

3권선 CCVT의 2차 전압 보상 방법

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

Compensation of the secondary voltage of a three winding coupling capacitor voltage transformer

*Yong-cheol Kang, *Yeon-hee Kim, *Taiying Zheng, **Sung-il Jang, **Yong-gyun Kim
 *Chonbuk National University, **Hankook IED ENG. Inc.

Abstract-A coupling capacitor voltage transformer (CCVT) is used in an extra high voltage power system to obtain the standard low voltage signal for protection and measurement. To suppress the effects of ferro-resonance more effectively, a three winding CCVT is used. This paper proposes an algorithm for compensating the secondary voltage of the three winding CCVT. With the secondary voltage of the three winding CCVT, the secondary and tertiary currents are obtained; the primary winding current is obtained by considering non-linear characteristics of the core; the voltage across the capacitor and the inductor are calculated and then added to the measured voltage to compensate the secondary voltage. Test results indicate that the algorithm can reduce the errors of the three winding CCVT significantly.

1. 서 론

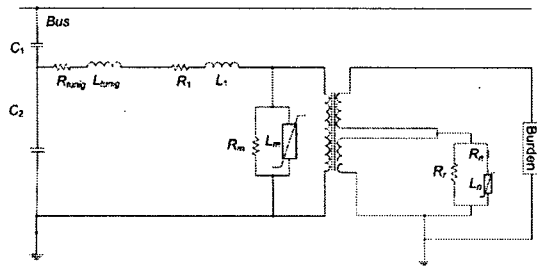
전력시스템에서 보호 계전기의 입력과 측정을 목적으로 초고압 또는 극초고압 계통에서는 커패시터로 계통전압을 분압하는 측정하는 CCVT(coupling capacitor voltage transformer)가 사용된다.

CCVT는 커패시터 때문에 2차 전압의 위상이 1차 전압의 위상과 다르다. 따라서 정상상태 시 기본파 성분을 기초로 하여 결정된 인덕터를 사용하여 위상차를 보상한다. 그런데, 사고 발생 시 나타나는 DC 성분과 고주파 성분으로 인하여 커패시터와 인덕터의 공진이 깨지게 되어, 커패시터와 인덕터 사이에 전압 강하가 일어나 CCVT의 2차 전압에 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차로 인하여 보호계전기가 오동작 할 수 있으며, 보호계전기의 동작시간이 늦어질 수 있다. 또한 철공진 현상 발생으로 CCVT의 오차가 증가하게 된다. 철공진을 더 효과적으로 감소하기 위해 2권선 CCVT 대신 3권선 CCVT를 사용하고 있다. [1 - 4]

본 논문에서는 3권선 CCVT 2차 전압 보상 방법을 제안한다. 보상 알고리즘은 3권선 CCVT의 2차 전압으로부터 철공진 억제 회로의 비선형성을 고려한 2차 및 3차 전류를 계산하고, 인덕터와 커패시터에 걸리는 전압을 추정하여 이를 보상한다. EMTP로 얻은 데이터를 사용하여 사고거리, 사고위상각, 사고저항을 변화시켜 다양한 조건에서 모의하여 제시한 방식의 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 3권선 CCVT 등가회로와 테브난 등가회로
 그림 1은 3권선 CCVT의 등가회로이다.

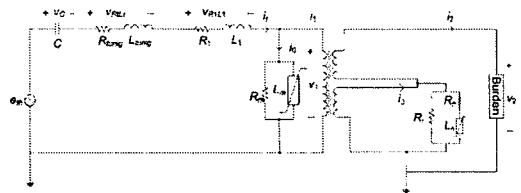


- 1) 분압 캐패시터 (C_1, C_2)
- 2) 공진인덕터 (L_{tuning}, R_{tuning})
- 3) 비선형 특성을 고려한 강압 변압기 (L_1, R_1, R_m, L_m)
- 4) 철공진 억제 회로 (R_r, R_n, L_n)

그림 1 3권선 CCVT 등가 회로

등가회로를 간략화 하기 위해 이상변압기를 사용하여 변압기 2차, 3차권선 저항과 변압기 2차, 3차권선 누설인덕턴스는 무시하였다. 회로 해석을 통해 3권선 CCVT 1차 전압을 구하였다. 비선형 소자인 L_n 과 L_m 은 두개의 직선으로 모의하였다.

