

## 반사계수 추정에 의한 초고속 거리계전 알고리즘

정병태<sup>0</sup> 조경래 홍준희 정해성 박종근  
서울대학교 전기공학과

### UHS Distance Relaying Algorithm Using Reflection Coefficients Estimation

Byung-Tae Jung Kyung-Rae Cho Jun-Hee Hong Hae-Seong Jeong Jong-Keun Park  
Dept. of Elec. Eng. Seoul Nat'l Univ.

#### Abstract

A novel UHS relaying algorithm using reflection coefficients estimation is proposed. Based on a travelling wave approach the algorithm can determine the fault location in a travelling time of the protected zone. The discrimination of the reflected wave from others is possible observing the difference of two coefficients. The algorithm is tested using results determined by EMTP.

Key Words : Reflection Coefficient, Travelling Wave, Distance Relay

#### 1. 서론

송전선로는 다른 요소들에 비해 넓은 지역에 노출되어 있어 고장이나 사고 발생빈도가 높고 다양한 형태의 고장이 존재한다. 최근에 송전선압이 높아지고 계통구성이 복잡해지고, 또한 사회가 전산화됨에 따라 고장으로 인한 피해는 더욱 증가하게 되었다. 이에 따라 계통의 안정도를 향상시키고 신뢰도를 높이기 위해서는 고속, 고신뢰도의 보호계전 알고리즘이 필요하게 되었다.

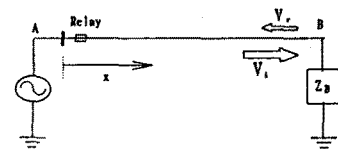
거리 계전 알고리즘들은 전압과 전류의 측정값으로부터 임피던스를 계산하여 자기 보호구간 내의 고장 유무를 판단하는데, 임피던스를 계산하는 방법에 따라 크게 두가지로 나눌 수가 있다. 하나는 전압과 전류의 신호에서 전력주파수 성분을 이용하여 임피던스를 구하는 것이고[1], 다른 하나는 진행파의 왕복시간으로 고장점까지의 거리를 계산하는 것이다. 진행파 알고리즘은 거의 빛의 속도로 움직이는 파를 이용하므로 전력주파수의 1/8주기내에 고장유무를 판단하고 고장점을 찾는 것이 가능하여 초고속 알고리즘으로 제안되고 있다.

선로에서의 진행파에 대한 연구가 진행된 것은 약 30년전의 일이지만 마이크로 프로세서가 실용화된 후에야 계전기에의 응용이 모색되었다. 1978년과 1980년까지 Charnia & Liberman, Dommel & Michels, Johns 등에 의해 진행파를 이용한 알고리즘들이 제안되었으나 단순한 모델을 중심으로 보호구간 내의 고장유무를 판단하는 정도였고, 이들은 통신설비를 필요로 하였다.[2,3,4] 1983년에 Maclaren & Crossley는 자기만의 정보만을 이용해서 고장유무는 물론 고장점까지 찾을 수 있는 알고리즘을 제안해 진행파를 이용한 알고리즘의 가능성을 분명히 하였다[5]. 이들은 Correlation을 이용하여 파를 구별하였는데 그 후에 Rajendra & Maclaren들이 이를 개선시켰다.[6] 최근에는 Christopoulos, Dutta & Dutttagupta, Ancei 등이 Correlation에 다른 기법을 도입하여 개선시키려 하였다.[7,8,9] 그러나 이들 알고리즘은 정확도를 높이고자 계산상 다소 부담이 가는 방법들을 도입하였다.

본 논문에서는 적은 계산량으로도 정확한 결과를 낼 수 있는 반사계수 추정에 의한 초고속 거리계전 알고리즘을 제안하였고 이를 단상모델에서의 사례연구를 검증하였다.

