

변류기 포화 판단 알고리즘으로 억제된 모선보호용 비율 전류차동 계전방식

論 文

52A-1-6

A Percentage Current Differential Relaying Algorithm for Bus Protection Blocked by a CT Saturation Detection Algorithm

姜龍澈*·尹在晟**

(Yong-Cheol Kang · Jae-Sung Yun)

Abstract - This paper describes a percentage current differential relaying algorithm for bus protection blocked by a CT saturation detection algorithm. The detection algorithm blocks the output of a current differential relay only if a differential current is caused by CT saturation in the case of an external fault. Moreover, if a current differential relay operates faster than the detection algorithm, the blocking signal is not ignited. On the other hand, if the detection algorithm operates faster than a current differential relay, the output of the relay is blocked. The results of the simulation show that the proposed algorithm can discriminate internal faults from external faults even when a CT is saturated in both cases. This paper concludes by implementing the algorithm into the TMS320C6701 digital signal processor. The results of hardware implementation are also satisfactory. The algorithm can not only increase the sensitivity of the current differential relay but improve the stability of the relay for an external faults.

Key Words : Percentage current differential relay, Saturation detection, Blocking signal

1. 서 론

모선보호용으로 비율 전류차동 계전방식이 주로 사용되고 있는데, 이는 차동전류와 억제전류를 계산하여 일정한 비율을 고려하여 내부사고를 판정하는 방식이다. 하지만, 이 방식은 변류기 포화를 수반한 외부사고의 경우에 내부사고로 잘못 인식하는 문제점을 가지고 있다. 이에 대한 대책으로 대전류 영역에서 계전기의 감도를 희생하여 계전기의 동작영역을 축소시킨 가변비율 전류차동 계전방식을 사용한다. 하지만, 계전기의 감도를 희생하는데 한계가 있기 때문에 심한 변류기 포화를 수반하는 외부사고 시 오동작을 피하기 어렵다. 따라서, 가변비율 전류차동 계전방식에서도 변류기 포화에 대한 별도의 대책이 반드시 필요하다.

참고문헌 [1]에서는 차동전류 순시값의 변화량이 억제전류 순시값의 변화량의 정해진 비율보다 적으면 포화가 발생한 것으로 판단한다. 그런데, 변류기가 두 개 이상이 포화된 경우에는 오동작할 가능성이 높다.

참고문헌 [2]에서는 사고 후 포화가 바로 발생하지 않는 점에서 double measurement 방법을 이용하여 사고를 판정한다. 처음 트립신호 발생 후 11-14 ms (50Hz 기준) 후에 다시 사고인지 아닌지 판단한다. 따라서, 사고를 인식하고 최종 트립신호를 출력하는데 시간이 지연된다.

참고문헌 [3], [4]에서는 모선 보호용으로 전류와 전압을 동시에 이용하는 방식을 제안하였다. 참고문헌 [3]에서는 계전기에서 계산한 임피던스의 크기와 위상을 가지고 내부사고와 외부사고를 구별하는 알고리즘이다. RX 그래프에서 3사분면에 임피던스가 존재하면 내부사고이고, 외부사고의 경우에는 1사분면과 3사분면에 임피던스가 존재하게 된다. 변류기가 포화된 경우에는 임피던스의 크기가 감소하고 위상이 증가하지만 사분면을 벗어나지 않기 때문에 변류기 포화에 의한 영향이 적다.

참고문헌 [4]에서는 계전점에서 전원과 임피던스(R-L)로 모델링하여 전압과 전류의 증분을 가지고 임피던스를 계산한다. B-H 곡선에서 포화구간의 그래프가 H축과 평행이라고 한다면, 변류기가 포화되면 전류의 증분이 0이 되고 계산된 임피던스가 매우 커지게 되어 포화 여부를 판단한다.

참고문헌 [5]에서는 변류기 보상 알고리즘을 이용한 비율 전류차동 계전방식이 제안되었다. 이 방식은 변류기가 포화되더라도 왜곡된 전류로부터 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하므로, 동작영역이 확대된 전류차동 계전기를 설계할 수 있었다. 하지만, 변류기 보상 알고리즘은 초기에 잔류자속이 없는 경우에만 보상이 가능하므로, 잔류자속이 존재하는 경우에는 오차의 증가가 예상된다.

