

## 아크고장 및 CT포화가 거리계전 알고리즘에 미치는 영향분석

손천명, 강상희  
영지대학교 차세대 전력기술연구센터

강용철  
전북대학교

Waldemar Rebizant  
Wroclaw Univ., Poland

### Analysis on the Effect of Arcing Fault and CT Saturation on Distance Algorithms

Chun-Myung Son\*, Sang-Hee Kang\*, Yong-Choel Kang\*\* Waldemar Rebizant\*\*\*

Myoungji University Next-Generation Power Technology Center\*, Chonbuk National University\*\*, Wroclaw Univ., Poland\*\*\*

**Abstract** - Distance relays need accurate current and voltage for determining the trip ignition. Therefore we must analyze nonlinear phenomena which cause distortion in signals first of all. This paper presents the effect of some distortion (arcing fault and current transformer saturation) in power system. The saturation of a current transformer distorts input current of a distance relay and arcing faults make current and voltage to be changed.

This paper describes modeling methods of a current transformer and arcing faults, and describes the simulation result of two distance relay algorithms (discrete fourier transform and modified differential equation methods)

를 필요로하는데 EMTP 내의 보조프로그램인 HYSDAT를 이용하여 얻을 수 있다. 변류기는 이상 변압기와 Type-96 소자를 병렬로 연결하여 모델링할 수 있으며, 계전기는 부담(Burden)을 통해 전류를 전압 형태로 입력받게 된다. 본 논문에서 사용한 변류기 모델은 그림 1과 같다.[3]

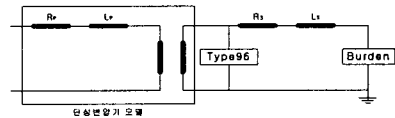


그림 1. 포화특성을 갖는 변류기 모델

일반적으로 변류기는 20배의 정격전류에 10[%]이하의 오차가 발생하도록 설치하므로, 포화되지 않는다. 하지만, 사고전류 파형이 직류성분을 포함하거나, 변류기 철심 내에 어느 방향의 잔류자속이 남아 있을 때, 그 방향의 자속이 증가하는 사고가 발생할 때 포화가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 C400 특성의 2000:5 변류기를 모델링하였으며, 계통의 지락, 단락 사고시 철심의 잔류자속 양에 따라 그림 2와 그림 3과 같은 포화 특성 갖음을 확인하였다.

## 1. 서 론

거리 계전 방식은 송전선로 보호에서 가장 널리 사용되는 보호 방식으로, 거리계전기는 계전점의 전압과 전류 신호만으로 선로임피던스를 계산하여 사고의 유무를 판단하는 계전방식이다. 따라서 이러한 거리계전기의 신속하고 정확한 동작을 위해서는 정확한 전압과 전류 신호를 필요로 한다. 그러나 실제 계통에는 거리계전기의 입력으로 사용되는 전압, 전류 신호를 왜곡시키는 많은 종류의 원인이 있고 이들은 비선형 특성에 기인한다. 그러므로 정확한 거리계전기의 동작을 보장하기 위해서는 이러한 요인에 대한 정확한 해석과 영향을 분석하는 일이 반드시 선행되어야만 한다.

본 논문에서는 계전기의 입력 전압, 전류에 영향을 미치는 변류기(current transformer: CT)의 포화와 아크(arc) 사고가 거리계전 알고리즘에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 변류기 포화는 입력 전류를 왜곡시키며, 아크 사고는 입력 전압과 전류를 비선형적으로 왜곡시킨다. 이들은 모두 비선형인 특징을 보인다.

아크와, 변류기를 EMTP를 사용하여 모델링하였으며, 거리계전 알고리즘에 미치는 영향을 분석하기 위해, 보편적으로 사용되고 있는 직교변환법을 이용한 알고리즘과 미분방정식법을 이용한 알고리즘을 검토하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 변류기 모델링

변류기는 전력계통에 흐르는 전류의 크기를 축소하여 보호 계전기에 입력하기 위하여 사용되는데, 일반적으로 자기포화특성을 갖는 철심 변류기(Iron-cored CT)를 사용하고 있다.