#### 2. 고장과 반사계수

##### 2.1. 고장후의 전압과 전류 신호의 변화



<그림 1> 고장과 전압, 전류

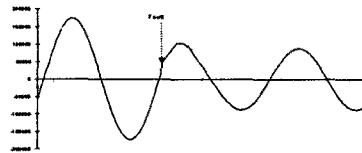
<그림 1>과같이 B 지점에서 고장이 발생한 경우, 모선 A에 위치한 계전기에서 측정되는 전압과 전류신호에는 지수감소하는 DC오프셋과 많은 고조파가 포함되어 심하게 왜곡되고, 이 때 파형은 고장시 고장점의 전압 위상각과 계통의 구성상태에 따라 달라진다. 고장시 전압위상각과 고장거리에 따라 주파수 구성이 달라지는데 고장점의 전압 위상각이 0도이면 전류에 DC오프셋이 두드러지고, 전압 위상각 90도 고장에서는 전압과 전류에 고조파 성분이 더 크게 나타난다.

고장후의 전압과 전류 신호를 전력주파수 성분인 정상분과 고유의 성분들인 과도분의 합으로 표현할 수 있는데 과도분은 고장으로인해 유입된 성분이고 정상분은 발전기에서 계속 공급된다.

$$v_{relay} = v_s + v_t$$

$$i_{relay} = i_s + i_t \quad (1)$$

고장후에는 계통의 구성이 고장전과 달라지게 되어 정상분도 변하게 되는데 <그림 2>은 고장전압각이 0도 부근이고 계전기로부터 180km지점에서 고장이 발생했을 때 고장이 발생했을 때의 전압신호를 그린 것으로 정상분의 변화를 잘 나타내고 있다.



<그림 2> 고장시 정상분의 변화

전력주파수 외의 나머지 성분들인 과도분은 시간이 지나면 감쇠, 소멸되는데 고장전에는 없거나 매우 작은 값이나 고장후에는 큰 값을 가지므로 고장유무와 고장계산에 이용된다. 측정값으로부터 과도분을 구하는데 많이 이용되었던 방법은 측정값에 반주기간의 정상분을 더해주는 방법이다.

$$v_t(\tau) \equiv v_{relay}(\tau) + v\left(\tau - \frac{T}{2}\right)$$

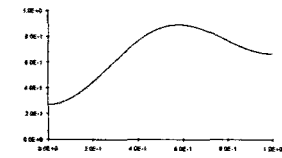
$$i_t(\tau) \equiv i_{relay}(\tau) + i\left(\tau - \frac{T}{2}\right) \quad (2)$$

식(2)와 같이 계산된 과도분은 송전선로의 경우 자기보호구간내에서 고장이 발생하면 일반적으로 <그림 2>와같이 정상분이 크게 달라지므로 실제 과도분보다 큰 값을 갖는다.

## 2.2. 과도분 추정 디지털 필터

디지털 필터는 특정 주파수 성분을 제거하기 위해 주로 사용된다. 그러므로 과도분을 구하는데 디지털 필터를 이용하면 정확한 결과를 얻을 수 있으나 진행파를 이용하여 고장계산을 하는 경우에는 몇가지 제약조건이 따른다. 첫째로 빠른 연산을 위해 필터의 시지연이 적어야한다. 필터의 시지연은 일반적으로 필터의 차수가 높아질 수록 커지므로 높은 차수의 필터는 이용할 수 없다. 둘째로는 과도분을 얻기 위해서는 전력주파수 성분만 제거하는 대역통과필터나 아니면 전력주파수 이하의 성분들을 제거하는 고역통과필터를 이용하여야한다. 이 때 진이대역이 좁은 필터가 이상적이다. 그러나 시지연을 줄이기위해 낮은 차수의 필터를 쓰는 경우에는 진이대역은 넓어지게된다. 본 논문에서는 식(3)과같이 표현되는 디지털 필터를 이용하여 과도분을 구하였는데, <그림 3>는 이용된 필터의 크기특성을 보이고 있는데 고역통과 특성을 보이고 있다.

$$\hat{v}_i[n] = \frac{2}{3}v[n] - \frac{1}{5}v[n-1] - \frac{1}{5}v[n-2] \quad (3)$$



<그림 3.> 필터의 크기 특성

## 3. 진행파와 반사계수

송전선로는 전력주파수의 파장에 비해 길이가 매우 길기 때문에 분포정수회로로 다루게 되는데 선로에서 인덕턴스와 커패시턴스가 저항 성분보다 훨씬 크기 때문에 손실을 무시하면 인덕턴스와 커패시턴스만으로 근사되고 전압과 전류의 관계는 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{di}{dt}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

