

CT와 CCVT의 오차를 고려한 거리 계전기의 응답 분석

\*강용철, \*정태영, \*최재선, \*강해진, \*김광무, \*장성일, \*\*김용균  
 \*전북대학교 전자정보 공학부, \*\*한국 아이이디 이엔지

Analysis of the response of a distance relay considering the errors of CT and CCVT

\*Yong-Cheol Kang, \*Tai-Ying Zheng, \*Jae-Sun Choi, \*Hae-Gweon Kang, \*Kwang-Moo Kim, \*Sung-Il Jang, \*\*Yong-Gyun Kim  
 \*Chonbuk National University, \*\*Hankook IED ENG. Inc.

**Abstract** - A distance relay has been widely used for transmission line protection. The distance relay detects a fault based on the calculated impedance i.e. the ratio of the voltage to the current measured from a current transformer (CT) and a coupling capacitor voltage transformer (CCVT), respectively. When a fault occurs and a CT saturates due to the magnitude of fault current, dc component, primary time constant, and the remanent flux of the iron core, the secondary current of a CT is distorted. On the other hand, non-fundamental components generated during a fault can increase the error of a CCVT, particularly when a fault distance is short. The distortion of the current and voltage can cause mal-operation or the operating time delay of a distance relay. This paper describes the response of a distance relay considering the errors of a CT and a CCVT. The results indicate that the severe distortion of a CT and a CCVT have noticeable effect to a distance relay.

1. 서 론

거리 계전기는 전력시스템에서 송전선로 보호에 광범위하게 쓰이고 있는 보호계전기로서, 전압 변성기와 변류기로 얻어진 전압, 전류 신호를 이용해 임피던스를 계산하고 계산된 임피던스를 이용해 사고를 판단한다. 따라서 정확한 전압, 전류 값의 측정이 거리 계전기의 응답과 관련하여 중요한 요소로 작용한다.[1-2].

사고가 발생하게 되면, 사고전류의 크기, DC성분, 1차 시정수, 그리고 잔류 자속 등의 원인으로 변류기가 포화를 일으킬 수 있다. 포화 발생에 의한 2차 전류의 왜곡은 거리계전기의 오동작과 시 지연을 가져 올 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위한 방법이 IEEE standard C37.110-1996에 소개 되어 있다[3]. 하지만 이를 만족하기 위한 변성기는 대형화가 불가피 하고 그에 따라 비용이 많이 들며 또한, 실제 구현하는 과정에서 문제점을 초래 하고 있다.

CCVT는 설비와 대지 사이에 높은 전압 분배를 위한 직렬 커패시터와 전압 조정 탭, 그리고 VT로 구성된다. 그런데, 커패시터에 걸리는 전압 때문에 CCVT의 2차 전압의 위상이 1차 전압의 위상과 다르게 되며, 이 위상차를 없애기 위하여 튜닝 리액터를 사용하는데, 이 때 튜닝 리액터의 인덕턴스 값은 정상상태 시 기본파 성분을 기초로 하여 결정된다. 그런데 계통 고장 발생 시에는 정적 주파수 외에 DC 성분과 고조파가 발생하게 된다. 따라서 리액터와 커패시터에 걸리는 전압이 커지므로 CCVT의 오차가 급격히 커진다.

CT와 CCVT의 오차는 모두 거리 계전기에 영향을 미친다. 본 논문에서 CT와 CCVT의 오차를 고려한 거리 계전기의 응답을 분석하였다. 제한한 분석 결과의 정확도를 검증하기 위해 EMTP를 사용하였다.

2. CT와 CCVT의 오차를 고려한 거리 계전기의 응답 분석

2.1 거리 계전기

거리 계전기는 계전기를 설치한 지점의 전압과 전류의 기본파성분의 페이저( $V, I$ )를 이용한 계전방식이다. 본 논문에서는 거리 계전기 중에서 주로 사용하고 있는 Mho 3단계 거리 계전기를 적용 하였다.

