

## Analytical Analysis of PT Ferroresonance in the Transient-State

강 용 철\* · 이 병 은<sup>†</sup> · 정 태 영\*\* · 김 연 희\*\*\*  
 (Yong-Cheol Kang · Byung-Eun Lee · Tai-Ying Zheng · Yeon-Hee Kim)

**Abstract** – When a circuit breaker is opened, a large capacitance around the buses, the circuit breaker and the potential transformer (PT) might cause PT ferroresonance. During PT ferroresonance, the iron core repeats saturation and unsaturation even though the supplied voltage is a rated voltage. This paper describes an analytical analysis of PT ferroresonance in the transient-state. To analyze ferroresonance analytically, the iron core is modelled by a simplified two-segment core model in this paper. Thus, a nonlinear ordinary differential equation (ODE) for the flux linkage is changed into a linear ODE with constant coefficients, which enables an analytical analysis. In this simplified model, each state, which is either saturated or unsaturated state, corresponds to one of the three modes, i.e. overdamping, critical damping and underdamping. The flux linkage and the voltage in each state are obtained analytically by solving the linear ODE with constant coefficients. The proposed transient analysis is effective in the more understanding of ferroresonance and thus can be used to design a ferroresonance prevention or suppression circuit of a PT.

**Key Words** : Ferroresonance, Nonlinear magnetizing inductance, Open phase angle of the circuit breaker, Potential transformer, Second-order differential equation, Transient-state, and Analytical analysis.

### 1. 서 론

전압 변성기(PT: Potential Transformer) 철공진은 PT 철심의 비선형 인덕턴스와 전력시스템의 커패시턴스 사이에 발생하는 일련의 공진현상이다. 커패시턴스로는 송/배전선 커패시턴스, 모선과 대지간, 모선과 모선간 커패시턴스, 차단기(CB: Circuit Breaker) grading 커패시턴스 등이 있다[1]. 정상상태에서, PT 철심의 비선형 인덕턴스는 비포화 영역에서 동작한다. 하지만, CB가 개방되면, 커패시턴스 성분으로 인하여 자속이 증가하여 철심의 인덕턴스는 자화곡선의 포화영역에서 동작하게 된다. 따라서, 과도한 전류와 전압이 발생되어 PT 소손, 금속 산화물 저항(Metal-Oxided Resistors)의 파괴 등을 유발한다[2].

커패시턴스 성분으로 인해 발생하는 PT 철공진은 계기용 변류기(CT: Current Transformer) 포화 현상과 비슷하며, 철심의 포화와 비포화를 반복한다. CT 포화가 단방향 포화인 반면 PT 철공진은 양방향 포화이다. CT 포화의 주요 요인은 1차측 전류의 dc성분이며, 이 성분은 시간이 지남에 따라 감소되기 때문에 CT 포화는 사라진다. 반면에, PT 철공진은 정격 전압이 커패시턴스를 통하여 장시간 공급되기

때문에 철공진은 오랫동안 유지되게 된다. 따라서, 장기간의 철공진 해석은 전력시스템의 신뢰성 있는 보호와 운영을 위해 매우 필요하다.

철공진의 해석 기법은 과도상태 해석과 과도상태 이후의 정상상태 해석으로 분류된다. 과도상태가 지난 후 정상상태에서 철공진은 4가지 형태 즉, 기본과 모드(Fundamental Mode), 저조파 모드(Subharmonic Mode), 준주기 모드(Quasi-periodic mode), 카오스 모드(Chaotic Mode)로 분류된다[3]. 참고문헌 [4-6]에 정상상태에서 철공진 해석 기법이 발표되었다. 참고문헌 [4]에서는, 전류가 자속의 3차식으로 표현될 수 있다는 가정에 기초하여 자속에 대한 상미분 방정식(ODE: Ordinary Differential Equation)을 세운 다음, 자속을 급수의 형태로 표현한 후에 해석적으로 해를 구했다. 참고문헌 [5]에서는 기본과 철공진(FF: Fundamental Ferroresonance)을 선형영역의 전압-전류 곡선과 비선형 영역의 포화된 여자특성 곡선 사이에 교점의 유무에 따라 해석하였다. 참고문헌 [6]에서는 쇄교자속에 대한 ODE에서 쇄교자속을 푸리에 급수로 표현하여 해를 구하였고, 해를 구하기 위해 쇄교자속의 기본과와 고조파 성분을 추정하였다.

