에서 분기선로의 영상분전류 (I_{TF0}) 및 자기단과 상대단

영상합성전류 (I_{SRF0})를 소거 후, 타회선 영상전류 (I_{SN0}) 와 자기 단 영상전류 (I_{ST0})의 비는 식 (31)로 주어지며,

$$\frac{I_{SN0}}{I_{ST0}} = \frac{TA_{C1}}{TA_{11}} = \frac{[a_{21}a_{14} - a_{11}a_{24}]}{[a_{13}a_{24} - a_{21}a_{13}]} \quad (31)$$

같은 방법으로 I_{SRF0}/I_{ST0} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{I_{SRF0}}{I_{ST0}} = \frac{TB_{01}}{TA_{11}} = \frac{[a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13}]}{[a_{13}a_{24} - a_{23}a_{14}]} \quad (32)$$

위의 식 (31)과 (32)에서 알 수 있듯이 분기선로 고장시에는 타회선 영상분 분배계수와 자단 및 타단에서 고장점으로 유입되는 합성전류의 분배계수는 고장거리 (p)의 함수가 아닌 상수로 볼 수 있다.

고장점 전류를 구하기 위한 역상분 전류 분배계수는 앞에서와 같은 방식으로 구한 3개의 전압방정식으로부터 다음과 같이 구한다.

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ST2} \\ I_{TF2} \\ I_{SN2} \\ I_{SRF2} \end{bmatrix} = 0 \quad (33)$$

여기서,

$$\begin{aligned} b_{11} &= Z_{S2} + Z_{L2} + Z_{R2} & b_{12} &= 0 \\ b_{13} &= Z_{S2} + Z_{R2} & b_{14} &= (q-1)Z_{L2} - Z_{R2} \\ b_{21} &= Z_{S2} + Z_{R2} & b_{22} &= 0 \\ b_{24} &= -Z_{R2} \\ b_{31} &= Z_{S2} + qZ_{L2} & b_{23} &= Z_{S2} + Z_{R2} + Z_{L2} \\ b_{32} &= p(Z_{L2} \times r) - Z_{T2} - (Z_{L2} \times r) = pb_{320} + b_{321} \\ b_{33} &= Z_{S0} + qZ_m & b_{34} &= p(Z_{L2} \times r) = pb_{340} + b_{341} \end{aligned}$$

식 (33)에서 I_{TF2} 및 I_{SN2} 를 소거 후 I_{SRF2} 와 I_{ST2} 의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{SRF2}}{I_{ST2}} = \frac{[pTC_{01} + TC_{02}]}{[pTC_{11} + TC_{12}]} \quad (34)$$

여기서,

$$\begin{aligned} TC_{01} &= b_{320}b_{33}(b_{23}b_{11} - b_{13}b_{21}) \\ TC_{02} &= b_{33}b_{321}(b_{11}b_{23} - b_{21}b_{13}) \\ TC_{11} &= b_{320}(b_{23}b_{341}b_{13} + b_{13}b_{24}b_{33} - b_{23}b_{14}b_{33}) \\ TC_{12} &= b_{321}(b_{23}b_{341}b_{13} + b_{13}b_{24}b_{33} - b_{23}b_{14}b_{33}) \end{aligned}$$

같은 방법으로 I_{TF2}/I_{ST2} 를 구하면 식 (35)와 같다.

$$\frac{I_{RF2}}{I_{ST2}} = \frac{pTD_{01} + TD_{02}}{pTC_{11} + TC_{12}} \quad (35)$$

여기서,

$$\begin{aligned} TD_{01} &= b_{340}b_{33}(b_{13}b_{21} - b_{23}b_{11}) \\ TD_{02} &= (b_{33})^2(b_{13}b_{24} - b_{21}b_{14}) + b_{31}b_{33}(b_{23}b_{14} - b_{13}b_{24}) \end{aligned}$$

2.3.3 고장 거리 방정식

분기선로 고장시 양단으로부터 유입되는 전류 (I_{ST} , I_{RT})의 합인 대칭분 전류성분 (I_{SRF0} , I_{SRF1} , I_{SRF2})중 정상분 전