최근 변류기 전류의 3차 차분을 이용한 변류기 포화 판단 논문이 발표되었다. 이 방식은 초기에 잔류자속이 존재하더라도 변류기의 포화여부를 판단 가능하다. 그런데, 변류기 포화의 시작과 종료만을 판단하기 때문에 내부사고와 외부사고의 구분이 어렵다. 본 논문에서는 변류기 포화 판단 알고리즘으로 억제된 비율 전류차동 계전방식을 제안한다.

* 正 會 員 : 全 北 大 電 子 情 報 工 學 部 助 教 授 · 工 博

** 正 會 員 : 全 北 大 電 子 情 報 工 學 部 博 士 課 程

接 受 日 字 : 2002年 10月 9日

最 終 完 了 : 2002年 11月 21日

변류기 포화에 의해서 생긴 차동전류인 경우에 전류차동 계전기의 출력을 억제한다. EMTP를 이용하여, 12개의 송전선이 연결되어 있는 154 [kV] 이중모선 시스템에서, 내부와 외부사고 데이터를 생성하여, 제안한 알고리즘의 성능을 확인하였다. 또한, 제시한 알고리즘을 TMS320C6701 디지털 신호처리 칩을 이용하여 실시간으로 구현하였다.

2. 변류기 포화 판단 알고리즘으로 억제된 모선보호용 비율 전류차동 계전방식

2.1 비율 전류차동 계전방식

비율 전류차동 계전방식은 입력 전류로부터 억제전류(I_r)와 차동전류(I_d)를 구하고, 식 (1)의 동작영역에 있게 되면, 내부사고가 발생한 것으로 판단한다.

$$I_d > kI_r + I_{offset} \quad (1)$$

여기서 k 는 계전기의 감도를 의미하며, I_{offset} 은 오차 등의 이유로 무시할 차동전류의 값이다. k 값이 작으면 동작영역이 확대되고, 반대로 k 값이 크면 동작영역이 축소된다.

2.2 3차 차분을 이용한 포화 판단 알고리즘[6]

변류기가 포화되면, 포화순간을 전후로 2차 전류가 매우 다른 형태의 파형이 된다. 따라서, 포화 개시/종료 순간에 2차 전류는 연속이긴 하지만, 2차 전류의 1차 차분이 불연속이 되고, 3차 차분이 큰 값을 갖는다. 따라서, 변류기가 포화 개시/종료 순간에 2차 전류의 3차 차분의 크기가 임계값보다 크면, 포화개시/종료 순간으로 판단한다.

3차 차분을 사용하는 변류기 포화 판단 알고리즘에 필요한 임계값은 다음과 같이 결정한다.

$$Th = k\sqrt{2}I_{fmax}(2 \times \sin(\pi/N))^3 \quad (2)$$

여기서 k 는 판단 알고리즘의 감도를 나타내는 상수이며, I_{fmax} 는 예상되는 최대 전류이고, N 은 주기당 샘플수이다.

2.3 제안된 계전방식

제안된 계전방식은 포화 판단 알고리즘으로 억제된 비율 전류차동 계전방식으로 그림 1은 제안한 계전방식의 흐름도를 보여준다.

전류차동 계전기가 동작영역 안으로 진입하는 경우는 두 가지가 있다. 하나는 내부사고에 의한 경우이고, 다른 하나는 변류기 포화를 수반한 외부사고의 경우이다. 제안된 계전방식은 비율 전류차동 계전기와 포화 판단 알고리즘을 동시에 수행시켜 이들의 결과를 조합하여, 최종적인 트립신호를 발생한다.

먼저, 내부사고의 경우이다. 변류기 포화가 발생하지 않은 경우에 대해서는 문제가 없으므로, 내부사고인데 변류기 포화가 발생한 경우에 대해서만 기술한다. 이런 경우는 이중모선인 경우에 한 쪽 모선에서 사고가 발생하여 두 모선을

연결한 bus-tie의 변류기가 포화되는 경우이다. 하지만, 대부분의 경우 변류기 포화는 사고가 발생하고 일정 시간이 지난 후에 발생한다. 차동전류-억제전류 평면에서 보면, 사고가 발생하자마자 차동전류가 증가하여 즉시 동작영역 내부로 진입하게 된다. 따라서, 계전기가 먼저 동작하게 되고, 그 이후에 변류기 포화가 검출된다. 그러므로, 비율 전류차동 계전기가 포화 판단 알고리즘보다 먼저 동작을 하면 보호영역 내부에서 사고가 발생한 것으로 판정할 수 있으므로, 이 경우에는 억제신호를 발생하지 않는다.

