

병행 2회선의 T분기 선로 고장점 표정 알고리즘

*권영진, 강상희, 이승재
명지대학교 전기공학과

Fault Location Algorithm for Parallel Transmission Line with a Teed Circuit

*Young-Jin Kwon, Sang-Hee Kang, Seeng-Jae Lee
Myongji University

Abstract - This paper presents a fault location algorithm for single-phase-to-ground faults on the teed circuit of a parallel transmission line. This algorithm uses only local end voltage and current information. Remote end and fault currents are calculated by using distribution factors. To reduce load current effect, negative sequence current is used. EMTP simulation result have shown effectiveness of the algorithm under various conditions.

하였고 고장점까지의 거리 p , 고장점부터 분기점까지의 거리 $(q-p)$, 분기점부터 상대단까지의 거리 $(1-q)$ 로 총 세 구간으로 구분하여 모델링하였다.

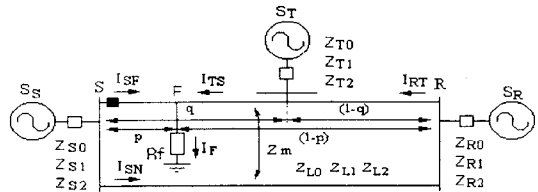


그림 1. 분기점을 갖는 병행 2회선 계통

1. 서론

송전선로의 사고발생 시 사고발생 지점을 정확하게 찾아내는 것은 계통의 안정성 확보와 신속한 고장 복구를 위해서 필수적이다. [1]

이를 위한 연구가 최근 활발하게 진행되어 오고 있으며 크게 진행과 방정식[3]이나 전파방정식[4]을 이용한 방식과 거리 계전기 알고리즘의 보완 방식[5-10]으로 나뉘며, 적용 계통에 따라 양단 전원 1회선 계통[5] 및 병행 2회선[6-9], 다단자 계통[10]으로 나눌 수 있다. 데이터의 사용에 따라 양단 정보를 같이 사용하는 경우[1]와 자기단 정보만을 이용하는 경우[4-10]로 나뉘며 별도의 통신 장비를 필요로 하지 않는 자기단 정보만을 이용하는 쪽이 경제적으로 유리하다.

고장점 표정에 오차를 유발하는 요인으로는 고장 저항과 부하전류, 정확히 판단하지 못하는 고장타입, 영상요소에 의한 상호 작용, 선로 파라미터의 불확실성 등이 있다.[11]

본 논문에서는 분기회선이 존재하는 병행 2회선의 분기된 선로 측의 분기점까지의 사고를 대상으로 하고 있으며 송전선로의 사고 중 가장 빈번하게 일어나는 1선 지락사고에 대하여 검증하였다. 자기단 전압 전류만을 이용한 분배계수를 사용하여 타회선 영상 전류, 상대단 전류 정보를 계산함으로써 별도의 통신장비를 필요로 하지 않는다. 최종 고장 거리의 방정식에서 실수부와 허수부로 나눈 후 반복 계산을 통해 고장저항의 영향을 배제시켰으며 부하전류의 영향을 받지 않는 대칭분 회로를 이용하여 부하전류의 영향을 배제시켰다.

제한된 알고리즘의 검토를 위해 EMTP(Electro Magnetic Transients Program)을 사용하여 154(kV), 25(km) 분기된 병행 2회선 송전선로에서 고장지점, 고장저항 및 전원 임피던스변화 변화에 대하여 검토하였다.

2. 본론

2.1 대칭분회로 및 기본 방정식

양단 전원과 분기점을 가지는 계통을 그림 1과 같이 모델링 하였다. 선로전체를 1로 하는 [p.u]단위를 사용

2.2.1 분기점 안쪽 사고시 대칭분 회로

영상분 회로는 그림 2와 같으며 역상분 회로는 그림 3과 같다.