류인 (I_{SRF1})는 분배계수로 추정할 수 없는 T-R 단 간의 부하전류분을 포함하고 있으므로 부하전류의 영향을 최소화하기 위해 역상분 전류 (I_{SRF2})를 추정하여 사용한다. 식 (29)의 전압 방정식에 분배계수를 대입하면 다음과 같은 고장거리 (p)에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$Tz_3p^2 + Tz_2p + Tz_1 + Ty_1pR_F + Ty_2R_F = 0 \quad (36)$$

$$\begin{aligned} T_{201} &= (Z_{L1} \times r)I_{ST0}TB_{01}TC_{03} \\ T_{202} &= (Z_{L1} \times r)(I_{ST2} + I_{ST2})TA_{11}TC_{01} \\ T_{203} &= [(Z_{L0} \times r) - (Z_{L1} \times r)]I_{ST0}TB_{01}TC_{03} \\ T_{211} &= q(T \cdot TA_{11}TC_{03}) \\ T_{212} &= q(Z_m I_{ST0}TA_{01}TC_{03}) \\ T_{213} &= (Z_{L1} \times r)I_{ST0}TB_{01}TC_{04} \\ T_{214} &= (Z_{L1} \times r)(I_{ST2} + I_{ST2})TA_{11}TC_{02} \\ T_{215} &= [(Z_{L0} \times r) - (Z_{L1} \times r)]I_{ST0}TB_{01}TC_{04} \\ T_{216} &= -V_S(TA_{11}TC_{03}) \\ T_{221} &= q(T \cdot TA_{11}TC_{04}) \\ T_{222} &= qZ_m(I_{ST0})TA_{01}TC_{04} \\ T_{223} &= -V_S(TA_{11}TC_{04}) \end{aligned}$$

여기서,

$$T = Z_{L1} * I_{ST} + (Z_{L0} - Z_{L1}) * I_{ST0}$$

정리하면,

$$\begin{aligned} Tz_3 &= T_{201} + T_{202} + T_{203} \\ Tz_2 &= T_{211} + T_{212} + T_{213} + T_{214} + T_{215} + T_{216} \\ Tz_1 &= T_{221} + T_{222} + T_{223} \\ Ty_1 &= 3 * I_{ST2} [TA_{11}(TC_{01} + TD_{01})] \\ Ty_2 &= 3 * I_{ST2} [TA_{11}(TC_{02} + TD_{02})] \end{aligned}$$

2.4 반복 계산을 통한 고장 거리 계산

지금까지 유도한 고장위치별 고장거리 방정식 즉, 식 (6), (14), (20), (28), (36)은 복소 방정식이므로 실수부와 허수부로 나누면 독립된 방정식을 각각 두개 얻을 수 있다. 각 방정식이 포함하고 있는 미지수는 각각 두개[고장거리 (p), 고장저항 (Rf)]이므로 Newton-Raphson 반복계산을 통하여 해를 구할 수 있다.

2.5 해의 존재조건

모델 계통 계전점에서 각각 임의의 고장신호가 입력되면 각 선로에서 분기점 안쪽에서 발생한 고장인지 바깥쪽에서 발생한 고장인지 알지 못하므로, 일단 분기되지 않은 선로에서는 분기내부와 분기외부 두 개의 방정식을, 그리고 분기된 선로에서는 분기내부, 분기외부, 분기선로 세개의 방정식을 모두 적용하여 해를 얻는다.

분기되지 않은 선로의 경우 분기점 안쪽 고장발생시의 방정식을 이용해 구해진 해를 p_m 이라 하고, 바깥쪽 고장발생시의 방정식을 이용해 구해진 해를 p_{out} 이라 하면 각각의 해의 존재 조건은 다음과 같다.

- (조건 1) 분기점 안쪽 고장발생시 : $0 < p_{in} \leq q$
- (조건 2) 분기점 바깥쪽 고장발생시 : $q \leq p_{out} < 1$

p_{in} 이 (조건 1)을 만족하면 분기점 안쪽에 고장이 발생한 것으로 보고 이 값을 고장거리로 선택하며, p_{out} 이 조건 2를 만족하면 분기점 바깥쪽에 고장이 발생한 것으로 보고 이 값을 고장거리로 선택한다. (시뮬레이션 결과 두 조건이 모두 만족하거나 모두 만족하지 않는 경우는 발생하지 않았다.)

