

진행파를 이용한 송전선로의 고장점 표정 알고리즘

김진한* 강상희 최면송 Waldemar Rebizant
 명지대학교 차세대전력기술연구센터, Wrocław Univ. of Technology, Poland

A Fault Location Algorithm on a Transmission Line using Travelling waves

Kim J H, Kang S H, Choi M S, Waldemar Rebizant
 Myoungji University Next-Generation Power Technology Center, Wrocław Univ. of Technology, Poland

Abstract - This paper describes how travelling waves measured at an end of a transmission line can be used for fault location. In this paper a FIR filter which makes high frequency components much more prominent is proposed. Consequently, the algorithm can distinguish correlation peaks. A series of simulation studies using EMTP verified that the proposed algorithm can calculate an accurate fault distance in spite of effects of various errors.

$$\begin{aligned} u(x, t) &= Z_0 [f_1(t-x/w) - f_2(t+x/w)] \\ i(x, t) &= f_1(t-x/w) + f_2(t+x/w) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, u : 전파속도 Z_0 : 선로의 특성 임피던스

계전기 설치점의 전진파 f_1 와 후진파 f_2 는 식(2)와 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} 2 Z_0 f_1(t) &= Z_0 i(t) + u(t) = S_1(t) \\ 2 Z_0 f_2(t) &= Z_0 i(t) - u(t) = S_2(t) \end{aligned} \quad (2)$$

1. 서 론

송전선로의 고장이 발생한 경우 사고 발생지점을 정확히 찾아내는 것은 계통을 안정적으로 유지하기 위한 신속한 고장복구에 필수적 요소이다. 최근 십여년간 고장점 표정 알고리즘은 활발히 연구되어 왔다. 고장점 표정 알고리즘으로는 진행파를 이용하는 방법(1), 전파 방정식을 이용하는 방법(2), 전압과 전류의 기본파 성분을 사용한 임피던스 법(3)등으로 구분하고 있다.

선로에서의 고장의 발생은 고장 지점으로부터 계전기 설치점으로 진행파를 발생시킨다. 지금까지 상호 상관 함수(cross-correlation)기법(4)을 사용한 것이 있으나 이 방법의 단점은 계전기 설치점의 근접한 사고와 전압 위상각 영도 근처의 사고는 감지하지 못한다는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 상호 상관 함수(cross-correlation)출력의 실효값을 사용하는 방식과 전압 위상각 0°사고 시 보정 인자를 계전신호에 곱해주는 방법(5)이 제안되었으나 근접 사고 및 전압 위상각 영도 근처의 사고는 전·후진파가 기본적으로 전력 주파수(60Hz) 성분과 같은 형태를 가지므로 상호 상관 함수(cross-correlation)에 필요한 전·후진파의 피크(peak) 부분이 두드러지지 않아 거리 판별이 역시 어렵다는 문제가 남게된다.

본 논문에서는 FIR 필터는 DC-offset 제거 효과 뿐만 아니라 고조파를 증폭해주는 효과가 있으므로 전압위상각 판단없이 FIR 필터에 전압, 전류신호 모두를 적용하여 결과적으로 상호 상관 함수의 피크를 보다 쉽게 구별하는 알고리즘을 제안한다. 이런 이유로 전력 주파수 성분만을 가지는 계전기 설치점 근처의 근접사고 및 전압위상각 0°사고 시에도 정확한 고장 거리 계산이 가능하다.

2. 본 론

2.1 진행파의 개념

본 논문에서는 계통을 주파수에 의존하지 않는 무손실 분포정수 회로로 취급하여 2차 편미분 방정식으로 사용되는 표시되는 파동 방정식을 사용하였다. D'Alembert 해로 널리 알려진 파동방정식의 해는 식(1)과 같다.

2.2 중첩 성분(Superimposed Component) 추출
 선로에서의 사고의 발생은 사고지점에 정상상태 전압과 크기가 같고 부호가 다른 전압을 인가하는 것과 같다. 그러므로, 사고 이후의 전압과 전류성분은 사고 이전의 정상상태 성분과 사고이후의 과도상태 성분의 합으로 볼수 있다.