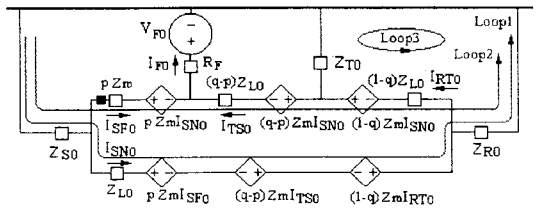


그림 2. 영상분 회로

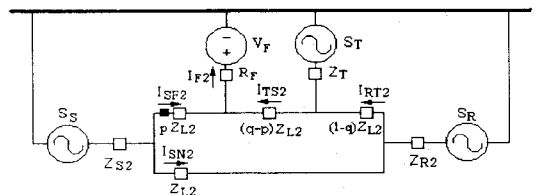


그림 3. 역상분 회로

2.1.2 기본방정식

그림 2 그림 3의 대칭분 회로에서 계전기 설치점으로부터 사고지점까지의 대칭회로 전압 방정식을 전개하면 식 (1)과 같고 최종 전압방정식은 식 (2)와 같다.

$$V_{S0} = pZ_{L0}I_{SF0} + R_F I_{F0} + pZ_m I_{SN0} + V_{F0} \quad (1)$$

$$V_{S1} = pZ_{L1}I_{SF1} + R_F I_{F1} + V_{F1}$$

$$V_{S2} = pZ_{L2}I_{SF2} + R_F I_{F2} + V_{F2}$$

$$V_S = p[I_{SF}Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{SF0} + Z_m I_{SN0}] + 3R_F I_{F2} \quad (2)$$

2.2 타회선 영상전류와 고장전류의 처리

식 (2)의 전압방정식을 풀기 위해서는 타회선 영상전류 I_{SNO} 와 고장전류 I_{F2} 를 알아야 한다. 본 논문에서는 이 두 전류를 자기단 전류와 분배계수를 이용하여 계산한다. 고장점에서 고장전류는 $I_{F0} = I_{F1} = I_{F2}$ 이므로 부하 전류의 영향이 가장 작은 영상분을 이용하였다.

2.2.1 영상분 분배계수의 계산

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

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SF0} \\ I_{RT0} \\ I_{SNO} \\ I_{TS0} \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

여기서,

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

식 (3)에서 I_{RT0} 를 소거 후 I_{SNO} 와 I_{SF0} 의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{SNO}}{I_{SF0}} = \frac{pA_{01} + A_{02}}{pA_{03} + A_{04}} \quad (4)$$

$$= \frac{a_{11}a_{32}(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}) - a_{21}a_{32}(a_{11}a_{32} - a_{12}a_{31})}{(a_{14}a_{32} - a_{12}a_{34})(a_{23}a_{32} - a_{22}a_{33}) - (a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33})(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31})}$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_{01} &= (a_{32})^2 a_{140} a_{21} - a_{32} a_{34} a_{110} a_{22} + a_{111} a_{240} (a_{32})^2 \\ &\quad - a_{210} a_{141} (a_{32})^2 + a_{210} a_{12} a_{32} a_{34} - a_{211} a_{140} (a_{32})^2 \\ A_{02} &= a_{11} a_{421} (a_{32})^2 - a_{111} a_{22} a_{32} a_{34} - a_{211} a_{141} (a_{32})^2 + a_{211} a_{32} a_{12} a_{34} \\ A_{03} &= a_{140} a_{23} (a_{32})^2 - a_{140} a_{32} a_{22} a_{33} - a_{13} a_{240} (a_{32})^2 + a_{12} a_{240} a_{33} a_{32} \\ A_{04} &= a_{141} a_{23} (a_{32})^2 - a_{141} a_{32} a_{22} a_{33} - a_{12} a_{34} a_{23} a_{32} + a_{12} a_{34} a_{22} a_{33} \\ &\quad - a_{13} a_{241} (a_{32})^2 + a_{13} a_{22} a_{32} a_{34} + a_{12} a_{33} a_{241} a_{32} - a_{12} a_{33} a_{22} a_{34} \end{aligned}$$

