

히스테리시스 특성을 고려한 CCVT 2차 전압 보상 방법

\*강용철, \*정태영, \*김연희, \*\*장성일, \*\*김용균  
\*전북대학교 전자정보 공학부, \*\*한국 아이이디 이엔지

Compensation of the secondary voltage of a coupling capacitor voltage transformer in the time-domain

\*Yongcheol Kang, \*Taiying Zheng, \*Yeonhee Kim, \*\*Sungil Jang, \*\*Yonggyun Kim  
\*Chonbuk National University, \*\*HankookIED ENG. Inc.

**Abstract** - A coupling capacitor voltage transformer (CCVT) is used in extra high voltage and ultra high voltage transmission systems to obtain the standard low voltage signal for protection and measurement. To obtain the high accuracy at the power system frequency, a tuning reactor is connected between a capacitor and a voltage transformer (VT). Thus, no distortion of the secondary voltage is generated when no fault occurs. However, when a fault occurs, the secondary voltage of the CCVT has some errors due to the transient components resulting from the fault. This paper proposes an algorithm for compensating the secondary voltage of the CCVT in the time domain. With the values of the secondary voltage of the CCVT, the secondary and the primary currents are obtained; then the voltage across the capacitor and the tuning reactor is calculated and then added to the measured secondary voltage. The proposed algorithm includes the effect of the non-linear characteristic of the VT and the influence of the ferro-resonance suppression circuit. Test results indicate that the algorithm can successfully compensate the distorted secondary voltage of the CCVT irrespective of the fault distance, the fault inception angle and the fault impedance.

1. 서 론

계기용 변성기의 하나인, 전압 변성기는 권선비를 고려하여 전력시스템의 높은 전압 값을 작은 전압 값으로 강압 측정하고, 전력 계통과 보호 계전기 사이 또는 다른 장비들을 전기적으로 절연을 시키는데 사용된다. 초고압 또는 극초고압 계통에서는 송전선의 전압이 너무 높아 절연과 비용에 문제를 일으키기 때문에 전압 변성기 대신에 CCVT (coupling capacitor voltage transformer)가 사용된다.

CCVT는 높은 전압의 설비와 대지 사이에 전압 분배를 위한 직렬 커패시터와 전압 조정 탭을 포함한다. 여기서, 직렬 커패시터로 인하여 CCVT의 1차와 2차 전압 사이에 위상 차이가 발생된다. 이 위상차를 보정하기 위하여 정격 주파수에서 공진을 형성시키도록 설계된 공진리액터를 사용한다.

공진리액터의 적용으로 CCVT는 정상 상태 시 정격 주파수에서는 오차가 작아지지만 계통 고장 발생 시에는 정격 주파수 외에 DC 성분과 고조파가 발생하게 되어 공진이 무너져 CCVT 2차측에 오차가 급격히 커진다. 따라서 사고 시에 발생하는 비기분과 성분으로 인하여, 보호 계전기의 오동작과 동작시간 지연을 유발할 수 있다. 따라서 과도상태 시에도 정확한 1차 전압을 측정하기 위한 방법들이 연구가 되어왔다. [1-4]

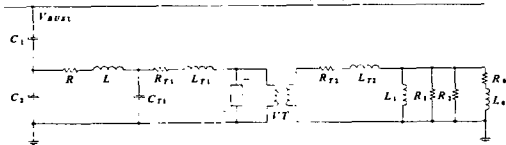
본 논문에서는 CCVT의 2차 전압을 히스테리시스를 고려하여 시간영역에서 보상하는 알고리즘을 제안한다. CCVT의 2차 전압으로부터 변성기의 자속을 계산하여 여자전류를 얻고, 여자전류와 2차 전류를 합하여 1차 전류를 계산한다. 계산된 1차 전류를 이용하여 공진리액터와 분압커패시터 사이의 전압을 추정하여 계통 전압을 계산한다. 제안된 알고리즘은 EMTP 환경 하에서 사고거리, 사고 위상각, 사고 임피던스를 고려하여 검증하였다.

