

## An Advanced Algorithm for Compensating the Secondary Current of CTs

姜龍澈\* · 林義宰\*\*  
(Yong-Cheol Kang · Ui-Jai Lim)

**Abstract** - During a fault the remanent flux in a current transformer (CT) may cause severe saturation of its core. The resulting distortion in the secondary current could cause the mal-operation of a protection relay. This paper proposes an algorithm for compensating for the errors in the secondary current caused by CT saturation and the remanent flux. The algorithm compensates the distorted current irrespective of the level of the remanent flux. The second-difference function of the current is used to detect when the CT first starts to saturate. The negative value of the second-difference function at the start of saturation, which corresponds to the magnetizing current, is inserted into the magnetization curve to obtain the core flux at the instant. This value is then used as an initial flux to calculate the actual flux of the CT during the course of the fault with the secondary current. The magnetizing current is then estimated using the magnetization curve and the calculated flux value. The compensated secondary current can be estimated by adding the magnetizing current to the secondary current. Test results indicate that the algorithm can accurately compensate a severely distorted secondary current signal.

**Key Words** : Current transformer, Saturation, Compensation, Second-difference, Remanent flux, Magnetizing current

### 1. 서론

사고 발생 시 과도한 사고 전류로 인하여 변류기가 포화 되면, 2차 전류가 왜곡되어 1차 전류와 다른 형태를 가지게 된다. 이러한 변류기 포화는 계전기의 동작 시간을 지연시키거나 계전기의 오동작을 유발한다. 변류기 포화에 대한 계전기의 오동작을 최소화하기 위하여, 정격전류보다 20배의 전류에서 변류비 오차가 10% 미만이 되도록 변류기를 설계하고, 보호 알고리즘의 감도를 둔하게 하여 사용한다. 그런데, 20배 이상의 전류가 흐르는 사고의 경우에는 변류기가 포화 되므로, 이에 대한 대책이 필요하다.

변류기 포화에 대한 대책으로 변류기 2차 전류 보상 알고리즘을 제안하였다[1, 2]. 참고문헌 [1]에서는 2차 회로에 별도의 회로를 추가하여 왜곡된 전류를 보상한다. 참고문헌 [2]에서는 2차 전류로부터 철심 자속을 계산하고, 계산된 자속을 자화곡선에 대입하여 자화전류를 추정하여 왜곡된 전류를 보상한다. 이 방식은 초기 자속값을 계산하기 위하여 한 주기 동안 자속의 평균값이 0이라는 성질을 사용하였다. 따라서 잔류자속이 존재하는 경우에는 평균값이 0이 아니므로, 초기 자속값을 정확하게 구할 수 없다.

본 논문에서는 잔류자속이 존재하는 경우에도 왜곡된 전류의 보상이 가능한 방법을 제시한다. 제시한 방식은 2차

전류의 2차 차분값을 이용하여 포화 시작 순간을 판단하고, 포화 순간의 2차 차분의 음의 값을 자화곡선에 대입하여 초기 자속을 결정하게 된다. 이후, 초기 자속과 2차 전류로부터 매 순간의 자속을 계산하게 되고, 이 값을 자화곡선에 대입하여 매순간의 자화전류를 계산한다. 계산된 자화전류를 측정된 2차 전류에 더하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하게 된다. 사고 위상각, 잔류자속, 1차 시정수 및 자동 재폐로의 경우에 대하여 제시한 방식의 성능을 검증하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 기존의 변류기 보상 알고리즘[2]

그림 1은 간략화한 변류기의 등가회로이다.  $L_m$ 은 자화 인덕턴스이고,  $R$ 은 2차 권선 저항이다.  $i_1$ ,  $i_m$ ,  $i_2$ 는 각각 변류비로 나눈 1차 전류, 자화 전류, 2차 전류이다. 변류기가 포화 되면  $L_m$ 은 매우 작아 지고, 그로 인해 2차 전류가 왜곡된다.

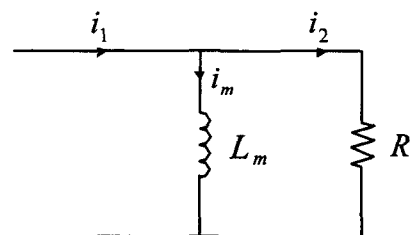


그림 1 간략화한 변류기 등가회로  
Fig. 1 A simplified equivalent circuit of a CT

\* 正 會 員 : 全 北 大 電 子 情 報 工 學 部 助 教 授 · 工 博  
\*\* 準 會 員 : 全 北 大 電 子 情 報 工 學 部 碩 士 課 程  
接受日字 : 2003年 1月 22日  
最終完了 : 2003年 5月 7日

$i_1$ ,  $i_m$  그리고  $i_2$ 의 관계를 식 (1)에 나타내었다.

$$i_1 = i_m + i_2 \quad (1)$$

$i_2$ 는 입력 전류이므로  $i_m$ 을 알 수 있다면, 변류기가 포화 되더라도  $i_1$  즉, 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있다.