비선형 ODE를 해석하는 방법에는 해를 직접 구하는 정량적인 방법(Quantitative Method)과 위상평면을 이용하여 해의 거동을 살피는 정성적인 방법(Qualitative Method)이 있다[7]. 그런데, 비선형 ODE의 해를 구하기 매우 어렵거나 불가능한 경우도 있기 때문에, 정량적인 방법보다는 정성적인 방법을 이용하여 해의 거동을 살피는 연구가 주를 이루었다. 정성적인 방법은 정확한 해를 구할 수는 없지만 해의 안정성을 판별하거나 정상상태에서 철공진 모드를 설명하는

\* 시니어회원 : 전북대 대학원 전기공학과 교수  
<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 전북대 대학원 전기공학과 박사과정  
 E-mail : mpeclab@chonbuk.ac.kr  
 \*\* 정 회원 : 전북대 대학원 전기공학과 박사과정  
 \*\*\* 정 회원 : 전북대 대학원 전기공학과 박사과정  
 접수일자 : 2010년 1월 22일  
 최종완료 : 2010년 4월 26일

데 주로 이용되어 왔다. 참고문헌 [8]에서는 과도상태에서 철공진에 대해 연구되었다. [8]에서, 카오스 현상이 나타나는 직렬 철공진 회로의 동적특성을 연구하였다. Chua-type 자화 모델을 이용하여 쇄교자속에 대한 ODE를 구한다음 backward 오일러 방법을 이용하여 수치해석으로 해를 구하였다.

본 논문은 과도상태에서 PT 철공진 해석적 분석기법을 제안한다. 본 논문에서는, 철심 코어를 간단한 2 선분 (two-segment) 모델로 표현한다. 따라서, 쇄교자속에 대한 비선형 ODE는 선형 상계수 ODE로 변환다. 코어의 각각의 상태는 3개의 모드 중의 하나에 대응된다. 3개의 모드는 과제동(Overdamping), 임계제동(Critical damping), 부족제동(Underdamping)이다. 각각의 상태에서 선형 상계수 ODE의 해를 구함으로써, 쇄교자속과 전압을 정량적인 방법을 이용하여 해석적으로 구한다.

### 2. PT 철공진 해석

그림 1(a)는 본 논문에서 PT 철공진을 모델링하기 위한 간단한 등가회로이다.  $E_{th}$ ,  $C_{th}$ ,  $R$ 는 각각 테브난 등가 전압, 테브난 등가 커패시턴스, 철손 저항과 PT의 부담이 포함된 등가 저항을 나타낸다. 자화전류( $i_L$ )는 코어 쇄교자속( $\lambda$ )의 함수로 표현될 수 있다. 즉,  $i_L = f(\lambda)$ .

쇄교자속에 대한 ODE는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + \frac{1}{RC_{th}} \frac{d\lambda(t)}{dt} + \frac{1}{C_{th}} f_\lambda(t) = E_{th}\omega\cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

여기서,  $\theta$ 는 CB의 개방위상각이다.

$f(\lambda)$ 가 2차 이상의 다항식으로 표현되면, 식 (1)은 비선형 ODE가 되고 식 (1)의 해를 구하기 위해 복잡한 기술이 요구된다. 본 논문에서 과도해석을 수행하기위해, 그림 1(b)에 나타낸 것처럼 2 선분 코어 모델을 이용한다. 2 선분 코어 모델은 충분한 정확도로 코어의 비선형특성을 모델 가능하다[9]. 쇄교자속에 대한 비선형 ODE는 선형 상계수 ODE로 변환다. 그림 1(b)에서, 쇄교자속과 포화점의 자화전류는  $\lambda_s$ 와  $i_s$ 로 표시한다. 각각의 선분은 각각의 상태에 대응된다. 즉, 각각의 상태는 포화 상태와 비포화 상태이고, 다음과 같이 자화전류는 한 식으로 표현될 수 있다.