2. CCVT 2차 전압 보상 알고리즘

2.1 CCVT 등가회로와 테브난 등가회로

그림 1은 CCVT의 자세한 등가회로이고, 다음과 같이 구성된다.

- 1) 분압 커패시터 ( $C_1, C_2$ )
- 2) 공진리액터 ( $L, R$ )
- 3) 비선형 특성을 고려한 강압 변압기 ( $L_{T1}, R_{T1}, L_{T2}, R_{T2}, C_{T1}$ )
- 4) 철공진 억제 회로와 부담 ( $L_1, R_1, R_2, R_0, L_0$ )

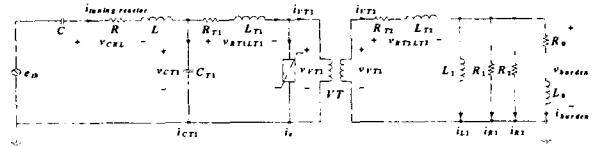


〈그림 1〉 자세한 CCVT 등가 회로

그림 2는 그림 1의 테브난 등가회로이다.  $e_{th}$ 는 테브난 등가 전압이고,  $C$ 는 테브난 등가 임피던스이다.  $C$ 는 다음과 같다.

$$C = C_1 + C_2 \quad (1)$$

이 회로에서의 강압 변압기는 이상 변압기, 1차와 2차 권선저항, 1차와 2차 누설 인덕턴스로 나타내었다. 위에서 언급한 소자 값들( $L_{T1}, R_{T1}, L_{T2}, R_{T2}, C_{T1}$ )은 참고문헌[4]에서 참조 하였다.



〈그림 2〉 CCVT 테브난 등가회로

2.2 2차 회로

그림 2에서, CCVT의 부담에 걸리는 전압  $v_{burden}(t)$ 를 측정하여 다음과 같은 식을 이용하여 전류  $i_{burden}(t)$ 를 계산한다.

$$v_{burden}(t) = R_0 i_{burden}(t) + L_0 \frac{di_{burden}(t)}{dt} \quad (2)$$

철공진 억제 회로(FSC)에 흐르는 전류  $i_{FSC}(t)$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$i_{FSC}(t) = i_{L1}(t) + i_{R1}(t) + i_{R2}(t) \quad (3)$$

여기에서  $i_{L1}(t), i_{R1}(t), i_{R2}(t)$ 는 철공진 억제 회로에 포함된 각각의 전류값이다. 이 세 개의 전류값은 전압  $v_{burden}(t)$ 를 통해 간단히 구할 수 있다.

강압 변압기의 2차 전류  $i_{VT2}(t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$i_{VT2}(t) = i_{FSC}(t) + i_{burden}(t) \quad (4)$$

강압 변압기 2차 권선 저항( $R_{T2}$ )과 누설 인덕턴스( $L_{T2}$ )의 양단에 걸리는 전압  $v_{RT2LT2}(t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$v_{RT2LT2}(t) = R_{T2} i_{VT2}(t) + L_{T2} \frac{di_{VT2}(t)}{dt} \quad (5)$$

2차측에 KVL을 적용하여 이상 변압기 2차 전압  $v_{VT2}(t)$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$v_{VT2}(t) = v_{RT2LT2}(t) + v_{burden}(t) \quad (6)$$

2.3 이상 변압기

계산된 이상 변압기 2차 전압과 전류를 이용하여, 변압기의 권선비가 고려된 1차 전압  $v_{VT1}(t)$ 과 전류  $i_{VT1}(t)$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$v_{VT1}(t) = v_{VT2}(t) \cdot \frac{N_1}{N_2}, \quad i_{VT1}(t) = \frac{i_{VT2}(t)}{\frac{N_1}{N_2}} \quad (7)$$

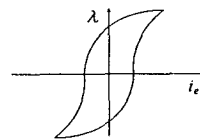
여기에서  $N_1$ 과  $N_2$ 는 각각 이상 변압기의 1차와 2차측 권선 수이다.

