

Method for Detection of Saturation of a Current Transformer

남 순 열[†] · 최 준 호* · 강 상 희** · 민 상 원***
 (Soon-Ryul Nam · Joon-Ho Choi · Sang-Hee Kang · Sang-Won Min)

Abstract - A Method for detection of saturation of a current transformer (CT) is proposed. The algorithm is initiated when the end point of a saturation period is detected. This detection is achieved by checking the time interval between the adjacent zero-crossing points of the second derivative of the secondary current. Once the end point of the saturation period is detected, the beginning point of the corresponding saturation period is determined by backward examination of the sum of the secondary current from the end point. The performance of the algorithm was evaluated for a-g faults on a 345 kV 100 km overhead transmission line. The Electromagnetic Transient Program (EMTP) was used to generate fault current signals for different fault inception angles and different remanent fluxes. The performance evaluation shows that the proposed algorithm successfully detects the saturation period even in the presence of a remanent flux.

Key Words : Current transformer, Detection, saturation, Second derivative, Zero-crossing point

1. 서 론

전력계통에서 사용되는 전류변성기는 전류변성기의 1차측에 흐르는 전류를 일정 비율에 따라 전류변성기의 2차측에 그대로 생성할 수 있어야만 한다. 전류변성기의 자속이 자화 곡선의 선형 영역 내에 있을 때에는 자화 전류가 작아서 전류변성기 2차측 전류는 전류변성기 1차측 전류와 거의 동일한 파형을 유지하게 된다. 하지만, 사고 전류가 크고 직류 성분 성분을 포함할 경우에는 전류변성기의 자속이 자화 곡선의 포화 영역에 들어가게 되어 자화 전류가 급격히 커지게 되며, 이로 인하여 전류변성기 2차측 전류의 파형에는 왜곡이 발생하게 된다. 이와 같은 전류변성기 포화는 보호 계전기의 오동작이나 동작 지연 등의 문제를 초래할 수 있다. 예를 들어, 왜곡된 전류변성기 2차측 전류는 계측 전류의 크기가 실제 전류의 크기보다 낮게 측정되게 함으로써 반한시 과전류 계전기의 동작 시간을 지연시킬 수 있다. 거리 계전기에서는 부정확한 임피던스 계산을 통한 다양한 문제들을 야기시킬 수 있으며, 모선 모호용 차동 계전기에서는 외부 사고에 대해서 오동작하게 할 수도 있다.

전류변성기 포화로 인해 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위해서는 전류변성기 포화를 검출하는 것이 필수적이며,

이를 위해서 다양한 방법들이 제시되어 왔다. Phadke는 전류변성기 포화가 시작될 때 전류가 갑자기 변화하는 특성을 이용하였는데, 이 방법은 전류변성기가 포화될 때 전류가 거의 0에 가까운 값이 되어야만 포화를 성공적으로 검출할 수 있게 된다[1]. Hosemann은 삼상 전류를 공간 페이지로 변환하여 포화 순간을 검출하는 방법을 제안하였다[2]. 비포화 상태에서는 공간 페이지의 궤적이 원을 이루기 때문에, 궤적에서 벗어날 경우에 포화가 발생한 것으로 판단하게 된다. 웨이블릿 변환을 이용하여 포화 영역을 검출하는 방법은 웨이블릿 변환의 특성상 많은 계산을 필요하게 되며, 이로 인하여 실시간 구현에 한계를 가지게 된다[3]. 전류변성기 2차측 전류의 3계 미분과 2계 미분을 이용하여 포화 영역을 검출하는 방법도 제시되었다[4]-[5]. 제안된 방법들은 전류변성기 포화를 효과적으로 검출할 수 있다는 장점이 있지만, 포화 영역의 시작점과 종료점을 구분할 수 없다는 문제점을 안고 있다. El-Naggar는 온라인 계산을 통해 예상되는 전류변성기 2차측 전류와 실제 측정된 전류변성기 2차측 전류의 실효치를 비교함으로써 전류변성기의 포화를 검출하였다[6]. 한 주기 동안에서 포화가 발생하는 짧은 구간을 오프라인에서 미리 선정하고 온라인에서는 이 구간에서의 전류 파형을 이용하여 전류 변성기 1차측 전류를 나타내는 방정식을 구하여 전류 변성기 2차측 전류를 예상하게 된다.