Mho 계전기의 3단계 동작영역은 그림 1과 같고, 동작 조건은 식 (1)과 같다.

$$|Z_{cal} - Z_{set}| \leq R_c \tag{1}$$

여기에서,  $Z_{set}$ ,  $R_c$ 는 계전기 동작영역의 원점과 동작원의 반지름이며, Zone 1, Zone 2, Zone 3의  $Z_{set}$ ,  $R_c$ 값은 각각 다르다.  $Z_{cal}$ 는 식 (2)를 이용하여, 계산된 임피던스이다.

$$Z_{cal} = \frac{V}{I} \tag{2}$$

2.2 CT의 오차

2차 측으로 환산한 철심 CT의 등가 회로를 그림 2에 나타내었다. 철손 저항은 히스테리시스 손실과 와류손의 조합으로 나타내며, 정상상태와 사고상태 시에 모두 매우 큰 값을 가지고 있다. 자화 인덕턴스는 자속과 자화전류의 비선형 관계로 표현되고, 철심 포화 전에 매우 큰 값을 갖으며, 철심 포화 후에 작은 값을 갖는다. 철심 CT의 자화 곡선은 그림 3과 같다.

CT의 포화 전에는 철손 저항과 자화 인덕턴스가 매우 크기 때문에, 철손 전류( $i_c$ )와 자화 전류( $i_m$ )는 거의 0이 되며, 이 때 2차 측으로 환산한 전류( $i_1'$ )와 측정된 2차 전류( $i_2$ )의 관계는 식 (3)과 같다.

$$i_1' = i_2 + i_c + i_m \approx i_2 \tag{3}$$

CT의 포화 후에는 자화 인덕턴스는 급하게 감소하며,  $i_m$ 의 크기는 무시할 수 없다. 이때에  $i_1'$ 과  $i_2$ 의 관계는 식 (4)와 같다.

$$i_1' = i_2 + i_c + i_m \approx i_2 + i_m \tag{4}$$

CT가 포화 되면, 식 (5)에 나타난 것과 같이 측정된 전류( $i_2$ )가 실제 전류( $i_1'$ )보다 작다.

$$|i_2| < |i_1'| \tag{5}$$

2.3 CCVT의 오차

그림 4는 CCVT의 자세한 모델이고, 그림 5는 CCVT의 등가회로이다. 여기서  $e_m$ 와  $C$ 는 각각 테브난 등가전원, 테브난 등가 임피던스를 나타내고, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C = C_1 + C_2 \tag{6}$$

그림 5에서 송전선 전압( $v_1$ )은 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$v_1(t) = \frac{C}{G} \times e_{th}(t) \quad (7)$$

그림 5에서  $e_{th}$ 은 식 (8)과 같이 표현되므로, 분압 커패시터에 걸리는 전압( $v_C$ ), 튜닝 리액터에 걸리는 전압( $v_{tuning}$ ), 변압기 1차 권선에 걸리는 전압( $v_{w1}$ ), 1차 축으로 환산한 변압기의 2차 권선에 걸리는 전압( $av_{w2}$ ), 측정 전압( $av_b$ )을 더하여 계산할 수 있다. 여기서  $a$ 는  $N_1/N_2$ 이다.

$$e_{th}(t) = v_C(t) + v_{tuning}(t) + v_{w1}(t) + av_{w2}(t) + av_b(t) \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있는 바와 같이,  $av_b$ 와  $e_{th}$ 사이에는  $v_C + v_{tuning} + v_{w1} + av_{w2}$ 만큼의 차이가 발생하고, 이 항이 CCVT의 오차가 된다.

여기서,  $R_n, L_n, R_{T2}, L_{T2}$ 의 값들은 작기 때문에,  $v_{w1}$ 과  $av_{w2}$ 는 거의 무시할 수 있고, 정상 상태에서  $C$ 와  $L$ 은 식 (9)와 같은 관계를 만족하기 때문에,  $v_C + v_{tuning}$ 은 거의 0이 된다.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (9)$$

그런데, 계통 고장 발생 시에는 정격 주파수 외에 DC 성분과 고조파가 발생하게 된다. 이러한 비 기본파 성분 때문에, 식 (9)는 성립되지 않고,  $v_C + v_{tuning}$ 은 크게 증가된다. 이 오차 때문에, 식 (10)과 같이 측정된 전압( $V_2'$ )이 실제 전압( $V_1$ )보다 크다.

