

진행파를 이용한 근접사고 거리계전 방식

김 곤옥 강 상희* 박 종근* 김 일동** 윤 만철** 권 옥현***
 *서울 대학교 전기공학과 **한전 기술연구원 ***서울 대학교 제어계측 공학과

Travelling Wave Technique for Close-Up Fault Protection

Gon-Wook Kim Sang-Hee Kang* Jong-Keun Park* Il-Dong Kim** Wook-Hyun Kwon***
 *Dept. of Electrical **Dept. of Contr. and Instr. Eng. SNU ***KEPCO Research Center

Abstract

In this paper the development of new technique based on the travelling-wave information contained in the post fault voltage and current signals has been presented. To develop fault location methods which can cope with close-up fault and zero-inception angle problems, magnitude of the backward wave has been used. The technique developed can be incorporated in a generalized algorithm for application as a high speed distance scheme. In this way some of the problems and limitations associated with travelling wave schemes are avoided. Verification of the relay operating principles is presented through digital computer numerical simulation using an electromagnetic transient program(EMTP) in conjunction with simulation of the proposed algorithms.

I. 서 론

최근에 들어 전력 계통이 대형화 됨에 따라 계통의 안정도를 증가시키는 측면에서 사고 발생시 사고의 신속한 제거가 요구되고 있다[9]. 지금까지 거의 대부분의 디지털 거리계전 방식은 기본파 선로 전압 및 전류 정보로부터 선로의 저항과 인덕턴스를 계산하여 고장점을 알아내고 있다. 이때 사고 바로 직후에 나타나는 과도(transient) 진행파가 기본파 전압, 전류의 파형을 심하게 왜곡시키기때문에 계전기의 동작을 빠르게 하거나 정확도를 증가 시키는데 한계가 발생한다. 즉 사고 이후의 전압과 전류의 신호로부터 필터링 등으로 과도 성분을 제거한 기본파 성분을 얻는 과정에 필연적으로 시간 지연이 생기며 이 결과로 계전기의 동작 시간은 느려지게 된다. 임피던스 계전기가 갖는 이러한 근본적인 문제점을 해결하고자 제안된 방법의 하나가

사고후의 과도성분을 이용해서 동작 속도를 크게 개선하려는 진행파를 이용한 거리 계전 방법이다.

선로에서의 사고의 발생은 사고 지점으로 부터 계전기가 설치된 선로 종단점으로 진행파를 발생시킨다. 이런 파의 전파 현상을 이용하여 사고 유 무를 감지하고, 더 나아가 사고거리를 알아내는 계전기가 진행파를 이용한 거리 계전기이다.

진행파를 이용한 거리계전 방식은 단상선로를 대상으로 Vinton[3]에 의해 최초로 연구 되었다. 사고거리는 계전기에 도달하는 전진파와 후진파의 시간차로서 구했으며, 이값은 두신호의 기본파 성분의 위상차로부터 얻었다. 도달 양쪽단에서 기준값을 넘는 전진파와 후진파의 도착 순서로 부터 사고 방향을 알아내는 방향 비교 저지방식이 Jonh[7]에 의해 제안되었다. 그뒤 McLaren과 Crossly[2]는 초고속(U.H.S) 거리계전방식을 제안했다. 여기서는 두 신호의 도달 시간차를 구하기 위하여 진행파와 후진파의 cross-correlation을 이용했다. 그리고 보다 복잡한 계통인 teed-circuit을 보호하는 방법을 Rajendra와 McLaren[4]이 제안했다.

지금까지의 진행파를 이용한 거리계전방식이 해결하지 못한 문제는 크게 두가지로 나눌수 있다. 그 하나는 파동의 전파시간이 매우 짧은 근접 사고가 발생했을 때이고, 다른 하나는 사고가 위상각 영도(zero-crossing)나 그 근처에서 일어났을 경우이다[1][2].