여기에서 L은 단위길이당 인덕턴스, C는 단위길이당 커패시턴스이다. 위 식의 해는 다음과 같이 전진파와 후진파의 합으로 표현되는 d'Alembert의 해로 알려져 있다.

$$v(x,t) = Z_c \left[ f_1 \left( t - \frac{x}{u} \right) - f_2 \left( t + \frac{x}{u} \right) \right] \quad (5)$$

$$i(x,t) = f_1 \left( t - \frac{x}{u} \right) + f_2 \left( t + \frac{x}{u} \right)$$

여기에서 u는 진행파의 전파속도로서  $u = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 과 같고,

$Z_c$ 는 선로의 특성 임피던스이다. 그리고 식(5)에서 전압과 전류는 전진파  $f_1$ 과 후진파  $f_2$ 의 합으로 표현됨을 알 수 있다. 역으로 전진파와 후진파는 전압과 전류의 값으로부터 구할 수 있다. 전진파에 비례하는 성분  $S_F$ 와 후진파에 비례하는 성분  $S_B$ 를 식(6)과 같이 정의하기로 한다.

$$S_F = 2 Z_c f_1(t) = Z_c i(t) + v(t) \quad (6)$$

$$S_B = 2 Z_c f_2(t) = Z_c i(t) - v(t)$$

## 4. 반사계수

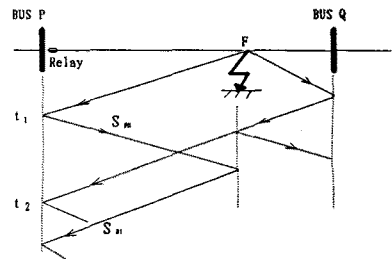
### 4.1. 전압의 반사계수

고장이 발생하는 순간에 <그림 1>과 같이 고장점 B에 입사하는 전압을  $V_i$ , 반사된 전압을  $V_r$ 이라면 이들의 비는 식(7)와 같고 이 값을 전압의 반사계수라 한다.

$$\frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_B - Z_c}{Z_B + Z_c} = m_B \quad (7)$$

반사계수는 반사되는 점의 매질의 성질에 따라 달라지므로 모선에서 반사되었을 때와 고장점에서 반사되었을 때는 서로 다른 값을 가지게 된다. 전압의 신호중 정상분은 고장점에서 반사되는 것과 발전기에서 공급되는 성분이 합해져서 측정된다. 그런데 정상분은 고장점에서 반사되어 돌아오는 성분외에 발전기에서 계속 유입되는 성분이 있어서 고장점을 찾는데 이용하기엔 부적절하다. 이와는 대조적으로 과도분은 새로 유입된 성분이 없고 고장시 발생한 파의 반사에 의한 성분만 있으므로 고장점을 찾는데 이용하기가 적절하다. 그러므로 식(6)의 계산시 전압값은 과도분만을 이용해서 구하게 된다.

### 4.2. 진행파의 반사



<그림 4.> 파의 반사

<그림 4>는 파의 발생, 반사, 투과를 보인 것으로 시간  $t_1$ 에서 고장이 감지되고,  $t_1$ 시간에 나간 파가 고장점에서 다시 반사되어 돌아오는 시간을 측정하면 고장점을 찾을 수가 있는데  $t_2$ 시간 이후에는 다른 곳에서 반사된 파도 들어오므로 파를 구별해내야 한다. <그림 4>에서 고장점은  $S_{F0}$ 와  $S_{B1}$ 사이의 시간차로 계산이 되는데 이 때  $S_{F0}$ 가 고장점에서 반사가 되어  $S_{B1}$ 이 되므로 고장점의 반사계수는  $S_{F0}$ 와  $S_{B1}$ 의 비로 구할 수 있다.

$$m_B = \frac{S_{B1}}{S_{F0}} \quad (8)$$

## 5. 반사파의 구별

송전선로에서 지락고장시 고장저항은 수 ohm정도로 매우 작은 값을 가지는데 이런 특성으로 다른 계통구성요소와는 다른 반사계수를 가지게 된다. 모선단에 설치된 계전기에서 전압과 전류의 측정치로부터 다음과 같이 2개의 반사계수를 구할 수 있는데 이를 이용하면 반사파를 구별해낼 수 있다.