$$|V_2'| > |V_1| \quad (10)$$

2.4 CT와 CCVT의 오차를 고려한 거리 계전기의 응용 CT와 CCVT의 오차가 없는 경우, 거리 계전기에 의해 계산된 임피던스( $Z_{cal}$ )는 다음과 같다.

$$Z_{cal} = \frac{V}{I} = \frac{V_1}{I_1' \times n} \quad (11)$$

여기에서,  $n$ 은 CT의 변류비이다. 하지만, CT와 CCVT의 오차가 존재하는 경우, 거리 계전기에 의해 계산된 임피던스( $Z'_{cal}$ )는 다음과 같다.

$$Z'_{cal} = \frac{V_2'}{I_2 \times n} \quad (12)$$

$Z_{cal}$ 과  $Z'_{cal}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\left| \frac{Z_{cal}}{Z'_{cal}} \right| = \left| \frac{V_1}{V_2'} \right| \times \left| \frac{I_2}{I_1'} \right| \quad (13)$$

식(5), (10), (13)을 이용하여, 식 (14)에서 나타낸 것과 같이  $|Z'_{cal}|$ 는  $|Z_{cal}|$ 보다 크다. 따라서 CT와 CCVT의 오차 때문에, 거리 계전기의 동작 시간을 지연시킨다.

$$|Z'_{cal}| > |Z_{cal}| \quad (14)$$

### 3. 사례연구

#### 3.1 모델 계통

제한한 CT와 CCVT의 오차를 고려한 거리 계전기의 응용 분석의 정확도를 검증하기 위해 그림 6과 같은 345kV의 2보선 송전 계통을 EMTP를 사용하여 모의하였다. 계통 주파수는 60Hz이며, 주기당 64샘플의 데이터를 사용했다. 저역통과 필터로는 컷오프 주파수가 1,920Hz인 중첩방지용 2차 버터워스 필터를 사용했다

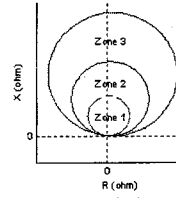
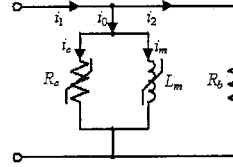


그림 1 Mho 계전기의 3단계 동작영역



$i_1, i_2$ : 1차, 2차, 여자 전류,  $R_0$ : 2차 부담  
 $i_0, i_m$ : 철손, 자화 전류,  $R_c$ : 철손 저항,  $L_m$ : 자화 인덕턴스

그림 2 철심 변류기 등가 회로

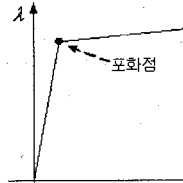
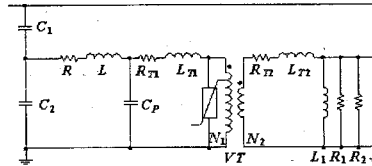


그림 3 철심 CT의 자화 곡선



$C_1, C_2$ : 분압 커패시터,  $L, R$ : 튜닝 리액터,  $L_0, R_0$ : 철공진 억제 회로,  $L_n, R_n, L_{T2}, R_{T2}, C_p$ : 비선형 특성을 고려한 강압 변압기,  $R_2, R_0, L_0$ : 부담

그림 4 CCVT의 자세한 모델

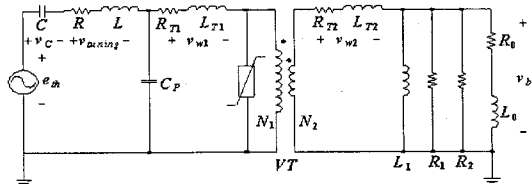


그림 5 CCVT의 등가회로

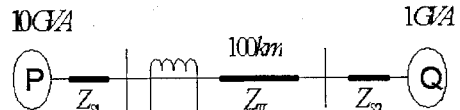
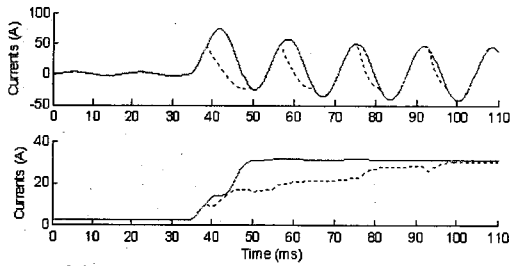