자기포화특성을 갖는 철심 변류기의 포화 특성을 정확하게 모델링하기 위해서는 철심의 포화특성 및 히스테리시스 특성까지도 표현할 수 있는 Type-96소자를 사용해야 한다. Type-96소자는 히스테리시스 데이터

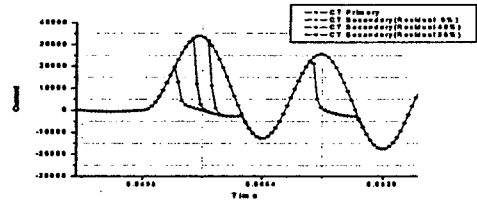


그림 2. 지락 사고시의 변류기의 포화특성

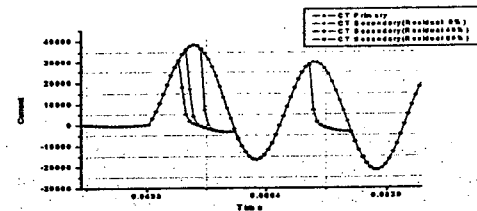


그림 3. 단락 사고시의 변류기의 포화특성

### 2.2 아크 모델링

전력계통의 사고발생시 1차 아크와 2차 아크가 발생하는데 1차 아크는 차단기 동작 이전에 발생하며 일반적으로 높은 전류치를 나타낸다. 2차 아크는 차단기 동작 후 건전상과 사고상의 mutual coupling으로 발생하게

되며, 재폐로 투입 시기를 결정하는데 중요한 요소로 알려져 있다.

아크 사고시 전압-전류의 특성은 선로와 접촉물의 특징에 따라 다양하게 나타난다. 아크사고시 전압-전류 특성은 그림 4와 같다. 아크 발생시 아크-개시-전압까지는 전류가 거의 흐르지 않으며, 아크가 발생하기 시작하는 시점부터 서서히 흐르기 시작한다. 그러나 아크가 형성된 이후 아크-소멸-전압까지는, 전압의 증가함에 전류가 크게 증가하는 비선형적인 특성을 갖는다.[4]

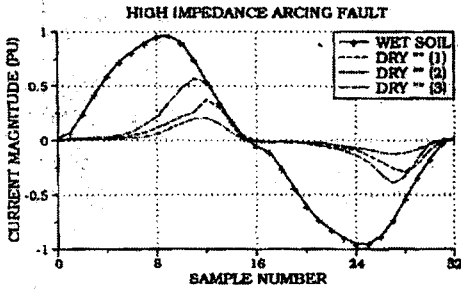


그림 4. 아크시 전압과 전류

이러한 특징을 갖는 아크 전압과 전류 파형을 전압-전류 평면에 나타내면, 1상함과 3상에서 삼각형 모양의 전압-전류 특성을 나타낸다. 그림 5와 그림 6은 아크의 특징을 전압-전류 평면에서 보여주고 있으며, 또한 삼각형을 불연속적인 저항으로 가정하여 모델링 가능성을 보여주고 있다.[5]

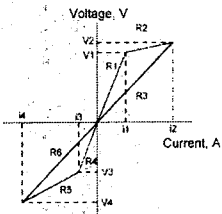


그림 5. 마른 땅 아크 특성

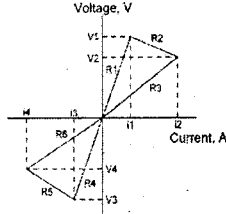


그림 6. 모래 땅의 아크 특성

따라서 본 논문에서는 아크를 EMTP의 TACS를 이용하여 그림 5와 그림 6과 같은 특성을 갖는 비선형적인 전압원으로 아크를 모델링 하였으며, 그림 5의 특징을 갖는 아크 모델을 통해 얻는 아크전압과 전류는 그림 7과 그림 8과 같은 특징을 갖는 것을 확인하였다.

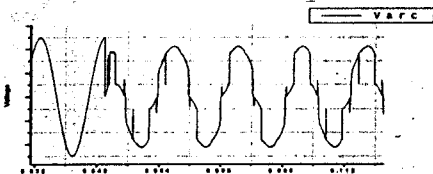


그림 7. 사고가시 전압

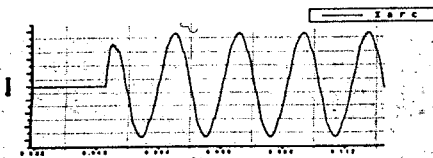


그림 8. 사고가시 전류

### 2.3 직교변환법(DFT)

직교변환법을 이용한 거리계전 알고리즘은 샘플된 파형에서 페이서 성분을 얻기 위해 가장 많이 사용되는 알고리즘 중에 하나이다. 식(1)과 (2)을 사용하여 전압전류의 페이서를 얻을 수 있으며, 식(3)를 사용하여 임피던스를 얻을 수 있다.[1]

$$A_1 + jB_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-j\frac{2\pi}{N}k} \quad (1)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right)$$

$$B_1 = -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N}k\right)$$

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (2)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}(B_1/A_1)$$

