

EMTP-RV를 이용한 CT포화 모델링

강용철\*, 최재선\*, 정태영\*, 강해권\*, 장성일\*, 김용균\*\*, 유영식\*\*  
전북대\*, (주)한국 IED\*\*, 한국전력거래소\*\*

EMTP-RV Modeling of CT Saturation

Yong-Cheol Kang\*, Jae-Sun Choi\*, Tai-Ying Zheng\*, Hae-Gweon Kang\*, Sung-Il Jang\*, Yong-Gyun Kim\*\*, Young-Sik Ryu\*\*  
Chonbuk National University\*, HanKook IED\*\*, Korea Power Exchange\*\*

**Abstract** - A protection current transformer (CT) has been widely used for protection devices. When a fault occurs, a CT should provide the faithful reproduction of the primary fault current. However, a CT may saturates due to the magnitude of fault current, dc component, primary time constant, and the remanent flux of the iron core, and the secondary current of a CT is distorted. The distorted current can cause mal-operation or the operating time delay of a protection relay. This paper provides a modeling of CT saturation using EMTP-RV. The performance of the proposed CT saturation modeling was investigated under various fault conditions varying the fault distance, fault inception angle, and remanent flux of the iron core. The results indicate that the proposed EMTP-RV modeling can operate correctly, and the reasons for CT saturation are verified by EMTP-RV simulations.

( $i_c$ )와 자속과 자화전류의 비선형 특성을 나타내는 자화인덕턴스( $L_m$ )에 의한 자화 전류( $i_m$ )로 나눌 수 있다. 정상상태 시에는 철손저항과 자화인덕턴스가 큰 값을 갖게 되므로, 변류된 2차 전류에 그리 크지 않은 영향을 준다. 하지만 포화상태 시 자화인덕턴스의 값이 급격히 감소하게 되어 큰 자화전류가 흐르게 된다. 이 처럼 비선형 자화인덕턴스의 특성에 의해 포화 현상이 발생하게 된다. 그러므로 포화현상을 알기 위해서는 어떠한 값들이 자속에 영향을 미치는지를 알아보아야 한다.

1. 서 론

복잡한 전력 계통에서 변류기(CT)는 전력계통의 전류를 변류비에 맞게 변류하는 장치로 거리계전기나 전류차동 계전기와 같은 보호시스템에 전력 계통의 전류정보를 제공하는 중요한 위치를 차지하고 있다.

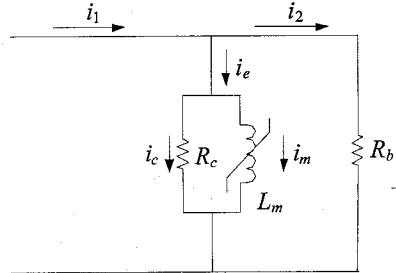
사고가 발생하게 되면 큰 사고전류가 흐르게 되고 그 사고전류의 크기, DC 오프셋, 1차시정수, 그리고 잔류자속 등의 원인으로 변류기 포화를 일으킬 수 있다. 포화 발생은 2차 전류의 왜곡을 가져오고 보호 계전기의 오동작이나 시 지연을 발생 시킬 수 있다[1]. 따라서 CT의 포화현상의 분석은 전력계통의 보호와 직결된 중요한 사항이며, 정확한 분석을 위해 신뢰할만한 CT포화 모델링은 필수적이다.

본 논문에서는 CT 포화현상을 분석하기 위한 모델링 방법을 소개하였다. 먼저, CT의 전류에 관한 식을 등가회로, 라플라스 변환과 역 라플라스 변환을 거쳐 최종적으로 자속에 관한 식을 유도했다. 이 식을 통하여 CT포화의 원인을 알아보고 본 CT포화 모델링에서 이 원인에 의해 CT포화현상이 발현되는지를 사례연구를 통하여 알아보았다.