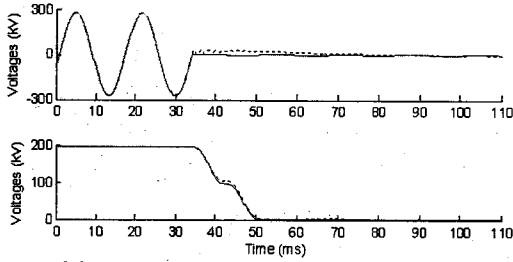
그림 6 모델 계통

표 1 CCVT 회로 파라미터

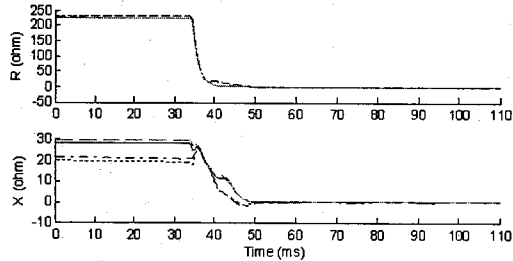
Parameter	크기	Parameter	크기
$C_1$	2.2 $\mu$ f	$R_{T2}$	0.125 $\Omega$
$C_2$	37.8 $\mu$ f	$L_{T2}$	0.125mH
$R$	7.95 $\Omega$	$L_1$	0.94H
$L$	176 $\mu$ H	$R_0$	350 $\Omega$
$C_p$	0.5 $\mu$ f	$R_2$	445 $\Omega$
$R_n$	1.4 $\Omega$	$R_0$	14.6 $\Omega$
$L_n$	1.2H	$L_0$	80.2mH



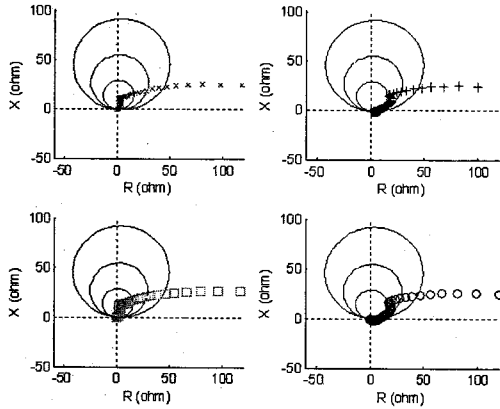
(a)  $i_1$ (상단 실선),  $i_2$ (상단 점선),  $i_3$ (하단 실선),  $i_4$ (하단 점선)



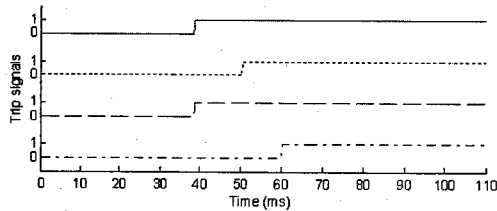
(b)  $v_1$ (상단 실선),  $v_2$ (상단 점선),  $v_3$ (하단 실선),  $v_4$ (하단 점선)



