

공극 변류기의 2차 전류 보상

論 文

57-2-1

Compensation for the Secondary Current of an Air-gapped Current Transformer

姜 龍 漵^{*} · 朴 志 蓮[†] · 鄭 太 英^{**} · 張 成 一^{***} · 金 容 均[§]

(Yong-Cheol Kang · Ji-Youn Park · Taiying Zheng · Sung-Il Jang · Yong-Gyun Kim)

Abstract – An air-gapped current transformer (CT) has been used to reduce a remanent flux in the core, particularly in the case of auto-reclosure. However, it causes larger transient, ratio and phase errors than the iron-cored CT because of the small magnetizing inductance. This paper proposes a compensation algorithm for the secondary current of the air-gapped CT during the fault conditions including auto-reclosure as well as in the steady-state. The core flux is calculated from the measured secondary current of the CT and inserted into the hysteresis loop to estimate the exciting current. Finally, the correct current is estimated by adding the measured secondary current to the estimated exciting current. Various test results clearly indicate that the proposed compensating algorithm can improve the accuracy of the air-gapped CT significantly and reduce the required core cross-section of the air-gapped CT significantly.

Key Words : Air-gapped CT, Hysteresis characteristics, Compensation, Remanent flux and Auto-reclosure

1. 서 론

변류기는 전력 시스템에 흐르는 1차 전류를 크기가 작은 2차 전류로 변류하여 계전기 또는 계량기 등의 입력에 사용하는 변성기이다. 1차 권선과 2차 권선사이의 상호 쇄교 자속을 높이기 위해 코어가 철심 변류기를 주로 사용하고 있다. 그런데 철심 변류기는 사고가 발생하여 큰 전류가 흐를 경우에는 포화될 가능성이 존재한다[1, 2]. 변류기가 포화되면, 2차 전류가 왜곡되어 보호 계전기의 오동작/시지연을 유발하게 된다. 따라서 포화를 방지하기 위하여 과전류 정수를 20 또는 40으로 하여 변류기를 설계하여 왔다[3]. 그러므로 큰 단면적으로 인하여 변류기의 무게와 가격이 상승하게 된다.

개다가 철심 변류기는 1차 전류가 0일 때, 포화자속의 최대 80%까지 잔류자속이 철심에 남게 되며, 이로 인해 재폐로 시 변류기는 잔류자속이 없는 경우보다 더 빨리, 더 심하게 포화될 수 있다[2]. 따라서 잔류자속을 고려하여 포화를 방지하도록 변류기를 설계한다면, 과전류 정수가 20 또는 40보다 커지게 되고, 이로 인한 단면적 증가는 불가피하다[3]. 그러므로 잔류자속의 감소가 필요한 경우에는 코어에 공극을 삽입한 공극 변류기를 사용하여 왔다[1, 2]. 공극 변류기는 재폐로시에 포화 자속의 10~20%의 잔류자속이 존재하기

때문에, 재폐로 이후 포화 가능성이 철심 변류기에 비해 훨씬 적다. 그러므로 최근 초고압 또는 극초고압 시스템에서는 공극 변류기 사용이 증가하고 있으며, 향후에는 공극 변류기의 사용이 더욱 확대될 전망이다.

하지만 공극 변류기는 자로에 공극이 삽입되어 자화 인덕턴스가 작게 되므로 정상 상태에서 비오차, 위상오차가 클뿐만 아니라, 사고 시의 과도오차도 크다. 따라서 철심 변류기 코어의 단면적 보다 크게 설계하여 오차를 감소시키고 있다. 그러므로 공극 변류기의 크기가 철심 변류기 보다 크고, 제작 단가 또한 철심 변류기에 비해 매우 높다.

본 논문에서는 공극 변류기의 2차 전류 보상 방법을 제안한다. 제안한 방식은 시간 영역에서 매 순간 공극 변류기의 여자 전류를 추정하고 이를 보상한다. 측정된 2차 전류로부터 자속을 계산하고, 이를 히스테리시스 루프에 대입하여 그에 상응하는 여자 전류를 구한다. 추정한 여자 전류를 측정한 2차 전류에 더함으로써 1차 전류를 추정한다. EMTP를 사용하여 공극 변류기를 모델링하였으며, 154kV 시스템에서 정상 상태와 사고 상태로 나누어 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였다.