분기된 선로에서는 분기선로 고장 거리방정식이 더 추가되는데 이 때 분기점 안쪽 거리방정식에서 구해진 해를 p_{in} , 분기점 바깥쪽 거리방정식에서 구해진 해를 p_{out} , 분기선로 고장거리 방정식에서 구해진 해를 p_t 라고 하면, 해의 존재 조건은 다음과 같다. (시뮬레이션 결과 아래의 조건에 위배되는 경우는 발생하지 않았다.)

- (조건 3) 분기점 안쪽 고장발생시 :
($0 \leq p_{in} \leq q$) and ($1 \leq p_t$ or $p_t \leq 0$)
- (조건 4) 분기점 바깥쪽 고장발생시 :
($q \leq p_{out} < 1$) and ($1 \leq p_t$ or $p_t \leq 0$)
- (조건 5) 분기선로 고장발생시 :
($0 \leq p_t < 1$) and [($1 \leq p_{out}$ or $p_{out} < q$)
and ($q < p_{in}$ or $p_{in} \leq 0$)]

3. 사례 연구

본 논문에서 제안한 고장점 표정 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 그림 11과 같은 154[kV]급 송전 계통을 EMTP로 모의하여 다양한 고장발생 조건과 계통조건에 적용하였다. 입력된 데이터는 표 1과 같다.

고장점 표정에 영향을 미치는 요소는 부하전류, 고장점 저항, 분기점 및 고장점의 위치, 분기 용량 변화 등이며, 이 네 가지 조건을 변화시키며 오차를 살펴보았다. 오차는 전체 송전선로 길이를 기준으로 한 것으로 다음과 같다.

$$\text{오차} = \frac{\text{실제 고장거리} - \text{계산된 고장거리}}{\text{송전선로의 길이}} \times 100. [\%]$$

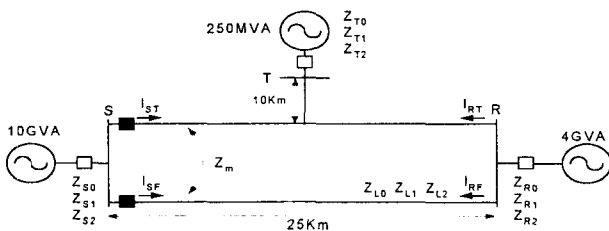


그림 11 모델 계통
Fig. 11 The model system

표 1 EMTP 모델에 사용된 데이터

Table 1 Used data of EMTP model

| 상수 | 입력 데이터 | 상수 | 입력 데이터 |
|----------|--------------------|----------|----------------------|
| ZS0 | 1.0648+j*5.7523[Ω] | ZR0 | 2.6651+j*14.381[Ω] |
| ZS1, ZS2 | 0.3021+j*2.3431[Ω] | ZR1, ZR2 | 0.7554+j*5.8579[Ω] |
| ZT0 | 39.158+j*229.63[Ω] | ZL0 | 0.2380+j1.0443[Ω/km] |
| ZT1, ZT2 | 11.099+j*93.536[Ω] | ZL1, ZL2 | 0.0436+j0.3445[Ω/km] |
| | | Zm | 1.0948+j0.5630[Ω/km] |

3.1. 분기되지 않은 선로의 경우

3.1.1 분기점의 위치 및 고장위치의 영향

고장 위치는 S단과 R단 사이를 0.1[pu]~0.9[pu]까지 5단계로 나누었으며 분기점의 위치는 0.2[pu]~0.8[pu]까지 3단계로 나누어 계산하였다. 이 때, 고장저항과 부하전류는 없는 것으로 하였다. 모든 경우에서 -0.01[%] 미만의 오차범위 내로 정확도를 유지하였다.

3.1.2 고장 저항의 영향

고장저항이 개입될 때 고장거리나 분기점의 위치가 멀어질수록 오차가 다소 증가하였다. 이 때 부하전류는 없는 것으로 하였다. 하지만, 고장저항이 30[ohm]까지 증가하여도 표정 결과는 -0.03[%]내로 모두 수렴한다. 우리나라의 경우 154kV 송전선에서 보호계전기가 고저항 지락고장시 정상적으로 보호를 수행하는 한계조건을 고장저항값 최대 30[ohm]으로 정정률에서 규정하고 있어 30[ohm]까지 고려하였다. 이때 부하전류는 없는 것으로 하였다.