여기서,

$A_1, B_1$  : 기본파의 real·imaginary phasor

$C_1, \phi_1$  : 기본파의 크기(실효값) 및 위상

$f(k)$  : 입력 신호의 샘플링 데이터

$N$  : 한 주기 샘플링 횟수

$$Z = \frac{C_{IV}}{C_{II}} \quad \phi_z = \phi_{IV} - \phi_{II} \quad (3)$$

### 2.4 수정 미분방정식법(MDAA)

미분방정식법은 시간영역에서 임피던스를 계산하는 알고리즘으로, 송전선로를 R과 L만으로 해석하는 방법이다. 회로방정식 식(4)에 근거하며, 이를 이산신호영역에서 나타내면 식(5)와 같이 R과 L의 값을 구할 수 있다. 식(6)과 식(7)은 근사식의 오차를 없애기 위해서 사용하는 계수식을 나타내고 있다.[2]

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

$$R = \frac{(v_m + v_{m-1}) \left( \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-1} + \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-2} \right) - (v_{m-1} + v_{m-2}) \left( \left( \frac{di}{dt} \right)_m + \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-1} \right)}{(i_m + i_{m-1}) \left( \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-1} + \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-2} \right) - (i_{m-1} + i_{m-2}) \left( \left( \frac{di}{dt} \right)_m + \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-1} \right)} \quad (5)$$

$$L = \frac{(i_m + i_{m-1})(v_m + v_{m-2}) - (i_{m-1} + i_{m-2})(v_m + v_{m-1})}{(i_m + i_{m-1}) \left( \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-1} + \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-2} \right) - (i_{m-1} + i_{m-2}) \left( \left( \frac{di}{dt} \right)_m + \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-1} \right)}$$

$$\left( \frac{di}{dt} \right)_m + \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-1} = K_0 (i_m - i_{m-1}) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } K_0 = w \cot \frac{wT}{2}$$

$i_m, i_{m-1}$  : 전류의 샘플링 데이터

$$\left( \frac{di}{dt} \right)_m + \left( \frac{di}{dt} \right)_{m-1} = \sum_{k=0}^{\infty} K_k (i_{m-1+k} - i_{m-k}) \quad (7)$$

### 2.5 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 변류기 포화의 영향과 아크의 영향을 개별적으로 시뮬레이션 하였으며, 거리계전 알고리즘은 모두 Butterworth 필터에 의해 필터링된 전압, 전류 신호를 사용하였다. 시뮬레이션한 계통은 그림 9와 같이 구성하였으며, 선로 2km 지점에서 사고를 모의하였다. 변류기의 포화 영향은 철심의 잔류자속이 80[%] 남아 있을 때 지락과 단락 사고를 모의하였으며, 아크 사고의 영향은 지락사고시 그림 5와 그림 6의 특징을 갖는 아크를 모의하여 시뮬레이션 하였다.

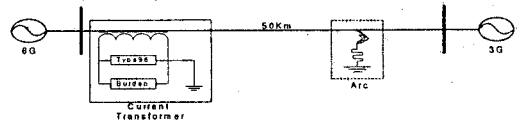


그림 9. 시뮬레이션 계통

**2.5.1 변류기 포화 실험**

직교변환법을 사용한 거리계전 알고리즘은 지락 사고시에는 그림 10과 같은 결과를 보였으며, 단락사고시에는 그림 12와 같은 결과를 보였다.

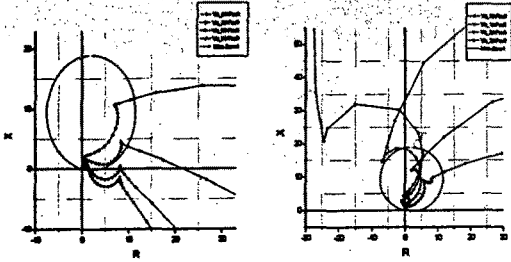


그림 11. 지락시의 DFT 연산결과    그림 12. 단락시의 DFT 연산결과  
 변류기의 포화 정도가 심할수록 Zone의 계적에 수렴하는 시간은 지연되게 되며, 단락 사고시보다는 지락 사고시 영향이 큼을 확인할 수 있다. 특히, 전압위상 0도의 지락사고시에는 변류기 1차측 전류보다 2/3 주기 정도 늦게 수렴함을 확인하였다.

미분방정식법을 사용한 거리계전 알고리즘은 R과 L 만으로 전력계통의 과도현상을 모으하기 때문에 고조파에 아주 취약한 단점을 갖고 있으므로, Butterworth 필터의 Cutoff 주파수를 6조파로 설정하였다. 그결과 지락 사고시에는 그림 13과 같은 결과를 보였으며, 단락사고시에는 그림 14와 같은 결과를 보였다.