다음은 변류기 포화를 수반한 외부사고의 경우이다. 이 경우는 두 가지가 해당될 수 있다. 하나는 모선에 연결되어 있는 송전선에 사고가 발생한 경우이고, 또 하나는 다른 모선에서 사고가 발생한 경우에 bus-tie의 변류기가 포화되는 경우이다. 일단, 변류기가 포화되면 이 때문에 차동전류가 발생하게 되고, 비율 전류차동 계전기가 동작을 하게 된다. 그런데, 변류기 포화는 사고가 발생하고 일정 시간이 지난 후에 발생한다. 이를 차동전류-억제전류 평면에서 보면, 사고 발생 초기에는 차동전류는 0인 상태에서 억제전류만 증가하다가, 변류기 포화가 발생하면 차동전류가 증가하여 동작영역 내부로 진입하게 된다. 따라서, 포화 판단 알고리즘이 포화를 검출하고 나서 비율 전류차동 계전기가 동작을 하게 된다. 그러므로, 비율 전류차동 계전기보다 포화 판단 알고리즘이 먼저 동작하면 변류기 포화에 의한 동작이라고 판정하여 계전기의 출력을 억제하여 트립신호를 발생하지 않는다.

주의할 점은 포화 판단 알고리즘이 포화를 판단하여, 포화구간에만 억제신호를 발생하는 것이 아니라는 것이다. 왜냐하면, 포화 판단은 매 순간 이루어지고 있으나, 억제전류와 차동전류는 한 주기의 데이터를 이용하여 계산하기 때문에 변류기가 포화에서 벗어났다 하더라도, 차동전류는 계속 존재하게 된다. 그런데, 포화가 종료된 후의 차동전류의 값이 포화종료 시점의 크기로 거의 일정하게 유지된다. 따라서, 포화종료 후 한 주기 이내에 차동전류의 크기가 변하지 않는 경우에는 계속적으로 억제신호를 유지하도록 하였다. 뒤의 사례연구에서 자세히 설명하겠다.

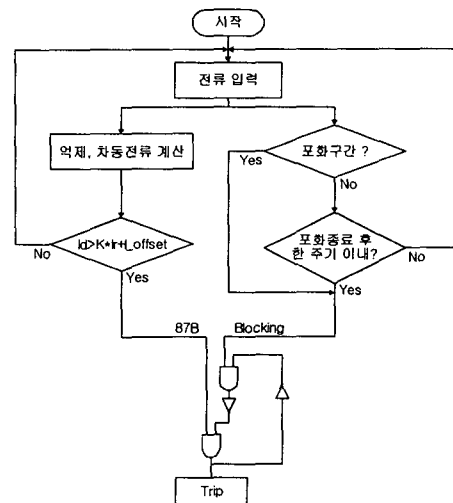


그림 1 제안된 계전방식의 흐름도
Fig. 1 The flow chart of proposed relaying algorithm

3. 사례연구

3.1 모델계통

제안한 계전방식의 성능을 평가하기 위하여 그림 2와 같이 이중 모선 구조의 모델 계통을 선정하여, EMTP로 데이터를 생성하였다. 길이가 50 [km]인 12개의 선로를 통하여 발전기가 연결되어 있으며, 전압은 154 [kV]이다. 변류기는 C800 변류기이며, 변류비는 800:5, 2차 권선 저항은 0.54 [Ω]이다. 히스테리시스 특성까지 모의할 수 있는 type96 소자를 모의하기 위한 포화점은 5.118 [A], 2.971 [Vs]이다. 사용한 주기당 샘플 수는 64 샘플, 즉 3840 [Hz]이다.

