

CCVT의 2차 전압 보상 방법

Compensation of the Secondary Voltage of a Coupling Capacitor Voltage Transformer

姜龍澈* · 鄭太英† · 李知勳** · 張成一*** · 金容均§

(Yong-Cheol Kang · Taiying Zheng · Ji-hoon Lee · Sung-Il Jang · Yong-Gyun Kim)

Abstract - A coupling capacitor voltage transformer (CCVT) is used in an extra or ultra high voltage system to obtain the standard low voltage signal for protection. To avoid the phase angle error between the primary and secondary voltages, a tuning reactor is connected between a capacitor and a voltage transformer. The inductance of the reactor is designed based on the power system frequency. If a fault occurs on the power system, the secondary voltage of the CCVT contains some errors due to a dc offset component and harmonic components resulting from the fault. The errors become severe in the case of a close-in fault. This paper proposes an algorithm for compensating the secondary voltage of a CCVT in the time-domain. From the measured secondary voltage of the CCVT, the secondary and primary currents are obtained; then the voltage across the capacitor and the inductor is calculated and then added to the measured secondary voltage to obtain the correct primary voltage. Test results indicate that the proposed algorithm can compensate the distorted secondary voltage of the CCVT irrespective of the fault distance, the fault inception angle, and the burden of the CCVT.

Key Words : CCVT, Compensation, Secondary voltage

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. 하지만, 초고압 또는 극초고압 계통에서는 송전선의 전압이 너무 높아 절연과 비용에 문제를 일으키기 때문에 전압 변성기 대신 CCVT(Coupling Capacitor Voltage Transformer)가 사용된다.

CCVT는 설비와 대지 사이 높은 전압의 분배를 위한 직렬 커패시터와 전압 조정 탭, 그리고 VT로 구성된다. 그런데, 커패시터에 걸리는 전압 때문에 CCVT의 2차 전압 위상이 1차 전압의 위상과 다르게 되고, CCVT의 오차로 작용하게 된다. 따라서 이 위상차를 없애기 위하여 튜닝 리액터를 사용하는데, 인덕턴스의 값은 정상상태 시 기본파 성분을 기초로 하여 결정된다[1]. 튜닝 리액터를 사용하게 되면, CCVT는 정상 상태 시 정격 주파수에서는 오차가 작아진다.

그런데, 계통 고장 발생 시에는 정격 주파수 외에 DC 성분과 고조파가 발생하게 된다. 따라서 리액터와 커패시터에 걸리는 전압이 커지므로 CCVT의 오차가 급격히 커지며, 이 오차는 근거리 사고의 경우에 더 커진다. 이러한 오차로 인하여 보호 계전기가 오동작 하거나 동작시간이 늦어질 수 있다. 따라서 CCVT의 과도 특성에 대한 연구가 계속적으로 수행되어 왔다[2-5].

참고문헌 [3]에서는 보호 계전기 과도 특성 분석용 CCVT의 디지털 모델링 기법을 제안 하였고, 참고문헌 [4, 5]에서는 시간 영역에서 CCVT의 디지털 모델링 기법을 제안하였다. 참고문헌 [6]에서는 CCVT 2차 전압을 보상하는 방법을 제안하였다. 이 방식은 CCVT 모델을 라플라스 변환하여 주파수 영역에서 오차를 보상한다. 하지만, CCVT의 차수가 높아 계산 부담이 많기 때문에, 이를 감소하기 위하여 간략 모델을 사용하였다.

본 논문에서는 CCVT의 오차를 시간영역에서 보상하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 CCVT의 2차 전압으로부터 2차 전류 및 1차 전류를 계산하고, 튜닝 리액터와 커패시터에 걸리는 전압을 계산하여, 이를 측정전압에 더하여 정확한 1차 전압을 추정한다. EMTP를 이용하여 CCVT를 모델링하였고, 사고거리, 사고위상각, 부담을 변화시켜 다양한 조건에서 모의하여 제시한 방식의 성능을 검증하였다.

† 교신저자, 正會員 : 全北大 大學院 電氣工學科 博士課程

E-mail : huanxiong417@hotmail.com

* 正會員 : 全北大 大學院 電氣工學科 副教授 · 工博

** 學生會員 : 全北大 大學院 電氣工學科 碩士

*** 正會員 : 全北大 大學院 電氣工學科 研究教授 · 工博

§ 非會員 : (株)韓國IED Eng. 代表理事

接受日字 : 2007年 12月 15日

最終完了 : 2008年 4月 30日

2. CCVT의 2차 전압 보상방법

2.1 CCVT 및 등가회로

본 논문에서 사용한 CCVT 등가회로는 그림 1과 같다[1]. 그림 1에서 C_2 에서 계통 전압쪽으로 테브난 정리를 적용하여 얻은 등가회로를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 계산을 간략화 하기 위하여 변압기 1, 2차 권선저항과 누설인덕턴스를 무시하였고, 코어의 비선형 특성과 철공진 억제회로는 고려하지 않았다.

그림 2에서 테브난 등가 전압은 다음과 같다.

$$e_{th}(t) = \frac{C_1}{C} v_{BUS1}(t) \quad (1)$$

따라서 그림 2의 e_{th} 를 구할 수 있으면, 송전선 전압 v_{BUS1} 을 구할 수 있다.

2.2 제안한 전압 보상방법

그림 2에서 e_{th} 와 측정 전압 v_2 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$e_{th}(t) = v_C(t) + v_L(t) + \frac{N_1}{N_2} v_2(t) \quad (2)$$

공진 조건을 이용하여 정격 주파수에 맞추어 L 을 설계하였으므로, 정상상태에서는 $v_C + v_L$ 이 0이 된다. 하지만, 사고 시에는 DC 성분과 고조파 성분이 발생되므로, $v_C + v_L$ 이 0이 되지 않으며, 이러한 현상은 근거리 사고의 경우에 더 심하다[1]. 그러므로 본 논문에서는 사고 상태시에 $v_C + v_L$ 을 추정하여 식 (2)를 이용하여 e_{th} 를 구하고, 식 (1)을 이용하여 v_{BUS1} 을 구하고자 한다.