철심 자속  $\lambda$ 와  $i_2$ 와의 관계를 식 (2)에 나타내었다.

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = Ri_2(t) \quad (2)$$

식 (2)를  $t_0$ 부터  $t$ 까지 적분하면 식 (3)과 같다.

$$\lambda(t) - \lambda(t_0) = R \int_{t_0}^t i_2(t) dt \quad (3)$$

만일  $\lambda(t_0)$ 를 알 수 있다면 식 (3)으로부터  $\lambda(t)$ 를 구할 수 있다. 참고문헌 [2]에서는  $\lambda(t)$ 의 한 주기 평균이 0이라는 가정아래,  $\lambda(t_0)$ 를 구하는 방식이 제안되었다. 하지만, 잔류자속이 존재한다면 정확한  $\lambda(t_0)$ 를 구하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 잔류자속이 존재하는 경우에도 왜곡된 2차 전류를 보상할 수 있는 방법을 제안한다.

### 2.2 개선된 변류기 보상 알고리즘

$i_1(t)$ 는  $t < 0$ ,  $i_1(t) = 0$ 이고,  $t \geq 0$ 일 때, 식 (4)와 같다.

$$i_1(t) = I_{max} [\cos(\omega t - \theta) - e^{-t/T_s} \cos \theta] \quad (4)$$

여기서,  $I_{max}$ ,  $T_p$ ,  $\theta$ 는 각각 최대 사고 전류, 1차 시정수, 사고 개시 위상각이다.  $i_2(t)$ 는 식 (5)와 같다.

$$i_2(t) = Ae^{-t/T_s} + Be^{-t/T_p} - C \sin(\omega t - \theta - \varphi) \quad (5)$$

여기서,  $T_s$ 는 2차 시정수이며,  $\tan \varphi = \omega T_s$  [3]이다. 식 (5)의 첫째, 둘째항은  $T_s$ 와  $T_p$ 에 따라 감소하고, 정현항의 크기  $C$ 는 식 (6)에 나타내었다.

$$C = I_{max} \omega T_s \cos \varphi = I_{max} \frac{\omega T_s}{\sqrt{(1 + (\omega T_s)^2)}} \quad (6)$$

이산화 2차 전류  $i_2[n]$ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$i_2[n] = Ae^{-nT/T_s} + Be^{-nT/T_p} - C \sin\left(\frac{2\pi}{N}n - \theta - \varphi\right) \quad (7)$$

여기서,  $T$ 는 샘플간격이며,  $N$ 은 주기당 샘플수이며, 이는 지속적으로 감소하는 두 개의 지수항과 한 개의 정현항으로 이루어져 있다.  $i_2[n]$ 의 1차 차분 함수는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} del1[n] &= i_2[n] - i_2[n-1] \\ &= A(1 - e^{T/T_s})e^{-nT/T_s} + B(1 - e^{T/T_p})e^{-nT/T_p} \\ &\quad - C(2 \sin \frac{\pi}{N}n - \theta - \varphi - \frac{\pi}{N} + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (8)$$

주파수가 60Hz이고  $N=64$ 이라면  $T=0.26ms$ 가 된다.  $T_s =$

1s 이고  $T_p=0.02s$  이면, 두 지수항의 감소율 즉,  $(1-e^{T/T_s})$ 과  $(1-e^{T/T_p})$ 은 각각 0.0026과 0.0131이 된다. 따라서, 시정수가  $T$ 보다 충분히 크다면,  $del1[n]$ 에 있는 지수항은 무시 가능하고,  $del1[n]$ 에 있는 정현항의 크기는  $2 \sin(\pi/N)C = 0.098C$ 가 된다. 즉,  $i_2[n]$ 에 있는 정현 성분의 크기 중에서 약 10%만 남는다.

$i_2[n]$ 의 2차 차분 함수  $del2[n]$ 는 식 (9)와 같이 정의된다.

$$del2[n] = del1[n] - del1[n-1] \quad (9)$$

여기서  $C=100A$ 이고,  $N=64$ 인 경우에는,  $del2[n]$ 의 크기는  $[2 \sin(\pi/N)]^2 C = 0.009604C$  즉,  $i_2[n]$ 의 정현항 크기의 1%이 된다.