반사계수 1.

고장 직전의 정상상태의 전압  $v(0^-)$ 가 고장점에 부딪혀 반사파가 발생하고 이 값이 계전기에서 정상분과 함께 측정된다. 그러므로 고장전의 정상분을 제거하면 새로 유입된 성분을 얻을 수 있는데, 한주기전의 정상분을 빼주면 된다.  $t = \alpha$ 에서 첫번째 파가 감지되었다면 전압신호중 새로 유입된 성분을  $v_{b0}$ 라하면,

$$v_{b0} = v(\alpha) - v(\alpha - T) \quad (9)$$

와 같이 구해진다. 이렇게 구한  $v_{b0}$ 와  $v(0^-)$ 의 관계에서 반사계수를 구하면 다음과 같다.

$$k_{F0} = \frac{v_{b0}}{v(0^-)} \quad (10)$$

반사 계수 2.

고장후 맨 처음 계전기단에 도달한 파는 고장점에서 온 후진파이고 이 것이 계전기단에서 반사되고, 다시 이 파가 고장점에서 반사되어 되돌아 온다. 그러므로 계전기단에서 처음에 나간 파를  $S_{F0}$ 라고 하고 시간  $t_2$ 에서 들어오는 후진파를 식(6)에 의하여 계산하여 그 값을  $S_B(t_1)$ 이라고 하면 다음의 다음의 관계가 얻어진다.

$$k_{F1} = \frac{S_B(t_1)}{S_{F0}} \quad (11)$$

그리고 고장순간의 고장점에서의 정상분,  $v(0^-)$ 는  $t_2 - \alpha$ 시간 전에 계전기단에서 나간 정상분과 같고 이 것은 계전기에 저장되어있으므로

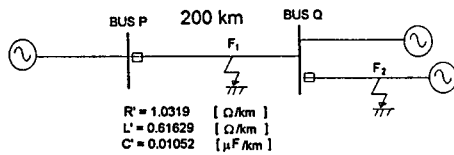
$$v(0^-) = v[\alpha - |\alpha - t_1|] \quad (12)$$

과 같이 구할 수 있다. 식(12)에서 구한  $v(0^-)$ 를 식(10)에 대입하면  $k_{F0}$ 를 구할 수 있다.

2개의 반사계수의 절대치의 차가 가장 작은 시점을 반사된 파가 돌아온 시점으로 한다. 그런데 고장점에서 반사가 이루어진 경우에는  $k_{F0}$ 와  $k_{F1}$ 의 절대치가 모두 1보다 작게 되므로 절대치의 차가 1이 넘는 경우는 무시할 수 있다.

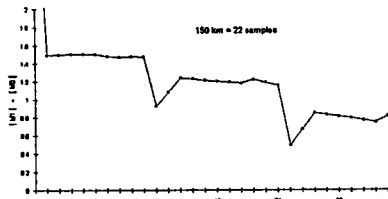
## 6. 사례연구

본 논문에서는 다음의 그림과 같은 단상 선로에서의 고장을 EMTF(Electro Magnetic Transient Analysis)를 이용하여 모의하였다.



< 그림 5. > 고장 선로 모델

<그림 6>은 모선 P에서 150 km 떨어진  $F_1$ 에서 전압위상각 90도에서 지락이 발생하였을 때 2개의 반사계수의 차를 보이고 있다. <그림 6>에서 알 수 있듯이 처음 고장을 감지한 후 고장점까지 파의 왕복시간 후엔 차가 최소로 됨을 알 수 있다.



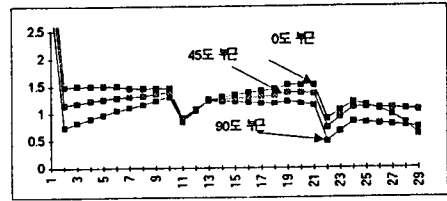
<그림 6> 반사계수의 차

$F_1$ 의 위치에서 최소가 되는 샘플의 위치가 달라지는데 <표 1>에 고장전압각 90도에서  $F_1$ 의 위치에 따른 모의 결과를 정리하였다.