2. 공극 변류기의 모델링과 오차 보상 알고리즘

2.1 공극 변류기의 모델링

그림 1은 코어에 공극을 삽입한 공극 변류기를 나타내며, 그림 2는 공극 변류기의 자기적 등가회로를 나타낸다.

우선 공극 변류기의 철손 저항을 무시하면, 공극 변류기의 자기저항은 철심의 자기저항과 공극의 자기저항의 합이므로, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_{iron} + \mathfrak{R}_{air} \quad (1)$$

* 正會員 : 全北大 大學院 電氣工學科 副教授 · 工博

† 교신저자, 學生會員 : 全北大 大學院 電氣工學科 碩士課程
E-mail : hgyy012@chonbuk.ac.kr

** 正會員 : 全北大學校 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 全北大 大學院 電氣工學科 研究教授 · 工博
§ 正會員 : 韓國IED Eng. 代表理事

接受日字 : 2007年 10月 30日

最終完了 : 2007年 12月 13日

따라서 공극 변류기의 자화 인덕턴스(L)는 식 (2)와 같다.

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (2)$$

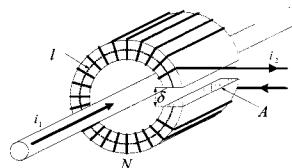
식 (1)을 식 (2)에 대입함으로써 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{air} + \mathfrak{R}_{iron}} = \frac{1}{\frac{\mathfrak{R}_{air}}{N^2} + \frac{\mathfrak{R}_{iron}}{N^2}} = \frac{1}{\frac{1}{L_{air}} + \frac{1}{L_{iron}}} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 L 이 공극의 인덕턴스(L_{air})와 철심의 자화 인덕턴스(L_{iron})의 병렬로 이루어졌음을 알 수 있다. 여기서 L_{air} 는 선형인 반면, L_{iron} 은 비선형이다. L_{air} 는 식 (4)와 같이 표현되며, μ_0 는 공기의 투자율로 $4\pi \times 10^{-7}$ 이다.

$$L_{air} = \frac{\mu_0 A N^2}{\delta} \quad (4)$$

따라서 공극 변류기의 전기적 등가회로는 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

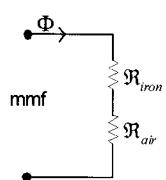


l : 철심의 자로 길이, δ : 공극의 길이

A : 단면적, N : 턴 수, i_1 , i_2 : 1차, 2차 전류

그림 1 공극 변류기

Fig. 1 Air-gapped CT

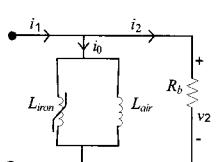


mmf: 기자력, Φ : 자속

\mathfrak{R}_{air} : 공극의 자기저항, \mathfrak{R}_{iron} : 철심의 자기저항

그림 2 공극 변류기의 자기적 등가회로

Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of the air-gapped CT



i_1 : 2차측으로 환산한 1차 전류, i_2 : 2차 전류

i_0 : 여자 전류

L_{iron} : 철심의 자화 인덕턴스, L_{air} : 공극의 인덕턴스

R_b : 2차 부담, v_2 : 2차 전압

그림 3 공극 변류기의 전기적 등가회로

Fig. 3 Electric equivalent circuit of the air-gapped CT

2.2 공극 변류기의 오차 보상 알고리즘

공극 변류기는 철심 변류기에 비해 자화 인덕턴스가 작아 여자 전류가 크므로, 정상 상태 및 사고 상태에서 오차가 크다. 하지만 이 여자 전류를 추정할 수 있다면 이를 추정한 2차 전류에 더함으로써 오차를 크게 감소할 수 있다. 본 논문에서는 정상 상태 뿐만 아니라 사고 상태에서 공극 변류기의 2차 전류를 보상하는 알고리즘을 제안한다.

2차 전류($i_2(t)$)와 자속($\lambda(t)$)의 관계는 식 (5)와 같다.

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = R_b i_2(t) \quad (5)$$

식 (5)를 적분하면, 식 (6)이 된다.

$$\lambda(t) - \lambda(t_0) = R_b \int_{t_0}^t i_2(t) dt \quad (6)$$

식 (6)으로부터 $\lambda(t)$ 을 구할 수 있다. 여기서, $\lambda(t_0)$ 는 t_0 에서의 자속을 나타내며, 이는 참고 문헌 [4]에서 제안한 방식을 통해 얻을 수 있다.