3.1.3 부하 전류의 영향

부하전류의 크기는 각 전원간의 전압 상차각에 관계되므로 S단과 R 또는 T단 전원간 위상각 차를 기준으로 오차를 살펴보았다. 부하전류는 S-R단 위상차가 10도를 넘어서면, 모델 가공선로의 최대허용전류를 초과하나 최악의 상황을 고려하기 위해 15도를 최대 위상차로 보았다. 그리고 T단은 자기단과 동상으로 보았다. 이 때 고장저항은 없는 것으로 하였다. 고장거리가 멀어질수록 오차는 다소 증가하고, 원거리 고장시 부하전류에 따라 오차가 좀더 크게 나타났으나 양단 전원간 위상각 차가 15° 까지 벌어져도 고장점 표정오차는 ±0.02[%]범위 내에서 정확도를 유지하였다.

3.1.4 최대 고장조건에서의 표정 결과

그림 12는 고장저항이 30[ohm], S단과 R단간의 전원 위상각 차는 15°이며 T단은 S단과 R단 위상차의 중간값을 갖도록 하고 고장 위치별 표정오차를 검토한 것이다. 분기점 위치를 바꾸어 가면서 영향 받을 수 있는 최대 조건을 모의하였다. T단과의 위상차가 존재하면 S-T 선로에서도 부하전류가 존재하여 부하전류의 영향을 더 많이 받게 되나, 본 경우는 분기되지 않은 선로이기 때문에 큰 영향은 없다. 고장저항 30[ohm]이 개입되고 부하전류가 크게 흐르

는 상황에서도 아래 그림과 같이 모든 오차가 $-0.04[\%]$ 내로 유지됨을 볼 수 있다.

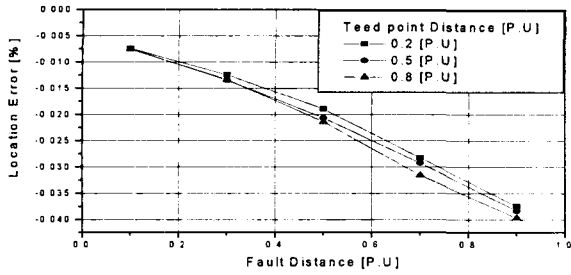


그림 12 분기 되지 않은 선로의 최대고장시 결과
Fig. 12 Error with the worst fault case in a T/L with no teed circuit

3.2. 분기된 선로의 경우

3.2.1 분기점의 위치 및 고장위치의 영향

고장 위치는 역시 $0.1[pu] \sim 0.9[pu]$ 까지 5단계로 나누었으며 분기점의 위치는 $0.2[pu] \sim 0.8[pu]$ 까지 3단계로 나누어 계산하였다. 이 때, 고장저항과 부하전류는 없는 것으로 하였다. 모든 경우에서 오차 $-0.02[\%]$ 미만의 범위로 정확도를 유지하였다.

3.2.2 고장 저항의 영향

고장저항이 개입될 때 고장거리나 분기점의 위치가 멀어질 수록 오차가 다소 증가하였다. 고장저항이 $30[ohm]$ 까지 증가하였을 때에도 표정 오차는 $-0.02[\%]$ 내를 유지하였다. 이 때 부하전류는 없는 것으로 하였다.

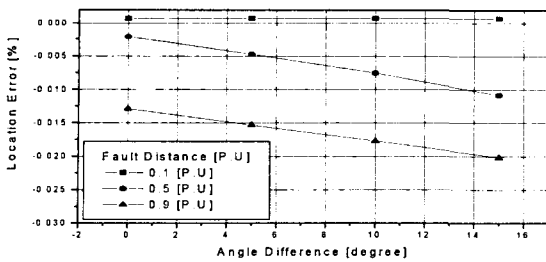


그림 13 부하전류의 변화에 따른 영향(분기점 0.2[pu])
Fig. 13 Error with different load current (tap= 0.2 [pu])

3.2.3 부하 전류의 영향

분기되지 않은 선로 고장과 마찬가지로 분기된 선로에서도 근거리 고장인 경우 분기점의 위치변화가 고장점 표정에 미치는 영향은 거의 없었다. 양단 전원간 위상각 차가 15° 까지 나더라도 고장점 표정 오차는 그림 13에서와 같이 $\pm 0.02[\%]$ 범위 내에서 정확도를 유지하였다. 이 때 고장저항은 없는 것으로 하였다.