이 논문에서는 사고 이후에 얻어지는 후진파 정보를 이용해서 근접 사고를 확실하게 제거시킬수 있는 방법을 제안했다. 아울러 이 방법으로 기존의 방법으로는 곤란한 전압 위상각 0°에서 발생한 사고도 제거 할수 있음을 보였다. 그리고 여기서는 각 사고에서의 사고 데이터를 얻기 위하여 과도 현상 해석 프로그램인 EMTP를 이용하였다.

II. 기본 이론

2.1 진행파 Relaying 신호

선로에서의 사고의 발생은 사고지점에 정상상태 전압과 크기가 같고 부호가 다른 전압을 인가하는 것과 같다. 그러므로, 사고 이후의 전압과 전류성 분은 사고 이전의 정상상태 성분과 사고로 부터 인가된 성분의 합으로 볼수 가 있다. 중첩의 원리에 따라 사고 이후값(i_{post}, v_{post})과 사고 이전의 값(i_{pre}, v_{pre})은 다음과 같이 나타낼 수 가 있다.

$$i_{post} = i_{pre} + i_{fault} = i_{pre} + (i)_{steady-state} + (i)_{transient} \quad (1)$$

$$v_{post} = v_{pre} + v_{fault} = v_{pre} + (v)_{steady-state} + (v)_{transient} \quad (2)$$

진행과 계전기는 사고를 감지하고 거리를 구하는데 i_{fault} 와 v_{fault} 를 이용한다. 중첩된 신호는 진행과 성분과 관련한 모든 중요한 정보를 가진다.

사고 지점에서의 전압의 붕괴는 전진파와 후진파를 발생시킨다. 이때 단상 무손실선로를 가정했을때 다음의 식을 얻을수 있다.

$$v(x,t) = f_1(x-ut) + f_2(x+ut) \quad (3)$$

$$I(x,t) = [f_1(x-ut) - f_2(x+ut)] / Z_0 \quad (4)$$

여기서 u 는 surge 의 속도이고, Z_0 는 선로의 특성 임피던스 이다. 전진파 f_1 과 후진파 f_2 는 식 (3),(4) 로 부터 다음과 같이 구할수 있다.

$$2f_2(t) = v(t) - Z_0 I(t) = S_1(t) \quad (5)$$

$$2f_1(t) = v(t) + Z_0 I(t) = S_2(t) \quad (6)$$

여기서 $S_1(t)$ 와 $S_2(t)$ 가 계전기 신호로 쓰인다.

2.2 Modal 변환

3 상 송전선로에서의 파동방정식은 주파수 영역에서 다음과 같이 나타 난다.

$$\frac{d[\bar{V}_p]}{dx} = -[\bar{Z}_p][\bar{I}_p] \quad (7)$$

$$\frac{d[\bar{I}_p]}{dx} = -[\bar{Y}_p][\bar{V}_p] \quad (8)$$

식 (7),(8)은 $[\bar{Z}_p][\bar{V}_p]$ 와 $[\bar{Y}_p][\bar{I}_p]$ 의 고유벡터로부터 구해진 변환 행렬 $[S]$, $[Q]$ 를 이용하여 modal 파동 방정식으로 변환이 된다.

$$\frac{d[\bar{V}_m]}{dx} = -\left\{ [S]^{-1} [\bar{Z}_p] [Q] \right\} [\bar{I}_m] = -[\bar{Z}_m] [\bar{I}_m] \quad (9)$$

$$\frac{d[\bar{I}_m]}{dx} = -\left\{ [Q]^{-1} [\bar{Y}_p] [S] \right\} [\bar{V}_m] = -[\bar{Y}_m] [\bar{V}_m] \quad (10)$$

여기서 Z_m 과 Y_m 은 대각행렬이고 modal 전압, 전류식은 상전압, 전류와 아래의 관계에 있다.

$$[\bar{V}_p] = [S][V_m] \quad (11)$$

$$[\bar{I}_p] = [Q][I_m] \quad (12)$$

위의 식으로 부터 각 상 정보로 부터 각 mode 로 decouple 시키는 것이 가능하게 된다.