$\lambda(t)$ 를 히스테리시스 루프에 대입함으로써 여자 전류($i_0(t)$)를 추정할 수 있다. 마지막으로 추정된 여자 전류($i_0(t)$)를 측정한 2차 전류($i_2(t)$)에 더함으로써(식 (7)) 정확한 1차 전류($i_1(t)$)를 추정할 수 있다.

$$i_1(t) = i_2(t) + i_0(t) \quad (7)$$

3. 사례연구

3.1 모델 시스템

그림 4는 사례 연구에 사용된 154kV 단선 송전 시스템을 나타낸다. 길이가 50km인 송전선이 두 모선 사이에 연결되어 있으며 시스템의 주파수는 60Hz이다.

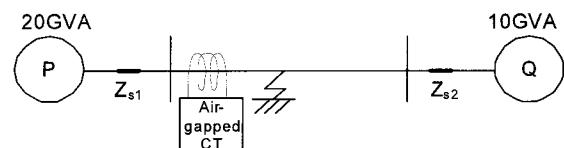


그림 4 모델 시스템

Fig. 4 Model system

3.2 EMTP를 이용한 공극 변류기의 모델링

본 논문에서는 154kV 시스템에서 정격으로 사용되는 C400 변류기(변류비 2000:5A)에 단면적을 늘리지 않고 공극을 삽입하여 공극 변류기를 모델링하였다. 변류기의 2차 부담(R_b)은 순수 저항 4.03Ω 으로 모델링 하였다.

먼저, 철심 코어의 히스테리시스 특성을 고려하기 위해 비선형 소자인 96소자를 포함하였고, 이에 필요한 히스테리시스 특성은 EMTP의 보조 프로그램인 HYSDAT을 통해 얻었다. 포화점은 2.05A, 1.50Vs로 하였다.

한편, 공극 길이는 철심의 단면적과 재질에 의해 결정되며 자로 길이의 0.001%~0.003% 정도가 적합하다[2]. 따라서 본 논문에서는 자로 길이의 0.003%를 고려하여 공극의 길이로 0.6mm 를 사용하였다. 이에 대한 L_{air} 는 식 (4)를 이용하여 구하였다. 이 때, 단면적 $A = 0.016\text{m}^2$ 이다.

철심의 히스테리시스 특성과 공극의 자화 인덕턴스를 합하여 구한 공극 변류기의 히스테리시스 특성은 그림 5와 같다.

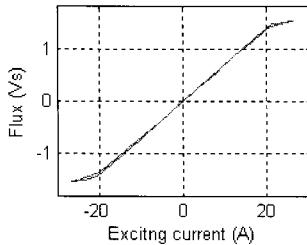


그림 5 공극 변류기 히스테리시스 주 루프

Fig. 5 Major hysteresis loop of the air-gapped CT

EMTP를 이용하여 공극 변류기의 1, 2차 전류를 생성하였으며, 샘플링 비율은 주기 당 64 샘플을 사용하였다. 첫 옵 주파수가 1,920Hz인 1차 RC 저역 통과 필터가 사용되었다.

제안한 알고리즘의 성능을 정상 상태와 사고 상태에서 검증하였다. 정상 상태는 정격 전류와, 정격의 120%, 20%에 대해 수행하였고, 사고 상태는 A상 지락 사고에 대해 시정 수와 재폐로 시간을 달리하여 수행하였다.

3.3 정상 상태

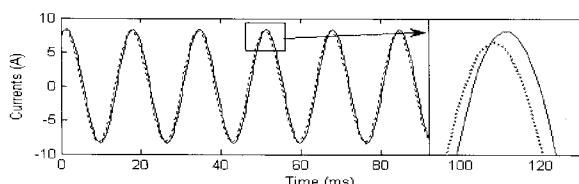
본 논문에서는 공극 변류기의 단면적을 철심 변류기의 단면적과 같게 하였으므로 정상 상태에서도 큰 오차를 가진다. 그런데 제안한 알고리즘을 적용하면 공극 변류기의 오차를 현격히 줄일 수 있다.