그림 1의 테브난 등가회로는 그림 2와 같다.



- 1) $C = C_1 + C_2$: 테브난 등가 임피던스
- 2) e_{th} : 테브난 등가 전원

그림 2 3권선 CCVT의 테브난 등가회로

2.2 2차 회로

그림 2에서, 3권선 CCVT의 부담에 걸리는 전압 $v_2(t)$ 를 측정하여 다음과 같은 식을 이용하여 전류 $i_2(t)$ 를 계산한다.

$$v_2(t) = R_2 i_2(t) \tag{1}$$

3권선 CCVT의 2차, 3차 전압인 $e_2(t)$ 와 $e_3(t)$ 은 권선 비를 이용하여 다음과 같다.

$$e_2(t) = \frac{N_2}{N_2 + N_3} v_2(t), e_3(t) = \frac{N_3}{N_2 + N_3} v_2(t) \quad (2)$$

여기서 N_2 와 N_3 은 각각 이상 변압기의 2차와 3차 권선 수이다.

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

$$i_{FSC}(t) = i_{Rr}(t) + i_{Ln}(t) \quad (3)$$

여기에서 $i_{Rr}(t)$, $i_{Ln}(t)$ 은 다음과 같이 계산한다.

$$i_{Rr}(t) = \frac{e_3(t)}{R_r}, e_3(t) = L_n \frac{di_{Ln}(t)}{dt} \quad (4)$$

3차 전류는 다음과 같이 계산한다.

$$i_3(t) = i_2(t) + i_{FSC}(t) \quad (5)$$

2.3 이상 변압기

계산된 이상 변압기 2차, 3차 전압과 전류를 이용하여, 변압기의 권선비가 고려된 1차 전압 $v_1(t)$ 과 전류 $i_1(t)$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$v_1(t) = \frac{N_1}{N_2} \cdot v_2(t) = \frac{N_1}{N_3} \cdot v_3(t), i_1(t) = \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2(t) + \frac{N_3}{N_1} \cdot i_3(t) \quad (6)$$

여기에서 N_1 은 이상 변압기의 1차권선 수이다.

2.4 여자 회로

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

$$\lambda(t) = \int_{t-\Delta t}^t v_1(t) dt + \lambda(t-\Delta t) \quad (7)$$

$\lambda(t)$ 의 초기 값은 자속의 한주기 값을 이용하여 구할 수 있다. 그리고 자속-자화전류 곡선을 이용하여 여자 전류 $i_0(t)$ 을 구할 수 있다.

2.5 1차 회로

KCL을 적용하여, 강압 변압기 1차권선 저항과 누설 인덕턴스에 흐르는 전류 $i_t(t)$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$i_t(t) = i_1(t) + i_0(t) \quad (8)$$

그리고, 1차권선 저항과 누설 인덕턴스 양단에 걸리는 전압 $v_{RLL}(t)$ 은 다음과 같이 계산한다.

$$v_{RLL}(t) = R_1 i_t(t) + L_1 \frac{di_t(t)}{dt} \quad (9)$$

공진 리액터 양단에 걸리는 전압 $v_{RLL}(t)$ 은 다음과 같이 계산한다.

$$v_{RLL}(t) = R_1 i_t(t) + L_1 \frac{di_t(t)}{dt} \quad (10)$$

테브난 등가 임피던스 양단에 걸리는 전압 $v_c(t)$ 는 커패시터에 흐르는 전류 $i_c(t)$ 를 이용하여 구할 수 있다.