본 논문에서는 전류변성기 2차측 전류의 1계 미분이 각 포화 영역의 종료 구간에서 포화 특이 패턴을 가진다는 특징을 이용하여 전류변성기의 포화를 검출할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 하며, 모의 결과를 통해서 제안된 알고리즘이 각 포화 영역의 종료점을 효과적으로 검출하고 이를 통해 포화 영역을 결정할 수 있음을 보인다.

† 교신저자, 정회원 : 전남대학교 전기공학과 조교수 · 공박
 E-mail : ptsouth@chonnam.ac.kr

* 정 회원 : 전남대학교 전기공학과 부교수 · 공박

** 시니어회원 : 명지대학교 전기공학과 교수 · 공박

*** 정 회원 : 한국전기연구원 선임연구원 · 공박

접수일자 : 2008년 11월 17일

최종완료 : 2009년 3월 3일

2. 전류 변성기의 포화 검출

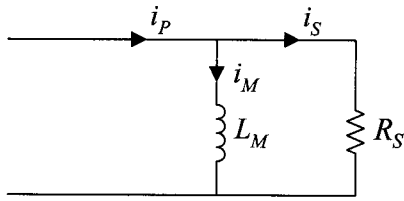


그림 1 전류 변성기의 단순화된 등가 회로
Fig. 1 Simplified equivalent circuit of a CT

전류 변성기에서 보았을 때, 현대의 마이크로프로세스를 이용한 보호계전기들은 매우 작은 임피던스를 가지므로 보호계전기의 임피던스는 전류 변성기 포화 문제에서 무시될 수 있다. 그러므로 전류 변성기의 권선 저항과 전류 변성기와 보호계전기를 연결하는 케이블의 저항 성분이 전류 변성기 포화의 주요 요인이 된다. 그림 1은 전류 변성기의 단순화된 등가 회로를 보여 주고 있다. 여기서 L_M 은 자화 인덕턴스, R_S 는 전류 변성기 2차 측의 전체 저항을 나타낸다. i_p 는 전류 변성기의 2차측으로 환산된 1차 전류, i_M 은 전류 변성기의 자화 전류, i_s 는 전류 변성기의 2차 전류를 나타낸다. $i_p^{(m)}$, $i_M^{(m)}$, $i_s^{(m)}$ 는 각각 i_p , i_M , i_s 의 m계 미분을 나타낸다.

전류 변성기에 유기된 2차 전압 $e_2(t)$ 와 자속 $\lambda(t)$ 는 i_s 와 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$e_2(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} = R_S i_s(t) \tag{1}$$

식 (1)을 t_0 부터 t 까지 적분하면 식 (2)를 얻게 된다.

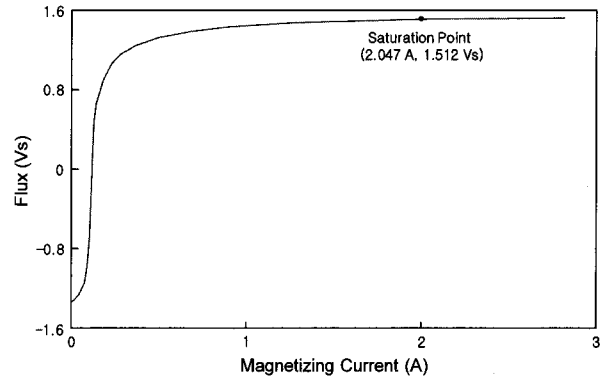
$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + R_S \int_{t_0}^t i_s(\tau) d\tau \tag{2}$$

식(2)에 대한 이산 식은 식 (3)과 같이 주어진다.

