

변류기 포화 판단 알고리즘의 저역통과 필터에 대한 성능 분석

論 文
51A-10-2

Performance Analysis of a Lowpass Filter on a CT Saturation Detection Algorithm

姜龍澈* · 玉昇勳** · 尹在晟*** · 姜相熙§
(Y. C. Kang · S. H. Ok · J. S. Yun · S. H. Kang)

Abstract - A difference based current transformer (CT) saturation detection algorithm uses the third difference of a secondary current to detect the instants of the beginning/end of saturation. The third difference of a secondary current contains high frequency components when a CT is saturated. Thus, an effect of an anti-aliasing lowpass filter implemented in digital protection relays on the detection algorithm should be studied.

This paper describes performance analysis of a lowpass filter on the CT saturation detection algorithm. The cutoff frequency of the lowpass filter is normally set to be half of a sampling frequency. In this paper, two sampling frequencies of 3,840 (Hz) corresponding to 64 sample/cycle (s/c) and 1,920 (Hz) corresponding to 32 (s/c) are studied; the cutoff frequencies of the lowpass filters are set to be 1,920 (Hz), 960 (Hz) and 960(Hz), 480(Hz), respectively. And the proposed algorithm is verified by experiment. A 2nd order Butterworth filter is designed as a lowpass filter. The test results and experiment results clearly indicate that the saturation detection algorithm successfully detects the instants of the beginning/end of saturation even though a secondary current is filtered by the designed lowpass filters.

Key Words : CT saturation, detection, difference, remanent flux, lowpass filter, high frequency components

1. 서 론

철심 변류기는 철심 코어를 사용하기 때문에 비선형 특성을 가지고 있으며, 이로 인해 변류기가 포화되는 경우에 2차 전류가 왜곡되어 계전기가 오동작을 하거나 동작 시간이 지연된다. 따라서, 전류를 이용하는 계전기는 변류기 포화에 대한 대책을 고려해야 한다. 특히, 전류차동 계전 방식의 경우에는 변류기 포화에 대한 별도의 대책을 반드시 구비하여야 한다.

변류기 2차전류 크기의 평균과 분산, 그리고 오차의 평균을 추정함으로써 CT의 포화를 판단하는 방법이 제안되었다.[1] 이 오차는 2차 전류가 완전 정현일 때, 전류와 전류의 2차 도함수의 합이 제로라는 가정에서 유도되었다.

변류기 2차 전류와 2차 파라미터로부터 철심 자속을 계산하여 포화를 판단하고, 변류기가 포화되면 왜곡된 전류를 보상하는 방식이 개발되었다.[2] 이 방식은 심하게 포화된 경우에도 포화를 정확히 판단하지만, 초기에 자속이 있는 경우에는 오차를 포함할 수 있다.

초기에 잔류 자속이 존재하여 변류기가 포화되는 경우에도, 포화를 검출하기 위하여 2차 전류의 차분을 이용하는 방

식이 제안되었다.[3] 제안된 방법은 변류기 포화개시/포화종료 시점을 전후로 해서 코어의 자화 인덕턴스가 심하게 변하므로, 포화 후(전)의 2차 전류가 포화 전(후)과 매우 다른 모습을 갖게 되는 점에 착안하였다. 이 방식은 포화개시/포화종료 순간을 판단하기 위해 변류기 전류의 3차 차분을 사용한다. 그런데, 포화된 전류의 3차 차분에는 포화개시/포화종료 순간에 고주파 성분이 많이 포함되어 있다. 그러므로, 디지털 계전기에서 중첩방지용으로 사용하고 있는 저역통과 필터가 차분을 이용한 변류기 포화 판단 알고리즘의 성능에 영향을 주게 된다.

본 논문에서는 저역통과 필터가 차분을 이용한 변류기 포화 판단 알고리즘에 미치는 영향을 분석했다. 일반적으로 디지털 계전기의 저역통과 필터의 저지대역 차단 주파수는 샘플링 주파수의 1/2로 설계된다. 본 논문에서는 주기 당 샘플수가 64샘플과 32샘플인 경우에 차단 주파수를 달리하여 변류기 포화 판단 알고리즘에 대한 영향을 분석하였고, 실험을 통해 제안한 내용의 타당성을 입증하였다.

2. 차분을 이용한 변류기 포화 검출 알고리즘

변류기가 포화개시/포화종료 되는 순간에, 변류기의 자화 인덕턴스는 매우 급격하게 변한다. 따라서, 변류기 2차 전류는 포화 시와 비포화 시에 서로 다른 인덕턴스 값을 갖게 되고, 결과적으로 2차 전류는 포화개시/포화종료 순간을 전후로 하여, 서로 다른 모습의 파형을 갖게 된다. 이러한 관점에서 서로 다른 두 개의 파형이 만나는 순간을 변류기의 포화개시/포화종료 시점으로 판단할 수 있다. 이러한 포화개시/포화종료 시점을 찾기 위해 2차 전류의 차분을 이용하였다.[3]

* 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 氣 工 學 科 碩 士 卒 業
*** 正 會 員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
§ 正 會 員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博
接受日字 : 2002年 2月 19日
最終完了 : 2002年 7月 25日