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_c(t) dt + v_c(t-\Delta t) \quad (11)$$

$v_c(t)$ 의 초기 값은 자속의 한주기 값을 이용하여 구할 수 있다.

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

$$e_{th}(t) = v_c(t) + v_{RLL}(t) + v_{RLL}(t) + v_1(t) \quad (12)$$

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

$$v_{BUS}(t) = \frac{C}{C_1} \times e_{th}(t) \quad (13)$$

3. 사례연구

3.1 모델계통

제안한 방식의 성능을 검증하기 위하여 그림 3과 같은 모델 계통을 선택하였고, 3권선 CCVT는 EMTP를 사용하여 모델링 하였다.

전압은 345kV이고, 전체 송전선의 길이는 100km이다.

주기 당 64샘플의 데이터를 사용하였으며, 저역통과 필터는 컷오프가 1920Hz인 중첩방지용 2차 버터워스 필터를 사용하였다.

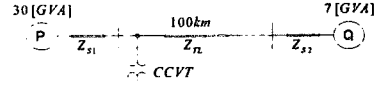


그림 3 모델계통

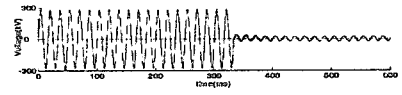
제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해, 각 샘플링마다 보상 알고리즘을 적용한 과도 오차와 적용하지 않은 과도 오차는 다음과 같이 계산한다.

$$Transient\ error(\%) = \frac{v_{BUS}(t) - v_{BUS_EMTP}(t)}{v_{BUS_MAX}} \times 100 \quad (14)$$

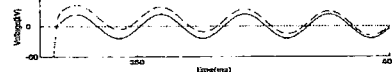
여기에서, $v_{BUS_EMTP}(t)$ 는 전압의 참값이고, v_{BUS_MAX} 는 $v_{BUS_EMTP}(t)$ 의 피크 값이다.

3.2 사례 연구

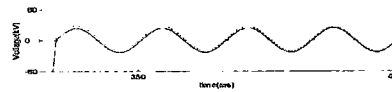
기준 사례로 3상 지락 사고, 사고 거리 1km, 사고 위상각 0도, 사고 임피던스 0Ω인 경우이다. 그림 4는 기준 사례 결과를 나타낸다.



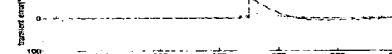
(a) 참값(실선), 추정한 전압(쇄선), 보상한 전압(점선)



(b) 참값(실선), 추정한 전압(쇄선)의 부분 확대



(c) 참값(실선), 보상한 전압(점선)의 부분 확대



(d) 추정한 전압(쇄선), 보상한 전압(점선)의 과도 오차
그림 4 기준 사례 결과

그림 4(a)는 333ms에서 발생한 사고에 의한 참값, 추정한 전압, 보상한 전압을 나타낸다. 그림 4(b),(c)는 그림 4(a)의 과도 상태를 확대하여 나타내었다. 그림 4(b)에서의 실선은 참값을 나타내고, 쇄선은 추정한 전압을 나타낸다. 그림 4(c)에서의 실선은 참값을 나타내었고, 점선은 보상한 전압을 나타낸다. 그림 4(b)와 그림 4(c)를 비교하면 전압이 보상되었음을 알 수 있다.

그림 4(d)는 식 (14)을 이용하여 계산된 과도 오차의 결과 값으로, 추정한 전압의 최대 과도 오차는 65.84%이고, 보상한 전압의 최대 과도 오차는 18.64%이다. 과도 상태 시에도 보상 알고리즘을 적용 시 오차가 많이 줄어들음을 알 수 있다. 또한, 정상 상태 시 추정한 전압에 비오차의 최대는 0.9868%이고, 보상한 전압에 비오차의 최대는 0.0077%이다.

사례 3로 3상 지락 사고, 사고 거리 1km, 사고 위상각 90도, 사고 임피던스 0Ω인 경우이다. 그림 5는 사례 3의 결과를 나타낸다.