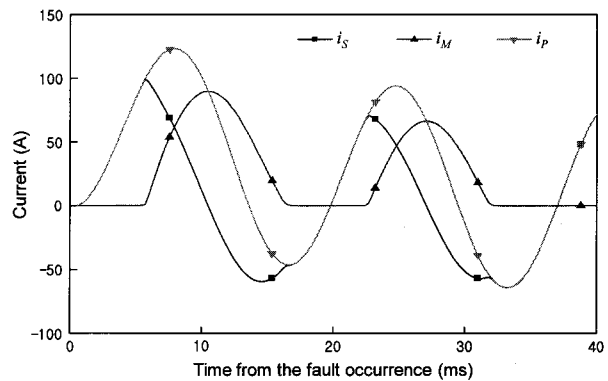
$$\lambda[n] = \lambda[n_0] + \frac{2\pi}{N\omega_0} R_S \sum_{l=n_0+1}^n i_s[l] \tag{3}$$

그림 2(a)에서 알 수 있듯이, 자속이 전류 변성기 포화점보다 큰 영역에서의 자화 전류는 상당히 큰 값을 가지게 되고 그림 2(b)와 같이 전류 변성기 2차 전류의 파형에는 왜곡이 발생하게 된다.

n_{B_k} 와 n_{E_k} 가 각각 k번째 포화 영역에서 i_M 의 시작점과 종료점을 가리킨다고 할 때, k번째 포화 영역은 n_{B_k} 부터 n_{E_k} 까지가 된다. 일반적으로, i_M 은 k번째 포화 영역 내에서 두 개의 변곡점을 가지게 되며, $n_{I_k^F}$ 와 $n_{I_k^S}$ 가 각각 첫 번째 변곡점과 두 번째 변곡점을 나타낸다. $n_{I_k^F}$ 와 $n_{I_k^S}$ 를 기준으로 k번째 포화 영역은 3 개의 구간으로 나눌 수가 있다. 즉, n_{B_k} 부터 $n_{I_k^F}$ 까지의 시작 구간, $n_{I_k^F}$ 부터 $n_{I_k^S}$ 까지의 주요 구간, $n_{I_k^S}$ 부터 n_{E_k} 까지의 종료 구간이 된다. 그림 3은 그림 2의 첫 번째 포화 영역에서의 n_{B_1} , $n_{I_1^F}$, $n_{I_1^S}$, n_{E_1} 를 보여 주고 있다.



(a) 전류 변성기의 자화 곡선



(b) 잔류자속 40%, 0° a상 지락 사고에 대한 전류 파형

그림 2 전류 변성기 포화의 예

Fig. 2 Example of CT saturation: (a) Magnetization curve of a CT (b) Current waveform for a 0° a-g fault with 40% remanent flux

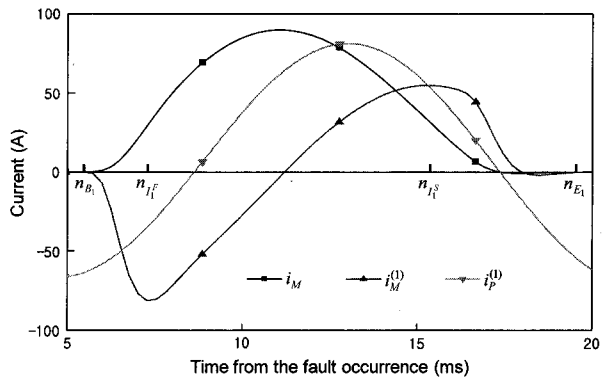


그림 3 그림 2의 첫 번째 포화 영역에서의 n_{B_1} , $n_{I_1^F}$, $n_{I_1^S}$, n_{E_1}
Fig. 3 n_{B_1} , $n_{I_1^F}$, $n_{I_1^S}$ and n_{E_1} corresponding to the first saturation region of Fig. 2

2.1 포화 특이 패턴의 검출

전류 변성기 2차측 전류의 1차 미분 $i_s^{(1)}$ 은 다음과 같이 정의되며, $i_s^{(1)}$ 은 각 포화 영역 내의 종료 구간에서 포화 특이

패턴을 가지게 된다.