이산화한 2차 전류를 $i_2[n]$ 이라 하면, 2차 전류의 1차 차분 $del1[n]$, 2차 차분 $del2[n]$, 3차 차분 $del3[n]$ 은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$del1[n] = i_2[n] - i_2[n-1] \quad (1)$$

$$del2[n] = del1[n] - del1[n-1] \quad (2)$$

$$del3[n] = del2[n] - del2[n-1] \quad (3)$$

그림 1은 변류기 2차 전류와 $del1$ 을 나타냈다. 그림에서 점선은 포화되지 않은 2차 전류와 $del1$ 을, 실선은 포화된 2차 전류와 $del1$ 을 나타냈다. 포화되지 않은 경우 자화 인덕턴스가 하나의 값을 갖게 되므로, 2차 전류와 $del1$ 은 모두 연속이다. 하지만 포화된 경우에는 포화 전후에서 자화 인덕턴스가 급격하게 변하므로, 2차 전류는 포화되지 않은 2차 전류와 다른 파형을 갖게 된다. 따라서 포화개시/포화종료 시점에서는, 2차 전류는 연속임에도 불구하고, 1차 차분 $del1$ 은 불연속이 된다. 따라서, 2차 차분을 구해 보면, 그 순간에는 펄스의 형태처럼 큰 값을 갖고 다른 순간에는 작은 값을 갖게 된다. 이러한 현상은 3차 차분의 경우에도 마찬가지이다.

따라서, 2차 차분이 큰 값을 갖게 되면, 그 순간에는 변류기가 포화개시 되거나 포화종료 된다. 그 값은 잔류자속, 포화개시 및 포화종료 순간, 그리고 사고 종류에 따라 다르다. 따라서, 2차 차분의 크기를 사용하게 되면, 시간이 지남에 따라 포화되지 않은 구간에서도 임계값을 넘는 경우가 발생한다. 이런 경우를 대비해서, 3차 차분의 경우에는 포화개시 및 포화종료의 순간을 제외한 구간의 값은 작아지므로, 포화판단이 용이해지는 장점이 있다. 그러므로, 본 논문에서는 포화순간을 보다 정확하게 판단하기 위하여 $del3$ 을 이용하여, 2차 전류의 값이 어느 값 이상일 때, $del3$ 의 절대값이 임계값(Th)보다 크면 그 순간을 포화개시/포화종료 시점으로 판단하였다. 이 알고리즘의 흐름도는 그림 2와 같다.

$$|del3[n]| > Th \quad (4)$$

3. 시뮬레이션 결과

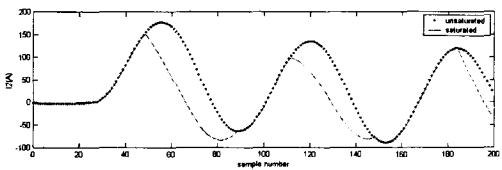
제시한 방법의 타당성을 검증하기 위한 모델계통을 그림 3에 나타냈다. 모델 계통은 154kV 송전선 2모선 계통이다. 모의한 사고는 100km 송전선 중 P 모선측 2km 지점에서 A상 지락 사고가 난 경우이며, 사고 위상각은 0도로 모의하였고, 사고 데이터는 EMTP를 이용하여 생성하였다. 사용된 변류기의 변류비는 2000:5이고, 히스테리시스 특성을 모델링하기 위하여 type-96 소자를 이용하였고, 포화점은 (2.047 A, 1.512 Vs)로 선택하였다. 잔류 자속은 -80에서 +80%까지 변화시켜 테스트하였고, 주기당 샘플 수는 64샘플(3840Hz)과 32샘플(1920Hz)인 경우에 대해 테스트하였다. 이 중에서, 두 가지 샘플에서 잔류자속이 0%, +80%인 경우에 대하여 나타냈다.

3.1 저역 통과 필터

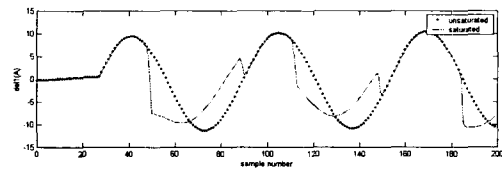
사용된 중첩방지 저역통과 필터는 2차 Butterworth 필터로서, 차단 주파수는 각각의 샘플링 주파수의 1/2과 1/4로 선택하였다. 저지 대역 차단 주파수에서 이득이 0.1, 통과대역에서의 감쇄 지수는 0.7071인 필터를 설계하였다. 그림 4, 그림 5, 그림 6은 설계한 필터의 크기와 위상 특성을 나타냈다.

3.2 주기당 64샘플인 경우

각 사례의 결과인 그림 7에서 그림 15까지는 각각 5개의 파형으로 구성되어 있다. 첫 번째 파형에서 굵은 점선은 포화되지 않은 2차 전류를 나타냈고, 얇은 실선은 포화된 2차 전류를 나타냈다. 두 번째 파형은 2차 전류의 1차차분 $del1$, 세 번째 파형은 2차차분 $del2$, 네 번째 파형은 3차차분 $del3$, 마지막 파형은 포화를 판단하는 detector를 나타냈다. 포화시에는 변류기의 2차측 전류가 줄어들기 때문에, 첫 번째 파형의 포화되지 않은 전류와 포화된 전류가 다른 값을 갖는 구간이 포화되는 구간이다. 본 논문에서는 detector가 포화되는 구간에서는 1을 비포화 구간에서는 0으로 표시하여 변류기 포화구간을 표시하였다.



