

포화를 고려한 CT의 디지털 필터로의 모델링

°강용철*, 강상희*, 김남호**, 김일동***, 윤만철***, 박종근*
 서울대 전기공학과*, 강원대 전기공학과**, 한전 기술연구원***

The Modelling of digital filter of CT including saturation
 including Saturation phenomena

Yongcheol Kang*, Sanghee Kang*, Namho Kim**, ILdong Kim***, Mancheol Yoon***, Jonggeun Park*
 Seoul Nat'l Univ.*, Kangwon Univ.**, KEPCO Rearch Center***

Due to the fault signal containing high and/or slowly decaying dc off-set component, saturation of current transformers cause errors in reproducing secondary current and therefore, secondary current is distorted, which cause relay to maloperate. In this paper, a new method which determines whether current transformer is saturated is proposed. By designing digital filter of current transformer, although secondary is distorted, exact secondary current can be reproduced.

1. 서론

계통의 규모가 거대해짐으로 인해 사고전류가 증가하거나, 또는 위상각 0도 사고시에 dc-off set이 많은 전류로 인하여 CT가 포화된다. CT의 포화는 계전기가, 존재하지 않은 고장을 검출한다든지, 고장을 검출하는데 실패하는 등 오동작을 유발하는 중요한 원인이 된다. CT의 포화가 계전기의 성능을 가름하는 주요한 원인임에도 불구하고, 지금까지의 연구결과는 CT가 포화되어 2차전류가 왜곡되었을 때 왜곡되지 않은 정보만을 이용한다든지(14), 왜곡된 2차전류를 그대로 이용하는 일고리움이 알려져 있을 뿐이다. CT의 포화는 CT의 1차측에 걸리는 전압이 높아지면, 철심에 유기되는 자속도 그에 따라 증가하고, 철심내의 자속이 많아지면 자기저항이 심하게 증가하여 여자전류가 매우 커지게 되고, 따라서 1차전류와 2차전류의 변비비가 정상적인 경우와 달라지게 되는 현상이다.

$$i_1 = i_m' + (N_2/N_1)i_2 \quad (1)$$

i_1, i_2 : 1차, 2차전류

i_m : 여자전류, N_1, N_2 : 1차, 2차 권선수

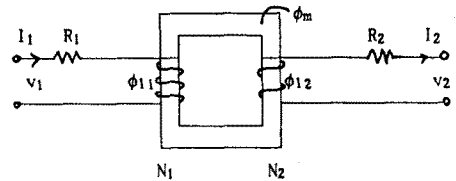
본 논문에서는 CT의 등가회로부터, CT의 1차전류와 2차전류에 대한 전달함수 $H(s)$ 를 구하고, 이를 쌍선형 변환(bilinear transform)하여 $H(z)$ 를 구한다음, 1차 전류와 2차 전류에 대한 디지털 필터를 구현하였다.

CT의 2차 단자 전압과 2차 전류를 이용하여, CT의 1차, 2차 간의 상호자속을 계산한 뒤 CT가 포화되었는지의 여부를 판단

하여, 포화시에는 구현된 디지털 필터를 이용하여 1차전류로부터 2차전류를 구하여, CT가 포화되는 경우에도 왜곡되지 않은 2차전류로 복원하는 방법을 제시하였다.

2. CT의 등가회로

CT의 등가회로는 변압기의 등가회로와 유사하다.(11)



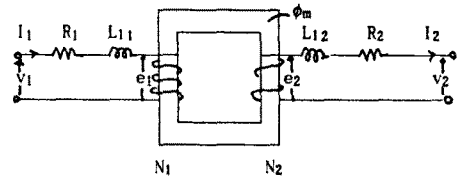
N_1, N_2 : 1차와 2차의 권선수

ϕ_m : 상호 자속

ϕ_{11}, ϕ_{12} : 각각 1차측과 2차측의 누설 자속

그림 1. CT의 등가회로

위의 등가회로에서 누설인덕턴스를 고려한 등가회로는 다음과 같다.