$$i_S^{(1)}[n] = -\frac{i_S[n] - i_S[n-1]}{\sin(2\pi f_0 \Delta t)} \quad (4)$$

전류변성기 2차측으로 환산된 1차측 전류는 2차측 전류와 자화 전류의 합과 동일하므로, 2차측 전류의 1차 미분 $i_S^{(1)}$ 는 1차측 전류의 1차 미분 $i_P^{(1)}$ 로부터 자화 전류의 1차 미분 $i_M^{(1)}$ 을 소거함으로써 구해진다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 종료 구간 내에서 $i_M^{(1)}$ 는 $i_P^{(1)}$ 보다 급격히 변하게 되며, $i_M^{(1)}$ 의 부호는 $i_P^{(1)}$ 와 동일하게 된다. 이에 따라 $i_S^{(1)}$ 는 그림 4에서 원으로 표시된 것과 같은 포화 특이 패턴을 가지게 된다. 시작 구간 내에서도 $i_M^{(1)}$ 는 $i_P^{(1)}$ 보다 급격히 변하게 되지만 $i_M^{(1)}$ 의 부호는 $i_P^{(1)}$ 와 반대가 되므로, 시작 구간에서의 $i_S^{(1)}$ 에는 포화 특이 패턴이 나타나지는 않으며 $i_S^{(1)}$ 의 변화만이 가속화 된다.

종료 구간에서 나타나는 $i_S^{(1)}$ 의 포화 특이 패턴으로 인해 $i_S^{(2)}$ 는 종료 구간 내에서 두 개의 영점 교차점을 가지게 된다. 종료 구간은 한 주기에 비해서 매우 짧기 때문에 $i_S^{(2)}$ 는 짧은 시간 간격 내에서 두 개의 영점 교차점을 가지는 특징을 보이게 된다. 따라서 $i_S^{(2)}$ 의 인접한 영점 교차점 사이의 시간 간격을 이용하여 종료 구간에서의 포화 특이 패턴을 검출할 수 있으며, 포화 특이 패턴을 검출하기 위한 기준은 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$n_{Z_j} - n_{Z_{j-1}} \leq T_Z \quad (5)$$

여기서, n_{Z_j} 는 $i_S^{(2)}$ 의 j 번째 영점 교차점이며, T_Z 는 포화 특이 패턴을 검출하기 위한 임계값이 된다. 식(5)를 만족하는 영점 교차점은 포화 영역의 종료점 n_{E_k} 와 거의 동일하게 나타난다. 따라서 식 (5)를 만족하는 영점 교차점은 k 번째 포화 영역의 종료점 n_{E_k} 가 된다.

2.2 포화 영역의 결정

식 (5)에 의해서 포화 영역의 종료점 n_{E_k} 가 구해지면, 포화 방향은 $I_S[n_{E_k}]$ 의 부호를 이용하여 알 수 있게 된다. 식 (3)에서 $I_S[n_{E_k}]$ 가 더해짐으로써 포화점을 벗어나 포화가 종료된다. 따라서 $I_S[n_{E_k}]$ 가 음의 값을 가질 경우에는 $\lambda[n_{E_k} - 1]$ 가 양의 값을 가지며 $\lambda[n]$ 이 $\lambda[n_{E_k} - 1]$ 보다 큰 영역에서 포화가 발생하게 된다. 반대로 $I_S[n_{E_k}]$ 가 양의 값을 가질 경우에는 $\lambda[n_{E_k} - 1]$ 가 음의 값을 가지며 $\lambda[n]$ 이 $\lambda[n_{E_k} - 1]$ 보다 작은 영역에서 포화가 발생하게 된다. 따라서 포화 영역에 대한 기준은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\frac{i_S[n_{E_k}]}{|i_S[n_{E_k}]|} \lambda[n] \leq \frac{i_S[n_{E_k}]}{|i_S[n_{E_k}]|} \lambda[n_{E_k} - 1] \text{ for } n_{B_k} < n < n_{E_k} \quad (6)$$