$$f_\lambda(t) = \frac{1}{L}(\lambda(t) - \lambda_s) + i_s \quad (2)$$

여기서,  $L = L_1, \lambda_s = 0, i_s = 0 \quad -\lambda_{s1} \leq \lambda \leq \lambda_{s1}, \text{ State } S_0$   
 $L = L_2, \lambda_s = \lambda_{s1}, i_s = i_{s1} \quad \lambda > \lambda_{s1}, \text{ State } S_+$   
 $L = L_2, \lambda_s = -\lambda_{s1}, i_s = -i_{s1} \quad \lambda < -\lambda_{s1}, \text{ State } S_-$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면, 다음 식과 같이 쇄교자속에 대한 2차 선형 상계수 ODE로 바뀐다.

$$\frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + \frac{1}{RC_{th}} \frac{d\lambda(t)}{dt} + \frac{1}{LC_{th}} \lambda(t) = E_{th}\omega\cos(\omega t + \theta) + \frac{1}{LC_{th}}(\lambda_s - Li_s) \quad (3)$$

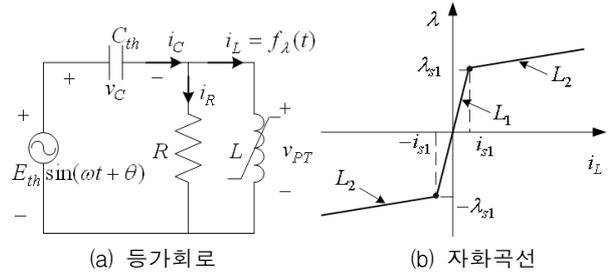


그림 1 PT 철공진 모델  
 Fig. 1 PT ferroresonance model

각 상태에 해당하는  $L$ 을 선택한다면, 식 (3)은 포화 상태 또는 비포화 상태에 대한 해를 구하기 위해 사용될 수 있다. 식 (3)의 해는 과제동, 임계 제동, 부족제동과 같은 세 가지 제동 모드에 따라 구하고, PT에 걸리는 전압 또한 구하였다.  $V_s$ 는 전압원의 크기이다.

i) 과제동 모드:  $L > 4R^2 C_{th}$  (4)

$$\lambda(t) = A_1 e^{-(\alpha-\beta)t} + B_1 e^{-(\alpha+\beta)t} + C_1 \sin(\omega t + \theta + \delta_{p1}) + D_1 \quad (5)$$

$$v_{PT}(t) = -A_1(\alpha-\beta)e^{-(\alpha-\beta)t} - B_1(\alpha+\beta)e^{-(\alpha+\beta)t} + C_1 \omega \cos(\omega t + \theta + \delta_{p1}) \quad (6)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1}{2RC_{th}}, \quad \beta = \sqrt{\left(\frac{1}{2RC_{th}}\right)^2 - \frac{1}{LC_{th}}}$$

$$A_1 = \frac{1}{2\beta} \{-C_1(\omega \cos(\theta + \delta_{p1}) + (\alpha + \beta)\sin(\theta + \delta_{p1})) + (\alpha + \beta)(\lambda_{ini} - D_1) + v_{ini}\},$$

$$B_1 = \frac{1}{2\beta} \{C_1(\omega \cos(\theta + \delta_{p1}) + (\alpha - \beta)\sin(\theta + \delta_{p1})) - (\alpha - \beta)(\lambda_{ini} - D_1) - v_{ini}\},$$

$$C_1 = \frac{\omega E_{th}}{\sqrt{(\alpha^2 - \beta^2 - \omega^2)^2 + (2\alpha\omega)^2}}$$

$$\delta_{p1} = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha^2 - \beta^2 - \omega^2}{2\alpha\omega}\right), \quad D_1 = \lambda_s - Li_s,$$

$$\lambda_{ini} = -(V_s/\omega)\cos\theta, \quad v_{ini} = V_s\sin\theta, \quad \lambda_s = 0, \quad i_s = 0, \quad L = L_1$$

ii) 임계제동 모드:  $L = 4R^2 C_{th}$  (7)