2.2.1 2차 전류, $i_2(t)$

전압 변성기 2차 전압을 알 때, 2차에 흐르는 전류를 구하면 식 (3)과 같다.

$$i_2(t) = \frac{v_2(t)}{R} \quad (3)$$

2.2.2 튜닝 리액터와 커패시터에 걸리는 전압, $v_C(t) + v_L(t)$

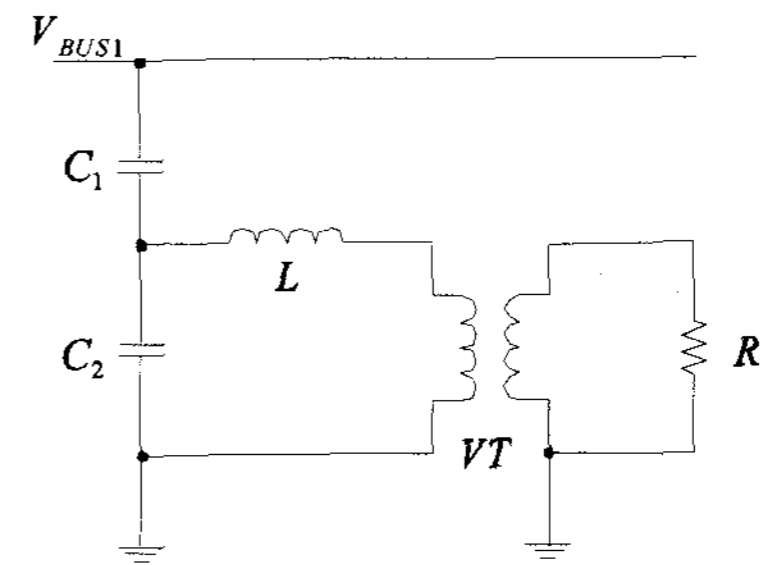
전압 변성기 1차 전류를 알 때, 테브난 등가 임피던스에서의 전압과 튜닝 리액터에서의 전압을 구하면 식 (4), (5)과 같다.

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_1(t) dt + v_C(t-\Delta t) \quad (4)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_1(t)}{dt} \quad (5)$$

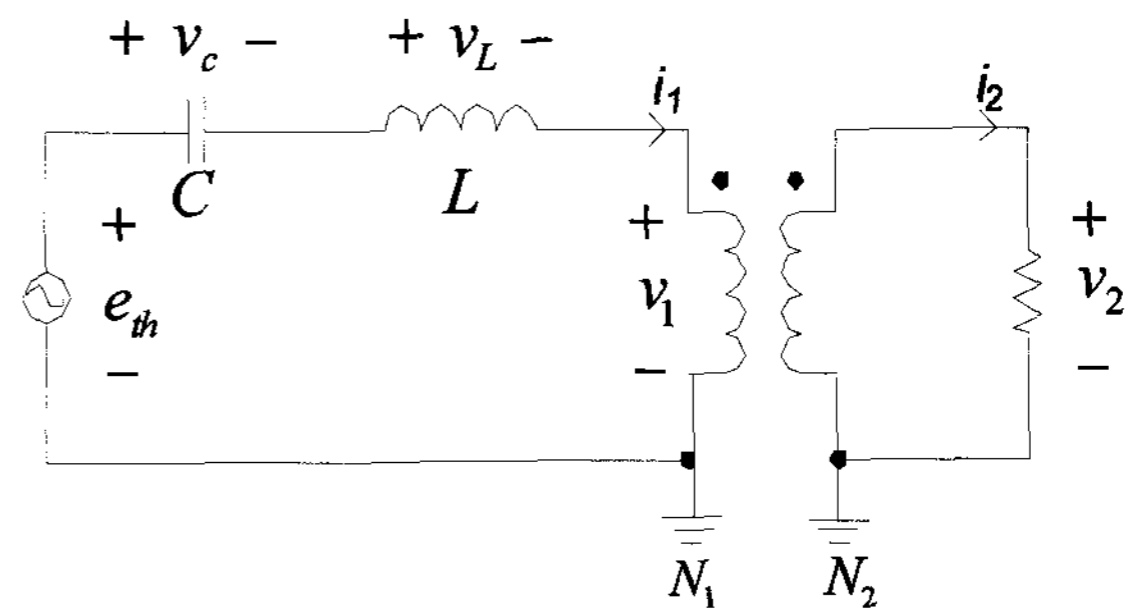
전압의 한주기 값을 평균하여 $v_C(t-\Delta t)$ 값을 구할 수 있다. 전압 변성기의 권선 비 N_1/N_2 를 고려하면 식(6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \frac{N_2}{N_1} \int_{t-\Delta t}^t i_2(t) dt + v_C(t-\Delta t) \quad (6)$$



V_{BUS1} : 송전선 전압, C_1, C_2 : 분압 커패시터, L : 튜닝 리액터, VT : 전압 변성기, R : 부담

그림 1 CCVT 모델
Fig. 1 CCVT model



$C=C_1+C_2$: 테브난 등가 임피던스
 N_1, N_2 : 1차, 2차 권선수
 e_{th} : 테브난 등가 전압
 i_1, i_2 : 1차, 2차 전류
 v_1, v_2 : 1차, 2차 전압
 v_C : 등가 커패시턴스 전압
 v_L : 튜닝 리액터에서의 전압