2.4 여자 회로

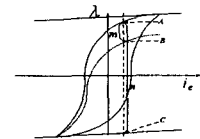
이상 변압기의 1차 전압은 여자 회로의 양단에 걸리는 전압과 같다. 계산된 전압을 이용한 철심에 쇄교하는 자속  $\lambda(t)$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\lambda(t) = \int_{t-\Delta t}^t v_{VT1}(t) dt + \lambda(t-\Delta t) \quad (8)$$

$\lambda(t)$ 의 초기값은 자속의 한주기 값을 이용하여 구할 수 있다. 그리고, 히스테리시스 루프를 이용하여 여자 전류를 구할 수 있다. major 히스테리시스 루프는 그림 3에서 나타내었다.



〈그림 3〉 major 루프



〈그림 4〉 minor 히스테리시스 루프 추정법

정상 상태로 운전 시 CCVT의 자화 곡선은 major 루프를 따라간다. 그러나 사고 발생 시, 자화 곡선은 major 루프를 벗어나 대부분 하나의 minor 루프를 따라간다. 그러므로 사고 발생 시, 자화 곡선이 따라갈 minor 루프를 찾는 것은 매우 중요하다.

그림 4에서는 minor 루프 추정법을 나타내었다 점 A는 major 루프에 있고, 점 B는 major 루프 내부에 존재하는 점이다. 점 C는 자화 곡선 중 포

화 부분의 연장선 상에 있는 점이다. 점 A, B, C는 같은 x축 값을 가진다. m은 점 A와 B 사이의 y축 값의 차이이고, n은 점 B와 C 사이의 y축 값의 차이이다. 본 논문에서는 점 B를 통과하는 minor 루프는 major 루프를 m/n의 비로 압축하여 구하였다.

### 2.5 1차 회로

KCL을 적용하여, 강압 변압기 1차측 권선 저항과 누설 인덕턴스에 흐르는 전류  $i_{RTLTL}(t)$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$i_{RTLTL}(t) = i_{VT1}(t) + i_i(t) \quad (9)$$

그리고, 1차 권선 저항과 누설 인덕턴스 양단에 걸리는 전압  $v_{RTLTL}(t)$ 는 다음과 계산한다.

$$v_{RTLTL}(t) = R_{T1}i_{RTLTL}(t) + L_{T1} \frac{di_{RTLTL}(t)}{dt} \quad (10)$$

강압 변압기 1차측 양단에 걸리는 전압  $v_{CT1}(t)$ 와 권선과 지표면 사이에 형성되는 캐패시턴스(equivalent stray capacitance)에 흐르는 전류  $i_{CT1}(t)$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$v_{CT1}(t) = v_{RTLTL}(t) + v_{VT1}(t) \quad (11)$$

$$i_{CT1}(t) = C_{T1} \cdot \frac{dv_{CT1}(t)}{dt} \quad (12)$$

동조 리액터에 흐르는 전류  $i_{tuning\ reactor}(t)$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$i_{tuning\ reactor}(t) = i_{CT1}(t) + i_{RTLTL}(t) \quad (13)$$

테브난 등가 임피던스 양단에 걸리는 전압  $v_C(t)$ 과 동조 리액터 양단에 걸리는 전압  $v_{tuning\ reactor}(t)$ 를 전류  $i_{tuning\ reactor}(t)$ 를 이용하여 계산할 수 있다. 이 두 전압을 더하여 전압  $v_{CRL}(t)$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$v_{CRL}(t) = v_C(t) + v_{tuning\ reactor}(t) \quad (14)$$

KVL을 이용하여, 테브난 등가 전원  $e_{th}(t)$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$e_{th}(t) = v_{CRL}(t) + v_{CT1}(t) \quad (15)$$

마지막으로, 측정하고자 하는 설비의 높은 전압  $v_{BUS1}(t)$ 는 다음과 같이 계산한다.