3.3.1 사례 1: 정격의 120%

그림 6은 사례 1의 결과이다. 그림 6(a)에서 $i_1(t)$ 를 실선으로, $i_2(t)$ 를 점선으로 표시하였다. 철심 변류기의 단면적을 그대로 유지하면서 공극만 삽입하였기 때문에 공극 변류기의 자화 인덕턴스가 작게 되므로, 예상한 대로 $i_1(t)$ 와 $i_2(t)$ 사이의 차이는 매우 큼을 알 수 있다. 그림 6(b)는 $i_2(t)$ 로부터 계산한 $\lambda(t)$ 를 보여주며, 그림 6(c)는 $\lambda(t)$ 를 그림 5의 히스테리시스 루프에 대입하여 추정한 $i_0(t)$ 를 보여준다. 공극을 삽입하였기 때문에 $i_0(t)$ 가 거의 정현에 가까움을 알 수 있다. $i_2(t)$ 에 $i_0(t)$ 를 더하여 얻은 추정한 $\tilde{i}_1(t)$ 가 $i_1(t)$ 와 거의 같음을 그림 6(d)를 통해 확인할 수 있다. 제안한 알고리즘의 성능을 명확하게 보여주기 위해, 그래프의 일부를 확대하였다. 제안한 알고리즘을 적용하게 되면, 비오차는 -1.88%에서 0.0004%로, 위상오차는 543.7분에서 -0.13분으로 감소하였다.

3.3.2 사례 2: 정격의 100%

그림 7은 사례 2의 결과를 나타낸다. 사례 1과 마찬가지로 그림 7(a)로부터 $i_1(t)$ 와 $i_2(t)$ 사이에 차이가 큼을 알 수 있다. 하지만 제안한 방식을 이용하면, 추정한 $\tilde{i}_1(t)$ 가 $i_1(t)$ 와 거의 같음을 알 수 있고, 비오차는 -1.87%에서 0.001%로, 위상오차는 548.5분에서 -0.18분으로 감소하였다.



(a) 1차 전류(실선), 측정한 2차 전류(점선)