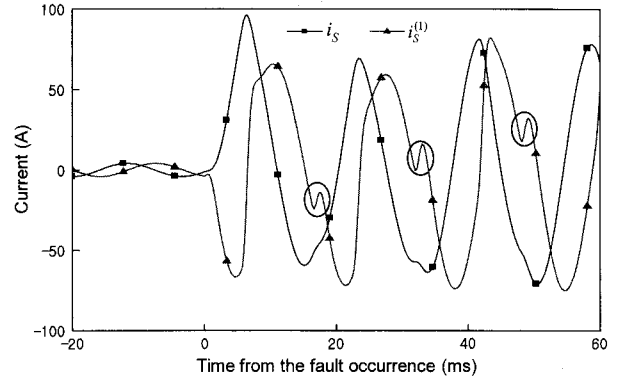


그림 4 종료 구간 내에서의 포화 특이 패턴
Fig. 4 Saturation-specific pattern during the end sub-period

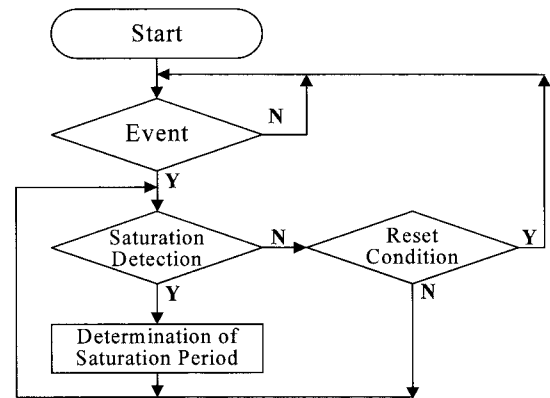


그림 5 전류변성기 포화 검출 알고리즘의 흐름도
Fig. 5 Flow chart for detecting the CT saturation

식 (3)을 식 (6)에 대입한 후 정리를 하면 포화 기준식 $S[n]$ 을 구하게 된다.

$$S[n] = \frac{i_S[n_{E_k}]}{|i_S[n_{E_k}]|} \sum_{l=n+1}^{n_{E_k}-1} i_S[l] \geq 0 \text{ for } n_{B_k} < n < n_{E_k} \quad (7)$$

포화 영역에서는 $S[n]$ 이 양의 값을 가지게 되며, 비포화 영역에서는 $S[n]$ 이 음의 값을 가지게 된다. 따라서 k 번째 포화 영역의 시작점 n_{B_k} 는 $S[n]$ 을 통해서 구할 수 있게 된다.

2.3 전류변성기 포화 검출을 위한 알고리즘

오동작 방지를 위해서 전류변성기 포화 검출 알고리즘은 특정 조건이 만족된 후에 동작하도록 하였다. 즉, 전류변성기 2차측 전류가 연속된 세 개의 샘플(sample) 동안에 정격 전류의 두 배를 초과할 때 포화 검출은 시작되며, 이전 포화 영역의 종료점으로부터 두 주기 이내에 포화가 검출되지 않으면 알고리즘은 초기화 된다. 그림 5는 전체 알고리즘의 흐름도를 보여 주고 있다.

3. 성능 평가

본 논문에서는 그림 6에서 주어진 345kV 100km 송전 선로에서의 a 상 지락 사고에 대해서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하였다. 그리고 표 1에서 주어진 송전 선로의 파라미터를 사용하여 지락 사고를 모의하였다. 다양한 사고 위상각과 잔류 자속에 대한 사고 전류 파형을 생성하기 위해서 과도해석 프로그램인 EMTP (ElectroMagnetic Transient Program)를 사용하였다. 샘플링 주파수는 3,840 Hz로 설정하였는데, 이는 60 Hz 계통에서 주기당 64 샘플링을 하는 것에 해당된다. 고조파 성분을 제거하고 aliasing 현상을 방지하기 위해서 960 Hz의 차단 주파수를 가지는 2차의 Butterworth 저역 필터를 EMTP의 출력에 적용하였다. 계전점으로부터 5 km 떨어진 지점에서 a 상 지락 사고를 발생시켰으며, 사고 위상각은 0°, 45°, 90°, 135°를 모의하였다. 동일 사고인 경우에도 잔류 자속에 따라서 전류변성기의 2차 전류는 다양한 파형을 가지게 되므로, 전류변성기 포화점의 -80% ~ 80%에 해당하는 잔류 자속에 대해서 모의를 하였다. 잔류 자속 모의를 위해서는 Kezunovic이 제안한 전류변성기 모델링 방법을 사용하였다[7]. 그림 6의 계전점에 설치된 전류변성기 C400(2000:5, 0.61Ω)에는 3.42Ω의 저항 부품을 연결하였으며, EMTP의 보조 프로그램인 HYSDAT을 이용하여 (2.047 A, 1.512 Vs)의 포화점에 대한 히스테리시스 데이터를 생성하였다.