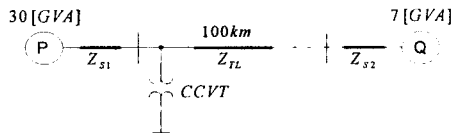
$$v_{BUS1}(t) = \frac{C}{C_1} \times e_{th}(t) \quad (16)$$

## 3. 사례 연구

### 3.1 모델계통

제한한 방식의 성능을 검증하기 위하여 그림 5와 같은 모델 계통을 선택하였고, CCVT는 EMTP를 사용하여 모델링 하였다.

전압은 345KV이고, 전체 송전선의 길이는 100km이다. 주기 당 64샘플의 데이터를 사용하였으며, 저역통과 필터로는 컷오프가 1920Hz인 중첩방식용 2차 버터워스 필터를 사용하였다.



〈그림 5〉 모델계통

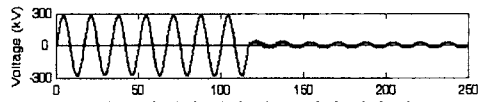
제한한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해, 각 샘플링마다 보상 알고리즘을 적용한 과도 오차와 적용하지 않은 과도 오차는 다음과 같이 계산한다.

$$\text{Transient error}(\%) = \frac{v_{BUS1}(t) - v_{BUS1,EMTP}(t)}{v_{BUS1,MAX}} \quad (17)$$

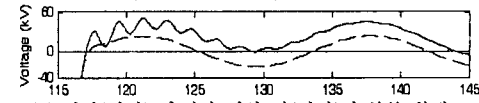
여기에서,  $v_{BUS1,EMTP}(t)$ 는 전압의 참값이고,  $v_{BUS1,MAX}$ 는  $v_{BUS1,EMTP}(t)$ 의 피크 값이다.

### 3.2 사례 연구

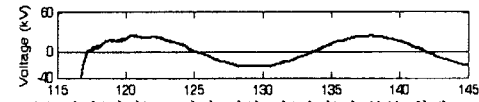
기준 사례로 3상 지락 사고, 사고 거리 2km, 사고 위상각 0도, 사고 임피던스 0.0인 경우이다.



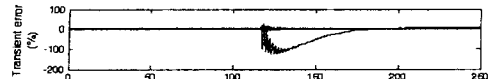
(a) 참값, 측정된 전압 값, 보상한 전압 값



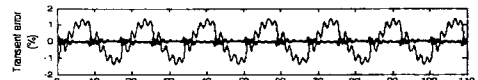
(b) 참값(점선), 측정된 전압 값(실선)의 부분 확대



(c) 참값(점선), 보상한 전압 값(실선)의 부분 확대



(d) 측정된 전압 값(가는 선), 보상한 전압 값(굵은 선)의 오차



(c) 그림 (d)의 정상 상태 시 오차 부분 확대

### 〈그림 6〉 기준 사례 결과

그림 6은 기준 사례 결과를 나타낸다. 그림 6(a)는 116ms에서 발생한 사고에 의한 참값, 측정된 전압 값, 보상한 전압 값을 나타낸다. 그림 6(b),(c)는 그림 6(a)의 일부분을 확대하여 나타내었다. 그림 6(b)에서의 점선은 참값을 나타내고, 실선은 측정된 전압 값을 나타낸다. 그림 6(c)에서의 점선은 참값을 나타내었고, 실선은 보상한 전압 값을 나타낸다. 그림 6(b)와 그림 6(c)를 비교하면 전압 값이 보상되었음을 알 수 있다.

그림 6(d)는 수식 (17)을 이용하여 계산된 오차의 결과 값으로, 가는 선은 측정된 전압 값의 오차를 나타내고, 굵은 선은 보상한 전압 값의 오차를 나타낸다. 그림 6(e)는 그림 6(d)의 정상 상태 시 오차 부분을 확대하여 나타내었다. 정상 상태 시 측정된 전압 값의 최대 오차는 1.5%이고, 보상한 전압 값의 최대 오차는 0.2%이다. 따라서 보상 알고리즘을 적용 시 오차가 줄어들었다.