그림 2 CCVT의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of a CCVT

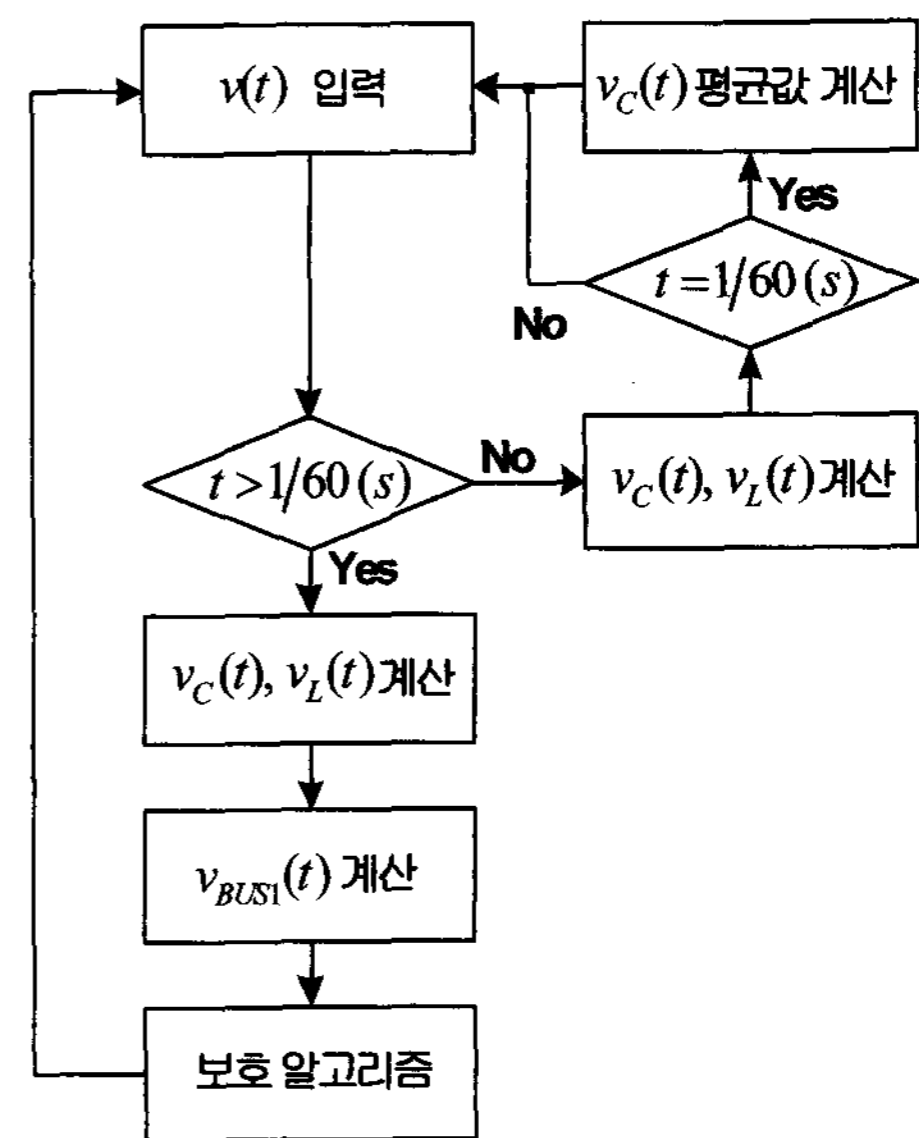


그림 3 제안한 알고리즘의 흐름도
Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

$$v_L(t) = L \frac{N_2}{N_1} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (7)$$

2.2.3 송전선 전압, $v_{BUS1}(t)$

전압 변성기 1차 측 회로에 KVL을 적용하면 식 (2)와 같다. 송전선 전압 v_{BUS1} 은 식 (2)을 이용하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{BUS1}(t) = \frac{C}{C_1} \times e_{th}(t) \quad (8)$$

제안한 알고리즘은 직렬 C, L 에 걸리는 전압을 계산하여 이를 보상하므로, CCVT의 오차를 감소할 수 있으며, 그림 3에 제안한 보상 알고리즘의 흐름도를 나타내었다.

3. 사례 연구

3.1 모델계통

제안한 방식의 성능을 검증하기 위하여 그림 4와 같은 모델 계통을 선택하였고, CCVT($C_1, C_2: 0.076\mu F$)는 EMTP를 사용하여 모델링 하였다. 전압은 345kV이고, 전체 송전선의 길이는 100km이다.