$$\lambda(t) = (A_2 + B_2 t)e^{-\alpha t} + C_2 \sin(\omega t + \theta + \delta_{p2}) + D_2 \quad (8)$$

$$v_{PT}(t) = (B_2 - A_2\alpha - \alpha B_2 t)e^{-\alpha t} + C_2 \omega \cos(\omega t + \theta + \delta_{p2}) \quad (9)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1}{2RC_{th}}$$

$$A_2 = -C_2 \sin(\theta + \delta_{p2}) + \lambda_{ini} - D_2,$$

$$B_2 = -C_2(\alpha \sin(\theta + \delta_{p2}) + \omega \cos(\theta + \delta_{p2})) + \alpha(\lambda_{ini} - D_2) + v_{ini},$$

$$C_2 = \frac{\omega E_{th}}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\alpha\omega)^2}}$$

$$\delta_{p2} = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha^2 - \omega^2}{2\alpha\omega}\right), \quad D_2 = \lambda_s - Li_s,$$

$$\lambda_{ini} = -(V_s/\omega)\cos\theta, \quad v_{ini} = V_s\sin\theta, \quad \lambda_s = 0, \quad i_s = 0, \quad L = L_1$$

iii) 부족제동 모드:  $L < 4R^2 C_{th}$  (10)

$$\lambda(t) = A_3 \sin(\omega_h t + \delta_h) e^{-\alpha t} + C_3 \sin(\omega t + \theta + \delta_{p3}) + D_3 \quad (11)$$

$$v_{PT}(t) = A_3 \{ \omega_h \cos(\omega_h t + \delta_h) - \alpha \sin(\omega_h t + \delta_h) \} e^{-\alpha t} + C_3 \omega \cos(\omega t + \theta + \delta_{p3}) \quad (12)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1}{2RC_{th}}, \quad \omega_h = \sqrt{\frac{1}{LC_{th}} - \left(\frac{1}{2RC_{th}}\right)^2},$$

$$A_3 = \frac{\lambda_{ini} - C_3 \sin(\theta + \delta_{p3}) - D_3}{\sin \delta_h},$$

$$\delta_h = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda_{ini} - C_3 \sin(\theta + \delta_{p3}) - D_3}{(v_{ini} - C_3 \omega \cos(\theta + \delta_{p3}) + \alpha(\lambda_{ini} - C_3 \sin(\theta + \delta_{p3}) - D_3)) / \omega_h} \right),$$

$$C_3 = \frac{\omega E_{th}}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega_h^2 - \omega^2)^2 + (2\alpha\omega)^2}},$$

$$\delta_{p3} = \tan^{-1} \left( \frac{\alpha^2 + \omega_h^2 - \omega^2}{2\alpha\omega} \right), \quad D_3 = \lambda_s - L_s,$$

$$\lambda_{ini} = -(V_s/\omega) \cos \theta, \quad v_{ini} = V_s \sin \theta, \quad \lambda_s = 0, \quad i_s = 0, \quad L = L_1$$

CB가 개방된 순간에 코어는 포화되지 않으므로,  $L$ 은 비포화 구간의 인덕턴스인  $L_1$ 이 된다. 이 값으로부터 식 (4), (7), (10)를 이용하여 과제동, 임계제동, 부족제동 중의 하나를 선정한다. 또한, 식 (5), (8), (11)를 이용하여 각 제동 모드에 대응하는 쇄교자속을, 식 (6), (9), (12)를 이용하여 전압을 얻을 수 있다.

쇄교자속의 절대값  $|\lambda|$ 이  $\lambda_{s1}$ 을 초과한다면, 코어는 포화되고  $L$ 은  $L_2$ 가 된다. 이 경우에도 식 (4), (7), (10)으로부터 세 가지 모드중의 하나를 선택하고, 대응하는 쇄교자속과 전압을 얻을 수 있다. 철공진 기간 동안 철심은 포화와 비포화를 반복하므로, 각 포화 또는 비포화 상태의 인덕턴스값으로부터 해당되는 제동 모드를 선택한 후에, 쇄교자속과 전압을 해석적으로 얻을 수 있다.