여기서는 Wedpohle 변환 행렬을 1 회선 완전연가된 선로를 decouple 시키는데 사용했다.

$$[S]^{-1} = [Q]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3/2 & 0 & -3/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.3 Cross Correlation

이산적(Discrete)인 cross-correlation은 샘플된 신호 X 와 시간지연 τ 후에 나타나는 신호 Y와의 유사성의 정도를 나타낸다.

$$\phi_{XY}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k\Delta t + \tau) Y(k\Delta t) \quad (14)$$

위 식에서 신호 X 가 시간지연 T 이후에 신호 Y 에 나타나면 위식의 correlation은 $\tau = T$ 일때 최대값이 나타난다.

Cross-correlation 을 실제로 적용하는데 있어서 correlate 되는 진행과 와 후진파가 다른 평균값을 가질수가 있다. 이때의 두 신호의 평균값이 서로 다를때 correlation의 정보를 사용하기 어렵게된다. 이 문제를 해결하기 위하여 각 신호의 평균값을 뺀 S_1 과 S_2 를 correlation 한다 [2]. 저장된 신호 S_2 와 순차적으로 얻어지는 S_1 와 이산적인 cross-correlation 은 다음과 같다.

$$\phi_{S_1 S_2}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [S_2(k\Delta t - \bar{S}_2)] [S_1(k\Delta t + \tau) - \bar{S}_1(\tau)] \quad (15)$$

여기서,

Δt - 샘플 사이의 시간 간격

$$\bar{S}_1(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_1(k\Delta t + \tau)$$

$$\bar{S}_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_2(k\Delta t)$$

III. 문제점 및 대책

3.1 일반적인 경우의 사고

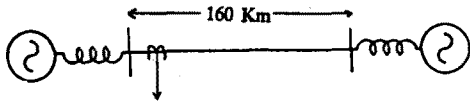


그림.1 계통 구성도

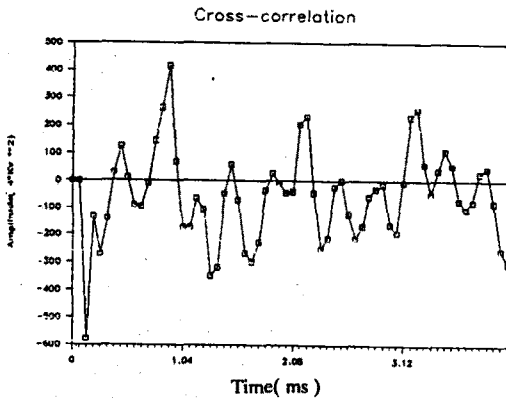
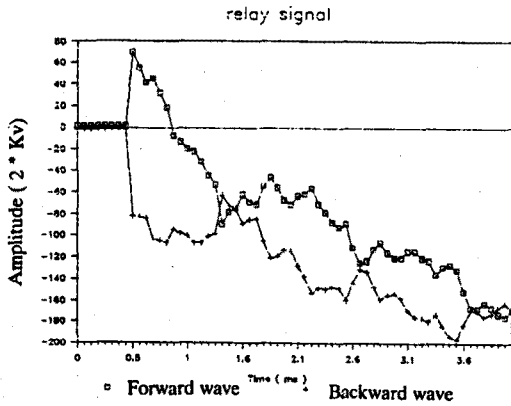


그림.2 128 Km A 상 지락 사고

그림.1 은 160 Km, 230 Kv 모델 계통도를 보이고 있다. 계전기는 busbar 1 에 위치한 경우를 다루었다.