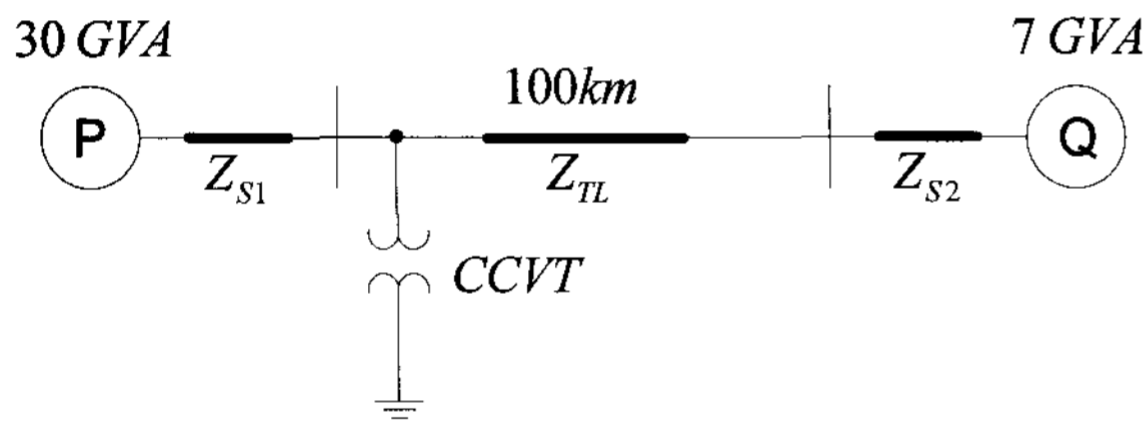


그림 4 모델계통
Fig. 4 Model system

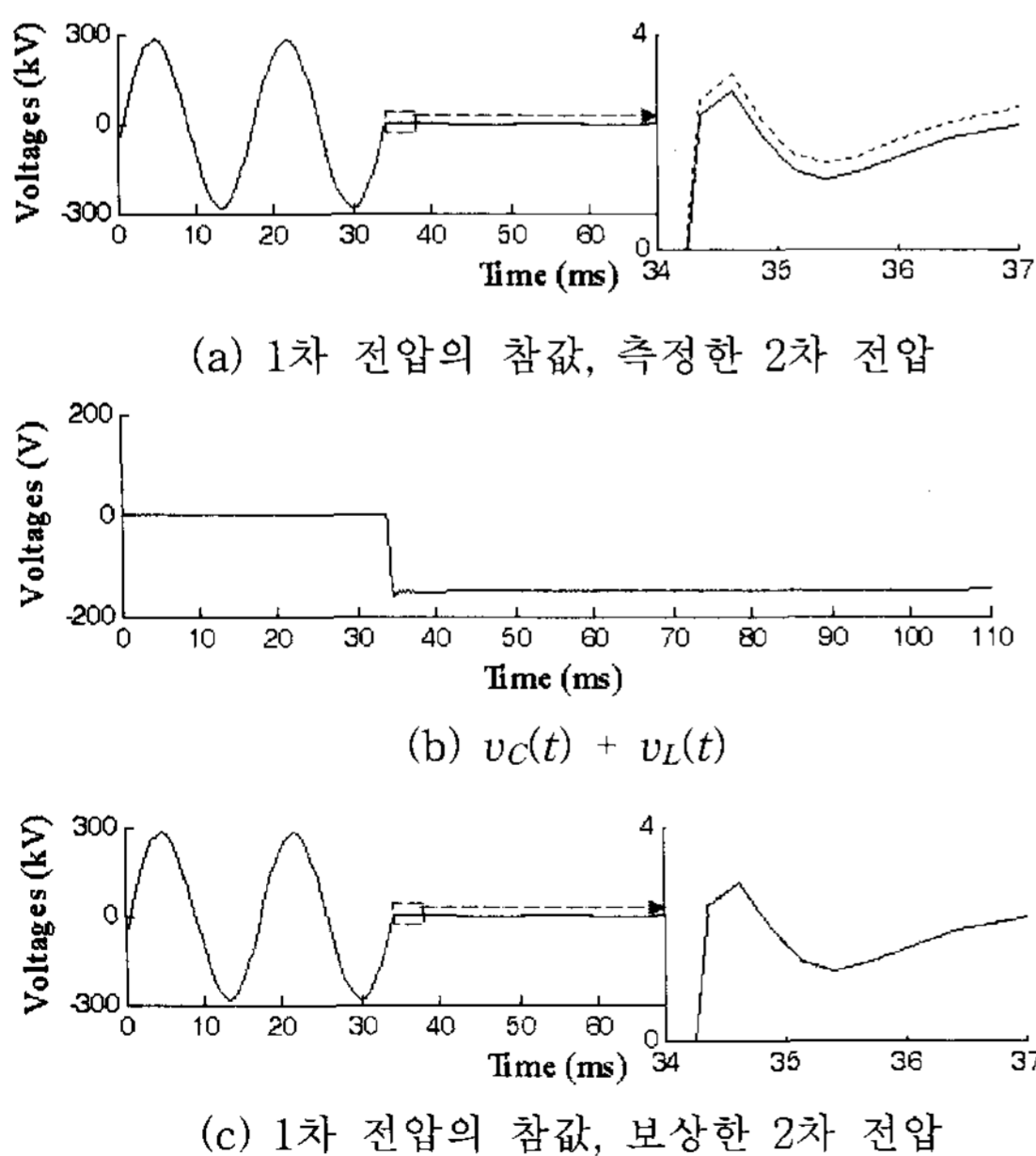


그림 5 사례 1의 결과
Fig. 5 Results for case 1

주기 당 64샘플의 데이터를 사용하였으며, 저역통과 필터로는 컷오프가 1920Hz인 중첩방지용 2차 버터워스 필터를 사용하였다. 사고 거리, 사고 위상각, 부담을 변화시켜 다양한 조건에 대해 모의하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였다.

3.2 사례 연구

사례 1: 3상 단락사고, 사고 거리 100m, 사고 위상각 0°, 사고 저항 0Ω, 부담 100Ω인 경우.

그림 5에 사례 1의 결과를 나타내었다. 그림 5a는 1차측으로 환산한 측정된 전압(점선)과 1차 전압(실선)을 나타낸다. 측정전압이 참값과 다를 수 있다. 그림 5b는 식 (6), (7)을 이용하여 계산한 $v_C(t) + v_L(t)$ 이며, 사고 이전에는 0이며,