각각의 상태에서 정확한 쇄교자속과 전압을 얻기 위해, 상태가 변하는 순간에 쇄교자속에 대한 두 개의 초기조건이 필요하다. 게다가 상태가 변하는 순간에서의  $\theta$  또한 필요하다. 상태가 변하는 순간인  $t_{st}$ 에서 초기값인  $\lambda_{ini}$ 와  $v_{ini}$ 를 구하기 위해서는 정확한 시간  $t_{st}$ 를 알아야만 한다.  $t_{st}$ 를 계산하기 위해, 본 논문에서는 식 (13)에 나타난 뉴턴-랩슨 방법을 이용한다. 그림 2는  $t_{st}$ 를 구하기 위한 절차를 나타냈다. 쇄교자속은 모든  $t_{st}$ 에서  $\lambda_{s1}$  또는  $-\lambda_{s1}$ 이다. 그 순간에서 전압은 전압에 대한 방정식에  $t_{st}$ 를 대입함으로써 얻게 된다. 따라서, 상태가 변하는 순간에서의  $\theta$ 는  $\omega t_{st}$ 로 얻을 수 있다.

$$t^{\nu+1} = t^\nu + [v_{PT}(t^\nu)]^{-1} \lambda(t^\nu) \quad (13)$$

### 3. 사례 연구

PT 철공진 동안 철심은 포화와 비포화를 반복하고, 각각의 상태에서 세 가지 모드인 부족제동, 임계제동, 과제동 중의 하나가 된다. 코어의 인덕턴스  $L$ 은 코어의 상태에 대응하는 두 값을 갖는다. 다섯 가지 종류의 모드 전이가 발생할 수 있다. 예를 들어, 부족제동과 부족제동, 임계제동과 부족제동, 과제동과 부족제동 등이 있다.

하지만, 현실적으로는 식 (7)의 임계제동 조건을 만족하는

경우는 거의 없다. 게다가, 과제동과 과제동 사이의 모드 전이는  $L_1$ 과  $L_2$ 가 식 (4)를 만족할 때만 일어난다. 이것은  $L_1$ 과  $L_2$ 가 매우 큰 값이어야 하는데 실제적으로 불가능하다.

따라서 실제적으로는 부족제동과 부족제동 사이의 모드 전이, 과제동과 부족제동 사이의 모드 전이와 같은 두 가지 경우만 가능하다. 비포화 영역에서 인덕턴스 값을 고려하면, 전자가 후자보다 더 자주 일어난다는 것을 알 수 있다. 이러한 두 가지 전이 사례(사례 1과 사례 3) 결과를 소개한다.

한편, 철공진은 식 (4)-(12)로부터 강제 응답보다 자연응답의 크기에 주로 의존한다는 것을 알 수 있다. 후자는 초기상태에 의존하므로  $R, L, C_{th}$ 의 값뿐만 아니라  $\theta$ 에도 의존한다.  $\theta$ 의 영향에 대해 사례2에 나타났다.

PT 코어의 특성은 비선형이지만, 본 논문에서 제시한 방식은 비선형 코어를 선형으로 근사화해서 해를 구했기 때문에 오차가 발생한다. 그림 3에서와 같이 EMTP-RV를 이용하여 코어의 히스테리시스 특성인 Hyst1을 모델링하여 얻은 결과와 본 논문에서 제시한 결과를 비교하였다. 이 결과를 그림 4, 5, 6에 나타났다.

표 1은 본 논문에서 이용한 파라미터 값이고, 1998년 12월 22일 철공진이 발생했던 154kV ○○변전소의 파라미터 값들을 등가 파라미터로 변환한 값이다[10]. 그림 3에서 히스테리시스 특성을 모의하였기 때문에, R은 철손 56 MΩ을 포함시키지 않아야 한다. 따라서, 사례 1, 2의 경우에서 R은 29.66 MΩ이고, 사례 3의 경우는 5.33 MΩ이다.