또한, 사고가 발생하여 생기는 과도 상태 시, 측정된 전압 값의 최대 과도 오차는 62.9%이고, 보상한 전압 값의 최대 과도 오차는 7.5%이다. 과도 상태 시에도 보상 알고리즘을 적용 시 오차가 많이 줄어들음을 알 수 있다.

표 1에서는 다양한 사례 연구의 결과 중 대표적인 결과 값을 표로 나타내었다.

〈표 1〉 사례연구의 결과

구분	사고 종류			측정한 전압 값의 최대 과도 오차 (%)	보상한 전압값의 최대 과도 오차 (%)
	사고 거리 (km)	사고 위상각 (deg)	사고 임피던스(Ω)		
기준사례	2.0	0	0	62.9	7.5
사례 2	1.0	0	0	120.4	15.5
사례 3	2.0	90	0	298.8	114.8
사례 4	2.0	0	10.0	6.7	1.1

사고 거리 변화에 따른 연구 결과는 기준 사례와 사례 2로 비교하였다. 사고 거리가 증가하면 오차가 줄어든다. 사고 위상각 변화에 따른 연구 결과는 기준 사례와 사례 3으로 비교하였다. 사고 위상각이 증가하면 오차가 증가한다. 사고 임피던스 변화에 따른 연구 결과는 기준 사례와 사례 4로 비교하였다. 사고 임피던스가 증가하면 오차가 줄어든다. 사고 발생 시, 사고 거리가 크거나, 사고 임피던스가 크면 전압의 강하가 심하지 않아 오차가 크게 발생하지 않는다. 사고 위상각이 크면, 고조파가 많이 존재하기 때문에, 오차가 크게 발생한다.

과도 오차를 계산하는 수식 (17)의 분모는 사고 발생 후 전압 값의 최대이다. 사고 종류에 따라 사고 후 분모 값이 달라진다. 분모가 큰 경우에는 오차가 작게 보이고, 분모가 작은 경우에는 오차가 상대적으로 크게 보인다. 그러나 참값과 보상한 값의 차이는 크지 않다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 시간 영역에서의 CCVT 2차 전압 보상 방법을 제안하였다. 측정된 2차 전압으로부터 각 회로 내 소자들의 전압 값 및 전류 값들을 계산하였다. 제안된 보상 알고리즘은 철심의 히스테리시스 특성과 철공진 억제 회로를 포함한다.

제한한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 사고 거리, 사고 위상각, 사고 임피던스 등을 달리하여 모의하였고, 제안한 보상 방법을 적용하였을 경우 전압 오차가 크게 줄어들음을 알 수 있었다.

제한한 보상 방법은 정상 상태 시 뿐만 아니라, 사고 발생 시에도 오차가 줄어든 CCVT 출력 전압을 얻을 수 있다. 이는 CCVT의 정확도를 향상시켰고, 제안한 알고리즘을 적용한 CCVT를 사용하는 계전기의 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

### 〈참 고 문 헌〉

- [1] Stanley H. Horowitz, and Arun G. Phadke, Power system relaying, John Wiley and Sons INC, 1992, pp. 4871.
- [2] Working Group C-5 of the Systems Protection Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee, "Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No.1, Jan. 2000, pp. 6272.
- [3] J. R. Marti, L. R. Linares and H. W. Dommel, "Current Transformers and Coupling-Capacitor Voltage Transformers in real-time Simulations," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No 1, Jan. 1997, pp. 164168.
- [4] J. Izykowski, B. Kasztenny, E. Rosolowski, M. M. Saha and B. Hillstrom, "Dynamic Compensation of Capacitive Voltage Transformers," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No. 1, Jan. 1998, pp. 116122.