$n=m+1$ 에서 포화가 처음 시작한다고 가정한다.  $i_{21}[n]$ 과  $i_{22}[n]$ 을 각각 포화 이전과 이후의 전류라 하면, 이들은 식 (7)의 형태를 가진다. 또한,  $i_{21}[m]=i_{22}[m]$ 이며,  $i_{21}[m+1] \neq i_{22}[m+1]$ 이다. 여기서,  $i_{21}[m+1]$ 은 실제의 점이 아닌, 그림 2에서의 나타낸 바와 같이 연장선상의 값이 된다.

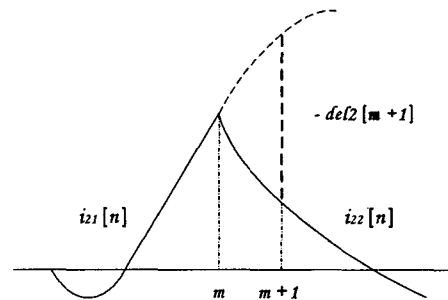


그림 2 2차 전류와 이의 2차 차분

Fig. 2 The secondary current and its second-difference

만일  $[2 \sin(\pi/N)]^2 C$ 가 매우 작다면,  $del2[n]$ 은 처음 포화순간을 판단하는데 사용할 수 있다.  $C=100A$ 이고  $N=64$ 인 경우에는  $[2 \sin(\pi/N)]^2 C = 0.96A$ 가 된다.  $n \leq m$ (포화이전)인 구간에서는  $del2[n]$ 은 정현파가 되며, 그 크기는 0.98A를 넘지 않는다. 또한, 포화시작 순간인  $n=m+1$ 에서 2차 차분은 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} del2[m+1] &= i_{22}[m+1] - 2i_{22}[m] + i_{21}[m-1] \\ &= i_{22}[m+1] - 2i_{21}[m] + i_{21}[m-1] \end{aligned} \quad (10)$$

또한, 식 (11)의 근사화가 가능하며, 이의 오차의 한계는 0.96 A이다.

$$i_{21}[m+1] - 2i_{21}[m] + i_{21}[m-1] \approx 0 \quad (11)$$

따라서,  $del2[m+1]$ 은  $i_{22}[m+1] - i_{21}[m+1]$ 로 근사할 수 있다. 여기서  $i_{21}[m+1]$ 은 가상의 연장선상의 점이므로, 변류기가 포화되지 않았을 때,  $n=m+1$ 인 순간의 값이라고 간주할 수 있다. 그러므로,  $del2[m+1]$ 은 자화전류 즉, 자화가 지로 흐르는 전류에 음의 부호를 붙인 값이 된다. 이의 크기는 그 순간의 포화의 정도에 의존하며, 0.96 A보다 크므로,  $del2[n]$ 를 포화개시 순간을 판단하는데 사용될 수 있고, 식 (12)를 만족하면 포화개시 순간이라고 검출한다.

$$|det2[n]| \geq Th \quad (12)$$

포화개시 순간을 검출하는 알고리즘에 사용되는 임계값은 식 (13)을 사용하였다.

$$Th = k\sqrt{2}I_{fmax}[2 \sin(\pi/N)]^2 \quad (13)$$

$I_{fmax}$ 는 최대 사고전류이며,  $k$ 는 저역 통과필터와 포화검출의 민감도를 고려한 요소이다.

$-det2[m+1]$ 가 포화 개시 순간의 자화전류의 값이므로, 자화곡선에  $-det2[m+1]$ 을 대입하면 포화 시작 순간의 자속의 값을 알 수 있다. 이 값을 자속 계산을 위한 초기 자속의 값으로 사용하여, 매 순간마다 식 (3)을 사용하여 자속을 계산하고, 이것을 자화곡선에 대입하여 그 순간의 자화 전류를 구한 다음, 2차 전류를 더 하면, 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있다. 본 논문에서 제시한 보상 알고리즘의 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

### 3. 사례연구

#### 3.1 모델계통

제시한 알고리즘 성능을 검증하기 위해 그림 4와 같은 345 kV의 송전선 모델계통을 선택하였다. 100 km의 송전선로로 P 모선으로부터 2 km 지점에 A상 지락사고를 모의하였다. 샘플링 비율은 주기당 64샘플이며, 차단 주파수가 1920 Hz인 1차 RC 저역통과 필터를 사용하였다.