(a) 2차 전류



(b) del1

그림 1 2차 전류와 del1

Fig. 1 A secondary current and a del1

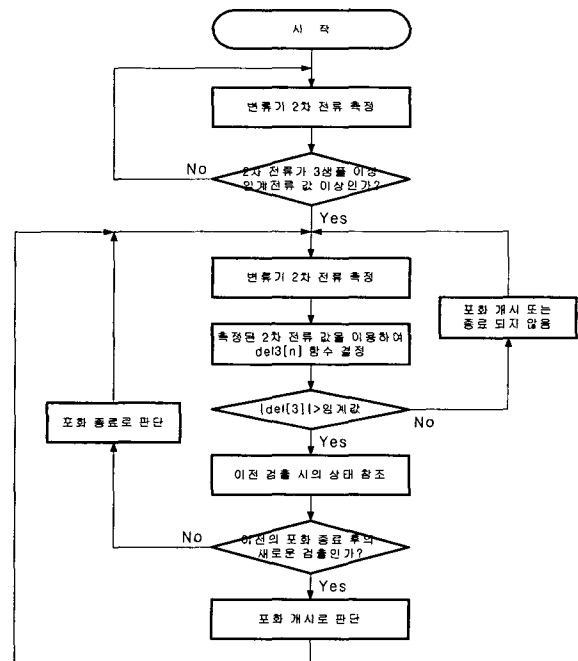


그림 2 제시한 알고리즘의 흐름도

Fig. 2 Flowchart of the proposed algorithm

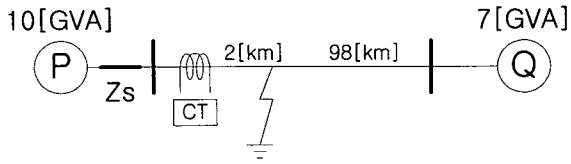


그림 3 모델 계통
Fig. 3 The model system

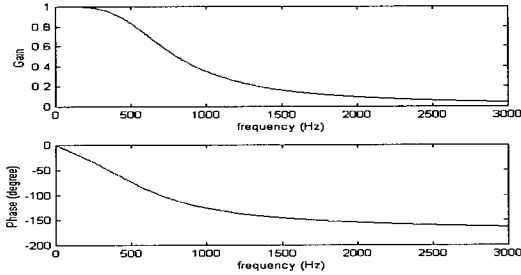


그림 4 차단 주파수가 1920Hz인 저역 통과 필터 특성
Fig. 4 The characteristics of low pass filter with the cut-off frequency of 1920Hz

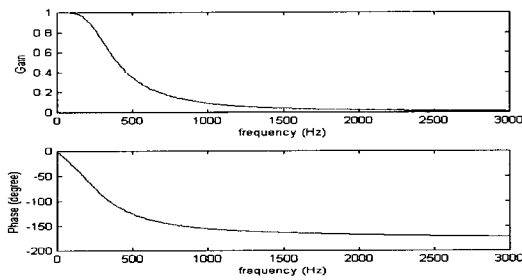


그림 5 차단 주파수가 960Hz인 저역 통과 필터 특성
Fig. 5 The characteristics of low pass filter with the cut-off frequency of 960Hz.

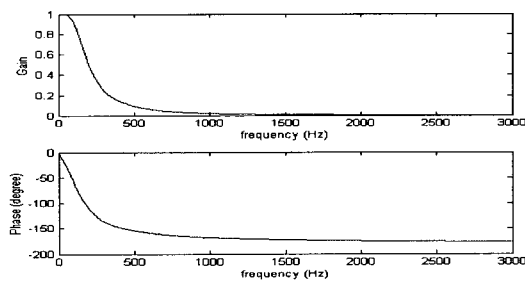


그림 6 차단 주파수가 480Hz인 저역 통과 필터 특성
Fig. 6 The characteristics of low pass filter with the cut-off frequency of 480Hz.

3.2.1 잔류자속 0%

그림 7은 잔류자속 0%에서 필터를 통과시키지 않은 경우에 2차 전류와 차분을 나타냈다. 포화개시/포화종료 되는 순간에서 2차 전류는 연속이지만, del1은 불연속이고, 이때 del2

와 del3은 포화개시/포화종료 시점에서만 큰 값을 갖고 있음을 알 수 있다.

필터를 사용하지 않았기 때문에, 2차 전류는 기본 주파수 성분뿐만 아니라, 고주파 성분의 정보도 그대로 포함하고 있으므로 포화개시/포화종료 되는 순간을 정확하게 구분할 수 있음을 그림 7의 결과로부터 알 수 있다.