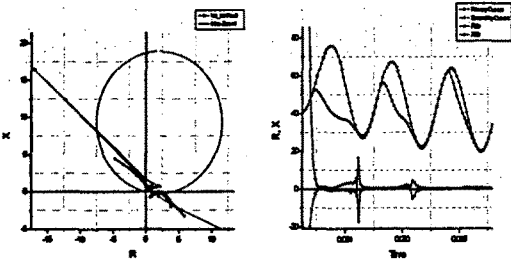


그림 13. 지락시의 MDA 연산결과(a)    그림 13. 지락시의 MDA 연산결과(b)

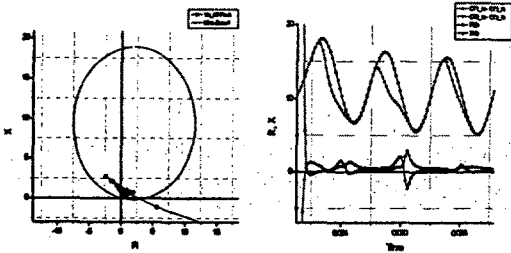


그림 14. 단락시의 MDA 연산결과(a)    그림 14. 단락시의 MDA 연산결과(b)  
 임피던스의 계적은 포화가 시작되는 구간은 비교적 흔들림이 적은 반면에 포화가 끝나는 부분에서 크게 흔들림을 확인할 수 있다. 단락사고시 보다는 지락사고시 크게 흔들림을 또한 확인할 수 있다.  
 따라서 직교변환법을 사용하는 알고리즘에서는 수렴속도에 영향을 미치며, 미분방정식법을 사용하는 알고리즘은 비선형구간에서의 임피던스의 흔들림으로 인해 Zone1을 벗어날 수 있음을 확인하였다.

**2.5.2 아크 사고 실험**

직교변환법을 사용하는 알고리즘은 그림 5와 같은 아

크 보다도 그림 6과 같은 아크시에 크게 흔들림을 확인할 수 있다. 특이점은 반주기 동안에 3개의 전압원이 상호작용 없이 절체됨에도 비교적 한 점으로 수렴함을 확인할 수 있다.

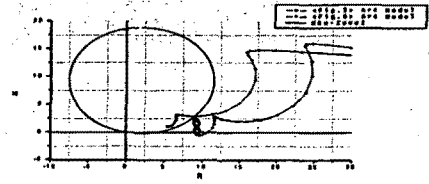


그림 15. 지락시의 DFT 연산결과

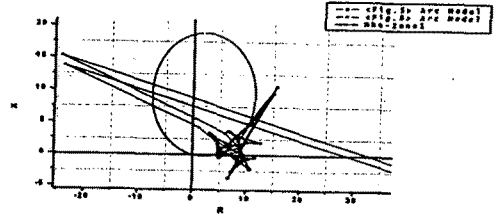


그림 16. 지락시의 MDA 연산결과

미분방정식을 사용하는 알고리즘은 아크의 비선형성 때문에 지속적으로 임피던스가 흔들림을 확인할 수 있으며, 직교변환법을 사용한 알고리즘과 동일하게 그림 6과 같은 아크시에 크게 흔들림을 확인할 수 있다.

**3. 결 론**

본 논문은 계전기의 입력신호에 영향을 미치는 변류기 포화와 아크 사고가 거리계전기에 미치는 양향을 궁극적으로 고찰하였다. 변류기의 포화는 직교변환법을 사용하는 알고리즘의 수렴속도에 영향을 미치며, 미분방정식법은 아크고장이나 변류기가 포화된 경우를 감안한 개선된 방법이 필요함을 확인하였다. 또한 아크 사고는 그 특성 에 따라 알고리즘에 미치는 영향이 서로 다름을 확인하였다.

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

**(참 고 문 헌)**

- [1] P.G. McLaren, M.A. Redrern "Fourier-Series Techniques Applied to Distance Protection", PROC.IEE, Vol. 122, No.11, November 1975
- [2] Y.Ohura, T.Matsuda, M.Suzuki etc. "Digital Distance Relay with Improved Characteristics Against Distorted Transient Waveforms", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.4, October 1989
- [3] M. Kezunovic, Lj. Kojovic, A. Abur, C. W. Fromen, D. R. Sevcik, F. Phillips, "Experimental evaluation of EMTP-based current transformer models for protective relay transient study", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994
- [4] Srinivas Varadan, Elham B. Makram, Adly A. Gargis, "A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996
- [5] 강 용철, 남 순열, 박 종근, 장 성일, "EMTP를 이용한 전압원으로서의 배전계통 고저항 사고 모델링 기법", 대한전기학회 논문지 제 48권 제 11호, 1999년 11월, pp. 1388-1393