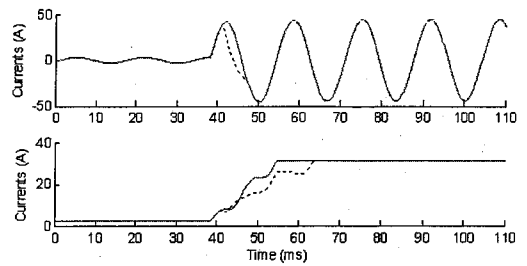
(c) 저항 성분과 리액턴스 성분



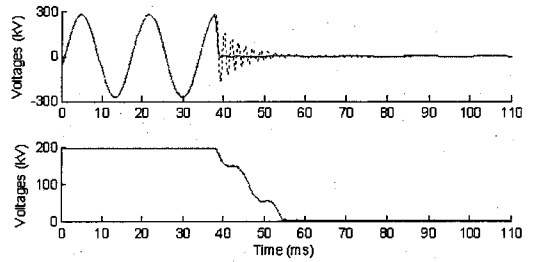
(d) Mho 계전기



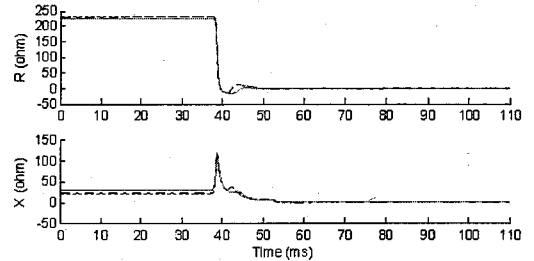
(e) 트립 신호  
그림 7 사례 1의 결과



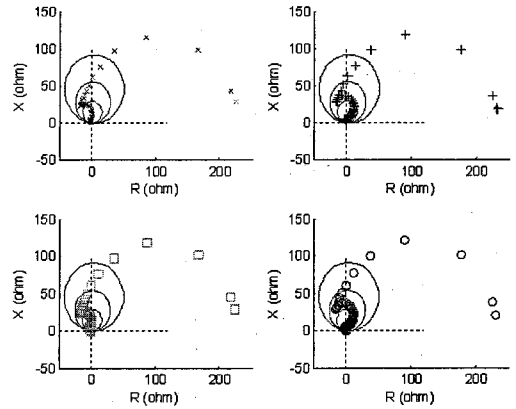
(a)  $i_1$ (상단 실선),  $i_2$ (상단 점선),  $i_3$ (하단 실선),  $i_4$ (하단 점선)



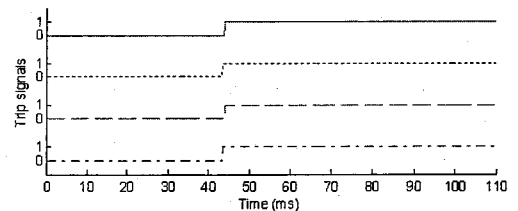
(b)  $v_1$ (상단 실선),  $v_2$ (상단 점선),  $v_3$ (하단 실선),  $v_4$ (하단 점선)



(c) 저항 성분과 리액턴스 성분



(d) Mho 계전기



(e) 트립 신호  
그림 8 사례 2의 결과

P 모선 쪽에 CT와 CCVT를 모델링하였고, 히스테리시스 특성은 EMTP의 보조 프로그램인 HYSDAT을 이용하여 모의하였다[4]. CT의 포화점은 1.512Vs, 4.0A로 하였으며, 변류비는 2000/5A로 가정하였다. 2차 부담으로는 순수 저항 부담을 사용하였고, 정격 부담인 100VA(4.030)로 모의하였다. CCVT의 포화점은 45.206Vs, 0.001A로 하였으며, 각종 CCVT 회로 파라미터를 표에 나타내었다[5].

### 3.2 사례 연구

사례 1: A상 지락사고, 사고거리 100m, 사고위상각 0°  
 그림 7은 사례 1의 결과를 나타내었다. 그림 7a의 상단에서는 2차로 환산한 1차 전류  $i_1$ 와 측정된 2차 전류  $i_2$ 를 각각 실선과 점선으로 표시하였고, 그림 7a의 하단에서는  $I_1$ 와  $I_2$ 의 기본파성분의 크기를 각각 실선과 점선으로 표시하였다. CT가 포화되기 때문에,  $i_1$ 와  $i_2$ ,  $I_1$ 과  $I_2$ 는 모두 차이가 크다. 그림 7b의 상단에서는 1차 전압  $v_1$ 과 1차로 환산한 2차 전압  $v_2$ 를 각각 실선과 점선으로 표시하였고, 그림 7b의 하단에서는  $V_1$ 과  $V_2$ 의 기본파성분의 크기를 각각 실선과 점선으로 표시하였다. 사고 거리가 짧기 때문에, 송전선 전압의 전압강하가 크게 발생하고, 분압 커패시터와 튜닝 리액터의 전압이 많이 증가하며, 과도오차가 크다. 그렇지만, 과도상태 시,  $|V_1|$ 과  $|V_2|$ 의 차이가 크지 않다.