그림 8은 잔류자속 0%에서, 샘플링 주파수의 1/2인 차단 주파수 1920Hz 저역통과 필터를 사용한 경우의 결과를 나타냈다. 저역통과 필터의 영향으로 2차 전류는 차단 주파수 이상의 고주파 성분의 크기가 감소하며, 위상이 지연된다. 그림 7과 같이 포화개시/포화종료 시점에서 2차 전류는 연속이지만, del1에서는 포화개시/포화종료 되는 순간 이후에도 영향이 나타난다. 따라서 del3의 경우, 필터를 사용하지 않은 경우에는 포화개시/포화종료 시점에서만 큰 값이 나타났으나, 저역통과 필터를 사용한 경우는 필터의 영향으로 del3의 값의 크기가 줄어들고, 그 값도 몇 샘플 동안 남아있다. 하지만 차단 주파수가 샘플링 주파수의 1/2인 경우에, 저역통과 필터의 영향에도 불구하고 제시한 알고리즘이 포화개시/포화종료 순간을 잘 구분하고 있음을 그림 8의 결과로부터 알 수 있다.

그림 9는 잔류자속 0%에서 샘플링 주파수의 1/4인 차단 주파수 960Hz 저역통과 필터를 사용한 경우의 결과를 나타냈다. 저역통과 필터의 영향으로 del1은 포화개시/포화종료 순간에서 불연속적인 특성이 많이 감소하여 앞의 경우들에 비해 del1의 파형이 많이 부드러워졌음을 알 수 있다. 따라서 del3의 경우, 이전의 경우들에 비해 필터의 영향으로 del3의 값의 크기가 줄어들고, 그 영향도 차단 주파수가 1920Hz인 경우에 비해 더 많은 샘플 동안 남아있어 포화개시/포화종료 순간을 판단하기가 더 어려워졌으나 알고리즘은 포화개시/포화종료 순간을 잘 구분하고 있음을 알 수 있다.

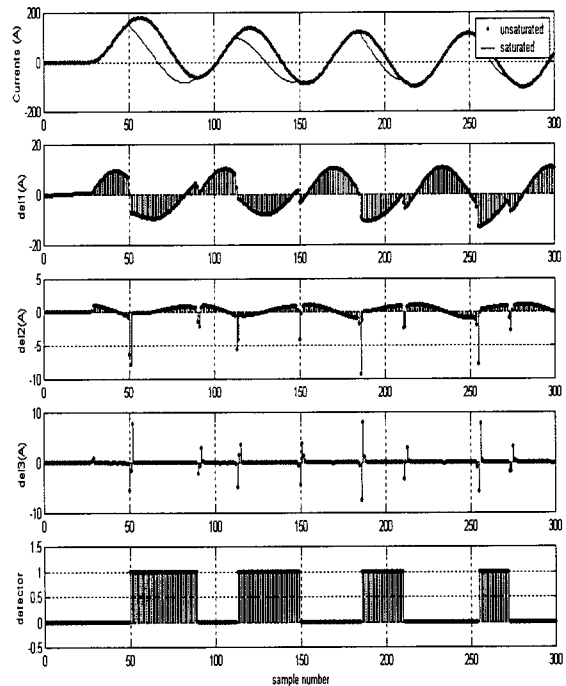


그림 7 필터를 통과시키지 않은 경우 (0%)
Fig. 7 In case of unfiltered (0%)

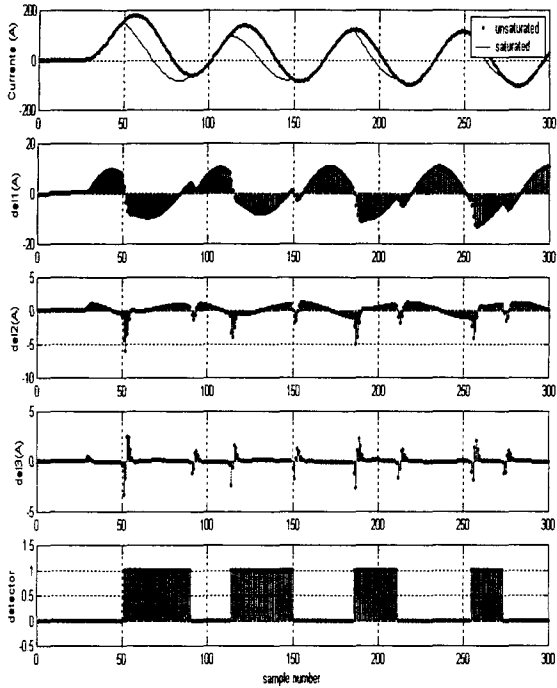


그림 8 차단 주파수가 1920Hz인 경우 (0%)
Fig. 8 In case of the cut-off frequency of 1920Hz (0%)