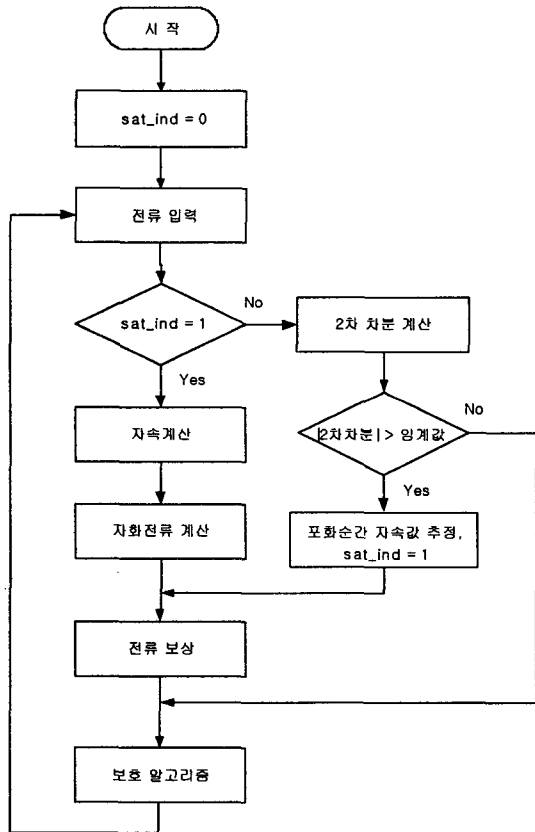


그림 3 제시한 알고리즘의 흐름도  
Fig. 3 The flow chart of the proposed algorithm

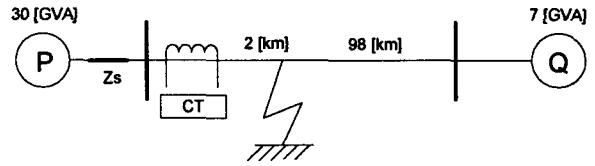


그림 4 모델 계통  
Fig. 4 Single line diagram of the system

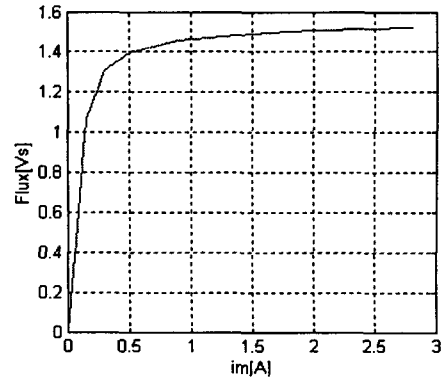


그림 5 보상에 사용한 자화곡선  
Fig. 5 Magnetization curve of the CT for compensation

참고문헌 [4]의 변류기 모델링 방법을 참조하여 EMTP를 이용하여 데이터를 생성하였다. C400 변류기를 3.42Ω의 저항성부담에 연결하였으며, HYSDAT을 이용하기 위한 포화점은 (2.047 A, 1.512 Vs)을 선택하였다. 그림 5는 본 논문에서 보상에 사용된 자화곡선을 나타낸다.

사고 발생 순간에, 2차 전류는 2차 차분 값이 임계값 이상의 값을 가질 수 있다. 이러한 경우에 포화 개시 판단 알고리즘의 오동작을 방지하기 위해, 본 논문에서는 전류가 정격전류의 3배를 연속하여 3번 초과하면, 포화개시 판단 알고리즘을 동작시켰다. 포화 개시 검출에 대한 임계값은  $k$ 의 값을 2로 한 1.9 A를 사용하였다.

제시한 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 참고문헌 [5]의 과도오차를 계산하는 식 (14)를 사용하였다.

$$transient\ error[\%] = \frac{(K_n \cdot i_2 - i_1)}{\sqrt{2} \cdot I_{psc}} \times 100 \quad (14)$$

사고 위상각, 잔류자속, 전원 시정수 및 자동 재폐로의 경우에 대하여 제시한 알고리즘의 성능을 시험하였다.

#### 3.2 사고 위상각에 따른 경우

변류기 포화에 큰 영향을 미치는 직류 윗 성분은 사고 위상각에 따라 크기가 달라진다. 본 절에서는 0도, 시정수 20 ms, 잔류자속이 0%인 경우에 대하여 제시한 방식의 성능을 시험하였다.