2. EMTP-RV를 이용한 CT포화 모델링

2.1 CT 등가회로

CT는 계통의 정상상태뿐만 아니라 사고 시에도 계통에 흐르는 1차 전류를 변류비에 맞는 2차 전류로 변류하여 계전기와 같은 기기에 전류를 공급한다. 이러한 목적으로 사용하는 CT의 등가회로는 그림 1과 같다[2]. 모든 파라미터들을 2차 측으로 환산한 등가회로로 2차 측 부담( $R_b$ )에 흐르는 2차 전류( $i_2$ )는 1차 측 전류( $i_1$ )에서 여자전류( $i_e$ )를 제외한 전류가 된다. 이 여자전류는 크게 히스테리시스 손실과 와전류손의 조합으로 이루어진 철손저항( $R_c$ )에 의한 철손전류



$R_c$  : 철손저항,  $L_m$ :자화인덕턴스,  $R_b$  : 2차 측 부담,  
 $i_1$  : 2차 측으로 환산한 1차 전류,  $i_2$  : 2차 전류,  
 $i_e$  : 여자전류,  $i_c$  : 철손전류,  $i_m$  : 자화전류  
그림 1 CT 등가회로

2.2 CT포화의 원인

사고 발생시 CT의 1차 전류는 식 (1)과 같이 나타낼수 있고 이를 이용해 CT의 자속을 구할수 있다. 계산의 편의를 위해 권선저항과 누설인덕턴스가 없다고 가정한다. 구해진 자속은 식 (1)과 같다. 는 사고전류의 최대값,  $T$ 는 1차 시정수, 사고 위상각 $\theta$ 에 의한 DC offset, 그리고  $\lambda(0)$ 인 잔류자속에 의해 포화현상을 유발할수 있음을 알수 있다.

$$i_1(t) = I_{max} [e^{-\frac{t}{T}} \cos \theta - \cos(\omega t - \theta)] \quad \text{for } t \geq 0 \quad (1)$$

$$i_1(t) = 0 \quad \text{for } t < 0$$

이를 등가회로를 이용해서 철손저항, 자화인덕턴스 그리고 부담에 흐르는 전류의 합으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$i_1(t) = \left( \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_b} \right) \frac{d\lambda(t)}{dt} + \frac{1}{L_m} \lambda(t) \quad (2)$$

라플라스 변환을 이용하고 자속에 관하여 풀어 보면 식 (3)과 같다.

$$\lambda(s) = \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \cdot \frac{1}{s + 1/\tau} i_1(s) + \frac{1}{s + 1/\tau} \cdot \lambda(0) \quad (3)$$

역 라플라스변환을 이용하여 정리하면 자속에 관한 식 (4)를 얻을 수 있다.

자속에 관련된 변수들을 살펴보면, 사고전류인  $I_{max}$ , 사고 위

상각  $\theta$ , 1차시정수  $T$  그리고 잔류자속  $\lambda(0)$ 의 값에 의해 좌우된다는 것을 알 수 있다.

$$\lambda(t) = I_{max} \cos\theta \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \quad (4)$$

$$\times \left\{ e^{-\frac{t}{T}} \left[ \frac{\tau T}{\tau - T} - \tau (\sin\psi \cos\psi \tan\theta - \cos^2\psi) \right] \right.$$

$$\left. - e^{-\frac{t}{T}} \left( \frac{\tau T}{\tau - T} \right) - \tau \frac{\cos\psi}{\sin\psi} \cos(\omega t - \theta - \psi) \right\}$$

$$+ \lambda(0) \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

### 2.3 EMTF-RV를 이용한 CT포화 모델링

CT의 모델링을 하는 방법으로는 비선형소자를 이용한 모델링 방법, TRELE, BCTRAN 등의 보조루틴을 이용한 방법, Nonlinear Data function을 이용한 비선형 특성을 구한 후 모델링하는 방법, Hysteresis fitter와 Hysteretic reactor를 이용한 비선형 특성의 모델링 방법 등이 있다[3]. 정확한 CT포화 모델링을 위해선 히스테리시스특성, 포화특성과 잔류자속 모델링을 할 수 있어야 한다. 위에서 소개한 방법 중 CT포화 모델링을 위한 가장 적절한 방법을 살펴보면 Hysteresis fitter Hysteretic reactor를 이용한 방법이라고 할 수 있다.