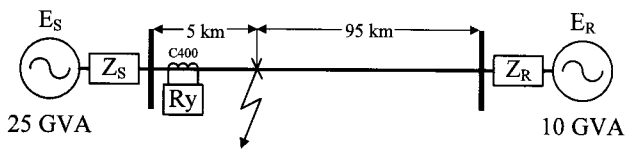


그림 6 모델 계통
Fig. 6 Model System

표 1 송전 선로의 파라미터
Table 1 Overhead transmission line parameters

Sequence	Parameter	Value	Unit
Positive Negative	R_1, R_2	0.0345	Ω/km
	L_1, L_2	0.9724	mH/km
	C_1, C_2	0.0117	$\mu F/km$
Zero	R_0	0.2511	Ω/km
	L_0	2.7058	mH/km
	C_0	0.0045	$\mu F/km$

그림 7은 잔류 자속 80%의 0° a상 지락 사고에 대한 모의 결과를 보여 주고 있다. 잔류 자속 80%의 0° a상 지락 사고는 모의된 사례들 중에서 가장 심각하게 포화가 발생하게 되므로, 첫 번째 포화 영역이 최대 포화 영역이 되며 종료 구간도 최대가 된다. 본 연구에서의 최대 종료 구간은 한 주기의 약 8%가 된다. 식 6의 T_2 는 최대 종료 구간에 따라서 결정이 되며, 본 연구의 모의에서는 저역 통과 필터의 영향을 고려해서 T_2 를 6으로 선정하였다.

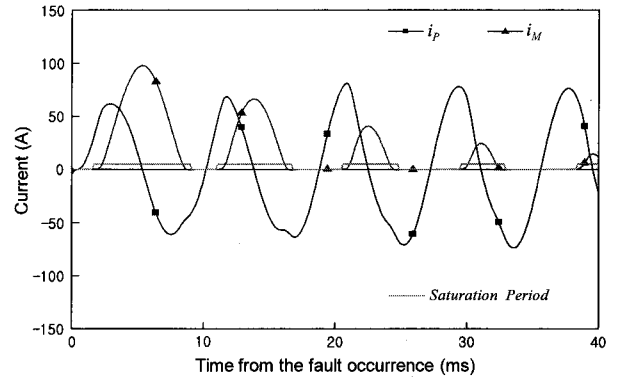


그림 7 잔류 자속 80%, 0° a상 지락 사고의 모의 결과
Fig. 7 Result for a 0° a-g fault with 80% remanent flux

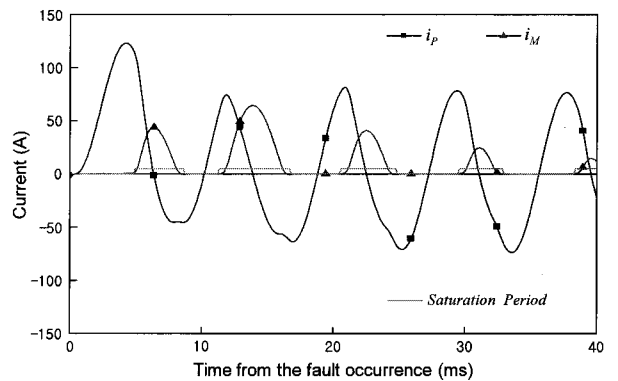


그림 8 잔류 자속 -80%, 0° a상 지락 사고의 모의 결과
Fig. 8 Result for a 0° a-g fault with -80% remanent flux