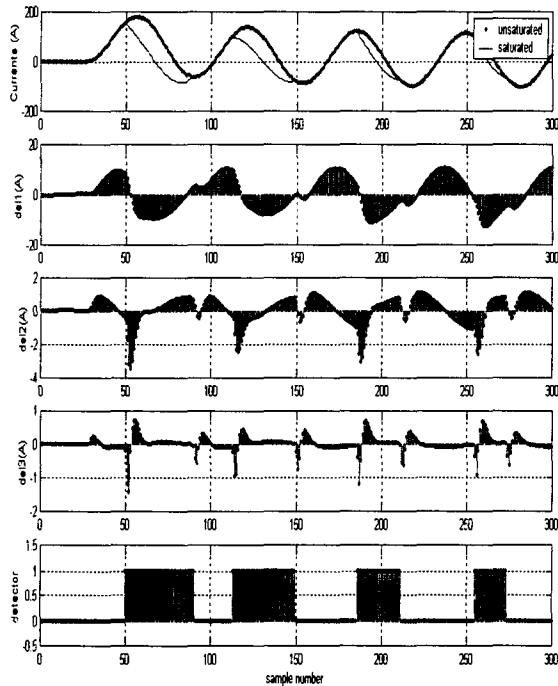


그림 9 차단 주파수가 960Hz인 경우 (0%)
Fig. 9 In case of the cut-off frequency of 960Hz (0%)

3.2.2 잔류자속 +80%

그림 10은 잔류자속 +80% 일 때, 차단 주파수가 1920Hz인 저역통과 필터를 사용한 경우의 결과를 나타냈다. 잔류자속

이 +80%가 남아 있으므로, 잔류자속 0%에 비해 첫 번째 포화개시 시점이 빠르고, 포화의 정도도 심함을 2차 전류를 통하여 알 수 있다. 이 경우에는 특히, 첫 번째 포화가 시작된 후에도 몇 샘플동안 2차 전류가 증가함을 볼 수 있다. 마찬가지로, 포화개시/포화종료 되는 순간에서 del1은 불연속이고, 이때 del2와 del3는 큰 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 잔류자속이 0%인 경우와 마찬가지로, 저역 통과 필터의 영향으로 포화개시/포화종료 시점에서 2차 전류는 연속이지만, del1에서는 포화개시/포화종료 되는 순간과 그 다음 순간에까지 영향이 나타난다. 따라서 del3의 경우, 필터를 사용한 경우 필터의 영향으로 del3의 값의 크기가 줄어들고, 그 값도 몇 샘플 동안 남아있다. 저역통과 필터가 포화개시/포화종료의 순간에 고주파를 감쇄함에도 불구하고 제시한 알고리즘은 포화개시/포화종료 순간을 잘 구분하고 있음을 그림 10의 결과로부터 알 수 있다.

그림 11은 잔류자속 +80%에서 차단 주파수가 960Hz인 저역통과 필터를 사용한 경우의 결과를 나타냈다. 그림 10에 비해, 필터의 영향으로 포화개시/포화종료 순간을 판단하기가 더 어려워졌으나 알고리즘은 포화개시/포화종료 순간을 잘 구분하고 있음을 알 수 있다.

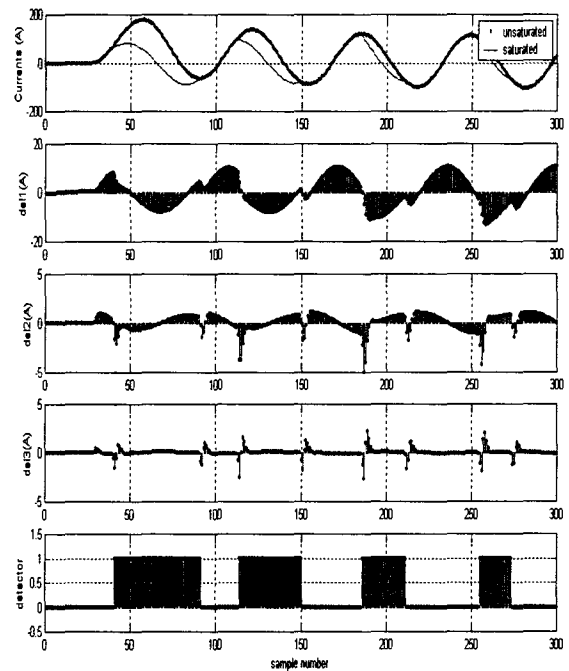


그림 10 차단 주파수가 1920Hz인 경우 (80%)
Fig. 10 In case of the cut-off frequency of 1920Hz (80%)

3.3 주기당 32샘플인 경우

3.3.1 잔류자속 0%

그림 12는 주기당 32샘플, 잔류자속 0% 일 때, 샘플링 주파수의 1/2인 차단 주파수 960Hz 저역통과 필터를 사용한 경우의 결과를 나타냈다. 주기당 32샘플의 경우에는 64샘플에 비해 샘플간의 간격이 커져, 2차 전류의 변화량의 차이가 커지고, 따라서 그 차분 값의 크기도 증가하게 된다. 저역 통과

필터의 영향으로 2차 전류는 차단 주파수 이상의 고주파 성분의 크기가 감소하며, 위상이 지연된다. 따라서 del3의 경우, 필터의 영향으로 del3의 값의 크기가 줄어들어 포화를 판단하기 어려워진다. 또한, 같은 경우에서 차단 주파수가 1920Hz인 필터를 사용한 그림 8에 비해, del1의 불연속적인 특성이 훨씬 둔해졌기 때문에 포화개시/포화종료 시점을 판단하기 어려워진다. 하지만 저역통과 필터의 영향에도 불구하고 제시한 알고리즘이 포화개시/포화종료 순간을 잘 구분하고 있음을 그림 12의 결과로부터 알 수 있다.