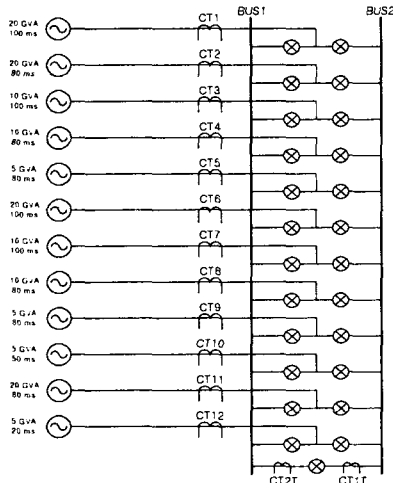


그림 2 모델 계통

Fig. 2 The model system studied

1, 3, 5, 7, 9, 11번 선로는 모선 1에, 2, 4, 6, 8, 10, 12번 선로는 모선 2에 각각 연결되어 있으며, bus-tie는 연결되어 있다. 모선 1을 담당하는 비율 전류차동 계전기(87B1)는 모선 1에 연결된 6개의 선로와 bus-tie에 설치된 변류기(CT1T)에서 전류를 입력받고, 모선 2를 담당하는 비율 전류차동 계전기(87B2)는 모선 2에 연결된 6개의 선로와 bus-tie에 설치된 변류기(CT2T)에서 전류를 입력받아 계산하게 된다. 그리고, 비율 전류차동 계전기의 k 값은 0.2를, I_{offset} 은 2.0 [A]를 사용하였다.

또한, 중첩방지 저역통과 필터는 샘플링 주파수의 반인 1920 [Hz]를 차단주파수로 갖는 1차 RC 필터를 사용하였다.

본 논문에서는 $I_{fmax}=233$ [A], $N=64$, $k=3$ 으로 하여, 0.93을 3차 차분의 임계값으로 선택하였으며, 2번 송전선에서 사고가 발생한 경우와 모선 1의 사고에 대하여 제시한 알고리즘의 성능을 검증하였다.

3.2 2번 송전선로 사고

2번 송전선의, 변류기에 근접한 곳에서 A상 지락사고를 모의하였다. 이 사고는 87B1, 87B2 모두 외부사고에 해당하므로, 두 계전기 모두 동작하지 않아야 한다. 이 경우에, bus-tie와 2번 선로의 변류기가 포화된다.

그림 3은 CT2T의 2차전류와 1차 차분, 2차 차분, 3차 차분, 그리고, 포화 판단 결과를 나타내었다. 변류기가 포화되어, 2차 전류가 왜곡되었지만, 1차 차분이 포화 개시 및 포화 종료 순간에 불연속이 되고, 결과적으로 3차 차분이 그 순간에 큰

값을 갖게 되어, 포화구간을 정확하게 판단함을 알 수 있다.

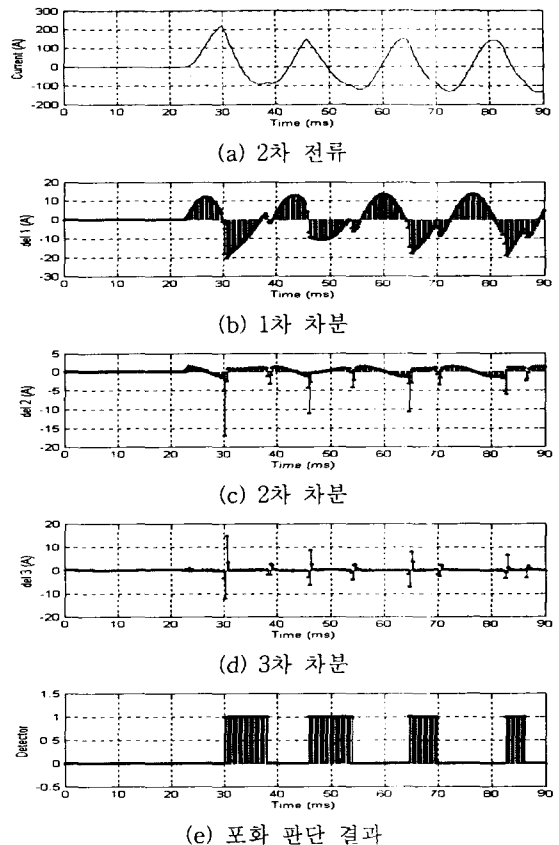


그림 3 CT2T의 포화 판단 결과

Fig. 3 The results of saturation detection at CT2T

그림 4에 2번 송전선로의 2차 전류와 포화 판단 결과를 나타내었다. 이 경우에도 변류기가 포화되어 2차 전류가 왜곡되었으며, 포화구간을 정확하게 판단하였다.