EMTF-RV의 Hysteresis fitter 소자에서 전류와 자속의 비선형 데이터의 테이블과 마이너 루프의 특성을 입력하게 된다. 입력된 값들에 의해서 만들어진 결과 파일은 Hysteretic reactor에 의해서 히스테리시스 곡선을 만들게 된다.

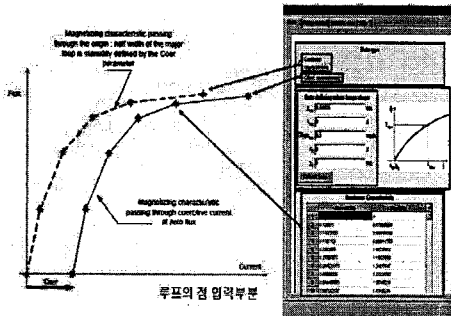


그림 2 Hysteresis fitter 입력창

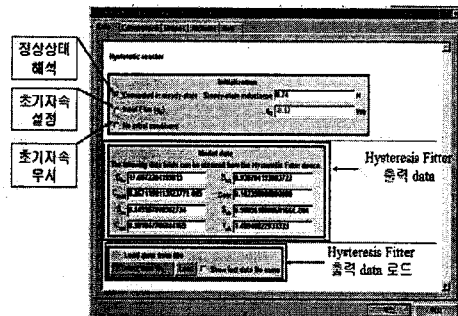


그림 3 Hysteretic reactor 입력창

## 3. 사례연구

### 3.1 모델 계통

위와 같은 방법으로 CT의 포화모델링을 검증하기 위해서 그림 4와 같은 345kV 2모선 송전계통을 구성하여 A상 지락사고를 통해서 모의해 보았다. 사고지점은 P모선 측 기준으로 변경 하였으며 계통 주파수는 60Hz이며, 주기당 384샘플을 사용하였다. CT는 등급 C400, 과전류정수 20, 포화점 1.512Vs, 2.047A인 CT를 사용하였고 모선양단에 각각 CT를 설치하여 CT의 포화를 알아보았다. EMTF-RV에서 모의 계통을 그림 5

와 같이 모델링 하였다.

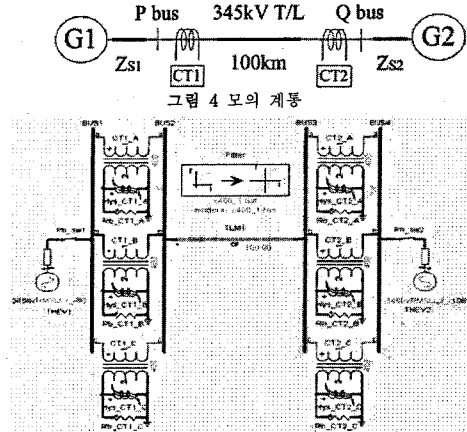


그림 5 EMTF-RV 계통 모델링

CT포화의 원인 중 단락전류의 크기에 따른 포화특성을 보기 위해 사고거리를 달리하여 시뮬레이션 하였으며, DC offset에 의한 특성을 고려하기 위해 사고위상각을 변경해 보았고, 초기 잔류자속을 변경하여 CT포화현상이 본 모델링에서 정확히 발현되는지를 알아보았다. CT포화원인 중 1차시정수는 계통이 정해지면 고정된 값을 갖게 되므로 모의에서 제외 하였다. 위 3가지 원인에 대한 사례를 표 1에서 정리 하였다.