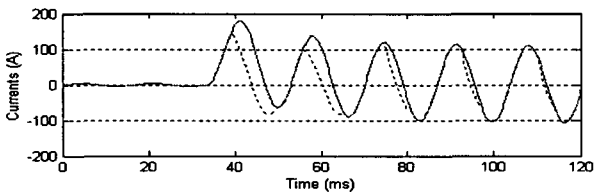
그림 6a의 실선은 변류비에 맞는 2차 전류이고, 점선은 측정된 2차 전류이다. 이 사고는 0도 사고이므로 많은 직류 윗 성분에 의해 변류기가 포화되어 2차 전류가 왜곡됨을 알 수 있다. 2차 차분을 이용하여 포화를 판단하였고(39.3 ms), 이후 식 (3)을 이용하여 계산한 자속을 그림 6b에 나타내었다. 그림 6b의 자속을 그림 5의 자화곡선에 대입하여 추정된 자화전류를 그림 6c에 나타내었다. 추정된 자화전류

에 측정된 2차 전류를 더하여 구한 보상한 2차 전류와 변류비에 맞는 2차 전류를 그림 6d에 나타내었다. 추정된 2차 전류의 정확도를 검증하기 위하여, 식 (14)를 이용하여 계산한 과도오차를 그림 6e에 나타내었다. 그 최대 크기는 1.1%로써, 제안한 방식이 왜곡된 전류를 정확하게 보상함을 알 수 있다.

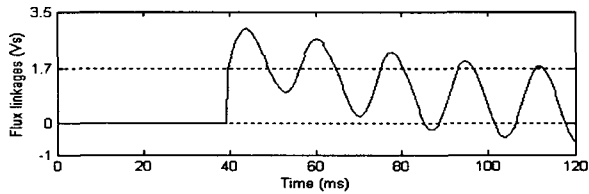
3.3 초기 잔류자속이 존재하는 경우

잔류자속은 포화의 시작, 지속 시간, 정도에 큰 영향을 주는 요소이다. 따라서, 초기 잔류자속이 존재하는 경우에 제시한 방식의 성능을 검증하였다.

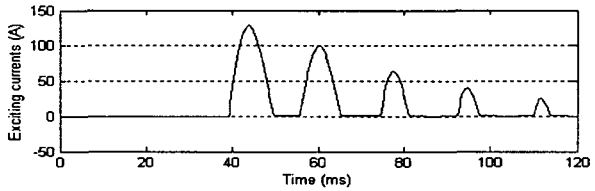
그림 7은 포화점의 +80%에 해당되는 잔류자속이 철심에 존재하는 경우에 대한 결과이다. 양의 방향 잔류자속으로 인해 변류기는 그림 6의 경우보다 일찍(36.7 ms) 포화된다. 하지만, 제안한 알고리즘이 포화를 검출하여, 자속을 계산하여 보상을 실시하였으며, 과도오차는 0.5%미만으로 매우 작았다.



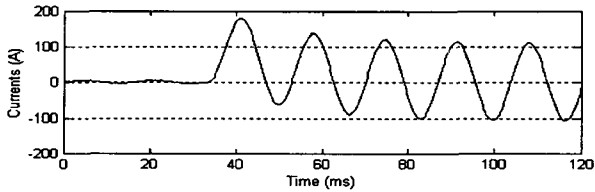
(a) 변류비로 나눈 1차 전류, 측정된 2차 전류



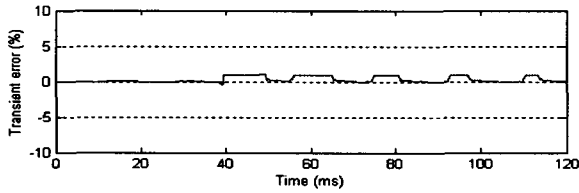
(b) 자속



(c) 자화 전류



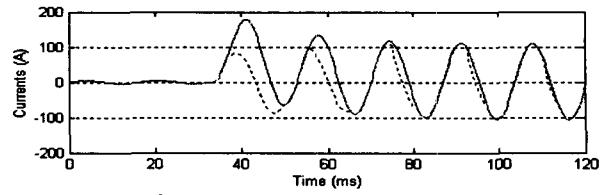
(d) 변류비에 맞는 2차 전류와 보상한 2차 전류



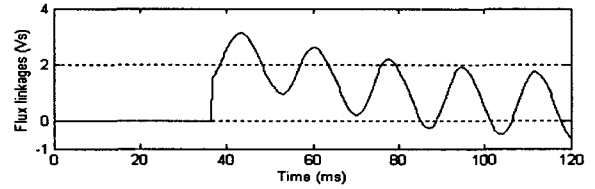
(e) 과도오차

그림 6 0도 사고의 경우

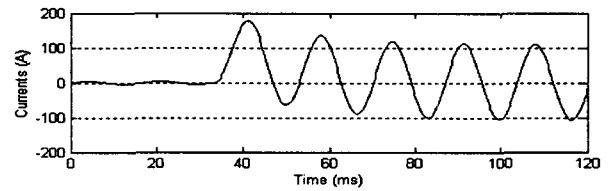
Fig. 6 The results in the case of 0 deg inception angle