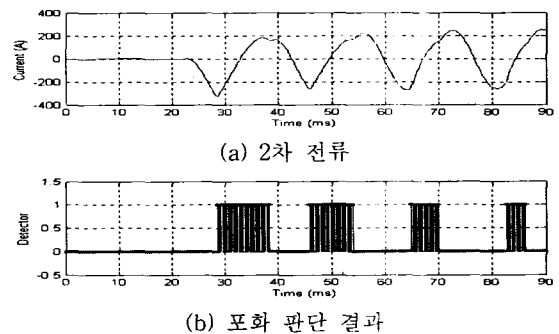


그림 4 CT2의 포화 판단 결과

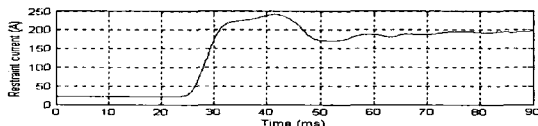
Fig. 4 The results of saturation detection at CT2

그림 5는 모선 1 경우의 억제전류, 차동전류, 차동전류-억제전류 평면, 계전기의 출력 신호, 포화 판단 결과, 억제신호 및 트립신호를 보여준다. 여기서 포화 판단 결과는 각 변류기의 포화 판단 결과를 OR 결합한 결과이다. 이 사고는 87B1의 경우에는 외부사고이므로, 사고가 약 24 [ms]에 발생해서, 억제전류의 크기는 바로 커지고 있는 반면에, 차동전

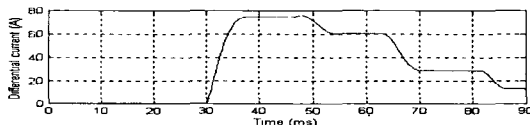
류는 변류기 포화 전(약 30 [ms])까지는 0을 유지하다가, 포화 이후에는 차동전류가 증가하고 있다.

약 38 [ms]인 순간에 변류기가 포화에서 벗어나면, 차동전류의 크기는 유지된다(그림 5b). 포화가 종료되었으므로 차동전류가 0이 되어야 함에도 불구하고, 데이터 윈도우 안에 포화된 상태의 전류값이 남아 있어 차동전류의 값이 존재하는 것이다. 따라서, 이 경우에는 동작영역에 있다 하더라도 억제신호를 보내야 한다. 제시한 방식에서는 포화 종료 한 주기 이내에 차동전류의 변화가 거의 없으면 억제신호를 유지하도록 하였다(그림 5d).

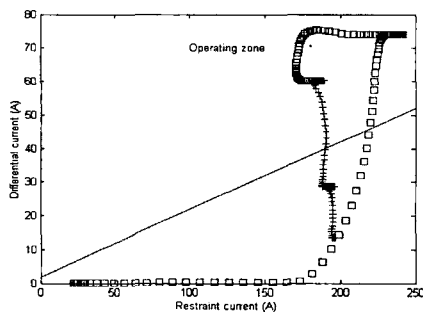
사고 발생 이후 초기에는 차동전류는 증가하지 않고 억제전류만 증가하므로, 차동전류-억제전류 평면에서 오른쪽으로 이동하다가, 변류기가 포화되면 차동전류가 증가하여 위로 이동하여 동작영역 안으로 들어가게 된다(그림 5c). 따라서, 87B1은 1을 출력한다. 하지만, 포화 판단 신호에 의한 억제신호가 발생되므로, 트립신호는 발생하지 않음을 알 수 있다(그림 5d). 따라서, 이 경우는 외부사고로 변류기가 포화되어 비울 전류차동 계전기가 동작하였지만, 포화 판단 알고리즘의 포화 판단 결과가 계전기보다 먼저 출력하였으므로, 트립신호를 발생하지 않았다.