표 1 CT포화현상 모의사례 및 포화여부

	사고거리	사고위상각	잔류자속	포화여부
사례1	10km	90°	0%	X
사례2	0.5km	90°	0%	O
사례3	10km	0°	0%	O
사례4	10km	90°	80%	O

### 3.2 사례 연구

사례 1: 사고거리 10km, 사고위상각 90°, 잔류자속 0%

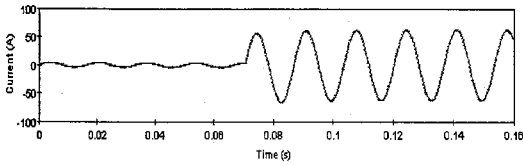
그림 6은 사례1의 결과를 나타내었다. 그림 6a는 변류비로 환산한 1차 측 전류와 2차 측 측정전류로 표시한 그래프이다. 그림 6b의 살펴보면 최대 1.142Vs로 자속값이 포화점을 넘지 않음을 알 수 있다. 그림 6c는 CT의 여자전류를 나타내는 것으로 비 포화 시에도 작은 여자전류가 흐름을 알 수 있으나 최대 순시값 0.284A로 전류역시 포화점을 넘지 않음을 알 수 있다. 사례1은 포화현상이 일어나지 않는 사례로 다른 3가지 원인에 따라 포화현상 여부를 판별할 수 있는 기준 사례가 될 수 있다.

사례 2: 사고거리 0.5km, 사고위상각 90°, 잔류자속 0%

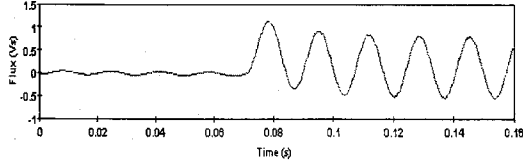
사례1에서 사고거리를 짧게 한 근거리사고를 모의 하였다. 사고거리를 짧게 하여 단락전류의 크기에 대한 CT포화 여부를 판별할 수 있는 단락전류에 대한 사례이다. 그림 7a를 보면 1차 측 전류와 2차 측 전류가 포화에 의해서 차이를 보임을 알 수 있다. 자속그래프인 그림 7b를 보면 자속이 2.014Vs로 포화점을 초과 했으며 그림 7c를 살펴보면 여자전류 최대 순시값 45.365A로 전류역시 포화점을 초과해 포화현상이 일어남을 알 수 있다.

사례 3: 사고거리 10km, 사고위상각 0°, 잔류자속 0%

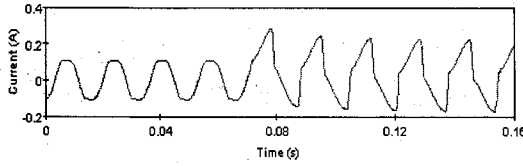
기준사례에서 사고위상각을 90°에서 0°로 변경한 DCoffset에 관한 사례이다. 그림 8a를 보면 2차 측 전류가 포화되었음을 알 수 있다. 그림 8b를 보면 자속이 2.147Vs로 포화점을 크게 초과 했음을 알 수 있고 여자전류역시 최대 순시값 56.894A로 포화점을 초과하여 포화현상이 일어남을 알 수 있다.