그림 13은 잔류자속 0%에서, 샘플링 주파수의 1/4인 차단 주파수 480Hz 저역통과 필터를 사용한 경우를 나타냈다. 그림 12에 비해, 필터의 영향으로 포화개시/포화종료 순간을 판단하기가 더 어려워졌으나 알고리즘은 포화개시/포화종료 순간을 잘 구분하고 있음을 그림 13의 결과로부터 알 수 있다.

3.3.2 잔류자속 +80%

그림 14는 주기당 32샘플, 잔류자속 +80%에서 샘플링 주파수의 1/2인 차단 주파수 960Hz 저역통과 필터를 사용한 경우를 나타냈고, 그림 15는 샘플링 주파수의 1/4인 차단 주파수 480Hz 저역통과 필터를 사용한 경우를 나타냈다. 마찬가지로, 저역 통과 필터의 영향으로 포화 판단이 어려워지지만 저역통과 필터의 영향에도 불구하고 제시한 알고리즘이 포화개시/포화종료 순간을 잘 구분하고 있음을 그림 14과 그림 15의 결과로부터 알 수 있다.

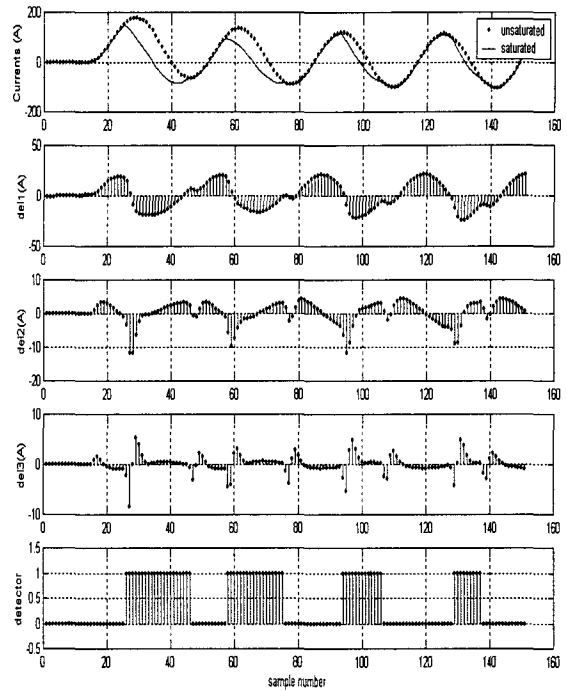


그림 12 차단 주파수가 960Hz인 경우 (0%)
 Fig. 12 In case of the cut-off frequency of 960Hz (0%)

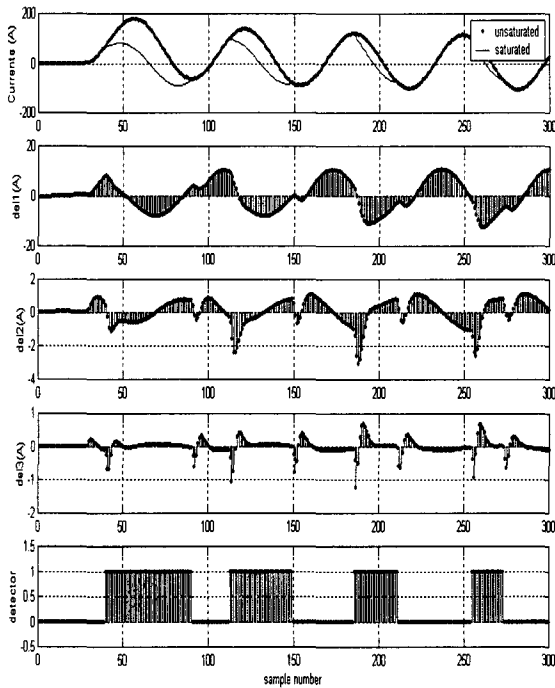


그림 11 차단 주파수가 960Hz인 경우 (80%)
 Fig. 11 In case of the cut-off frequency of 960Hz (80%)

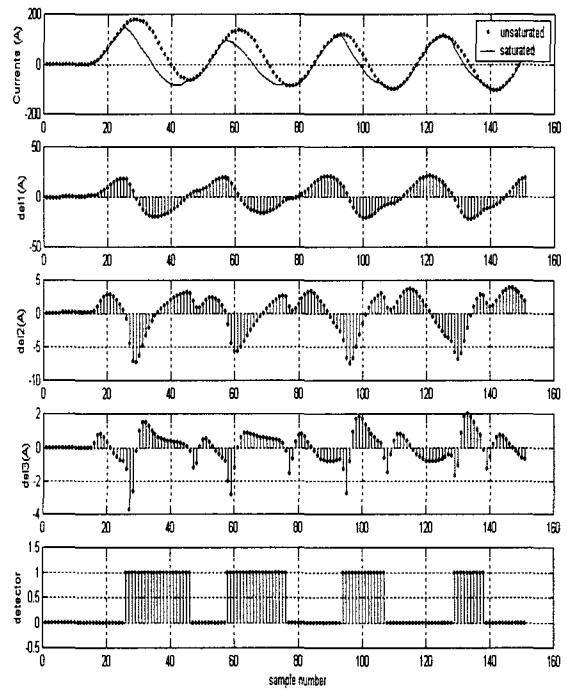


그림 13 차단 주파수가 480Hz인 경우 (0%)
 Fig. 13 In case of the cut-off frequency of 480Hz (0%)