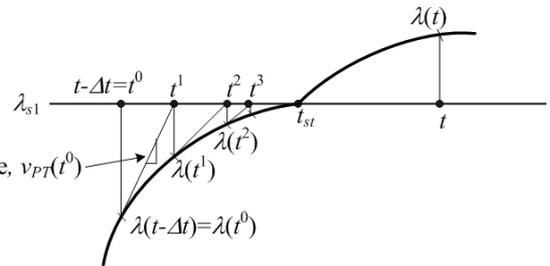


그림 2 뉴턴-랩슨 방법을 이용한  $t_{st}$ 의 계산  
Fig. 2 Calculation of  $t_{st}$  using the Newton-Raphson method

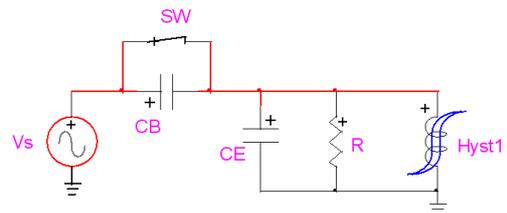


그림 3 EMTP-RV를 이용한 PT 철공진 모델  
Fig. 3 EMTP-RV based PT ferroresonance model

표 1 PT 철공진 모델링을 위해 이용한 파라미터 값들  
Table 1 Parameters used for PT ferroresonance modelling

$V_s$	125.74 kV	$E_{th}$	76.16 kV
$\theta$	0°, 90°	$\omega$	377 rad/s
$\lambda_{s1}$	413.27 Vs	$i_{s1}$	0.789 mA
$L_1$	523.5 kH	$R$	19.39 MΩ
$L_2$	0.4768 kH	$C_{th}(=C_B+C_E)$	3218 pF(=1949 pF+1269 pF)

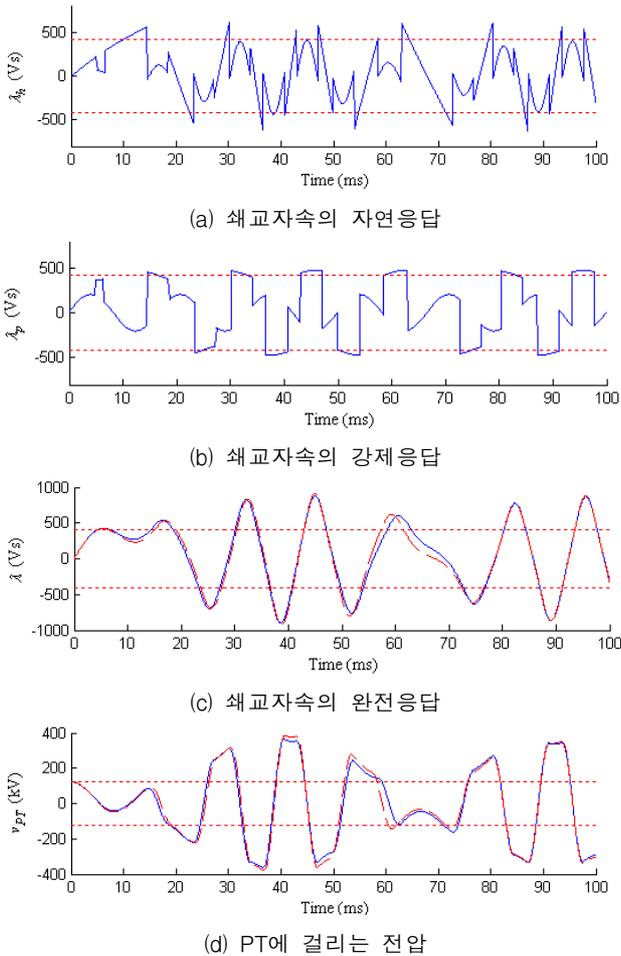


그림 4 사례 1에 대한 결과  
Fig. 4 Results for Case 1

3.1 사례 1: 부족제동과 부족제동 사이의 모드 전이 ( $\theta = 90^\circ$ )

그림 4는 사례 1에 대한 결과를 나타냈다. 이  $L_1$ 과  $L_2$ 는 모두 부족제동 모드 조건을 만족한다. 다시 말하면, 코어는 포화와 비포화 상태에서 모두 부족제동 모드이다. 그림 4(a), 4(b), 4(c), 4(d)에서 실선은 각각 본 논문에서 제시한 해석으로 구한 쇄교자속의 자연응답, 강제응답, 완전응답, PT에 걸리는 전압을 나타내고, 그림 4(c), 4(d)에서 쇄선은 EMTP-RV를 이용하여 얻은 결과를 나타낸다. 그림 4(a), 4(b), 4(c)에서 점선은  $\lambda_{s1}$ 을 나타내고, 그림 4(d)에서 점선은  $V_s$ 를 나타낸다.