2.2.2 영상분 분배계수의 계산

영상분 회로에도 영상분 회로에서와 같은 경로의 3개의 루프에 따라 전압방정식을 세우면 식 (5)과 같다

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SF2} \\ I_{RT2} \\ I_{SN2} \\ I_{YS2} \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} b_{11} &= pZ_{L2} + Z_{S2} = pb_{110} + b_{111} \\ b_{12} &= (q-1)Z_{L2} - Z_{R2} \\ b_{13} &= Z_{S2} + Z_{R2} \\ b_{14} &= pZ_{L2} - qZ_{L2} = pb_{140} + b_{141} \\ b_{21} &= Z_{S2} \quad b_{22} = -Z_{R2} \\ b_{23} &= Z_{S2} + Z_{R2} + Z_{L2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{32} &= qZ_{L2} - Z_{T2} - Z_{L2} - Z_{R2} \\ b_{33} &= Z_{R2} \quad b_{34} = Z_{T2} \end{aligned}$$

식 (5)에서 I_{RT0} 를 소거 후 I_{SNO} 와 I_{SF0} 의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{TS2}}{I_{SF2}} = \frac{pA_{11} + A_{12}}{pA_{13} + A_{14}} \quad (6)$$

$$= \frac{(b_{13}b_{22} - b_{12}b_{23})b_{33}b_{21} + (b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21})(b_{33}b_{22} - b_{32}b_{23})}{-b_{14}b_{22}(b_{33}b_{22} - b_{32}b_{23}) + (b_{13}b_{22} - b_{12}b_{23})b_{34}b_{22}}$$

여기서,

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

2.3 고장거리 방정식

고장점까지의 전압 방정식에서 2.2절에서 구한 분배 계수를 사용하여 식을 변형하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_S &= p[I_{SF}Z_{L1} + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{SF0} + Z_m I_{SNO}] + 3R_F I_{F2} \\ V_S &= p[Z_{L1}I_{SF} + (Z_{L0} - Z_{L1})I_{SF0} + Z_m \frac{I_{SNO}}{I_{SF0}} I_{SF0}] + 3R_F I_{SF2} \left(1 + \frac{I_{TS2}}{I_{SF2}}\right) \quad (7) \end{aligned}$$

이 식을 정리하면 다음과 같은 고장거리(p)에 대한 방정식을 얻을 수 있다. [12]

$$x_3 p^3 + x_2 p^2 + x_1 p + w_1 p^2 R_F + w_2 p R_F + w_3 R_F + w_4 = 0 \quad (8)$$

여기서,

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

식 (8)은 p와 R_F 2개의 미지수를 가지며, 복소 방정식의 형태이므로 실수부와 허수부로 나누어 방정식 2개를 얻어 Newton-Raphson 반복 계산법을 이용하여 해를 구한다.

2.4 사례연구

제한된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 154(kV)급 송전 계통을 EMTP를 이용하여 고장점 표정에 영향을 주는 요소인 고장거리, 분기점의 위치, 고장저항, 전원임피던스등을 변화시켜 가면서 고장점 표정의 오차 변화를 살펴보았다. 모의 계통은 다음과 같다.

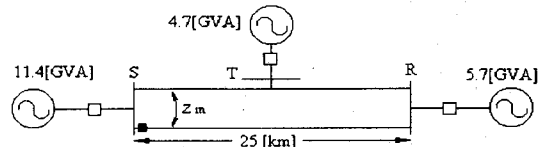


그림 4. EMTP 모의계통

$$\text{오차} = \frac{(\text{실제 고장거리} - \text{계산된 고장거리}) \times 100}{\text{전체 송전선로 거리}} [\%]$$

2.4.1 분기점 위치 및 사고위치의 영향

그림 5는 분기점의 위치와 사고위치의 변화에 따른 고장점 표정 오차의 추이를 나타낸다. 고장거리는 측정점으로부터 분기점까지의 거리를 1로 하여 단계별 (p.u.)로 변화 시켰다. 0.002[%] 미만의 범위 내로 정확성을 보인다.