[1] 강용철, 정태영, 김연희, 장성일, 김용균, "히스테리시스 특성을 고려한 CCVT 2차 전압 보상 방법", 2006년도 대한 전기학회 하계학술대회 논문집 pp. 266-267, July 2006.
 [2] Yong-Cheol Kang, Taiying Zheng, Sung-II Jang, and Yong-Gyun Kim, "Compensation of the secondary voltage of a coupling capacitor voltage transformer in time domain", International Conference in Electrical Engineering 2006, pp. 9-12 July 2006.
 [3] Milan Graovac, Reza Irvani, Xiaolin Wang, and Ross D. McTaggart, "Fast Ferroresonance Suppression of Coupling Capacitor Voltage Transformers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 1, pp. 158-163, Jan. 2003.
 [4] 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, pp. 62-72, Jan. 2000.

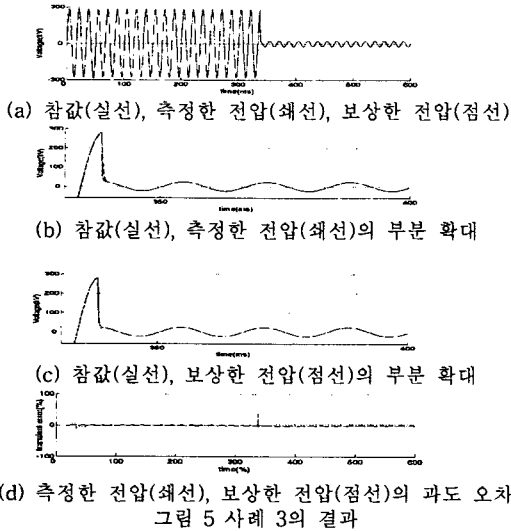


그림 5(a)는 338ms에서 발생한 사고에 의한 참값, 측정된 전압, 보상한 전압을 나타낸다. 그림 5(b),(c)는 그림 5(a)의 과도 상태를 확대하여 나타내었다. 그림 5(b)에서의 실선은 참값을 나타내고, 쇄선은 측정된 전압을 나타낸다. 그림 5(c)에서의 실선은 참값을 나타내었고, 점선은 보상한 전압을 나타낸다. 그림 5(b)와 그림 5(c)를 비교하면 전압이 보상되었음을 알 수 있다.

그림 5(d)는 식 (14)을 이용하여 계산된 과도 오차로 결과 값으로, 측정된 전압의 최대 과도 오차는 38.72%이고, 보상한 전압의 최대 과도 오차는 9.64%이다. 정상 상태 시 비오차는 기준 사례와 동일하였다.

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

구분	사고 종류			측정한 전압 값의 최대 과도 오차 (%)	보상한 전압값의 최대 과도 오차 (%)
	사고 거리 (km)	사고 위상각 (deg)	사고 임피던스(Ω)		
기준사례	1.0	0	0	65.84	18.64
사례 2	2.0	0	0	32.85	9.43
사례 3	1.0	90	0	38.72	9.64
사례 4	1.0	0	10.0	4.09	2.14

표 1 사례연구의 결과

사례 연구 결과 여러 종류의 사고 시에 3권선 CCVT의 과도 오차가 개선되어짐을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 시간 영역에서의 3권선 CCVT 2차 전압 보상 방법을 제안하였다. 측정된 2차 전압으로부터 각 회로 내 소자들의 전압 및 전류들을 계산하였다. 제안된 보상 알고리즘은 철심의 비선형성을 고려하여 3권선 CCVT의 2차 전압을 보상하였다.

제안한 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.

제안한 보상 방법은 정상 상태 시 뿐만 아니라, 사고 발생 시에도 오차가 줄어든 CCVT 출력 전압을 얻을 수 있다. 이는 CCVT의 정확도를 향상 시켰다.