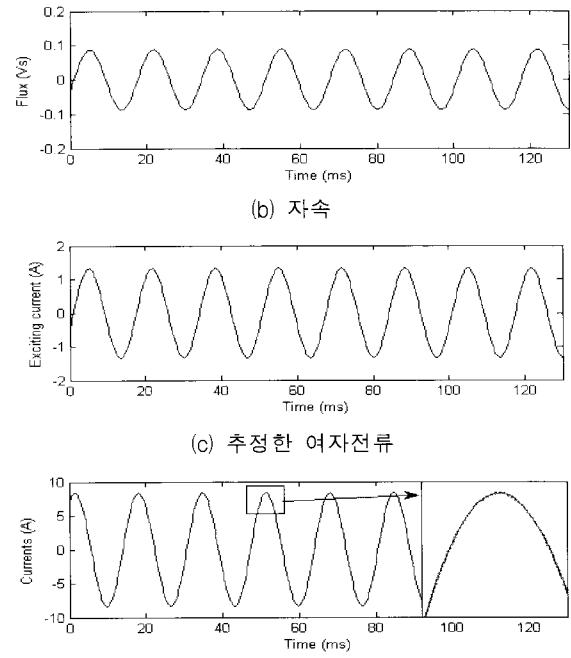


그림 6 사례 1의 결과

Fig. 6 Results of case 1

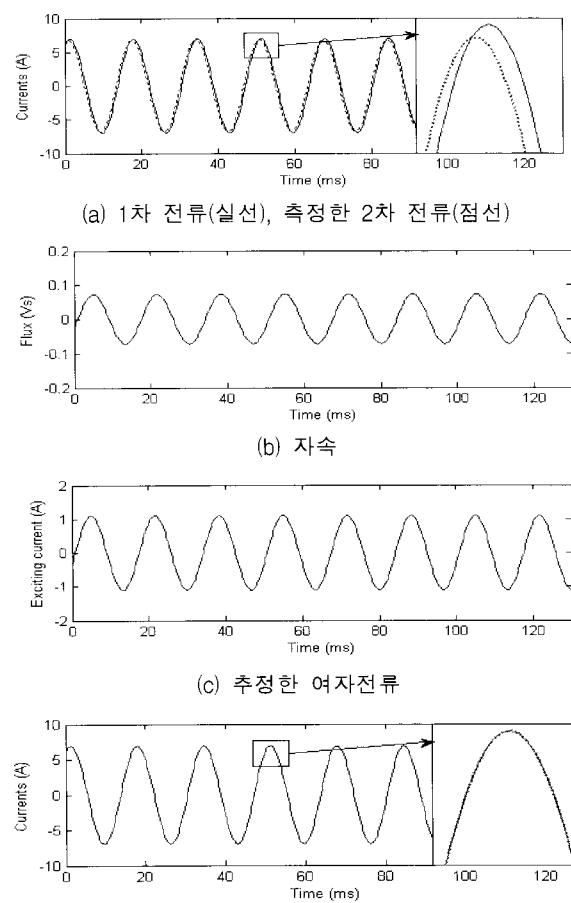


그림 7 사례 2의 결과

Fig. 7 Results of case 2

3.3.3 사례 3: 정격의 20%

그림 8은 사례 3의 결과를 나타낸다. 정격 전류의 20%이기 때문에 $i_1(t)$ 와 $i_2(t)$ 사이의 차이가 사례 1, 2에 비해 큼을 그림 8(a)를 통해 알 수 있다. 그런데 제안한 알고리즘을 적용하면 보상이 잘 되는 것을 그림 8(d)를 통해 알 수 있으며, 비오차는 -1.65%에서 0.002%로, 위상오차는 579.2분에서 -0.36분으로 감소하였다.

사례 1-3을 통하여 공극 변류기의 단면적을 철심 변류기의 단면적과 같게 하여 정상 상태에서의 오차가 매우 크더라도, 제안한 알고리즘은 오차를 상당히 감소함을 알 수 있다.

3.4 사고 상태

사고 시에 큰 사고 전류나 dc 옵셋 성분, 큰 시정수로 인하여 공극 변류기가 포화되어 큰 오차가 발생된다. 초고압 시스템의 1차 시정수는 대개 수십 ms에서 최대 200ms에 이른다. 따라서 사례 4와 5에서는 시정수를 10ms와 100ms로 다르게 하였고, 사례 6에서는 재폐로 시간을 달리하여 알고리즘을 검증하였다.

사고 시, 제안한 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 식(8)과 같이 매 순간 과도오차를 계산하였다[5].

$$\epsilon = \frac{\tilde{i}_1(t) - i_1(t)}{\sqrt{2} I_{psc}/K} \times 100(\%) \quad (8)$$

$\tilde{i}_1(t)$, I_{psc} 와 K 는 각각 추정한 1차 전류, 1차 전류의 실효값 그리고 정격 변류비를 의미한다.

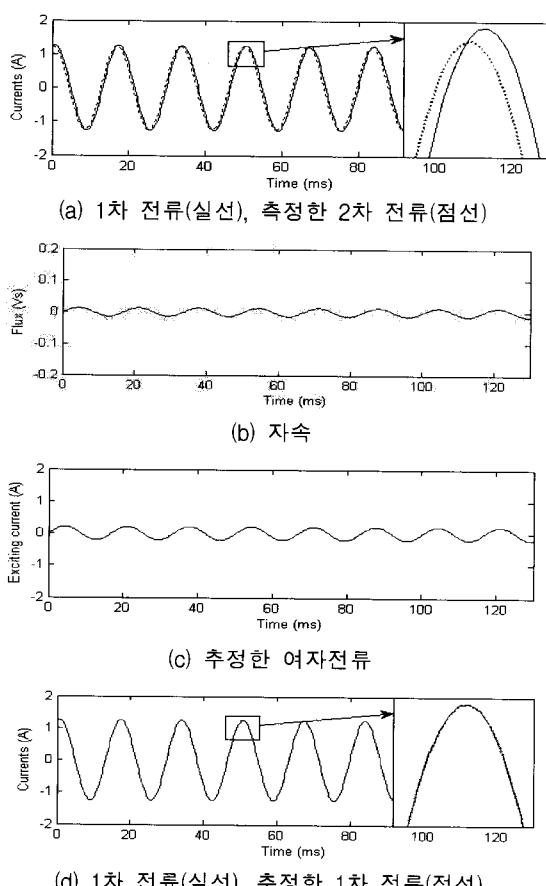


그림 8 사례 3의 결과

Fig. 8 Results of case 3

3.4.1 사례 4: 0도 A상 지락사고, 사고 거리: 2km, 사고시간: 13.33ms, 개방시간: 50.05ms, 재폐로 시간: 88.33ms, 시정수: 10ms