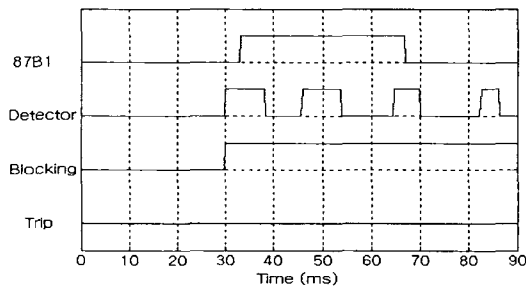
(a) 억제전류



(b) 차동전류



(c) 차동전류-억제전류

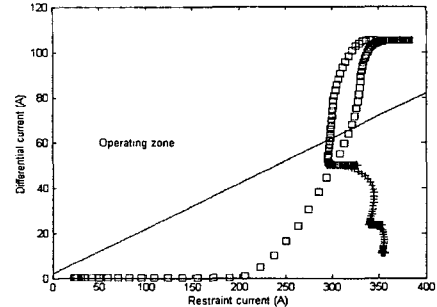


(d) 계전기 출력, 포화 판단, 억제신호, 트립신호

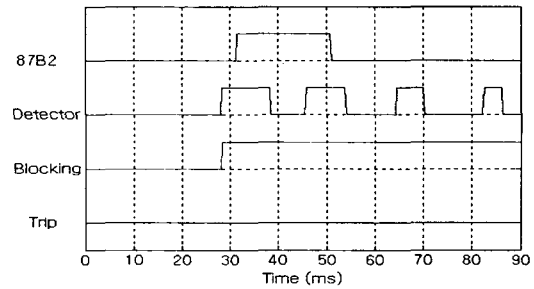
그림 5 모선 1의 결과 (외부사고)

Fig. 5 The results of Bus 1 (an external fault)

그림 6은 모선 2에서의 결과이다. 이 경우에도 계전기가 동작하지 않아야 한다. 2번 송전선의 변류기가 bus-tie의 변류기보다 더 빨리 포화되었기 때문에, 87B2가 87B1보다 더 빨리 동작하였다(그림 6b). 이 경우 역시 포화 판단이 계전기의 출력보다 앞서기 때문에, 억제신호에 의하여 트립신호는 발생하지 않았다.



(a) 차동전류-억제전류



(b) 계전기 출력, 포화 판단, 억제신호, 트립신호

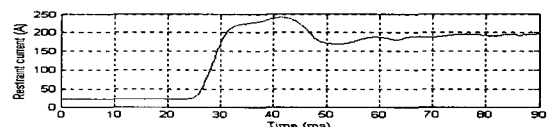
그림 6 모선 2의 결과 (외부사고)

Fig. 6 The results of Bus 2 (an external fault)

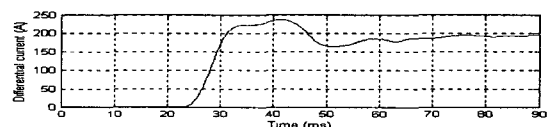
3.3 모선 1 사고

모선 1에서 A상 지락사고의 경우에는 bus-tie에 설치된 CT1T와 CT2T가 포화가 된다. 이 경우에는 87B1은 동작해야 하며, 87B2는 동작하지 않아야 한다. 그림 7은 모선 1에서의 결과이다. 이 사고는 내부사고이기 때문에, 사고 발생 직후 차동전류가 발생하였으므로, 동작영역 안으로 진입하게 된다. 이에 반해 변류기 포화는 그 이후에 판단되므로, 억제신호가 발생되지 않아 트립신호를 발생한다.

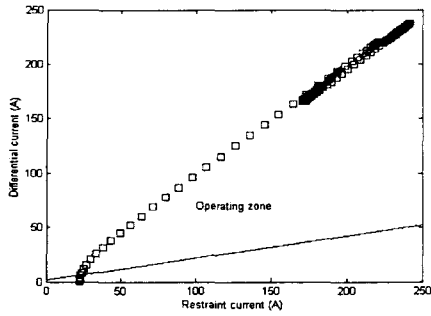
그림 8은 모선 2에서의 결과이다. 이 경우에는 외부사고이기 때문에, 사고 초기에는 억제전류가 증가하지만 차동전류는 증가하지 않는다. 하지만, 사고 후 약 7 [ms] 후에 변류기가 포화되고, 그림 8a와 같이 동작영역 내부로 진입하기 때문에 그림 8b와 같이 87B2가 동작한다. 하지만, 포화 판단 알고리즘이 먼저 동작하여 억제신호를 발생시키기 때문에 트립신호는 발생되지 않았다.