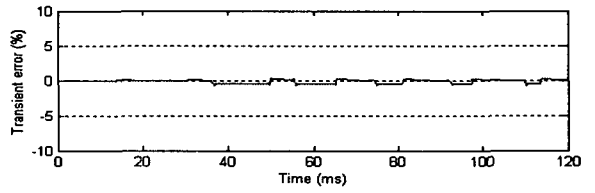
(a) 변류비로 나눈 1차 전류, 측정된 2차 전류



(b) 자속



(c) 변류비에 맞는 2차 전류와 보상한 2차 전류



(d) 과도오차

그림 7 잔류자속이 +80%인 경우

Fig. 7 The results in the case of 80% remanent flux

그림 8은 포화점의 -80%의 잔류자속이 존재하는 경우에 대한 결과이다. 음의 잔류자속이 존재하기 때문에 그림 8은 그림 6, 7의 사례들에 비해 변류기가 더 늦게(41.4 ms) 포화되었다. 그림 8b와 그림 8c에서 보여 준 바와 같이 -80%의 잔류자속이 존재하여도 제시한 보상 알고리즘으로 보상한 결과 0.6% 미만의 과도오차로 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다.

위의 두 경우의 결과로써 제시한 알고리즘은 초기에 잔류자속이 존재하더라도, 포화 시에 변류비에 맞는 2차 전류를 정확하게 추정함을 알 수 있다.

3.4 전원 시정수에 따른 경우

전원시정수가 클수록 포화 지속시간이 길어지고, 고압 계통일수록 전원 시정수가 크다. 본 논문에서는 전원 시정수가 200 ms인 경우, 0도 사고, 잔류자속 +80%인 경우에 대해 제시한 방식을 시험하였다.

시정수가 20 ms인 경우(그림 8a)와 비교했을 때 그 포화는 더 오래 지속되고, 전류가 심하게 왜곡됨을 알 수 있다. 하지만, 제시한 방식은 왜곡된 2차 전류를 정확하게 보상하였으며, 과도오차는 0.6% 미만이었다.