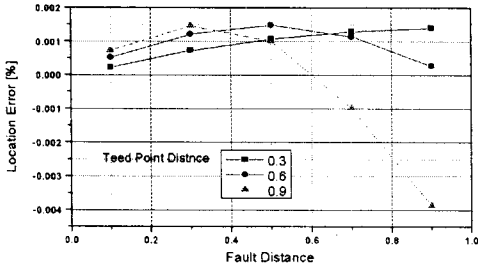


그림 5. 분기점 및 사고위치에 따른 오차

2.4.2 고장저항의 영향

그림 6은 고장저항의 영향에 따른 고장점 표정 오차의 추이를 나타낸다. 분기점은 0.9(p.u.)인 경우이다. 고장저항이 들어간 경우 고장거리가 멀어질수록 오차가 커짐을 알 수 있다.

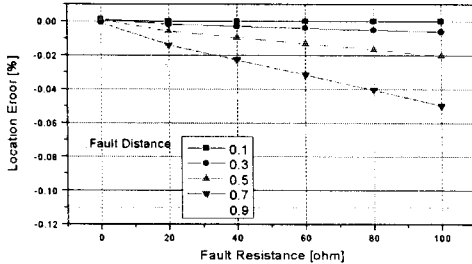


그림 6. 고장저항 변화에 따른 오차

2.4.3 전원임피던스의 변화

그림 7은 전원임피던스 변화에 따른 고장점 표정 오차의 추이를 나타낸다. 분기점 0.6(p.u.), 사고점 0.3(p.u.), 전원 S 임피던스 -30[%], 고장저항 60(ohm)일 때이다. 전원 T단의 임피던스가 실제보다 적게 들어갔을 때 오차가 증가함을 보인다. 전원 T단이 -30[%]~30[%]까지 변화하여도 0.3[%]이내의 정확성을 나타낸다.

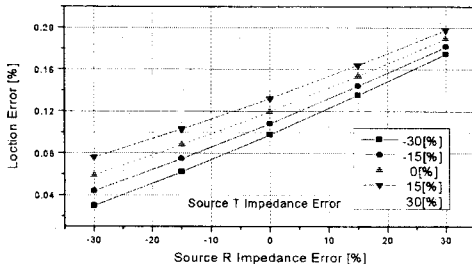


그림 7. T단 전원 임피던스 변화에 따른 오차

3. 결론

1회선 분기점을 갖는 병행 2회선 선로의 분기 회선쪽 고장점 표정 알고리즘에 대하여 제안하였다. 자기단 전압, 전류 정보만을 사용하여 타회선 영상전류 및 고장전류를 계산하였고, Newton-Raphson 반복계산을 통해 고장거리를 구하였다. EMTP 모의로 알고리즘의 타당성을 실험한 결과 각종 변화 요인에도 강인한 알고리즘임을 검증하였다.

[참고 문헌]

- [1] Damir Novosel, David G. Hart Eric Udren Jim Garitty "Unsynchronized Tow-Terminal Fault Location Estimation" IEE Trans. on PWRD, Vol. 1, pp. 130-138, January 1995
- [2] M.H.J Bollen "Travelling-Wave-Based Protection of double-circuit" IEE Proceeding-c, Vol. No.1, pp. 37-47, January 1993
- [3] 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, pp.1316-1323, 1988
- [4] 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
- [5] 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 2000, pp. 16-20 July 2000, Seattle
- [6] 권 태원, 강 상희, 최 먼송, 이 승재, "1회선 분기점을 갖는 병행 2회선 송전선로의 고장점 표정 알고리즘", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 116-118, 1999년 11월
- [7] 박홍규, 이명수, 이재규, 유석구, "송전선로에서의 고저항 지락고장시 고장거리 추정에 관한 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 1363-1365, 1999년 7월
- [8] 박홍규, 이재규, 유석구, "영상회로를 이용한 병행 송전선로에서의 고장점 추정 알고리즘" 대한 전기학회 추계학술대회 논문집, pp 283-284, 1999년 11월
- [9] 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
- [10] IEE Tutorial course "Advancement in Microprocessor Based Protection and Communication", The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp 63-72, 1997
- [11] M. B. Djuric', Z. M. Radojevic' and V. V. Terzija, "Distance Protection and Fault Location Utilizing Only Phase Currnet Phasor", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 13, No 4, pp. 1020-1026, October 1998