그림 9는 사례 4의 결과이다. 그림 9(a)에서 $i_1(t)$ 를 실선으로, $i_2(t)$ 를 점선으로 표시하였다. 공극 변류기의 포화로 인해 $i_2(t)$ 가 재폐로 이전과 이후에 왜곡됨을 알 수 있다. 그림 9(b)는 $i_2(t)$ 로부터 계산한 $\lambda(t)$ 를 나타내며, 개방되는 시점인 50.05ms에서 $\lambda(t)$ 는 -0.6781Vs이고 재폐로 시점인 88.33ms에서 $\lambda(t)$ 는 -0.08148Vs이다. 그림 9(c)는 $\lambda(t)$ 를 그림 5의 히스테리시스 루프에 대입하여 얻은 추정한 $i_0(t)$ 를 나타낸다. 그림 9(d)는 $i_2(t)$ 에 $i_0(t)$ 를 더하여 얻은 추정한 $\tilde{i}_1(t)$ 와 $i_1(t)$ 를 나타내는데, 두 전류가 거의 같음을 확인할 수 있다. 그림 9(e)에 나타난 바와 같이 식(8)의 보상된 전류의 과도오차는 현저히 작음을 알 수 있다.

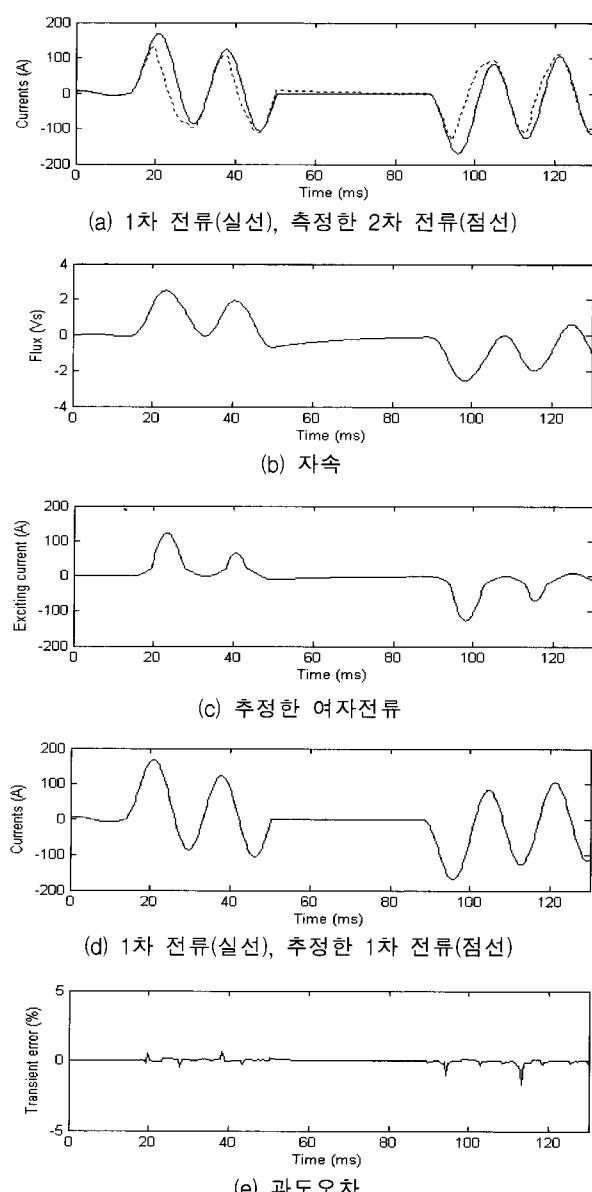


그림 9 사례 4의 결과

Fig. 9 Results of case 4

3.4.2 사례 5: 0도 A상 지락사고, 사고 거리: 2km, 사고시간: 13.33ms, 개방시간: 50.05ms, 재폐로 시간: 88.33ms, 시정수: 100ms

그림 10은 사례 5의 결과이다. 사례 4와 시정수만 100ms로 다르다. 그림 10(a)를 통해 알 수 있듯이 시정수가 커졌기 때문에 $i_2(t)$ 의 웨곡이 더 심하다. 상이 개방되는 시점인 50.05ms에서 $\lambda(t)$ 는 0.1253Vs이고 재폐로 되는 시점인 88.33ms에서 $\lambda(t)$ 는 0.02217Vs임을 그림 10(b)를 통해 알 수 있다. 또한 사례 4보다 $i_0(t)$ 가 더 큼을 그림 10(c)를 통해 볼 수 있다. 큰 시정수에 의해 큰 오차를 갖지만 제안한 알고리즘을 적용하면 오차가 매우 적음을 그림 10(e)를 통해 알 수 있다.