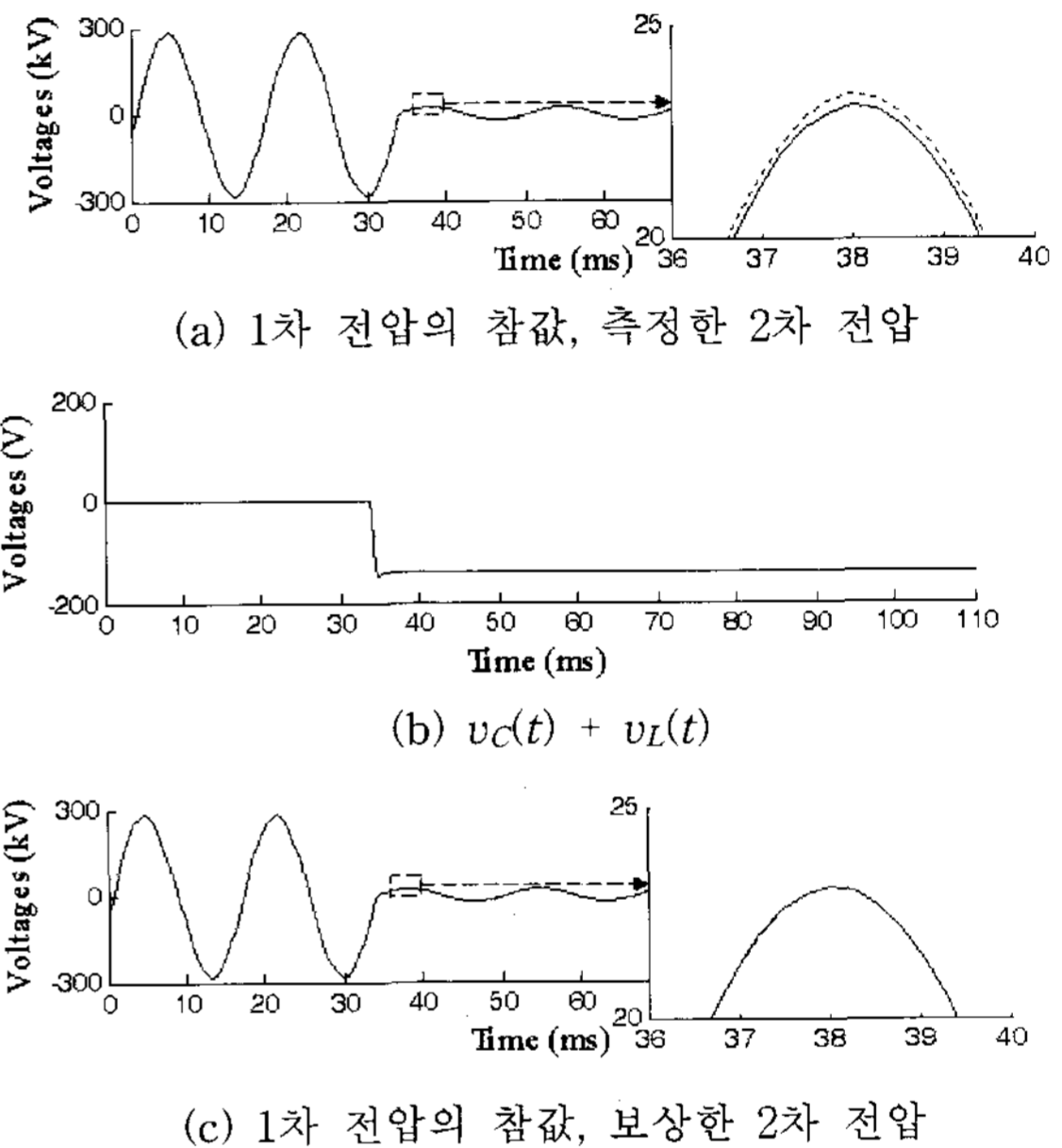


그림 6 사례 2의 결과
Fig. 6 Results for case 2

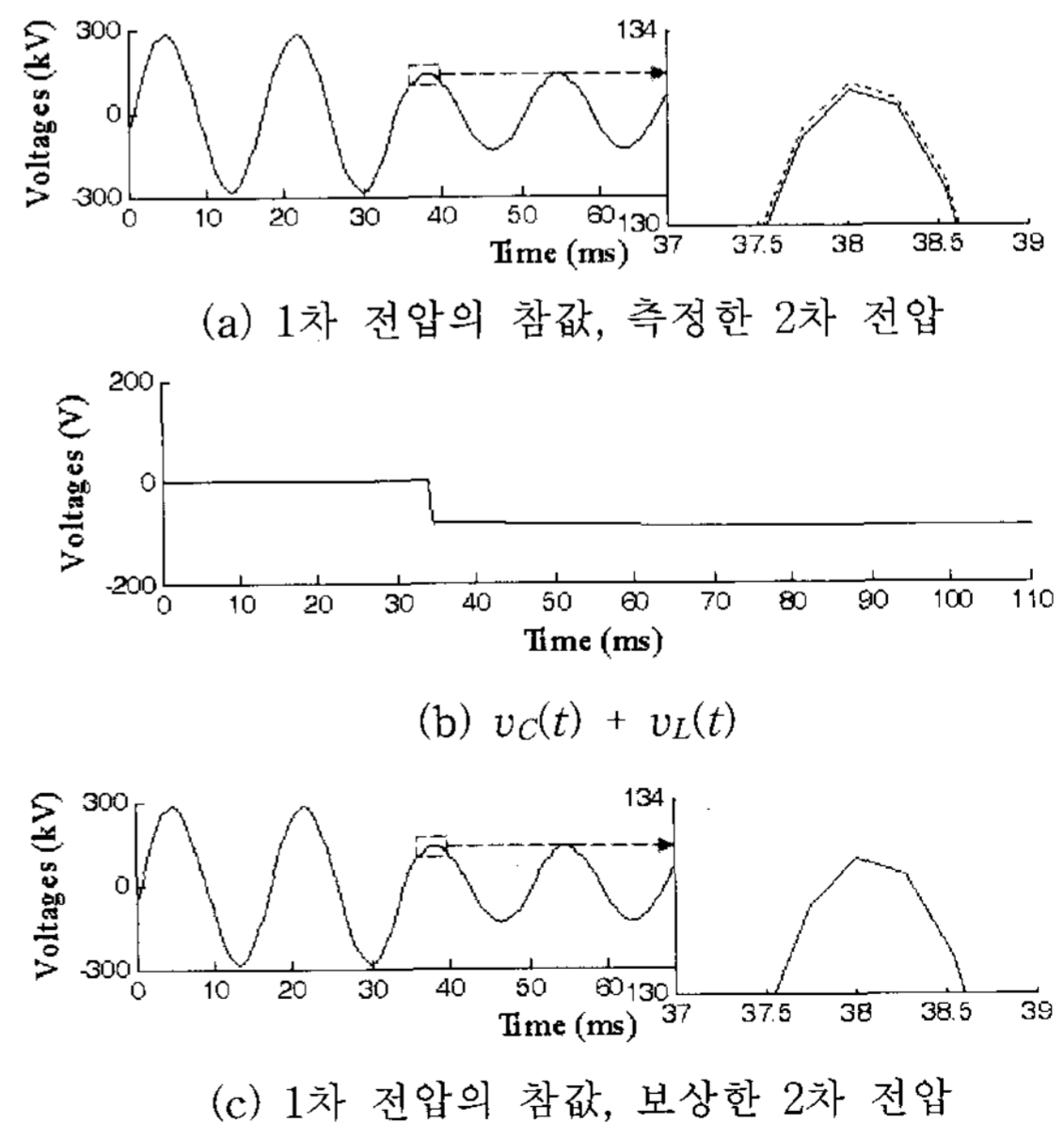
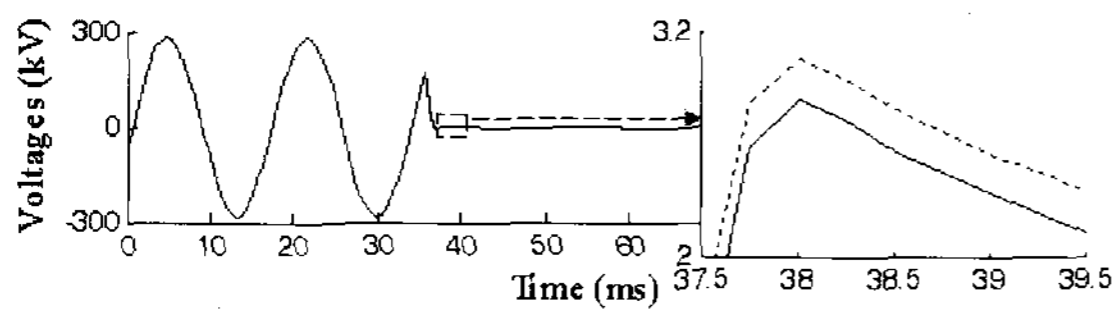
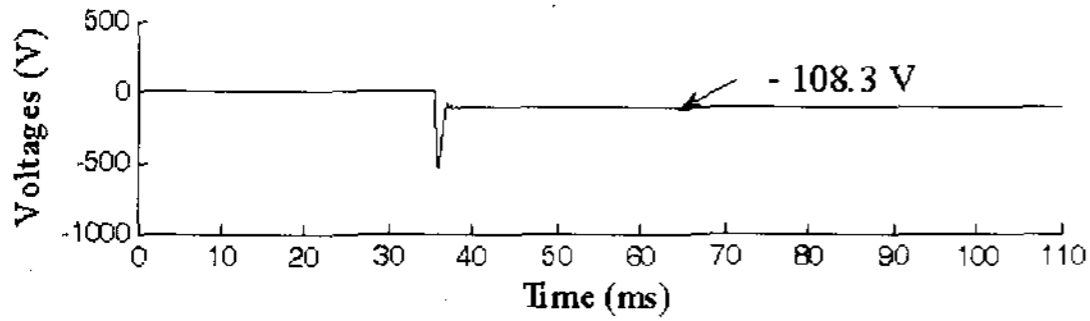