3.2.4 최대 고장조건에서의 표정 결과

그림 14는 고장저항이 $30[ohm]$ 이고, S단과 R단간의 전원

상차각은 15° 이며 T단은 S단과 R단 위상차의 중간값을 갖도록 하고 고장 위치별 표정오차를 연산하였다. 그리고 분기점 위치를 바꾸어 가면서 영향 받을 수 있는 최대 조건을 모의하였다.

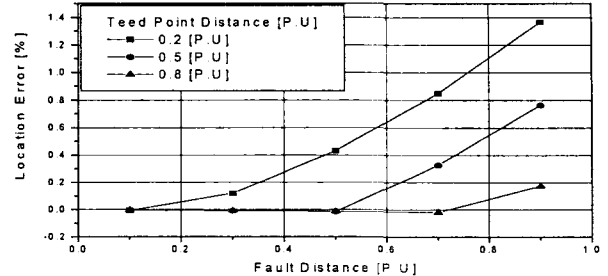


그림 14 분기된 선로에서 최대 고장시 결과
Fig. 14 Error with the worst fault case in a T/L with a teed circuit

고장저항 $30[ohm]$ 이 개입되어도 최대부하전류가 존재하는 상황에서 그림과 같이 오차가 최대 $1.36[\%]$ 이하를 나타내고 있다. 이 예러는 분기점 바깥쪽 고장시 분기점과 고장점 사이의 정상분 전류추정이 T단 전원으로 인하여 정확도가 떨어짐에 기인한 것으로 판단된다.

3.3. 분기선로의 고장인 경우

3.3.1 분기점의 위치 및 고장위치의 영향

고장위치는 분기점부터 분기전원까지를 1로 보아 $0.1[pu] \sim 0.9[pu]$ 까지 5단계로 나누었으며 분기점의 위치는 S-R단 사이를 1로 보아 $0.2[pu] \sim 0.8[pu]$ 까지 3단계로 나누어 계산하였다. 모든 경우에서 오차는 $\pm 0.04[\%]$ 미만을 유지하였다. 이때, 고장저항과 부하전류는 없는 것으로 하였다.

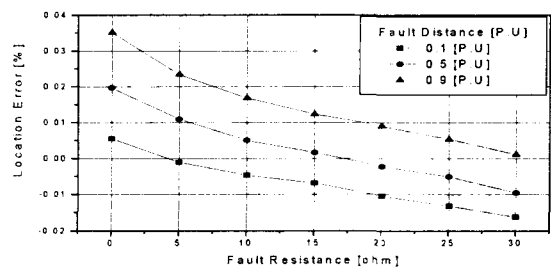


그림 15 분기선로 고장시 고장저항 변화에 따른 영향 (분기점 0.2 [pu])

Fig. 15 Error with different fault resistance in a teed T/L fault (tap= 0.2 [pu])

3.3.2 고장 저항의 영향

그림 15는 고장저항이 개입된 경우 고장저항의 크기에 따른 오차의 변화를 나타내고 있다. (a)는 분기점의 위치가 $0.2[pu]$ 인 경우, (b)는 분기점의 위치가 $0.8[pu]$ 인 경우이다.

이 때 부하전류는 없는 것으로 하였다.

고장저항이 개입될 때와 고장거리나 분기점의 위치가 멀어질 수록 오차가 증가함을 알 수 있다. 이 경우 오차는 (.04[%] 내를 유지한다.

3.3.3 부하 전류의 영향

분기선로에서의 고장시 부하전류의 영향을 검토한 결과 고장거리가 멀어질 수록 오차가 증가하고 고장점이 가까우면 부하전류에 의한 오차가 거의 없는 것으로 나타났다. 이 때 고장저항은 없는 것으로 하였다. 양단(S-R)전원간 상차각이 15° 까지 나더라도 고장점 표정 오차는 0.18[%] 범위 내에서 정확도를 유지하였다.

3.3.4 최대 고장조건에서의 표정 결과

그림 16은 고장저항이 30[ohm]이고 S단과 R단간의 전원상차각이 15°이며 T단은 S단과 R단 위상차의 중간값을 갖도록 하고 고장 위치별 표정오차를 계산하였다. 그리고 분기점 위치를 바꾸어 가면서 영향 받을 수 있는 최대 조건을 모의하였다. 고장저항이 30[ohm]이 개입하고 최대부하전류가 존재하는 상황에서 그림과 같이 표정 오차가 0.65[%]내를 유지함을 볼 수 있다.