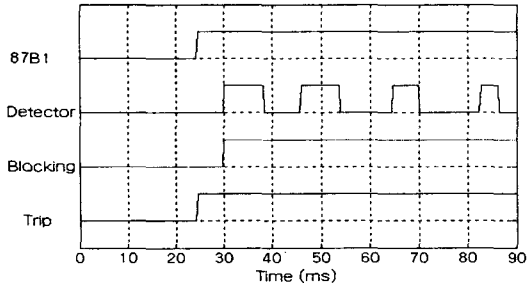
(a) 억제전류



(b) 차동전류



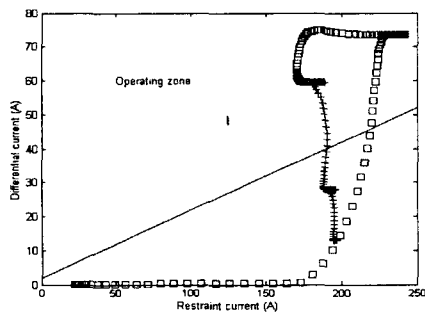
(c) 차동전류-억제전류



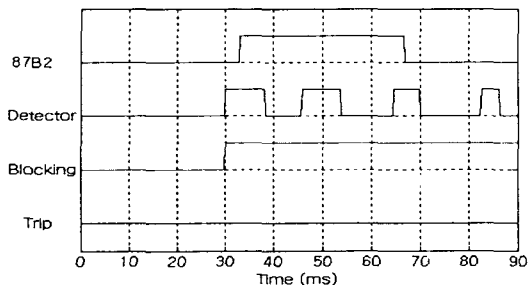
(d) 계전기 출력, 포화 판단, 억제신호, 트립신호

그림 7 모선 1의 결과 (모선 1 내부사고)

Fig. 7 The results of Bus 1 (a fault at Bus 1)



(a) 차동전류-억제전류



(b) 계전기 출력, 포화 판단, 억제신호, 트립신호

그림 8 모선 2의 결과 (모선 1 내부사고)

Fig. 8 The results of Bus 2 (a fault at Bus 1)

4. 실시간 시험

제안한 계전방식의 성능을 실시간으로 테스트하기 위하여 그림 9와 같은 시험 시스템을 구성하였다.

그림 9와 같이 PCL727 D/A 변환기를 이용하여 EMTP에서 얻은 사고데이터를 아날로그 데이터로 변환한 뒤, 차단

주파수가 약 1920 [Hz]인 RC 저역통과 필터를 통과시킨 후 AI(analog input) 카드에 입력하였다. AI 카드에서 이를 디지털 값으로 변환하여 DSP(TMS320C6701)로 전달하고 DSP에서 주기 당 64샘플의 속도로 제한한 알고리즘을 수행하게 된다. 실시간 시험의 경우 노이즈에 의한 영향 때문에 식 (2)의 임계값을 결정하는데 $k=5$ 로 하여 3차 차분의 임계값을 1.5로 사용하였다.

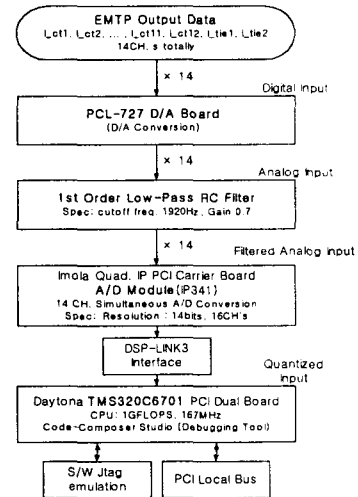


그림 9 실시간 시험 시스템

Fig. 9 A real time testing system

그림 10, 그림 11은 2번 송전선 사고의 경우에 모선 1, 모선 2에서의 결과이고, 그림 12, 그림 13은 모선 1 사고의 경우에 모선 1, 모선 2에서의 결과이다. 실시간 시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교할 때, 제안한 계전방식이 정확하게 동작함을 알 수 있다.

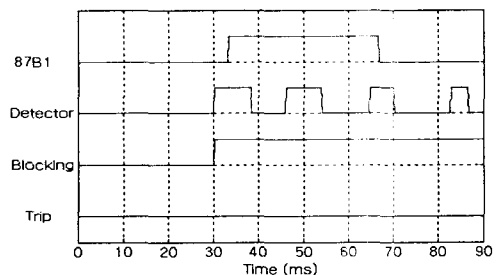


그림 10 모선 1의 결과 (외부사고)

Fig. 10 The results of Bus 1 (an external fault)