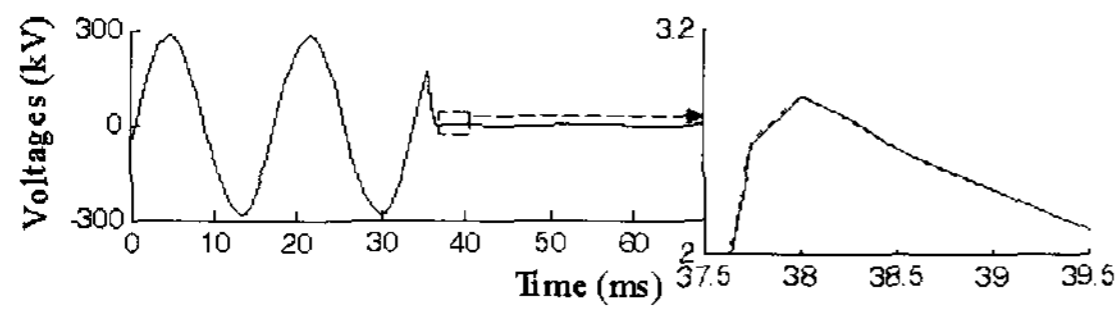
그림 7 사례 3의 결과
Fig. 7 Results for case 3



(a) 1차 전압의 참값, 측정된 2차 전압



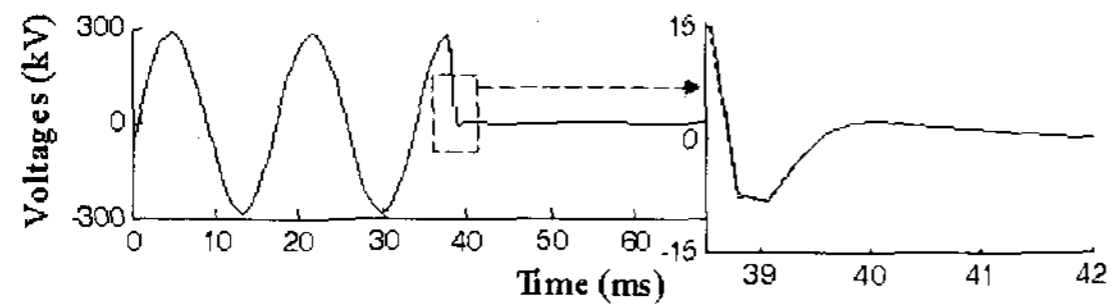
(b) $v_C(t) + v_L(t)$



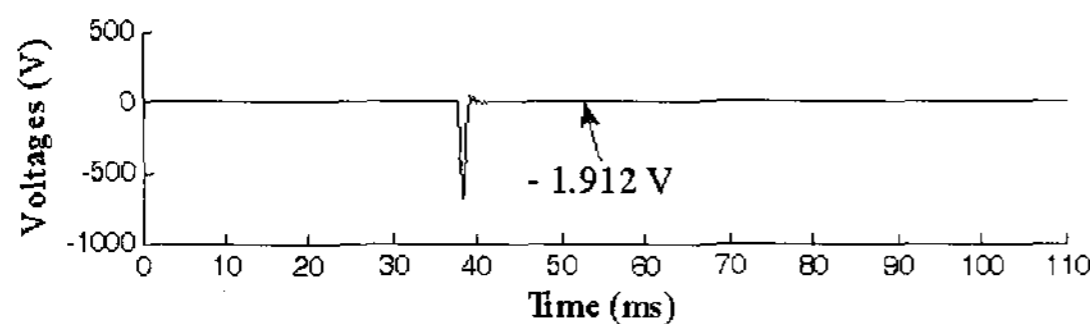
(c) 1차 전압의 참값, 보상한 2차 전압

그림 8 사례 4의 결과

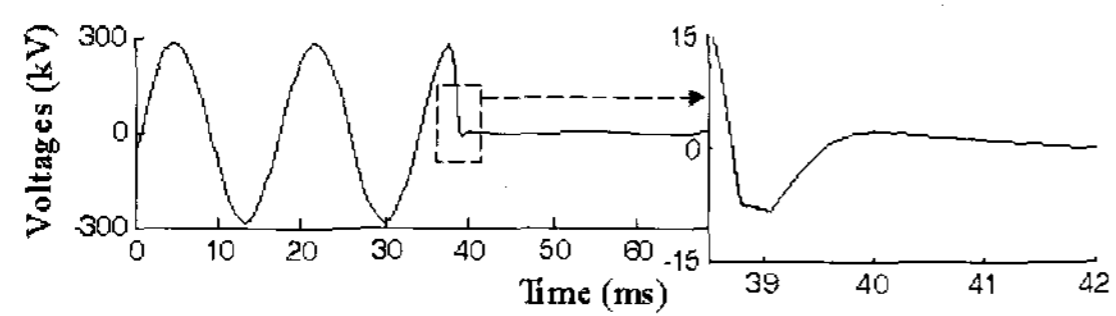
Fig. 8 Results for case 4



(a) 1차 전압의 참값, 측정된 2차 전압



(b) $v_C(t) + v_L(t)$



(c) 1차 전압의 참값, 보상한 2차 전압

그림 9 사례 5의 결과

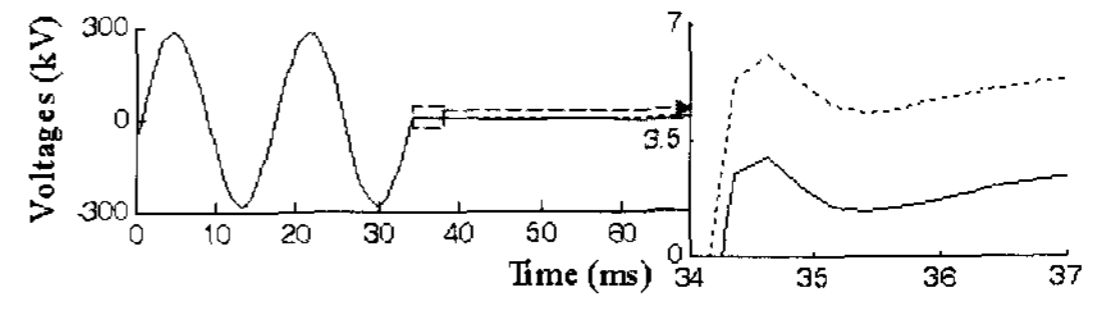
Fig. 9 Results for case 5

사고 이후에는 0이 되지 않음을 알 수 있다. 그림 5b의 값에 그림 5a의 측정된 2차 전압을 합하면 보상 전압을 얻을 수 있으며, 이를 그림 5c에 나타내었다. 확대한 그림에서 알 수 있듯이 보상한 2차 전압은 1차 전압과 거의 같음을 알 수 있다.