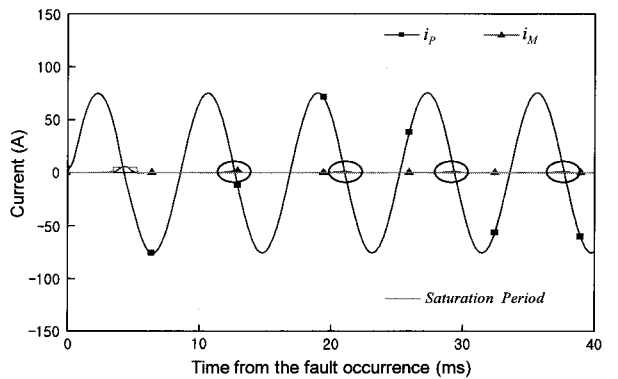


그림 9 잔류 자속 0%, 90° a상 지락 사고의 모의 결과
Fig. 9 Result for a 90° a-g fault with 0% remanent flux

그림 7과 그림 8은 각각 잔류 자속이 80%와 -80%인 경우의 0° a상 지락 사고에 대한 모의 결과를 보여 주고 있다. 전류변성기의 포화는 자화 전류로 인하여 발생되므로 각 포화 영역의 시작점 및 종료점은 자화 전류의 시작점 및 종료점과 일치하게 된다. 그림 7과 그림 8에서 알 수 있듯이 제안한 알고리즘을 이용하여 검출한 포화 영역의 시작점과 종

료점은 자화 전류 i_M 의 시작점과 종료점과 일치하고 있으며, 이를 통해 제안한 알고리즘이 포화 영역을 성공적으로 검출하고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 잔류 자속 0%의 90° a상 지락 사고에 대한 모의 결과를 보여 주고 있다. 사고 위상각이 90°인 경우에는 사고 전류에 직류 성분은 나타나지 않기 때문에, 전류 변성기에는 포화가 발생하지 않거나 약한 포화가 발생하게 된다. 이와 같은 약한 포화로 인하여, 그림 9에서 원으로 표시된 구간과 같이, 제안한 알고리즘은 일부 포화 영역을 검출하지 못하게 된다. 하지만, 검출하지 못한 포화 영역에서는 자화 전류 자체가 작기 때문에 이로 인한 보호 계전기의 오 동작이나 동작 지연 등의 영향이 미미할 것으로 판단된다.

그림 10과 그림 11은 각각 잔류 자속이 40%와 -40%인 경우의 135° a상 지락 사고에 대한 모의 결과를 보여 주고 있다. 사고 위상각이 135°이므로 전류 변성기의 포화는 전류 변성기의 2차 전류가 음의 값을 가지는 동안에 발생된다. 그림 10과 그림 11에서 알 수 있듯이 제안한 알고리즘을 이용하여 검출한 포화 영역의 시작점 및 종료점은 자화 전류의 시작점 및 종료점과 일치하고 있다. 따라서 음의 포화 방향에 대해서도 제안한 알고리즘이 포화 영역을 성공적으로 검출하고 있음을 알 수 있다.

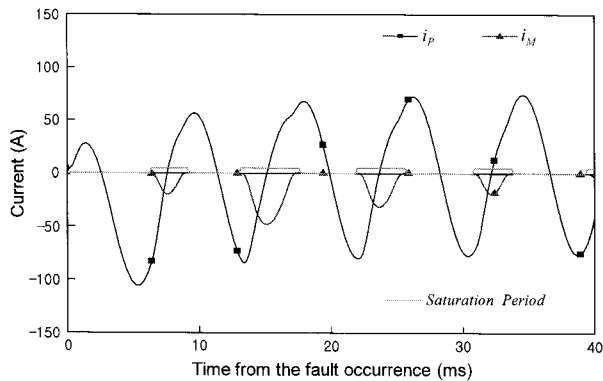


그림 10 잔류 자속 40%, 135° a상 지락 사고의 모의 결과
Fig. 10 Result for a 135° a-g fault with 40% remanent flux