이는 분기선로 고장거리 방정식에서 분기점과 고장점 사이의 정상분 전류 대신 부하전류의 영향을 없애기 위해 사용한 역상분 전류에 의한 오차와 고장방정식의 S단 정상분 전류에 포함된 부하전류 때문으로 보여진다.

위의 각 사례연구에서 분배계수를 사용하여 R단 및 T단의 전류를 추정할 때, 임피던스의 함수인 분배계수로는 전진 위상각 차에 의한 부하전류를 고려할 수 없으며, 따라서 부하전류가 포함되어 있는 정상분 전류를 사용하는 분기선로 바깥쪽 고장과 분기선로 고장에서는 부하전류의 영향으로 오차가 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

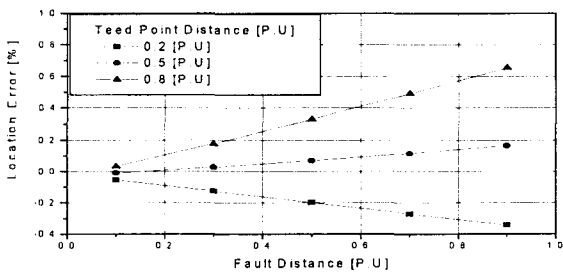


그림 16 분기선로에서의 최대 고장시 표정오차
Fig. 16 Error with the worst fault case in a teed T/L

4. 하드웨어 모의

4.1. 계전기 하드웨어 사양

하드웨어 테스트는 TI사의 DSP인 TMS320C6701이 장착된 Daytona PCI 보드를 사용하였다. 이 보드는 Dual CPU

를 이용하여 병렬연산을 할 수 있으며 PC에 장착하여 쉽게 사용할 수 있는 장점이 있다. TMS320C6701은 1 GFLOPS의 연산속도와 167 MHz CPU CLOCK Rate의 성능을 갖고 있다. 디버깅 툴(Debugging Tool)로는 Code-Composer Studio를 사용하였다.

아날로그 파형으로부터 데이터 취득을 위한 ADC (Analog to Digital Conversion) 모듈의 사양은 14비트 Resolution에 변환시간은 8 [μsec]이고 동시에 최대 8CH의 데이터를 취득할 수 있다.

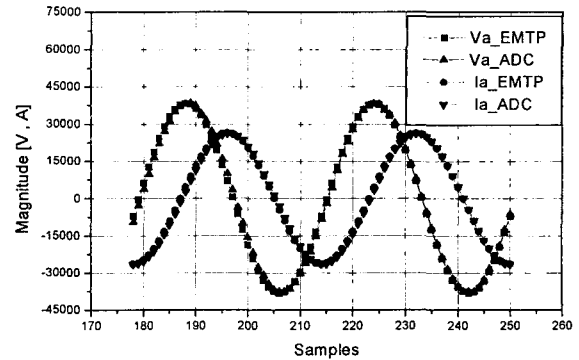


그림 17 ADC 샘플과 EMTP 데이터와의 비교
Fig. 17 Comparison ADC samples and EMTP data

4.2 모의 파형

아날로그 신호 생성을 위해 EMTP 출력 데이터를 COMTRADE 파일 형식으로 변환하여 DOBLE Simulator에 입력하였으며 DOBLE 출력중 전압은 내부 PT를 거쳐 계하고 전류는 내부 CT를 통과시키고 보조 CT를 거쳐 계전기 보드에 입력하였다. 그림 17은 EMTP 출력 데이터와 계전기보드에서 읽은 값을 비교한 것으로 고장 후 5주기 중 마지막 2주기의 전압전류를 보여주고 있다. 1주기 36 샘플을 적용하였고 그림에서와 같이 두 신호는 약간의 차이를 보이며 거의 일치함을 볼 수 있다.

4.3 하드웨어 모의 결과

고장 판단은 편의상 영상전류 요소와 과전류 요소(최대 부하전류의 2배에서 동작)로 하였다. 소프트웨어 테스트에서와 마찬가지로 고장 판단 후 4주기를 저장하여 마지막 1주기 연산값의 평균값으로 고장거리를 산출하였다.

고장 조건은 고장저항 30[ohm], 분기지점 0.5[pu]이며, S단과 R단간의 전원 위상각차는 15°, T단은 S단과 R단 위상차의 중간값을 갖도록 하여 부하전류의 영향을 최대화하였다.