Wedepole 변환을 이용한 mode 2에서 얻어진 값을 계전 신호를 사용했으며, 이 때의 파의 전파 속도는 292.92 Km/ms, 특성 임피던스는 271 Ohm 이다. 이때의 샘플링 주기는 15.36 KHz, 즉 샘플링 시간이 .065 ms 인 경우이다. 이전의 많은 연구에서 전압 위상각 90°인 경우에 그 근방에서의 사고를 다루었다[1][2][4].

그림.2 는 128 Km 전압의 위상각 60°에서 A 상 지락 사고가 난 경우의 전진파와 후진파, 그리고 이때의 correlation 결과를 보이고 있다. 이 대값은 14 샘플 지나서 나타남을 보이고 있으며, 이는 거리로 환산하면 거리 = (sample / 2) * 파의 전파속도 의 식으로부터 133.5 Km 에 해당함을 볼수가 있다.

전진파의 피크가 존재하고, 거리에 해당하는 시간 지연후에 후진파가 나타나는 경우에는 correlation 한 결과로부터 거리를 구할수 있음을 보여 주고 있다.

3.2 근접 사고

계전기 설치점으로 부터 매우 가까이에서 난 사고는 그 파의 전파시간이 매우 작다. 파의 전파시간이 샘플링 시간 보다 매우 짧기 때문에 순차적으로 도달하는 신호에서 피크 값은 나타나지 않게 된다. 그림.3 은 사고 발생위상각 60° 일때 6 Km 에서 A 상 지락 사고가 난 경우의 계전기 신호를 보이고 있다.

이런 경우에는 전진파의 피크를 얻을 수없고 이 결과 순차적으로 얻어지는 후진파와 correlation 방법으로는 사고 재거를 할수 없음을 알수 있다. 근접사고인 경우에 경우에 전진파와 후진파는 기본파 성분을 갖는다[1].

이 성질을 이용하여 전진파의 크기가 어떤 값을 넘었을 때는 후진파의 평균값이나 RMS값을 구하여 그 크기로 부터 트립 신호를 낼수 있다. 전압의 0° 바로 이전에서 사고가 발생했을때의 오동작을 방지하기 위하여 여기서는 RMS 값을 사용했다.

$$m = \left[\sum_1^{2\tau} S_1^2 / 2\tau \right]^{1/2} \tag{16}$$

여기서 m 은 후진파의 RMS 이며, τ 는 보호구간의 전파 시간이다.