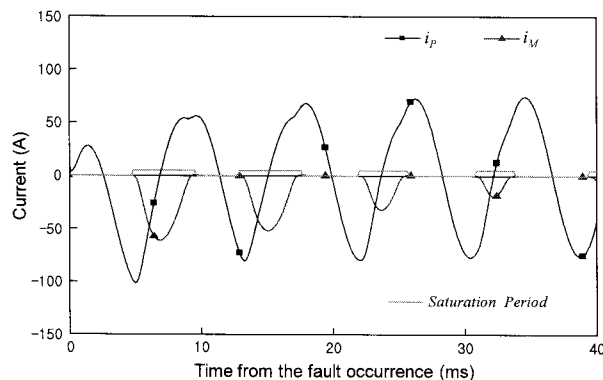


그림 11 잔류 자속 -40%, 135° a상 지락 사고의 모의 결과
Fig. 11 Result for a 135° a-g fault with -40% remanent flux

4. 결 론

본 논문에서는 전류 변성기 2차 전류의 1계 미분이 각 포화 영역의 종료 구간에서 포화 특이 패턴을 가진다는 특징을 이용하여 전류 변성기의 포화를 검출할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 포화 특이 패턴은 전류 변성기 2차 전류의 2계 미분에서의 인접한 영점 교차점 사이의 시간 간격을 이용하여 검출하게 된다. 종료 구간은 한 주기에 비해서 매우 짧기 때문에, 포화 특이 패턴이 발견된 순간이 포화 영역의 종료점으로 설정되며, 포화 종료점이 검출되면 전류 변성기 2차 전류를 포화 종료점으로부터 역방향으로 합산하여 그 값을 검사함으로써 포화 시작점을 구하게 된다.

제안된 알고리즘의 성능은 345kV 100km 송전 선로에서의 a상 지락 사고에 대한 모의를 통해서 검증하였다. 다양한 사고 위상각과 잔류 자속에 대한 모의 결과들을 통해서 제안된 방법이 각 포화 영역의 종료점을 효과적으로 검출하고 이를 통해 포화 영역을 결정할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] A. G. Phadke and J. S. Thorp, Computer Relaying for Power Systems, Research Studies Press Ltd., 1988.
- [2] G. Hosemann, H. M. Steigerwald, "Model saturation detector for digital differential protection," IEEE Trans. Power Delivery, 1993:933 - 940.
- [3] F. Li, Y. Li, R.K. Aggarwal, "Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers," Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib., 2002:497 - 503.
- [4] Yong-Cheol Kang, Seung-Hun Ok, Sang-Hee Kang, "A CT saturation detection algorithm," IEEE Trans. Power Delivery, 2004:78 - 85.
- [5] Yong Cheol Kang, Ui Jai Lim, Sang-Hee Kang, Peter A. Crossley, "Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT," IEEE Trans. Power Delivery, 2004:1642 - 1649.
- [6] K.M. El-Naggar, M.I. Gilany, "A discrete dynamic filter for detecting and compensating CT saturation," Electric Power Systems Research, 2007:527 - 533
- [7] M. Kezunovic, L. Kojovic, A. Abur, C.W. Fromen, and F. Phillips, "Experimental evaluation of EMTP-based current transformer models for protective relay transient study," IEEE Trans. Power Delivery, 1994:405 - 413.

저 자 소 개



남 순 열 (南 淳 烈)

1996년 서울대학교 전기공학부 졸업.
1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 062) 530-1768

E-mail : ptsouth@chonnam.ac.kr



최 준 호 (崔 峻 豪)

1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업.
1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대학교 전기공학과 부교수

Tel : 062) 530-1742

E-mail : joono@chonnam.ac.kr



강 상 희 (姜 相 熙)

1985년 서울대학교 전기공학과 졸업.
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 명지대학교 전기공학과 교수. 차세대 전력기술 연구센터 연구원.

Tel : 031) 330-6364

E-mail : shkang@mju.ac.kr



민 상 원 (閔 湘 元)

1999년 서울대학교 전기공학부 졸업.
2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 선임연구원.

Tel : 031) 420-6137

E-mail : swmin@keri.re.kr