4.3.1 분기되지 않은 선로고장

그림 18은 분기되지 않은 선로 고장중 고장거리 0.5[pu]에서의 표정 결과이다

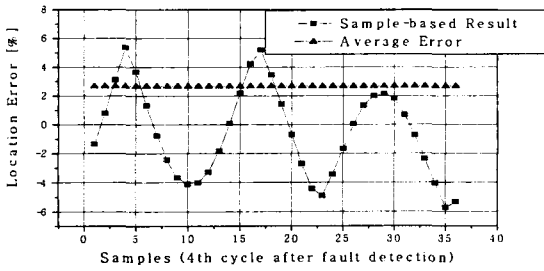


그림 18 분기되지 않은 선로 0.5[pu] 고장시 하드웨어 테스트 결과

Fig. 18 H/W test result in a T/L with no teed circuit (tap distance = 0.5 [pu])

위의 테스트에서 최대 -5.71[%] 최소 0.02[%], 평균 2.67[%] 의 정확도를 나타내고 있다. 소프트웨어 테스트에서는 -0.04[%]의 표정 오차를 보였다.

4.3.2 분기된 선로고장

4.3.2.1 분기점 내부 선로고장

그림 19는 분기된 선로 분기점 안쪽 고장중 고장거리 0.3[pu]에서의 표정결과이다

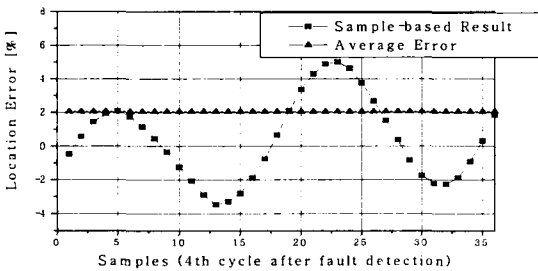


그림 19 분기점 내부 0.3[pu] 고장시 H/W test 결과

Fig. 19 H/W test result in a T/L with a teed circuit (tap = 0.3 [pu])

위의 경우 최대 5.11[%] 최소 0.31[%], 평균 2.05[%] 의 정확도를 나타내고 있다. 이 경우 소프트웨어 테스트에서는 -0.01 [%]의 표정 오차를 나타냈다.

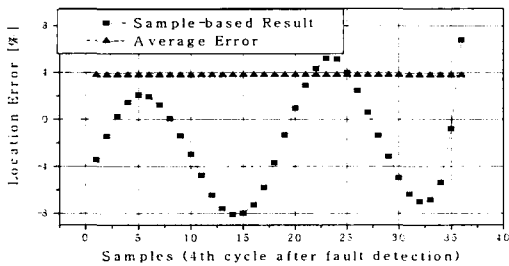


그림 20 분기점 외부 0.7[pu] 고장시 H/W Test 결과

Fig. 20 H/W test result in a T/L with a teed circuit (tap= 0.7 [pu])

4.3.2.2 분기점 외부 선로고장

그림 20은 분기된 선로 분기점 바깥쪽 고장중 고장거리 0.7[pu]에서의 표정결과이다. 이 경우 최대 7.98[%] 최소 0.05[%], 평균 3.81[%] 의 정확도를 나타내고 있다. 소프트웨어 테스트에서는 0.33 [%]의 표정 오차를 보였다.

4.3.3 분기 선로 고장

그림 21은 분기선로 고장중 고장거리 0.5[pu]에서의 표정 결과이다.

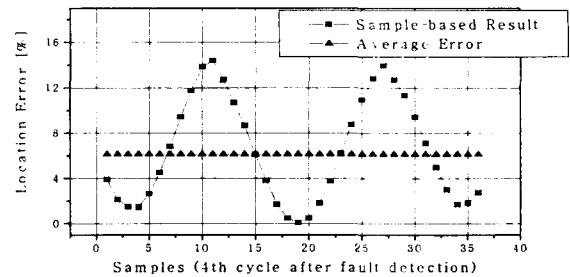


그림 21 분기선로 0.5[pu] 고장시 H/W Test 결과

Fig. 21 H/W test result in a teed T/L fault (tap= 0.5 [pu])

위의 경우 최대 13.97[%] 최소 0.09[%], 평균 6.14[%] 의 정확도를 나타내고 있다. 소프트웨어 테스트에서는 이 경우 0.07 [%]의 표정 오차를 나타냈다.