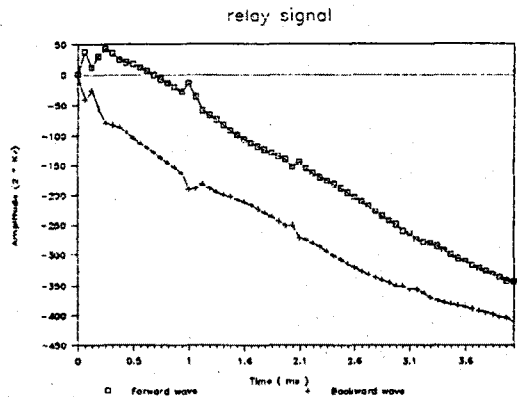


그림.3 6 Km 지점에서의 A 상 지락 사고

3.3 위상각 영도와 그 근처에서의 사고

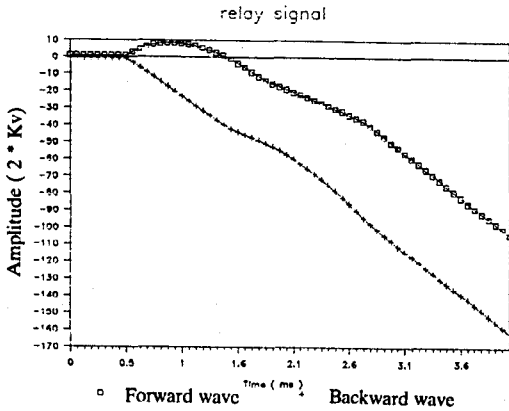


그림.4 128 Km 지점에서 A 상 지락 사고

사고가 발생하면 두 종류의 과도 현상이 나타난다. 그 하나는 전원측과 선로 인덕턴스에 저장된 자기(magnetic)에너지의 방전으로서 이는 지수 함수적으로 감소하는 전류의 Off-set 으로 나타난다. 그리고 다른 하나는 선로의 커패시턴스에 저장된 전기(electrical) 에너지의 방전으로 나타나는데 이는 전압과 전류파형에 고조파의 형태로 나타나게 된다. 전자는 전압 zero-crossing 시 일어나는 사고일때, 후자는 전압 최대시 일어나는 사고일때 큰 영향을 끼친다. 그러므로, 전압위상각 0°와 그 부근에서의 사고는 고조파가 거의 발생하지 않으며 이 결과로 원하는 계 전 신호를 얻을 수 없게 된다.

그림.4 는 128 Km 지점에서 A 상 지락 사고가 위상각 0° 에서난 경우를 보이고 있다. 이 경우에서도 전진파의 피크를 얻을수 없기 때문에 기존의 방법으로는 사고제거를 할수 없게 된다. 여기에서도 근접사고에서의 같은 방법으로 전진파의 크기가 일정값을 넘었을때 후진파의 RMS로서 사고를 제거 시킬 수 있다.

IV. 결론

지금까지의 진행과를 이용한 거리계전 방식은 일선 지락 사고가 전압위상 각 0° 나 그 부근에서 발생한 경우와 근접사고가 난 경우를 제외하고는 기존 계전기와 비교했을때 매우 빠른 동작 특성을 보인다. 이 논문에서는 진행과를 이용한 기존의 방식이 갖는 이러한 문제점을 다루었다.

1. 파의 왕복 전파시간이 샘플링시간 보다 짧은 근거리 사고에서 전진파가 일정 값을 넘었을때 후진파의 RMS값으로부터 사고제거를 효과적으로 할수가 있다.
2. 일선지락 위상각 0°인 사고에서도 후진파의 RMS를 이용하여 트립 신호를 낼수가 있다.

V. 참고 문헌

- [1] E.H Shehab-Eldin and P.G. McLaren, "Travelling Wave Distance Protection - Problem Areas and Solutions," IEEE Trans. Power Delivery, Vol.3, No.3, pp.894-902, July 1988.
- [2] P.A. Crossley, P.G. McLaren, "Distance Protection Based on Travelling Waves," IEEE Trans., PAS-102, No.9, pp.2971-2982, Sept. 1983.
- [3] M.Vintins, "A Fundamental Concept for High Speed Relaying", IEEE Trans., PAS-100, No.1, pp.1607-1616, Jan. 1981.
- [4] S.Rajendra, P.G.McLaren, "Travelling-Wave Technique Applied to the Protection of Travelling-Wave Techniques", IEEE Trans., PAS-104, No.12, pp3544-3550, Dec.1985.
- [5] S.Rajendra, P.G. McLaren, "Travelling Wave Techniques Applied to the Protection Teed Circuit: Multi-Phase/Multi-Circuit System", IEEE Trans., PAS-104, No.12, pp.3551-3557, Dec. 1985.
- [6] AL-BAHRANT, Abdallah Hussin, "Modelling of Frequency Dependence in Untransposed Transmission Lines", Ph.D Thesis, University of Wisconsin-Madison, pp.17-23, 1983.
- [7] A.T. Johns, "Ultra-High Speed Directional Comparison Technique for the Protection of E.H.V. Transmission Lines", IEE Proc., Vol. 127, No. 4,
- [8] Seong-Soo Kim, Jong-Keun Park, Sang-Hee Kang, "Digital Differential Relay for Transmission Line Protection using a Correlation Method", Preprints of 1989 IFAC Symposium.
- [9] K.L. Hicks, W.H. Butt, "Feasibility and economics of ultra-high-speed fault clearing", IEEE Trans., PAS-99, No.6, pp.2138-2145, Nov/Dec. 1980.