L_{11}, L_{12} : 1차측, 2차측 누설 인덕턴스

그림 2. 누설리액턴스를 고려한 CT의 등가회로

상호자속 ϕ_m 에 의해서 생긴 1차측과 2차측의 유기기전력(e. m. f.)을 각각 e_1, e_2 라 하면

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt_1} \quad (2) \quad e_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt_1} \quad (3)$$

이고, 양측 단자전압을 v_1, v_2 라 하면

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + e_1 \quad (4)$$

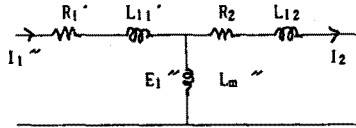
$$v_2 = -R_2 i_2 - L_{12} \frac{di_2}{dt} + e_2 \quad (5)$$

1차측에서 상호자속 ϕ_m 을 발생시키는데 필요한 여자전류를 i_m' 라 하고, 그에 해당하는 인덕턴스를 L_m' 이라 하면

$$L_m' = \frac{N_1 \phi_m}{i_m'} = \frac{N_1^2}{R_m} \quad (6)$$

R_m : 철심의 릴럭턴스(reluctance)

여기서 위의 등가회로를 2차측으로 환산한 등가회로를 그리면 다음과 같다. CT의 철손은 없다고 가정하였다.



$$a = \frac{N_1}{N_2}, \quad R_1' = \frac{R_1}{a^2}$$

$$L_{11}' = \frac{L_{11}}{a^2}, \quad L_m \approx \frac{L_m'}{a^2}$$

$$E_1 \approx \frac{E_1}{a}$$

$$I_1 \approx a I_1', \quad I_m \approx a I_m'$$

그림 3. 2차측으로 환산한 CT의 등가회로

식 (4)와 (6)으로부터 상호자속 ϕ_m 를 계산할 수 있다. 식 (4)에서

$$\frac{d\phi_m}{dt_1} = \frac{1}{N_2} e_2 \quad (7)$$

식 (6) → 식(8)

$$\frac{d\phi_m}{dt_1} = \frac{1}{N_2} \left[v_2 + R_2 i_2 + L_{12} \frac{di_2}{dt} \right] \quad (8)$$

식 (8)의 양변을 t_0 에서 t 까지 적분하면

$$\begin{aligned} \phi_m(t) - \phi_m(t_0) &= \\ &= \frac{1}{N_2} \left[\int_{t_0}^t v_2 dt + R_2 \int_{t_0}^t i_2 dt + L_{12}(i_2(t) - i_2(t_0)) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

식 (9)에서 계산된 상호자속의 양이 knee-point 자속보다 크면 2차전류는 포화되어 왜곡된 파형이고, 적으면 왜곡되지 않은 정상적인 2차전류이다.

3. 포화를 고려한 CT의 디지털 필터의 모델링

위의 그림 3.에서 $R_1' \approx 0$, $L_{11}' \approx 0$ 이라 하고 릴레이를 R_L 이라 하면 그림 4.와 같은 등가회로를 얻을 수 있다.

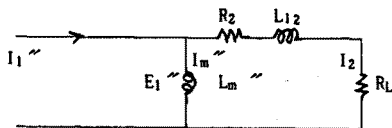


그림 4. 1차누설 리액턴스 및 권선저항을 무시한 등가회로

$$I_1 \approx I_m + I_2 \quad (10)$$

그림 4. 등가회로의 회로방정식은

$$L_m \frac{di_m}{dt} = (R_2 + R_L) I_2 + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (11)$$

식 (10) → 식 (11)

$$L_m \frac{d[I_1 - I_2]}{dt} = (R_2 + R_L) I_2 + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (12)$$

$$L_m \frac{dI_1}{dt} = (R_2 + R_L) I_2 + (L_{12} + L_m) \frac{di_2}{dt} \quad (13)$$