하드웨어 테스트 결과가 소프트웨어 테스트 결과보다 큰 에러값을 보이는 이유는 그림 29에서 보여지듯 EMTP 데이터를 이용하여 DOBLE 시뮬레이터를 거친 아날로그 신호가 샘플링된 후 계전기에 저장된 값이 EMTP 데이터와 약간의 차이를 보이고 있기 때문인데, 여기에는 D/A resolution의 문제, CT, PT 오차 등이 영향을 준 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 T분기된 병행 2회선 송전계통에서 자기단의 전압·전류 신호만을 이용한 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다. 분기되지 않은 선로와 분기된 선로의 고장은 각각 분기점 안쪽과 바깥쪽 고장, 그리고 분기선로에서의 고장 등 모두 5가지의 고장거리 방정식이 각각 서로 다르게 나타나며, 모두 Newton-Raphson 반복계산을 통해 고장 거리를 구하였다. 자기단의 각 계전점이 정해지면 임의의 고장신호 입력시 계전점에서의 분기점 안쪽 고장시의 방정식과 바깥쪽 고장시, 그리고 분기선로 고장 방정식에 대해 해가 모두 구해지며, 해의 존재 조건을 고려하여 어느 구간에서 발생한 고장인지 판단한다.

EMTP 모의결과 제안된 알고리즘은 저항지락 고장시나 부하전류의 변화에도 적은 오차 범위 내에서 거리를 추정할 수 있었다. 모의계통에서의 최악의 조건에서도 고장점 표정 오차는 소프트웨어 테스트에서는 2[%]이만의 오차를 보였다.

그러나 분기된 선로에서의 분기점 외부고장 및 분기선로 고장시, 고장거리 방정식에 계전점에서는 추정이 불가능한 부하전류를 포함하는 정상분 전류항이 포함되어 분배계수를 사용하는 본 알고리즘에서는 전원상차각에 따른 부하전류의 영향을 완전히 배제할 수는 없었다. 향후 이러한 부하전류는 고장 후의 중첩성분을 이용한 회로 방정식이나 상계단 정보를 이용하는 방법 등으로 보완되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국과학재단의 산학협력연구 프로그램의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] G. B. Ansell, N. C. Pahalawatththa, "Maximum Likelihood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 9, No. 9, pp.680-689, 1994

[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. 100, No. 3, pp.1316-1323, 1988

[3] 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

[4] A. Wiszniewski, "Accurate Fault Impedance Locating Algorithm", IEE Proceedings, Vol. 130, pt. C, No. 6, pp.311-314, 1983

[5] 박홍규, 이명수, 이재규, 유석구, "송전선에서의 고저항 지락고장시 고장거리 추정에 관한 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1363-1365, 1999

[6] Yong-Jin Ahn, Myeon-Song Choi, Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee, "An Accurate Fault Location Algorithm For Double-Circuit Transmission Systems", IEEE PES Summer Meeting, pp. 16-20 July 2000

[7] 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

[8] M. Abe, N. Otsuzuki, T. Emura, M. Takeuchi, "Development of a New Fault Location System for Multi-Terminal Single Transmission Lines", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 10, No. 7, pp.159-168, 1995

[9] 권태원, 강상희, 최면송, 이승재 "1회선 분기점을 갖는 병행 2회선 송전선로 고장점 표정 알고리즘", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.116-118, 1999

[10] Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee, Young-Jin Kwon, Yong-Cheol Kang, "Transmission line with a teed circuit" IEEE PES Summer Meeting, Vol. 2, pp. 921-926, 2001

저 자 소 개



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(공학박). 현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 부교수. 차세대전력기술연구소 연구원.
Tel : 031-330-6364, Fax : 031-321-0271
E-mail : shkang@mju.ac.kr



노 재 근 (盧 載 根)

1975년 9월 18일생. 2001년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 현재 명지대 대학원 전기공학과 석사과정. 차세대전력기술연구소 연구원.
Tel : 031-335-2068, Fax : 031-321-0271
E-mail : nojaekun@hotmail.com



권 영 진 (權 寧 珍)

1974년 10월 16일생. 2000년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주) 셀파워 전력IED연구소 재직, 동 대학원 전기공학과 박사과정. 차세대전력기술연구소 연구원.
Tel : 031-336-3280, Fax : 031-321-0271
E-mail : yjkwon@mju.ac.kr