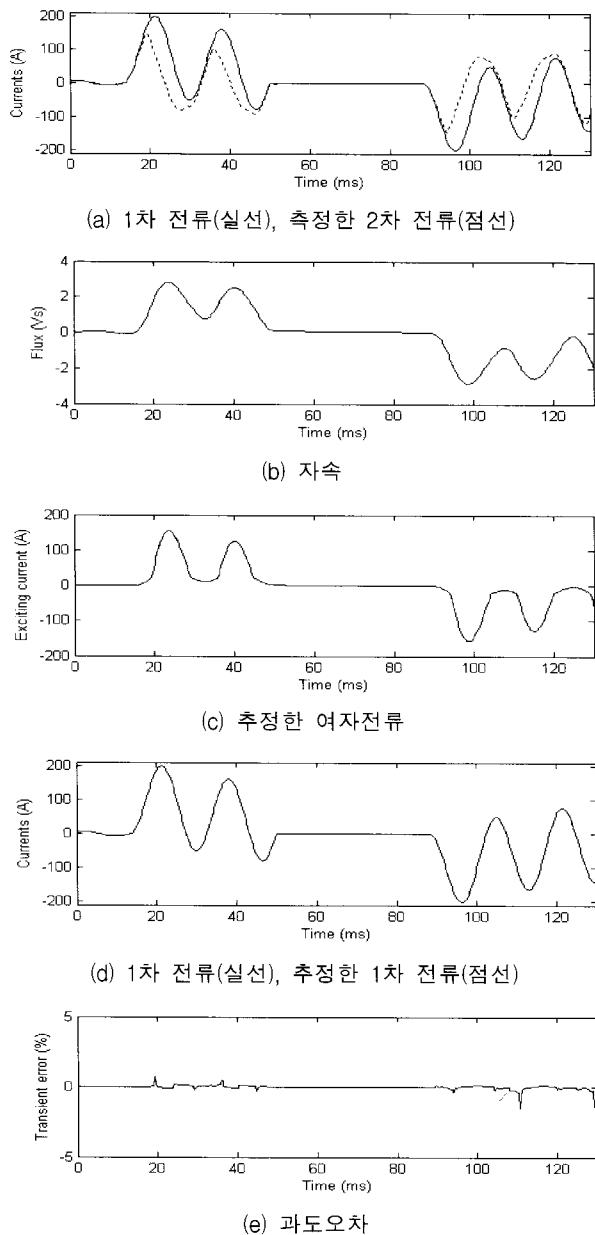


그림 10 사례 5의 결과

Fig. 10 Results of case 5

3.4.3 사례 6: 0도 A상 지락사고, 사고 거리: 2km, 사고시간: 13.33ms, 개방시간: 59.42ms, 재폐로 시간: 89.37ms, 시정수: 100ms

그림 11은 사례 6의 결과이다. 사례 5와 같은 조건에서 개방시간과 재폐로 시간만을 변경한 것이다. 사고 전류의 크기는 동일하나 잔류자속의 양이 다름을 그림 11(a)와 11(b)를 통해 알 수 있다. 상이 개방되는 시점인 59.42ms에서 $\lambda(t)$ 는 1.894Vs이고 재폐로 되는 시점 89.37ms에서 $\lambda(t)$ 는 0Vs임을 그림 11(b)를 통해 알 수 있다. 이를 통해 재폐로 시 공극 변류기에서 잔류자속이 현격히 감소함을 알 수 있다. 제안한 방식을 이용하면 추정한 $\tilde{i}_1(t)$ 는 $i_1(t)$ 와 거의 같음을 그림 11(d)를 통하여 알 수 있고, 과도오차가 매우 적음을 그림 11(e)를 통해 알 수 있다.