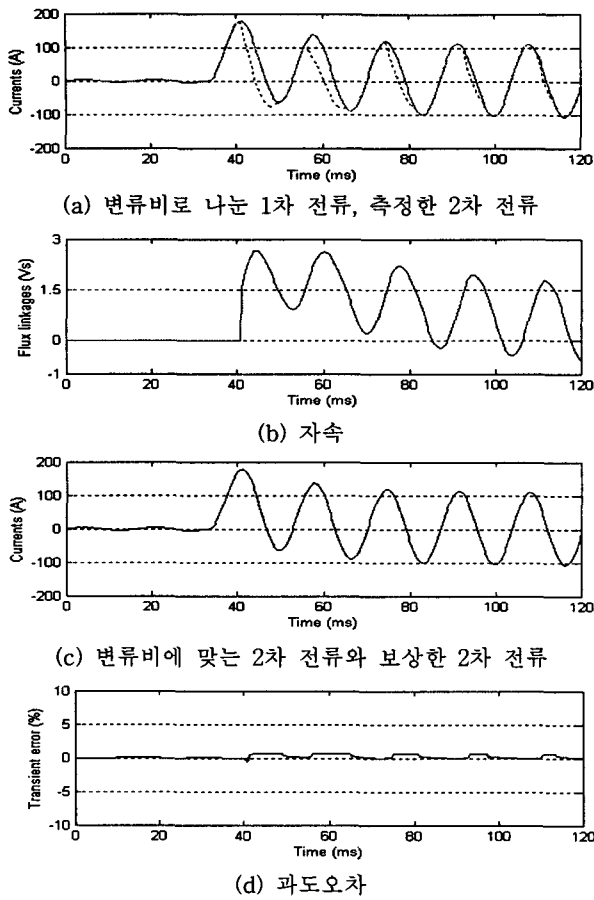


그림 8 잔류자속이 -80%인 경우  
 Fig. 8 The results in the case2 of -80% remanent flux

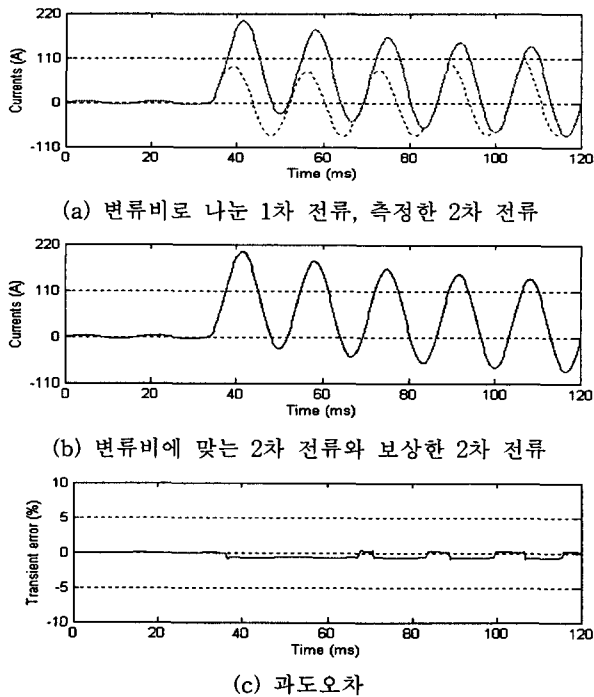


그림 9 전원 시정수가 200 ms인 경우  
 Fig. 9 The results in the case of the primary time constant of 200ms

### 3.5 자동 재폐로시 잔류자속이 존재하는 경우

사고 발생시 계전기가 사고를 판단하여 차단기를 개방하여 1차 회로가 개방된 이후에, 변류기 코어에 잔류 자속이 남게 되고, 이로 인하여 재폐로 이후에 2차 전류가 심하게 왜곡된다. 이러한 경우에 제시한 방식의 성능을 시험하기 위해, 본 절에서는 200 ms 시정수의 경우, 90도 사고와 0도 사고의 경우에 대하여 사례연구를 수행하였다.

그림 10은 90도 사고의 경우이다. 이 사고는 90도 사고이므로 직류 성분이 없으므로, 1차 회로를 개방(45.7 ms)하기 전에 약한 포화가 발생하였다. 그런데, 개방 후에는 잔류자속이 존재하여, 재폐로(87 ms) 이후에는 전류가 개방 전보다 심하게 왜곡됨을 알 수 있다(그림 10a). 재폐로 후 심한 포화가 발생하여 2차 전류가 심하게 왜곡되었지만 제시한 알고리즘은 정확하게 보상을 실시하였고(그림 10b), 그 오차는 1.5%미만이다.

그림 11은 0도 사고의 경우, 재폐로의 결과를 나타낸 것이다. 차단기 개방은 47.6 ms, 재폐로는 83.3 ms에서 실시하였다. 이 사고는 0도 사고이므로, 큰 직류 성분으로 인해 사고제거 전에 변류기가 포화됨을 알 수 있다. 그림 11b는 포화 개시 판단 이후의 계산한 자속을 도시한 것으로 1차측 회로 개방 후에 양의 방향의 잔류자속을 가지게 되고, 이는 시간이 지남에 따라 감소하여 재폐로 순간에는 1.44 Vs의 자속이 존재하였다. 이 잔류자속으로 인하여, 재폐로 이후에 전류가 매우 심하게 왜곡되었다. 또한 이 경우에는 1차 회로가 개방이 된 이후에도 2차 전류는 값이 존재하는데, 이러한 전류는, 차단 실패시에 사용되는 과전류 계전기의 리셋을 지연시킨다. 제시한 알고리즘은 재폐로 이전 및 이후의 왜곡된 2차 전류를 정확하게 보상하였다(그림 11c와 11d).