고장점 위치	추정값	고장 전압각
150 km	147.26 km	90도 부근
100 km	100.41 km	90도 부근
30 km	33.46 km	90도 부근

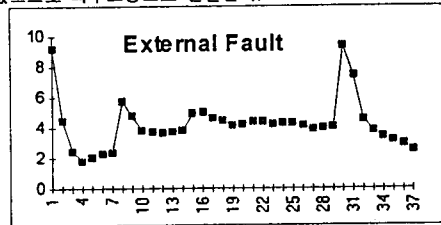
<표 1> 고장점 위치와 추정값의 비교

<그림 7>은  $F_1$ 의 위치가 120 km일 때에 고장전압각이 달라졌을 때의 절대치의 차의 변화를 그린 것이다. <그림 8>에서 알 수 있듯이 고장전압각이 0도에 가까워 질 수록 결과가 나빠지는데 이 것은 0도에 가까워 질 수록 과도분이 적어지고 정상분이 상대적으로 커지기 때문이다.



<그림 7> 고장 전압각에 따른 변화

계전기는 자기보호구간의 고장과 외부구간의 고장을 판별할 수 있어야 오동작하지 않는데 <그림 8>는 제안된 알고리즘이 외부 고장을 잘 판별해 냄을 보이고 있다. 즉, 파가 자기보호구간을 왕복하는데 걸리는 시간 이내에 절대치의 차가 1보다 작은 시점이 없으므로 외부고장으로 판단한다.



<그림 8> 외부 고장 판별

## 7. 결론

본 논문에서는 파의 왕복시간으로 고장점을 찾아내는 초고속 거리계전 알고리즘을 새로 제안하였다. 제안된 방식은 2개의 반사계수를 추정하고 이들의 차가 가장 작은 시점과 처음 고장을 감지한 시점과의 차로써 고장점까지의 거리를 추정해내는 방식이다. 제안된 방식이 고장점을 정확히 찾아낼 수 있음을 단상선로에서의 사례연구를 통해 검증하였다.

## 8. 참고문헌

- [1] 조경래, 정병태, 홍준희, 박종근, "송전선 보호용 적분근사 거리계전 알고리즘", 전기학회 논문지 제43권 5호, 1994.5.
- [2] M. Chamia, S. Liberman, "Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines-Development, Design and Application", IEEE Trans., PAS-907, No. 6, Nov. 1978.
- [3] H. W. Dommel, J.M. Michels, "High Speed Relaying Using Travelling Wave Transient Analysis", IEEE Winter Meeting, Paper No. A77 750-3, July 1977.
- [4] A. T. Johns, "Ultra-High Speed Directional comparison Technique for the Protection of E.H.V. Transmission Lines", IEE Proc., Vol. 127, No. 4, 1980.
- [5] P.A. Crossley, P.G. McLaren, "Distance Protection Based on Travelling Waves" IEEE Trans. on PAS, Vol. 102, No. 9, September 1983.
- [6] S. Rajendra and P. G. McLaren, "Travelling-wave techniques applied to the protection of the teed circuits: Principle of travelling-wave techniques", IEEE Trans., PAS-104, 1985.
- [7] C. Christopoulos, D.W.P. Tomas, "Scheme, based on travelling-waves, for the protection of major transmission lines", IEE Proc. Vol. 135, Pt. C, No.1, January 1988
- [8] P. Dutta and P. Dutttagupta, "Microprocessor-based UHS relaying for distance protection using advanced generation signal processing", IEEE Trans. PWRD, Vol. 7, No. 3, July 1992
- [9] G. B. Ancell, N. C. Pahalawaththa, "Maximum likelihood estimation of fault location on transmission lines using travelling waves", IEEE Trans. on PWRD, Vol 9, No. 2, April 1994
- [10] 정병태, 홍준희, 조경래, 박종근, "진행파를 이용한 거리계전 알고리즘" '94 대한전기학회 하계학술대회 논문집B