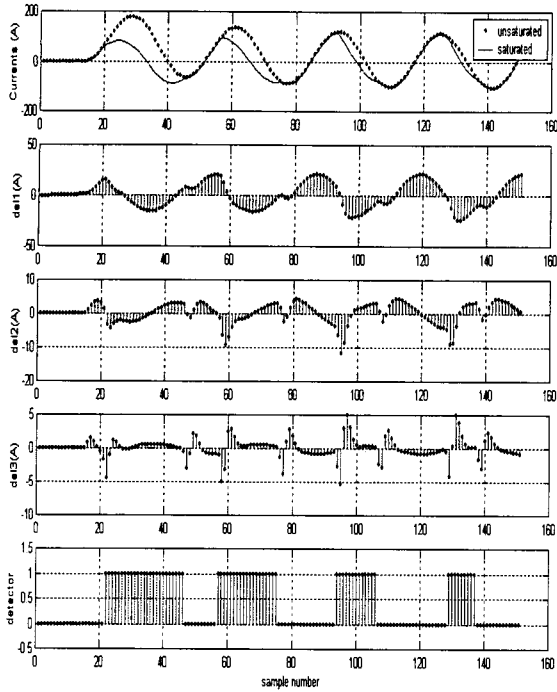


그림 14 차단 주파수가 960Hz인 경우 (80%)
 Fig. 14 In case of the cut-off frequency of 960Hz (80%)

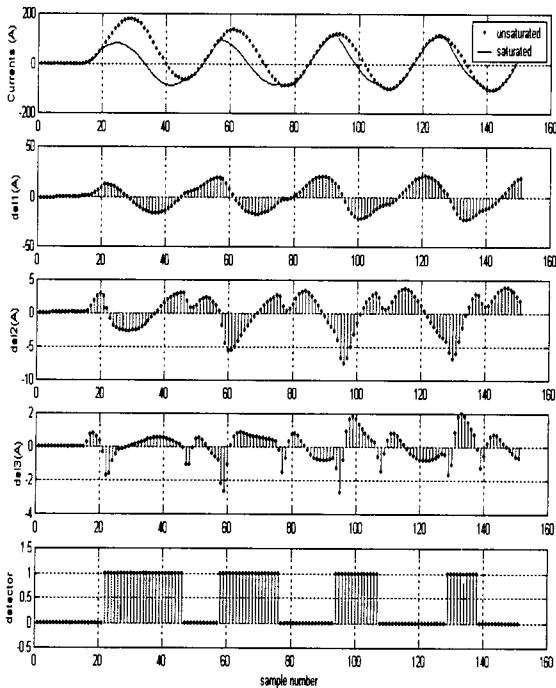


그림 15 차단 주파수가 480Hz인 경우 (80%)
 Fig. 15 In case of the cut-off frequency of 480Hz (80%)

4. 실험 결과

이 절에서는, 계통의 축소 모형을 이용하여 제안한 알고리즘을 실시간으로 테스트한 결과를 나타냈다. 그림 16은 구성

한 실험 회로이다. 사용한 실제 CT의 변류비는 100:5이고, 실시간 구현을 위해 TMS320C6701을 이용하였다.

주기당 64샘플인 경우에, 차단 주파수가 1920Hz인 저역통과 필터를 사용한 경우의 결과를 그림 17과 그림 18에 나타냈다. 실험 결과로부터 del3은 포화 개시/포화종료 순간에 큰 값을 갖게 되고, 제시한 알고리즘이 저역 통과 필터의 영향에도 불구하고, detector는 포화개시/포화종료 순간을 잘 판단하고 있음을 볼 수 있다.