결국, 계전 신호로 사용되는 전압, 전류의 중첩성분 s 는 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} i_s &= i_{po} - i_{pr} \\ v_s &= v_{po} - v_{pr} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, po : 사고후 값
 pr : 사고전 값

2.3 Modal 변환

3상 송전선로에서 진행파 정보를 포함하는 선로의 전압, 전류는 몇 개의 mode로 구성되어 있다. 각 mode는 각기 다른 전파속도와 감쇠정수 및 특성 임피던스를 가지므로 3상의 전압, 전류 신호는 3개의 독립적인 mode로 구분될 수 있다. 본 논문에서는 3상 연가 선로를 단상선로로 쉽게 해석하기 위해 식(4)와 같은 Wedepohl 행렬을 사용하였다.

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3/2 & 0 & -3/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3개의 독립적인 mode중 ground mode는 감쇠가 심하고 속도가 느린 특성을 가지고 있어 본 논문에서는 aerial mode2를 사용(5)하였다.

2.3 상호 상관 함수(Cross Correlation)

상호 상관 함수는 들어오는 파와 반사되는 파가 얼마나 correlate 되었는가, 즉 유사성의 정도를 알수 있다. 상호 상관 함수는 샘플된 신호 X와 시간지연 τ 후의 나타나는 신호 Y와의 유사성의 정도를 나타낸다. 그 식은 (5)와 같다.

$$\phi_{xy}(r) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M Y(k\Delta t + r) X(k\Delta t) \quad (5)$$

여기서, Δt 샘플치 간격의 시간
M 원도우당 샘플수

신호 X가 순차적으로 들어오는 신호 Y에 나타나면 식 (5)의 $r=T$ 일 때 상호 상관 함수는 최대값을 가진다. 시간차 T는 고장이 발생하였을 때 고장 거리를 구하는데 사용한다. 실제로 전진파와 후진파는 서로 다른 평균 값을 가지므로 두 신호의 상호 상관 함수의 값을 왜곡시킨다. 이런 문제점을 해결하기 위해 서로 다른 두 평균치 값을 각각 빼주는 이산 상호 상관 함수(discrete cross-correlation)를 사용하였다. 그 식은 (6)과 같다.

$$s_{1, s_2}(r) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M [S_1(k\Delta t) - S_1^{AVR}] [S_2(k\Delta t + r) - S_2^{AVR}] \quad (6)$$

여기서, $S_1^{AVR} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M S_1(k\Delta t)$
 $S_2^{AVR} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M S_2(k\Delta t + r)$

2.3.1 고장 거리의 계산

선로에서 고장이 발생하면 전압, 전류의 증가된 성분으로 인하여 전진파가 발생하고, 이 전진파는 관측점을 떠나 선로를 따라 진행하다가 고장점에서 반사하여 다시 관측점으로 돌아오게 된다. 즉, 고장점까지의 거리를 계산하는 데는 관측점을 떠난 전진파가 얼마만큼의 시간지연을 가지고 후진파로서 다시 관측점에 도달하는가를 측정하여 정의(5)하고 있다.

본 논문에서는 상태단으로부터 진행파가 한번만 반영 되도록 보호구간의 전파시간의 2배이상으로 설정하였다. 또한 본 논문에서는 보다 확실하고 정확하게 제전점을 떠난 전진파를 윈도우에 담기하기 위하여 Threshold값 이전의 2 샘플을 같이 저장하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 이산 상호 상관 함수의 최대값이 나타나는 시간은 전진파가 관측점을 떠나 고장점에서 반사하여 되돌아오는 시간($2t_2$)을 나타낸다. 따라서 관측점에서부터 고장점까지의 거리는 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$L = \frac{r}{2} \cdot v \quad (7)$$

여기서, L : 관측점에서 고장점까지의 거리
v : 선로에서의 전파속도 (\sqrt{LC})

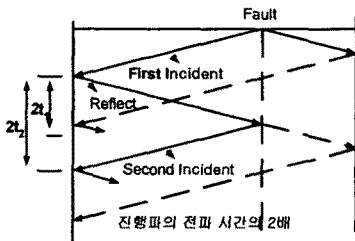


그림 1. Lattice diagram

2.4 FIR(Finite Impulse Response) Filter

중첩성분중 고조파 성분은 전압 위상각 90° 사고에서 최대가 되고 전압 위상각 0° 사고에서 최소가 된다. 그리고 전류신호는 DC-offset에 비례하는데 이 DC-offset 성분은 전압 위상각 90° 사고에서 최소가

되고 전압 위상각 0° 사고에서 최대가 된다. 그리고 전압 0° 또는 그 근처의 사고 시 진행파는 레벨이 낮고 변화도 느리다.