CT와 CCVT의 오차를 고려한 거리 계전기의 응답 분석을 하기 위해, 네 가지 경우를 모델링하였다.

- 경우 1: CT와 CCVT의 측정 오차가 없는 경우
- 경우 2: CT의 측정 오차만 존재한 경우
- 경우 3: CCVT의 측정 오차만 존재한 경우
- 경우 4: CT와 CCVT의 측정 오차 모두 존재한 경우

네 가지 경우에 계산한 사고 거리의 저항 성분과 리액턴스 성분을 각각 실선, 점선, 쇄선, 일점쇄선으로 그림 7c에서 표시하였다.

네 가지 경우에 Mho 계전기 결과를 각각 "X", "+", "□", "○"으로 그림 7d에 나타내었다. 트립 신호를 각각 실선, 점선, 쇄선, 일점쇄선으로 그림 7e에 나타내었다. 첫 번째 경우, 계전기가 가장 빠르게 동작하였다(동작시간: 38.28ms). 세 번째 경우, 계전기의 동작시간은 첫 번째 경우의 계전기의 동작시간과 같다(동작시간: 38.28ms). 그 이유는 측정된 전압( $V_2$ )의 오차가 작기 때문이다. 두 번째 경우, 계전기의 동작시간은 첫 번째 경우와 세 번째 경우보다 느리다(동작시간: 50.26ms). 그 이유는 사고 발생 후, CT가 포화 되며, 측정된 전류( $I_2$ )의 오차가 크기 때문이다. 네 번째 경우, CT와 CCVT의 측정 오차가 모두 존재하기 때문에, 계전기의 동작시간이 가장 느리다(동작시간: 59.90ms). 네 가지 경우의 결과를 비교하면, CT의 측정 오차가 없는 경우, CCVT의 측정 오차가 거리 계전기에 미친 영향이 적으며, CT의 측정 오차를 고려한 경우, CCVT의 측정 오차가 거리 계전기에 미친 영향은 크다.

사례 2: A상 지락사고, 사고거리 100m, 사고위상각 90°  
 그림 8은 사례 2의 결과를 나타내었다. 사고 위상각이 90°일 때, CT의 포화가 심하지 않다. 측정된 전압의 순시값( $v_1$ ,  $v_2$ )의 차이가 크지만, 기본파성분의 크기( $|V_1|$ ,  $|V_2|$ )의 차이는 작다. CT와 CCVT의 측정 오차(기본파성분의 크기)가 모두 작기 때문에, 네 가지 경우, 계전기의 동작시간은 같다(동작시간: 43.23ms, 43.75ms, 43.23ms, 43.75ms).

## 4. 결 론

본 논문에서 CT와 CCVT의 오차를 고려한 거리 계전기의 응답을 분석하였다. 제안한 분석 결과의 정확도를 검증하기 위해 EMTP를 사용하였다.

CT의 오차로 인해 측정된 전류는 실제 전류보다 작고, CCVT의 오차로 인해 측정된 전압은 실제 전압보다 크다. 이러한 전압, 전류의 오차를 고려하면, 거리 계전기

에 의해 계산된 임피던스는 실제의 임피던스 값 보다 크며, 이로 인해 거리 계전기의 동작시간을 지연시킬 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] S. H. Hecrowitz, and A. G. Phadke, Power System relaying. Herfordshire, U.K.: Research Studies Press LTD., 1992, p. 100.
- [2] A. R. Bergen, and V. Vittal, Power Systems Analysis 2nd Edition. U.S.A.: Prentice Hall, Inc., 2000, pp. 508-509.
- [3] IEEE Guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes, IEEE Std. C37.110-1996.
- [4] M. Kezunovic, Lj. Kojovic, A. Abur, C. W. Fromen, D. R. Sevcik, and F. Phillips, "Experimental evaluation of EMTP-based current transformer models for protective relay transient study," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 405-413, January 1994.
- [5] J. Lzykowski, B. Kasztenny, E. Rosolowski, M. M. Saha and B. Hillstrom, "Dynamic Compensation of Capacitive Voltage Transformers," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp. 116-122, January 1998.