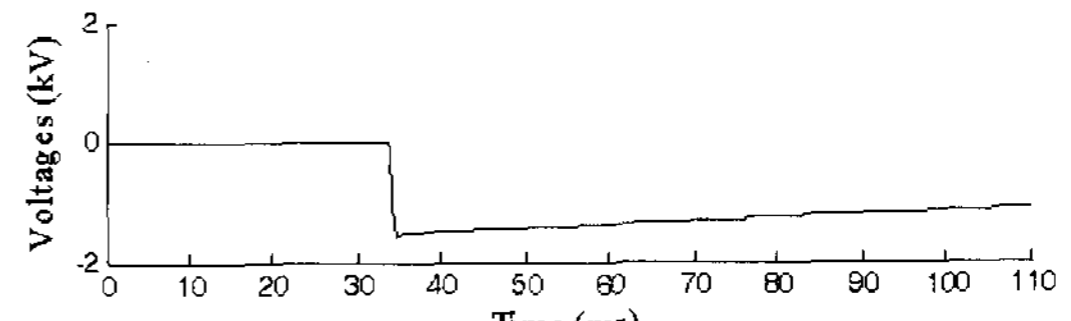
3.2.1 사고거리 변화에 따른 사례 분석

사례 1을 기준으로 하여, 사고 거리를 100m, 400m, 1km, 10km, 50km로 변화시켜 사고를 모의하였으며, 사례 2와 사례 3의 결과를 그림 6와 그림 7에 나타내었다.

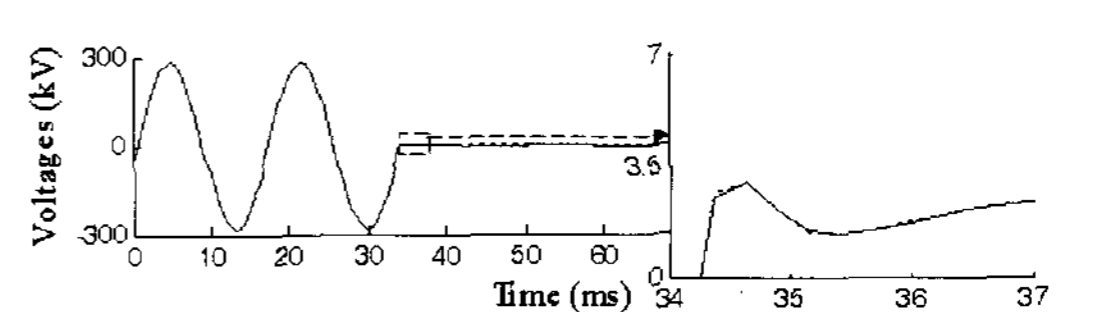
사례 2: 3상 단락사고, 사고 거리 1km, 사고 위상각 0°, 사고 저항 0Ω, 부담 100Ω인 경우.



(a) 1차 전압의 참값, 측정된 2차 전압



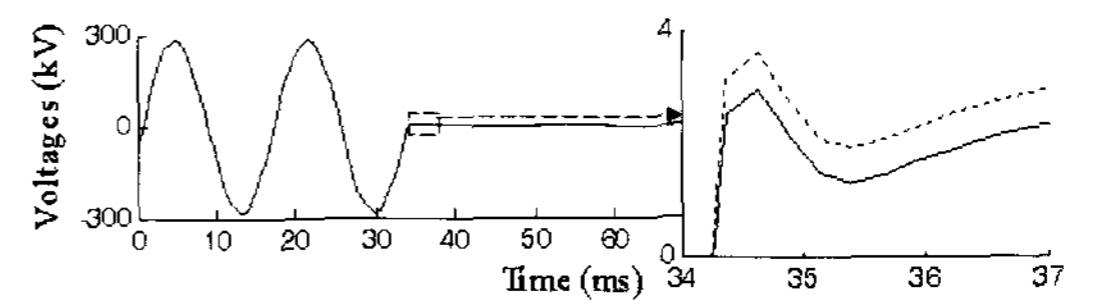
(b) $v_C(t) + v_L(t)$



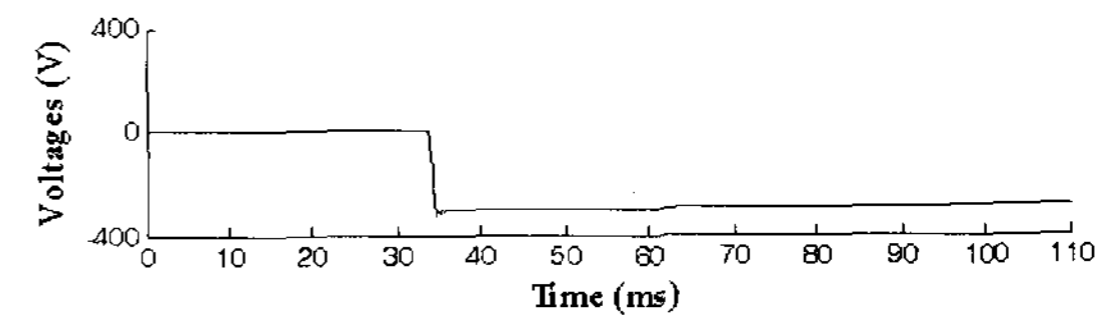
(c) 1차 전압의 참값, 보상한 2차 전압

그림 10 사례 6의 결과

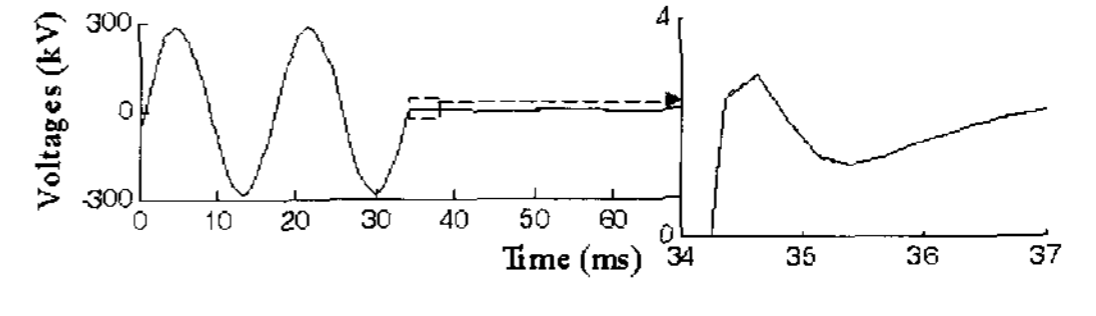
Fig. 10 Results for case 6



(a) 1차 전압의 참값, 측정된 2차 전압



(b) $v_C(t) + v_L(t)$



(c) 1차 전압의 참값, 보상한 2차 전압

그림 11 사례 7의 결과

Fig. 11 Results for case 7

사례 3: 3상 단락사고, 사고 거리 10km, 사고 위상각 0°, 사고 저항 0Ω, 부담 100Ω인 경우.