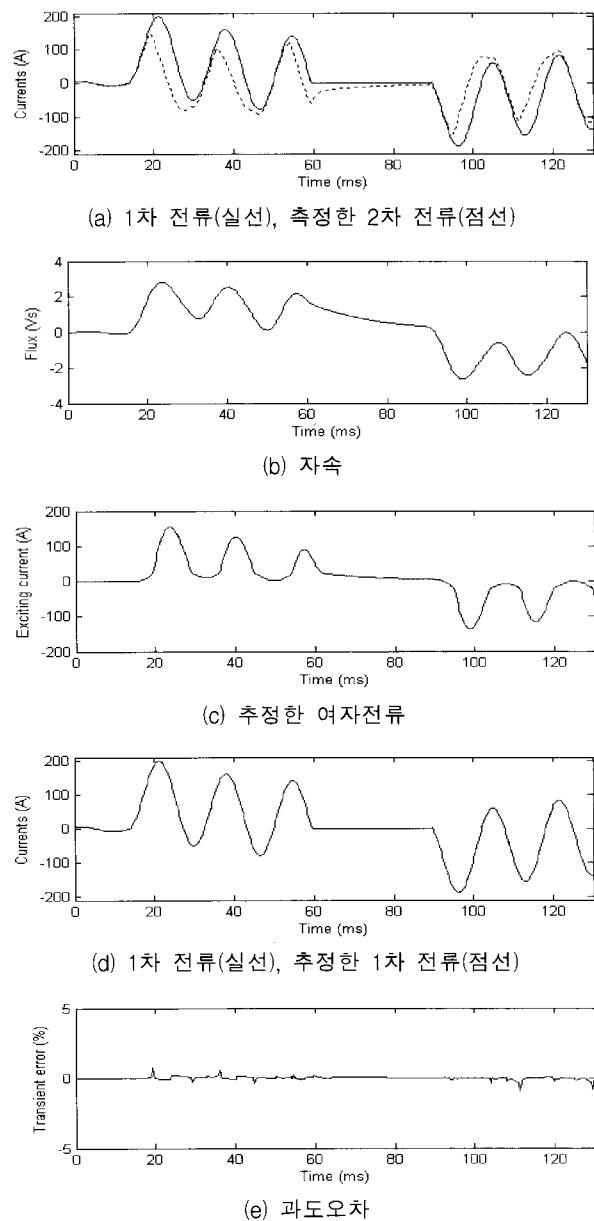


그림 11 사례 6의 결과

Fig. 11 Results of case 6

4. 결 론

본 논문에서는 시간 영역에서 공극 변류기 2차 전류의 오차를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 코어의 자속은 공극 변류기의 측정된 2차 전류로부터 계산되고, 이를 히스테리시스 루프에 대입함으로써 여자 전류를 추정할 수 있다. 마지막으로, 추정된 여자 전류를 측정한 2차 전류에 더함으로써 정확한 1차 전류를 추정할 수 있다.

다양한 사례연구 결과로부터 제안한 알고리즘은 정상 상태(오차 0.1% 이하) 뿐만 아니라 재폐로를 고려한 사고 상태(오차 2% 이하)에서도 공극 변류기의 오차를 현격하게 감소시킬 수 있었다.

제안한 보상 알고리즘은 공극 변류기의 단면적이 철심 변류기와 같기 때문에 정상 상태 및 사고 시에 오차가 크더라도, 이를 현격하게 감소시킬 수 있으며, 기존의 공극 변류기의 코어 단면적을 크게 감소 할 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] D. Muthumuni, P. G. McLaren, W. Chandrasena, and A. Parker "Simulation model of an air gapped current transformer", Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE Cnf, Vol. 2, pp. 705-709, 2001.
- [2] An IEEE Power System Relay Committee Report, "Gapped core current transformer characteristics and performance", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp. 1732-1737, 1990.
- [3] IEEE C37.110-1996, "IEEE guide for the application of current transformer used for protective relaying purpose", IEEE Std. December 1996.
- [4] Y. C. Kang, J. K. Park, S. H. Kang, A. T. Johns, and R. K. Aggarwal, "An algorithm for compensating secondary currents of current transformers," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 116-124, January 1997.
- [5] IEC 60044-8, "Instrument transformers-part 8: electronic current transformers", IEC Std. July 2002.

저 자 소 개



강 용 철 (姜 龍 淊)

1964년 8월 2일 생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재, 전북대학교 전자정보공학부 부교수.

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394
E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr



박 지연 (朴 志 蓮)

1984년 1월 6일 생. 2006년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2006년 ~ 현재 전북대학교 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394
E-mail : hjjy012@chonbuk.ac.kr



정 태영 (鄭 太 英)

1982년 4월 17일 생. 2004년 중국 절강대학교 전기공학과 졸업. 2006년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394
E-mail : huanxiong417@chonbuk.ac.kr



장 성 일 (張 成 一)

1971년 8월 30일 생. 1996년 강원대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 전북대학교 전기공학과 BK21 연구교수
Tel : 063-270-2389, Fax : 063-270-2394
E-mail : sijiang@chonbuk.ac.kr



김 용균 (金 容 均)

1973년 7월 4일 생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년 ~ 현재 한국IED Eng. 대표이사
Tel : 063-276-2123, Fax : 063-276-2124
E-mail : codacoda@hankookied.com