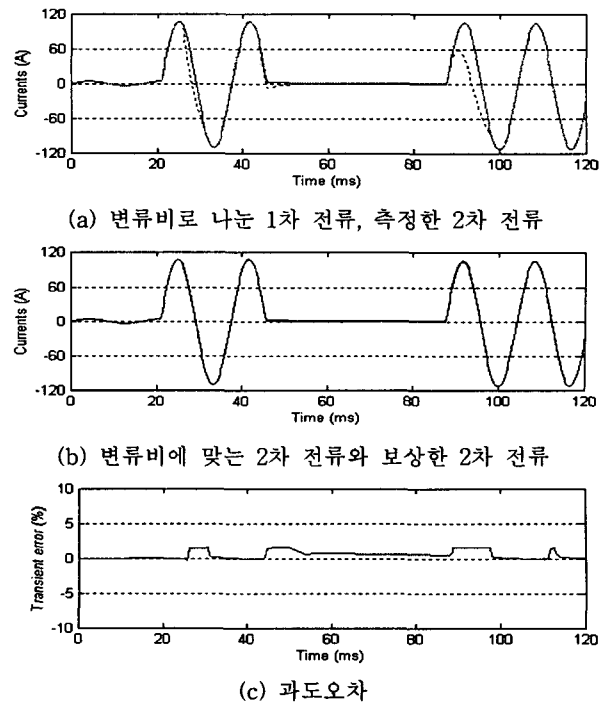


그림 10 90도 사고시의 자동 재폐로  
 Fig. 10 The results in the case of auto-reclosure

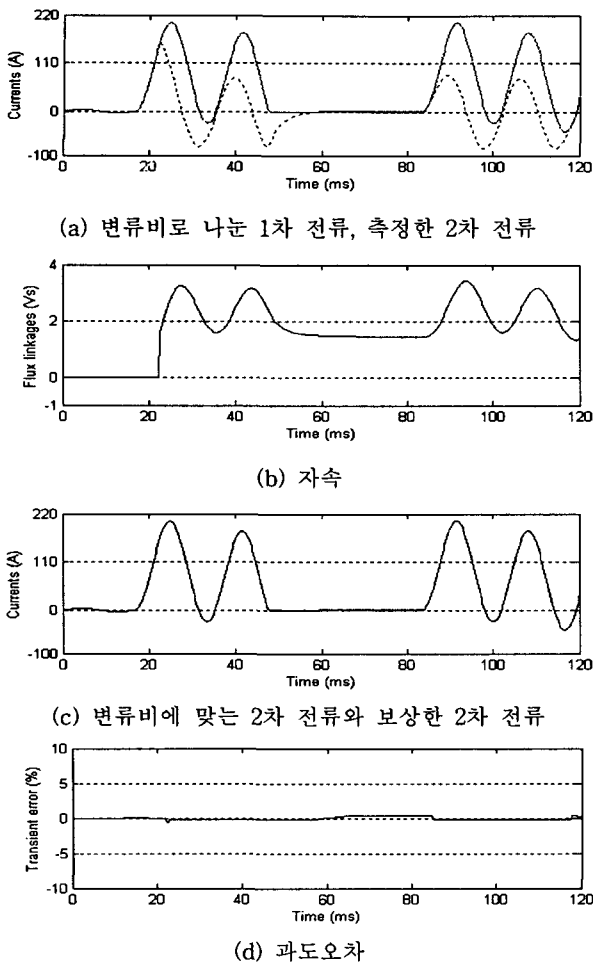


그림 11 0도 사고시의 자동재폐로

Fig. 11 The results in the case of auto-reclosure

### 3. 결 론

본 논문에서는 잔류자속에 영향을 받지 않는 변류기 2차 전류 보상 알고리즘을 제안하였다. 제시한 방식은 전류의 2차 차분을 이용하여 포화 시작 순간을 검출하고, 음의 2차 차분값을 자화곡선에 대입하여 그 순간의 자속을 얻게 된다. 이후, 이 값을 초기 자속으로 사용하여, 전류로부터 매순간 자속을 계산한다. 계산한 자속을 자화곡선에 대입하여 얻은 자화전류를 입력전류와 더하여 왜곡된 2차 전류를 변류비에 맞는 2차 전류로 보상한다.

제시한 방식을 사고 위상각, 잔류자속, 시정수 및 재폐로의 경우에 대해서 시험한 결과, 변류기 포화로 인하여 심하게 왜곡된 2차 전류를 정확하게 보상을 알 수 있었다. 제시한 보상알고리즘은 전류를 이용하는 각종 계전기의 성능을 향상시키는데 사용될 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. A. Bradley, C. B. Gray, and D. O'Kelly, "Transient compensation of current transformers," *IEEE Trans. on PAS*, vol. 97, no. 4, July/August 1978, pp. 1264-1271
- [2] Y. C. Kang, J. K. Park, S. H. Kang, A. T. Jones, and R. K. Aggarwal, "An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 12, no. 1, January 1997, pp. 116-124
- [3] S. H. Horowitz, and A. G. Phadke, *Power System Relaying*, Research Studies Press LTD. 1992
- [4] M. Kezunovic, L. Kojovic, A. Abur, C. W. Fromen, and F. Phillips, "Experimental Evaluation of EMTF-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study," *IEEE Trans. PWRD*, vol. 9, no. 1, January 1994, pp. 405-413
- [5] *IEC 44-6, International Standard Part 6, Current Transformers*, 1992

### 저 자 소 개



#### 강 용 철 (姜 龍 撤)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재, 전북대 공대 전자정보공학부 조교수. 차세대전력기술연구센터  
Tel: 063-270-2391, Fax: 063-270-2394  
E-mail : yckang@moak.chonbuk.ac.kr



#### 임 의 재 (林 義 宰)

1976년 6월 24일생. 2002년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 3월 - 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.  
Tel: 063-270-2391, Fax: 063-270-2394  
E-mail : zodiac76@hanmail.net