(a) 1차 축, 2차 축 전류

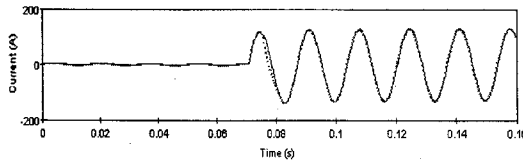


(b) 자속

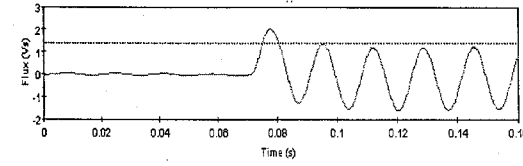


(c) 여자전류

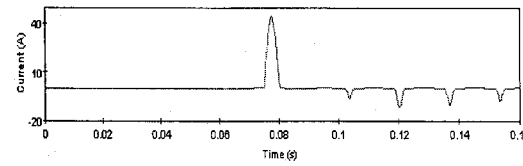
그림 6 사례 1의 결과



(a) 1차 축, 2차 축 전류

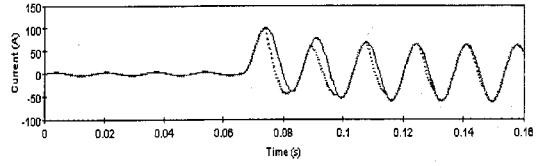


(b) 자속

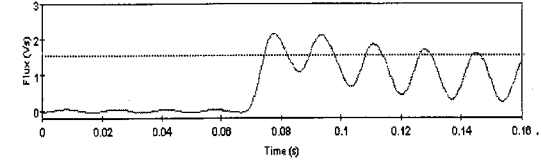


(c) 여자전류

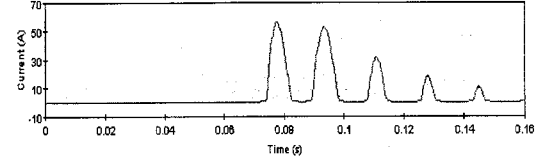
그림 7 사례 2의 결과



(a) 1차 축, 2차 축 전류

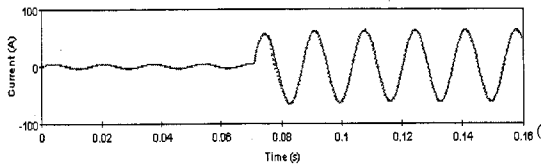


(b) 자속

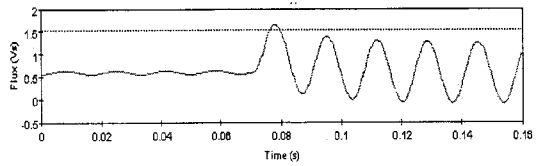


(c) 여자전류

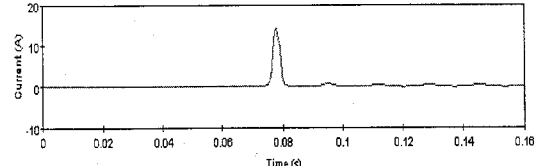
그림 8 사례 3의 결과



a) 1차 축, 2차 축 전류



(b) 자속



(c) 여자전류

그림 9 사례 4의 결과

사례 4: 사고거리 10km, 사고위상각 90°, 잔류자속 80%  
 마지막으로 잔류자속에 의한 CT포화를 알아보는 사례이다. 1, 2차 축 전류 파형에서 포화현상을 알 수 있고, 그림 9b에서 자속 1.714Vs로 포화점을 초과하고 역시 그림 9c에서 여자전류 최대 순시값은 19.527A로 포화점을 초과하여 포화현상이 나타남을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기존 EMTP-RV 이용하여 CT포화를 모델링 방법에 대하여 제시하였다. EMTP-RV의 Hysteresis fitter와 Hysteresis reactor를 이용해 CT포화 모델링을 여러 포화의 원인에 따라 사례연구를 하였고 이를 통하여 본 모델링의 타당성을 검증해 보았다.

이러한 CT포화 모델링 방법은 계통보호계전기에서 사고 시 발생할 수 있는 왜곡된 측정 전류에 대한 보다 정확한 분석을 위하여 활용될 수 있을 것으로 기대 된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Stanley H. Horowitz, and Arun G. Phadke, Power system relay ing, John Wiley and Sons INC, 1992, pp. 59-61.
- [2] Powell, JR, Louie, J, "Current transformer burden and saturation," IEEE Trans. PAS, Vol. IA-15, No.3, May. 1979, pp. 294-302.
- [3] DCG-EMTP(Development coordination group of EMTP) Versio n EMTP-RV, Electromagnetic Transients Program. [Online]. Availa ble : <http://www.emtp.com>