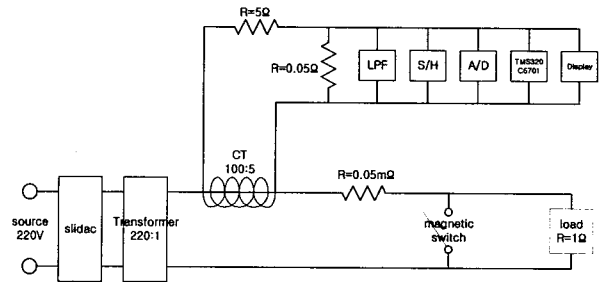


그림 16 변류기 포화 실험 회로도
 Fig. 16 A circuit of CT saturation experiment

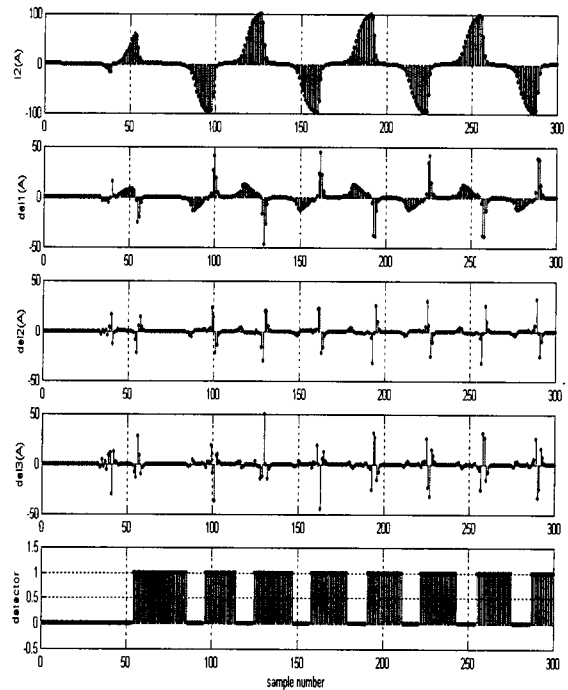


그림 17 실험 결과 1
 Fig. 17 An experiment result 1

5. 결론

본 논문에서는 저역 통과 필터가 변류기 포화 판단 알고리즘에 미치는 영향을 분석하였다. 사례 연구를 통해 주기당 샘플수가 64, 32인 경우, 여러 차단 주파수의 저역 통과 필터에 대한 결과를 보였고, 실험을 통해 제안한 내용의 타당성을 입증하였다.

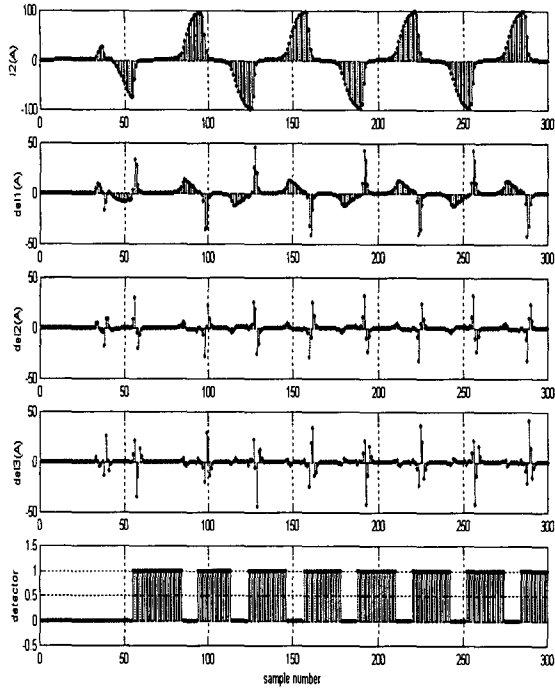


그림 18 실험 결과 2
Fig. 18 An experiment result 2

첫째, 샘플수가 줄어들어 따라, 2차 전류 변화의 정보가 줄어들어 포화개시/포화종료 시점 판단이 어려워지지만, 본 알고리즘의 경우, 64샘플과 32샘플의 경우에서 포화개시/포화종료 시점을 잘 판단함을 볼 수 있었다.

둘째, 차단 주파수가 낮은 저역통과 필터를 사용함에 따라, 2차 전류의 고주파 성분을 많이 잃게 되어, 변류기 포화개시/포화종료 시점 판단이 어려워지지만, 제안한 알고리즘은 주기당 64샘플인 경우에는 1920Hz, 960Hz 주기당 32샘플인 경우에는 960Hz, 480Hz에서 포화개시/포화종료 순간을 잘 판단함을 알 수 있었다. 그 결과, 샘플링 주파수의 1/4 까지를 저역통과 필터의 저지대역 차단 주파수로 결정하는 경우에는 차분을 이용한 변류기 포화판단 알고리즘이 영향을 받지 않음을 알 수 있었지만, 그 이하의 차단 주파수에서는 포화 판단에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] T.Bunaygul, P.Crossley, P.Gale, "Overcurrent Protection Using Signals Derived from Saturated Measurement CTs", IEEE PES 2001 SM, July 15~19, 2001, Vancouver, BC, Canada

[2] Y. C. Kang, J. K. Park, S. H. Kang, A. T. Johns, R. K. Aggarwal, "An Algorithm for Compensating the Secondary Current of Current Transformers", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 3, January 1997, pp. 116 ~ 124
[3] 강용철, 옥승훈, 강상희, "변류기 2차 전류의 포화 여부 판단 알고리즘", 대한전기학회논문지 A권, pp. 275~278, 제 50권 제 6 호 2001년 6월

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(공학). 현재, 전북대 공대 전자정보공학부 조교수. 차세대전력기술연구소

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

옥 승 훈(玉 昇 勳)



1975년 1월 22일생. 2000년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 차세대전력기술연구소

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394
E-mail : opalman@dreamx.net

윤 재 성(尹 在 晟)



1971년 4월 25일생. 1997년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 3월~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 차세대전력기술연구소

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394
E-mail : hana42@netian.com

강 상 희(姜 相 熙)



1962년 8월 15일 생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 명지대 공대 전기정보 제어공학부 부교수. 차세대전력기술연구소

Tel : 031-330-6364, Fax : 031-321-0271
E-mail : shkang@mju.ac.kr