한편, 이산 상호 상관 함수에 피크(Peak)가 나타나는 것은 고조파 성분 때문이다. 그러나 전압 위상각 0° 사고 및 근접 사고에서는 피크 부분이 두드러지지 않게 된다. 전압 위상각 0° 사고 시 이전의 방법(5)은 보정인자($1 + \cos \theta$)를 계전신호에 곱하여 준다. 그러나 이 방법은 전압 위상각 0° 근접 사고 시에는 전진파와 후진파에 전력주파수(60Hz) 성분만 나타나게 되어 정확한 거리 계산이 되지 않는다.

본 논문에서는 FIR 필터를 적용하여 0° 사고 및 근접 사고 시에도 이산 상호 상관 함수(Discrete cross correlation)의 피크가 두드러지게 나타나게 되어 정확한 고장 거리 계산이 되도록 하였다.

본 논문의 샘플링 주파수는 60[kHz]이나 주파수 크기 특성이 60[kHz]에서 Gain이 2가 되도록 필터를 설계하였다. 여기서 적용한 FIR 필터는 위상지연을 선형으로 설계하여 각 주파수별로 왜곡현상이 나타나지 않는다.

$x(k) = X_m \sin n\theta_k$ 라고 가정하면,

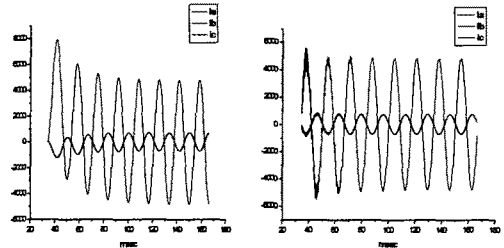
$$x(k-1) = X_m \sin(n\theta_k - n \cdot \frac{360^\circ}{N})$$

$$y(k) = x(k) - x(k-1) = X_m \sqrt{(1 - \cos(n \cdot \frac{360^\circ}{N}))^2 + \sin^2(n \cdot \frac{360^\circ}{N})} \sin(n\theta_k + \phi) \quad (8)$$

식(8)은 FIR 필터의 주파수 크기 특성을 나타내었다.

최대 크기 X_m 의 기본파를 본 논문에서 제안한 FIR 필터에 통과시키면 기본파에서 그 크기는 0.0031배가 되고 위상은 0.03° 앞서게 된다. 이 줄어든 기본파 크기는 보상을 하여 원래 신호의 기본파 크기와 같게 된다.

본 논문에서는 전압, 전류 신호 모두에 FIR 필터를 적용하여 사고 위상각 판단 없이 사고거리 계산에 들어가게 되어 알고리즘의 계산량 부담이 적다.



(a) 적용전 (b) 적용후
그림 2. 전압 위상각 0° 사고 시 FIR 필터의 효과

2.5 사례연구

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 실제 계통인 신옥천에서 신포항 구간을 1회선 345[KV] 3상 평형 송전선로 100km EMTP를 사용하여 모의 하였고 1선 지락사고를 모의 하였다. 그림 3에 대상 계통도를 나타내었다.

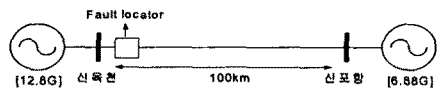


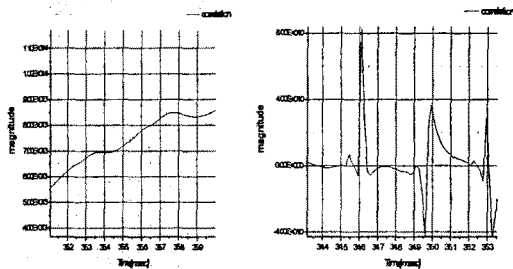
그림 3. 모델 계통 구성도

각 모의 계통에 대하여 고장거리, 고장 저항 및 양단 전원 위상 차이를 바꾸면서 변화시켰다. 고장거리는 0.1[pu]~0.9[pu], 고장 저항은 0[Ω], 10[Ω], 20

(Ω), 30(Ω)로 변화시켰다. 데이터 취득을 위한 샘플링 주파수는 60(kHz), אליאיש 에러를 방지하기 위해 30(kHz) 차단 주파수 특성을 갖는 2차 Butterworth 저역 통과 필터를 사용하였다. 고장거리 계산 에러는 식 (9)를 사용하여 산정하였다.

$$\%Error = \frac{\text{계산된거리} - \text{실제고장거리}}{\text{전체선로길이}} \times 100 \quad (9)$$

그림 5에서 (a) 보정인자 사용시는 피크(peak)가 불분명하고 고장거리계산이 정확하지 않지만 (b) FIR 필터 적용 시는 피크(peak)가 분명하게 보이고 고장거리 계산이 정확하였다.