$t=0$ 에서 relaxed 되었다고 가정하고, 양변을 Laplace transform하면

$$sL_m I_1(s) = (R_2 + R_L) I_2(s) + s(L_{12} + L_m) I_2(s) \quad (14)$$

$$\frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{sL_m}{(R_2 + R_L) + s(L_{12} + L_m)} \quad (15)$$

$$\frac{I_2(s)}{a I_1(s)} = \frac{sL_m'/a^2}{(R_2 + R_L) + s(L_{12} + L_m'/a^2)} \quad (16)$$

1차전류 $I_1(s)$ 와 2차전류 $I_2(s)$ 와의 전달함수 $H(s)$ 는

$$H(s) = \frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{sL_m'/a}{(R_2 + R_L) + s(L_{12} + L_m'/a^2)} \quad (17)$$

여기서 $L_m'/a = A$, $R_2 + R_L = R$, $L_{12} + L_m'/a^2 = L$ 라 하면

$$H(s) = \frac{sA}{R + sL} \quad (18)$$

식 (18)의 s 에

$$s = \frac{2}{T_d} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \quad T_d = \text{sampling parameter} \quad (19)$$

를 대입하면 $H(s)$ 를 쌍선형 변환(bilinear transform)한 z -영역에서의 $H(z)$ 를 얻을 수 있다.

$$H(z) = \frac{\frac{2A}{T_d} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right)}{R + \frac{2L}{T_d} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right)} \quad (20)$$

$$= \frac{2A(1 - z^{-1})}{RT_d(1 + z^{-1}) + 2L(1 - z^{-1})} \quad (21)$$

$$= \frac{2A - 2Az^{-1}}{(RT_d + 2L) + (RT_d - 2L)z^{-1}} = \frac{I_2(z)}{I_1(z)} \quad (22)$$

식 (22)를 정리하면

$$\begin{aligned} 2AI_1(z) - 2Az^{-1}I_1(z) &= \\ &= (RT_d + 2L)I_2(z) + (RT_d - 2L)z^{-1}I_2(z) \quad (23) \end{aligned}$$

식 (23)의 양변을 inverse z -transform하면 시간영역에서의 1차전류와 2차전류사이의 관계식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} 2AI_1(k) - 2AI_1(k-1) &= \\ &= (RT_d + 2L)I_2(k) + (RT_d - 2L)I_2(k-1) \quad (24) \end{aligned}$$

식 (24)로부터

$$I_1(k) = \frac{2AI_1(k-1) + (RT_d + 2L)I_2(k) + (RT_d - 2L)I_2(k-1)}{2A} \quad (25)$$

$$I_2(k) = \frac{2A(I_1(k) - I_1(k-1)) - (RT_d - 2L)I_2(k-1)}{RT_d + 2L} \quad (26)$$

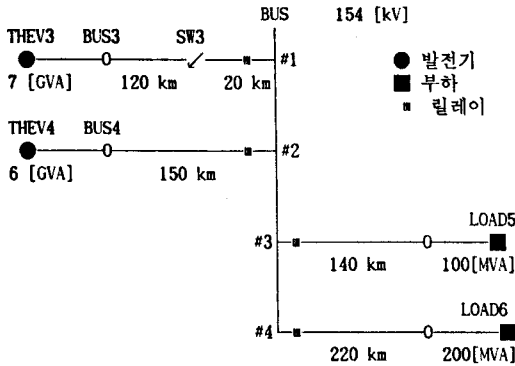
포화가 되지 않으면 그림 4.의 L_m 이 어떤 값을 갖게 되고, 포화가 되면 즉 자속의 값이 knee-point 자속값보다 크게 되면 L_m 이 정상적인 때의 값보다는 매우 작은 값을 갖게 되어 여자전류가 매우 증가하므로 1차전류와 2차전류의 비는 일정하지 않아 2차전류가 왜곡된다. 원래 CT의 $i_m - \phi$ 곡선은 비선형이지만, 2구간으로 선형화하여 시뮬레이션하였다.