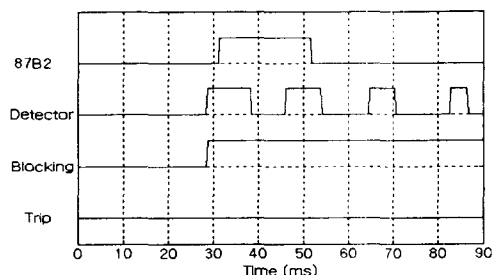


그림 11 모선 2의 결과 (외부사고)

Fig. 11 The results of Bus 2 (an external fault)

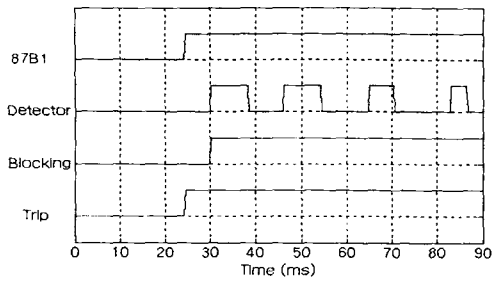


그림 12 모선 1의 결과 (모선 1 내부사고)
Fig. 12 The results of Bus 1 (a fault at Bus 1)

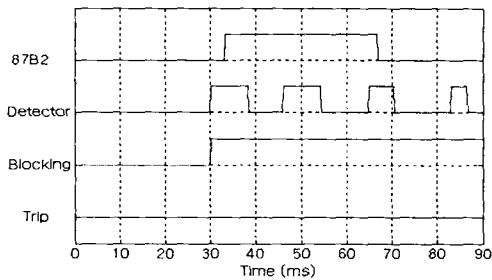


그림 13 모선 2의 결과 (모선 1 내부사고)
Fig. 13 The results of Bus 2 (a fault at Bus 1)

5. 결 론

본 논문은 차분을 이용한 변류기 포화 판단 알고리즘으로 억제된 모선보호용 비율 전류차동 계전방식을 제안하였다. 제안한 계전방식은 모선보호용 비율 전류차동 계전기와 전류 차분을 이용한 포화 판단 알고리즘을 결합하여 변류기 포화 때문에 발생하는 모선보호 계전기의 오동작을 방지하도록 하였다. 비율 전류차동 계전기가 포화 판단보다 먼저 동작하게 되면 내부사고라 판정하였고, 포화 판단이 비율 전류차동 계전기보다 먼저 동작하면 외부사고에 의한 차동전류로 인식하여 계전기의 트립신호를 억제하였다. 또한, 포화가 종료된 후 한 주기 이내에 차동전류의 변화가 적으면 억제신호를 유지하도록 하였다.

사례연구 결과, 변류기 포화에 관계없이 내부사고에는 정 동작하고, 외부사고의 경우에는 정부동작함을 보였다. 또한, 이를 TMS320C6701 DSP에 구현하여, 실시간으로 시험하여 성능을 확인하였다.

제시한 방식은 비율 전류차동 계전방식을 사용하기 때문에 가변비율 전류차동 계전방식보다 동작 영역이 확대되며, 변류기 포화를 수반한 외부사고 시에도 정부동작하여 신뢰도가 향상되었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] F. Andow, N. Suga, Y. Murakamy, and K. Inamura, "Microprocessor-based busbar protection relay", in IEE Fifth International Conference on Developments in Power System Protection, Mar. 1993.
- [2] A. Kumar and P. Hansen, "Digital bus-zone protection", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 4, Oct. 1993, pp.29~34
- [3] M.S. Sachdev, T.S. Sidhu, H.S. Gill, "A busbar protection technique and its performance during CT saturation and CT ratio-mismatch", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 15, No. 3, July 2000, pp.895~901
- [4] C. Fernandez, "An Impedance-Based CT Saturation Detection Algorithm for Bus-Bar Differential Protection", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 16, No. 4, October 2001, pp.468~472
- [5] 강용철, 윤재성, 김동룡, "변류기 전류보상 알고리즘을 이용한 모선보호용 전류 차동계전 알고리즘", 전기학회 논문지 A, 제49권 제9호, 2000년 9월, pp. 446 ~ 450
- [6] Y. C. Kang, S. H. Ok, S. H. Kang, "A Novel CT Saturation Detecting Algorithm Unaffected by a Remanent Flux," IEEE PES 2001 SM, July 15 ~ 19, 2001, Vancouver, BC, Canada

저 자 소 개



강 용 철 (姜 龍 徹)

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. 차세대 전력기술연구센터

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



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. 차세대 전력기술연구센터

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