(a) 보정인자 사용 (b) FIR 필터 적용
그림 4. 전압 위상각 0°50km 사고 시 correlation 결과

그림 5는 양단 전원 위상차 10°이고 고장저항이 10 Ω 일때 전압 위상각 0°사고 및 전압 위상각 90°사고에서 고장거리계산 에러를 나타내었다. 근접사고 5km 사고 시에 0.06(%)로 정확한 고장거리계산 결과를 나타내었고 최대 오차는 0.9(pu)시 1.07(%)이다. 본 논문에서는 자기단 정보만을 사용하였고 원단에서 고장이 발생할수록 계전신호 즉, 전·후진파에 과도 현상이 많이 포함되어 있어 오차가 증가한다.

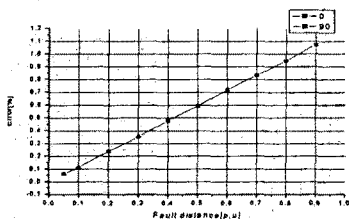


그림 5. 전압 위상각 0°및 90°사고 시 고장거리계산 오차

그림 6은 고장저항을 변화시켰을 때 고장거리계산 오차를 나타낸 것이다. 그림 5와 6에서 고장거리계산 오차가 고장 저항에도 무관함을 알 수 있고 그림 7에서 보듯이 중첩성분을 추출하여 사용하므로 고장시 부하전류의 영향에도 역시 무관함을 알 수 있다.

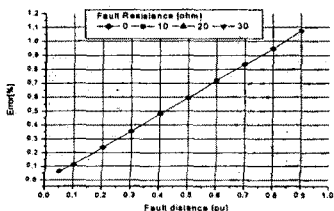


그림 6. 고장저항을 변화했을 때 고장거리계산 오차

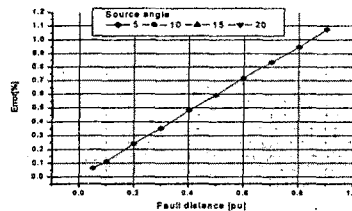


그림 7. 양단전원위상 변화시 고장거리계산 오차

3. 결 론

본 논문에서는 진행파를 이용한 송전선로 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 FIR필터를 사용하여 사고 위상각 판단없이 고조파 성분을 증폭한 계전신호로 사용함으로써 정확한 고장 거리 계산 결과를 나타내었다. 또한 사례연구를 통하여 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 사고시 전압 위상각, 고장저항, 양단전원 위상차에도 고장거리계산 결과가 영향을 받지 않음을 보였다. 그리고 별도의 통신수단이 없이 자기단 정보만을 사용하여 최대 오차 1.1(%)이내의 정확한 결과를 나타내었다.

추후의 연구내용은 본 논문의 고장점 표정 알고리즘을 초고속 거리 계전에 적용하는 것이고 지중 송전 계통에 적용하여 근거리의 고장점 표정을 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. 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] P.A. Crossley, P.G. McLaren, "Distance Protection Based on Travelling Waves", IEEE Trans. on PAS, Vol 102, No. 9, pp.2971-2983, September 1983.
- [5] E.H. Shehab-Eldin and P.G. McLaren, Travelling Wave Distance Protection-Problem Areas and Solutions, IEEE Trans., Power Delivery, Vol.3, No.3, 894(1998).
- [6] Z Q Bo, A T Johns, R K Aggarwal, "A Novel Fault Locator Based on the Detection of Fault Generated High Frequency Transients", IEE Developments in Power System Protection, 25-27th March 1997, Conference Publication No. 434, pp. 197~200 pp.126~131
- [7] C.Christopoulos와 3명, "Signal processing and discriminating techniques incorporated in a protective scheme based on travelling waves" IEE PROCEEDINGS Vol.136.Pt. C.No 5,SEPTEMBER 1989 pp.279~288
- [8] Pritindra Chowdhuri, "Electromagnetic Transients in Power Systems", JOHN WILEY & SONS INC. pp.10~30