먼저 식 (10)으로부터 계산된 flux가 knee-point 자속값 이하일 때는 CT가 정상이므로 L_m 의 값을 정상적인 구간의 L_a 라하고, 식 (25)를 이용하여 1차전류를 계산하고, flux가 knee-point 자속값이상일 때는 CT가 포화되었으므로, L_m 의 값을 포화 구간의 L_b 라하고 식 (25)를 이용하여 1차전류를 계산한 다음, 그 1차전류로부터 식 (26)을 이용하여 왜곡되지 않은 2차전류를 구하였다. 식 (25)에서의 $I_2(k-1)$ 은 계전기에서 받아들이는 2차전류이고, 식 (27)에서의 $I_2(k-1)$ 은 복원된 정상적인 전류이다.

4. 사례연구

본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 모선보호 방식 중의 하나인 차동전류 계전방식에 적용하여 보았다.

대상 계통은 다음과 같다.



송전선의 임피던스

$$Z_0 = 0.2511 + j1.02 - j589462 [\Omega]$$

$$Z_1 = 0.0345 + j0.37 - j226705 [\Omega]$$

그림 5. 모델 계통도

모선이 1개이고 송전선이 4개인 계통에서 용량이 25[VA]인 CT를 각 송전선에 연결하여 2차전류와 전압을 EMTP로 구하였으므로 주기당 64샘플을 취하였다.

각 선로에 연결되어 있는 CT의 자속은 다음과 같다.
flux

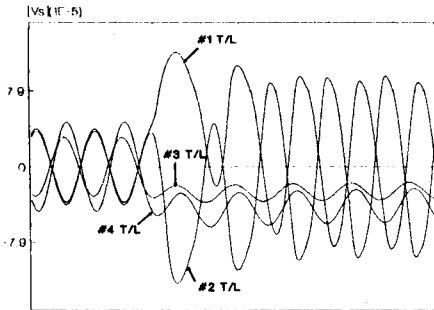


그림 6. 각 선로의 CT의 상호자속

용량이 25 [VA]인 CT는 knee-point 상호자속이 7.9E-5[Vs]이므로 그림 6.에서 알 수 있는 바와 같이 #1 송전선과 #2 송전선의 상호자속의 절대값이 knee-point 상호자속을 초과하게 되어 #1 송전선과 #2 송전선의 CT는 포화되었다가 정상인 과정을 반복하게 된다.

각 선로의 CT의 1차전류와 2차전류는 그림 7. 과 그림 8. 에 나타내었다.

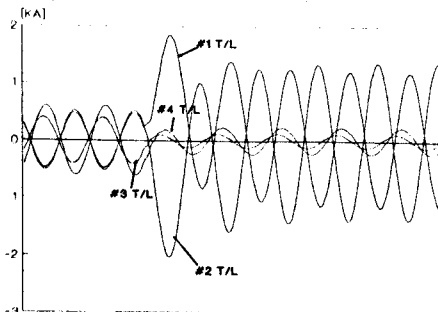


그림 7. 각 선로의 CT의 1차전류

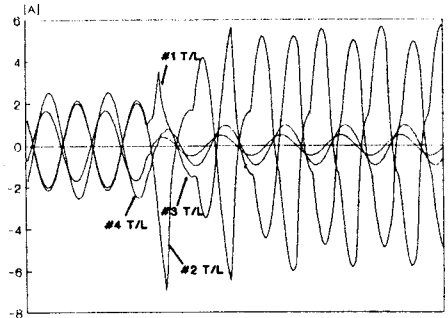


그림 8. 각 선로의 CT의 2차전류

그림 8.에서 #1 송전선과 #2 송전선의 2차전류는 CT가 포화되어 왜곡되는 것을 알 수 있다.