그림 5b, 6b, 7b를 비교 했을 때, 사고 거리에 따라 오차가 달라짐을 알 수 있다. 즉, 사고 거리 100m일 때 오차가 가장 크게 발생하며, 사고 거리가 10km일 때 오차가 가장 적게 발생했다. 이 이유는 2절에서 설명한 바와 같이, 사고 거리가 짧은 경우에, 송전선 전압의 전압강하가 많이 발생하며, 분압 커패시터와 튜닝 리액터의 공진을 심하게 파괴되기 때문이다. 그림 6c,와 7c에 나타난 바와 같이, 제안한 알고리즘은 사고 거리에 무관하게 CCVT의 오차를 잘 보상함을 알 수 있다.

3.2.2 사고위상각 변화에 따른 사례 분석

사례 1을 기준으로 하여, 사고 위상각을 0°, 30°, 45°, 60°, 90°로 변화시켜 사고를 모의하였으며, 사례 4와 사례 5의 결과를 그림 8와 그림 9에 나타내었다.

사례 4: 3상 단락사고, 사고 거리 100m, 사고 위상각 45°, 사고 저항 0Ω, 부담 100Ω인 경우.

사례 5: 3상 단락사고, 사고 거리 100m, 사고 위상각 90°, 사고 저항 0Ω, 부담 100Ω인 경우.

그림 5b, 8b, 9b를 보면, 사고 위상각에 따라 오차 성분이 달라짐을 알 수 있다. 즉, 사고 위상각 0°일 때 오차가 가장 크게 발생하며, 사고 위상각 90°일 때 오차가 가장 적게 발생했다. 그 이유는 사고 위상각이 작은 경우, 사고 시에 발생한 고주파 성분이 많이 포함되어 있기 때문에, 오차가 많이 발생한다. 사고 위상각이 90°일 때, 고주파 성분이 거의 발생하지 않으며, 아주 짧은 기간 동안만 오차가 발생하는 것을 제외하고는 오차가 적음을 확인할 수 있다. 그림 8c, 9c에서 나타난 바와 같이, 제안한 알고리즘은 사고 위상각에 무관하게 오차를 감소함을 알 수 있다.

3.2.3 부담 변화에 따른 사례 분석

사례 1을 기준으로 하여, 부담을 10Ω, 30Ω, 50Ω, 75Ω, 100Ω으로 변화시켜 사고를 모의하였으며, 사례 6과 사례 7의 결과를 그림 10과 그림 11에 나타내었다.

사례 6: 3상 단락사고, 사고 거리 100m, 사고 위상각 0°, 사고 저항 0Ω, 부담 50Ω인 경우.

사례 7: 3상 단락사고, 사고 거리 100m, 사고 위상각 0°, 사고 저항 0Ω, 부담 10Ω인 경우.

그림 5b, 10b, 11b에서 나타난 바와 같이, 부담 10Ω일 때 오차가 가장 크게 발생하며, 부담 100Ω일 때 오차가 가장 적게 발생했다. 부담이 작은 경우에, CCVT에 흐르는 전류가 크므로 테브난 등가 임피던스와 튜닝 리액터에서의 전압이 많이 발생하기 때문에 오차가 많이 발생한다. 하지만, 그림 10c, 11c에 보인 바와 같이 제안한 알고리즘은 오차를 많이 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 CCVT 2차 전압 보상 방법을 제안하였다. 제안한 방식은 측정된 2차 전압으로부터 커패시터와 튜닝 리액터에서의 전압을 추정하여 오차를 보상하여 정확한 CCVT의 1차 전압을 추정하는 방식이다.

사례연구에서 나타난 바와 같이 다양한 사고에서 제안한 보상 알고리즘을 적용하였을 경우, 전압 오차가 크게 줄어들음을 보였다. 사고 거리, 사고 위상각, 부담을 달리하여 모의하였고, 제안한 보상 알고리즘을 적용하였을 경우 전압 오차가 크게 줄어들음을 알 수 있었다.

제안한 방식에서는 오차가 작은 전압 변성기의 출력전압을 얻을 수 있으므로 전압을 이용하는 보호 계전기의 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

참 고 문 헌

- [1] S. H. Horowitz, and A. G. Phadke, "Power system Relaying," 1992.
- [2] J. Rungis, "Investigation of Capacitor Voltage Transformers," IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 388-391, June 1990.
- [3] M. Kezunovic, C. W. Fromen, S. L. Nilsson, L. Kojovic, V. Skendzic, and D. R. Sevcik, "Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Protective Relay Transient Studies," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, pp. 1927-1935, October 1992.
- [4] J. R. Marti, L. R. Linares, and H. W. Dommel, "Current Transformers and Coupling-Capacitor Voltage Transformers in real-time Simulations," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 164-168, January 1997.
- [5] 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. on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp.62-72, January 2000.
- [6] 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, pp. 116-122, January 1998,

저 자 소 개



강 용 철 (姜 龍 澈)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재, 전북대 공대 전기공학과 부교수.

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr



정 태 영 (鄭 太 英)

1982년 4월 17일생. 2004년 중국 절강대 전기공학과 졸업. 2006년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 전북대 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : huanxiong417@hotmail.com



장 성 일 (張 成 一)

1971년 8월 30일생. 1996년 강원대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국IED Eng.

연구소장

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : sijang@chonbuk.ac.kr



이 지 훈 (李 知 勳)

1981년 3월 7일생. 2005년 전북대 공대 전자정보공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : revival9126@chonbuk.ac.kr



김 용 균 (金 容 均)

1973년 7월 4일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 한국IED Eng. 대표이사

Tel : 02-529-2113

Fax : 02-571-9207

E-mail : codacoda@naver.com