그림 8.의 2차전류로부터 식 (25)을 이용하여 1차전류를 계산한 결과와 원래의 1차전류를 비교하면 다음과 같다

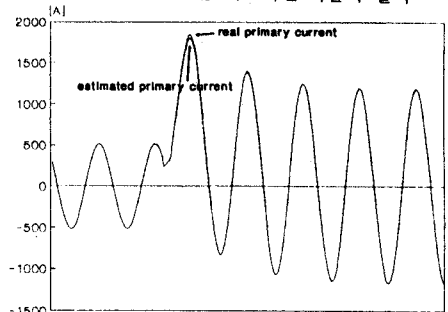


그림 9. #1 송전선의 원래의 1차전류와 추정된 1차전류

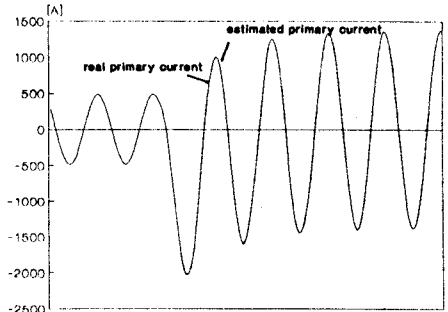


그림 10. #2 송전선의 원래의 1차전류와 추정된 1차전류

추정된 1차전류로부터 식 (26)을 이용하여 추정된 2차전류와 왜곡된 2차전류를 그림 11. 과 그림 12.에서 비교하였다.

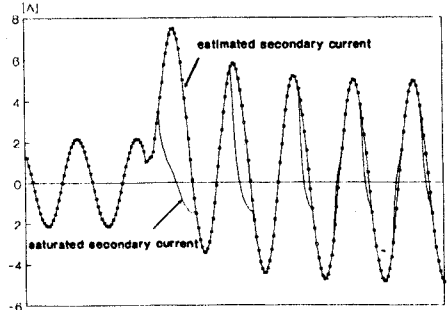


그림 11. #1 송전선의 왜곡된 2차전류와 추정된 2차전류

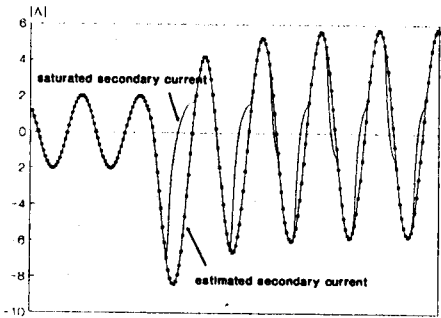


그림 12. #2 송전선의 왜곡된 2차전류와 추정된 2차전류
 왜곡된 2차전류를 합하여 계산한 차동전류와, 추정된 2차전
 류를 합하여 계산한 차동전류를 다음 그림에서 비교하였다.

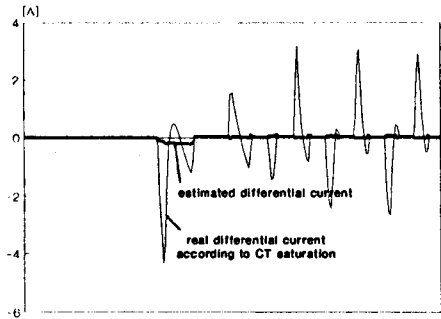


그림 13. 왜곡된 2차전류를 이용하여 계산한 차동전류와
 추정된 2차전류를 이용하여 계산한 차동전류

5 결론

본 논문에서는 릴레이에 직접 연결되는 CT의 2차전류와 전압만을 이용하여 2차전류가 정상적인 전류인지, 포화되어 왜곡된 전류인지를 판단하였고, CT가 포화되어 2차전류가 왜곡되었을 때에도 왜곡되지 않은 2차전류를 계산하는 방법을 제안하였다.

6 참고문헌

- [1]. G. R. Slemon, A. Straughen, Electric Machines, Addison-Wesley Publishing Company, 1981
- [2] Applied protective Relaying, Westinghouse Electric Cooperation, 1982
- [3] L. J. Powell, "Current transformer burden and saturation," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 15, No.3, pp. 294-302, May/June, 1979
- [4] A. Wiszniewski, J. Szafran, "Distance Digital Algorithm Immune to Saturation of Current Transformers," Fourth International Conference on Development in Power System Protection, IEE, pp.11-13 April, 1989
- [5] A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, "Disctrte-time Signal Processing," 1989