그림 4(a)에서, 비포화와 포화 상태에서  $\omega_h$ 는 각각 23 rad/s와 807.26 rad/s이다.  $\lambda_{im}$ 와  $\delta_h$ 가  $\theta$ 에 의존하기 때문에, 각각의 상태에서  $A_3$ 는 다른 값을 가진다. 코어가 같은 부족제동 모드에 있음에도  $A_3$ 는 다르다.

그림 4(b)에서, 비포화 기간 동안 강제응답의 dc 옵셋들은 0이 된다. 반면에, 포화 기간 동안 dc 옵셋들은 거의 포화점 근처 값인 413.27 Vs 또는 -413.27 Vs이다. 한편, 비포화와 포화 상태에서  $C_3$ 는 각각 202.67 Vs와 56.33 Vs이다. 이러한 값은  $\theta$ 가 아니라  $1/LC_{th} = a^2 + \omega_h^2$ 에 의존한다.  $1/LC_{th}$ 이  $\omega$ 와 가까워지면,  $C_3$ 는 매우 커진다. 포화 기간 동안 강제응답의 진폭은 비포화 기간 동안 진폭보다 더 작다.

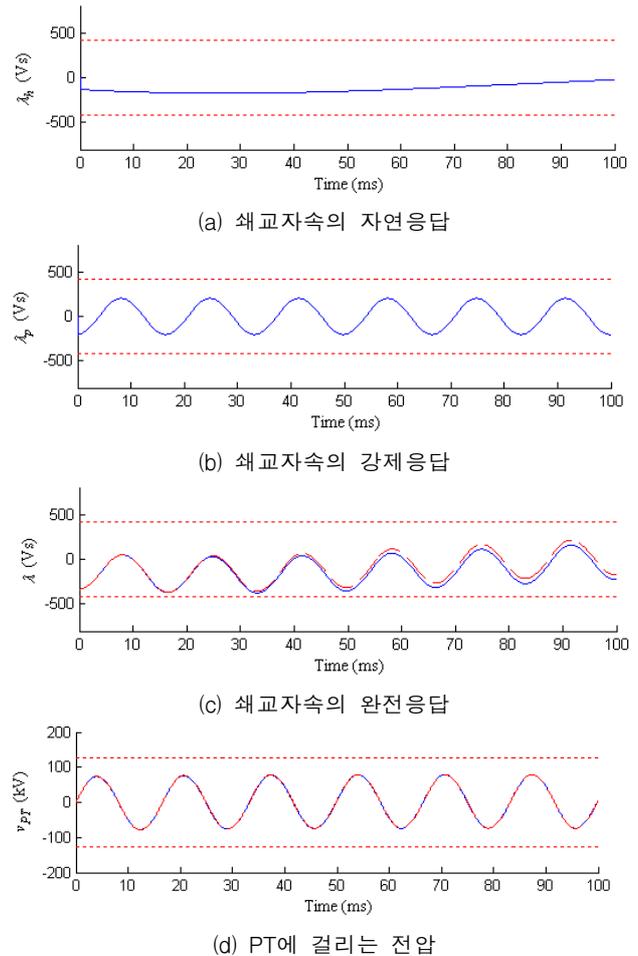


그림 5 사례 2에 대한 결과  
Fig. 5 Results for Case 2

그림 4(c) 실선에서, 코어는 CB 개방 후 4.8 ms에 첫 포화에 도달한다. 예상한 바와 같이, 앞선 포화는 다음 포화의 발생, 순간, 기간에 영향을 준다.

그림 4(d) 실선은 식 (12)를 이용하여 계산한 PT에 걸린 전압을 나타낸다. 이러한 경우에, 전압은 CB 개방 후 40.6 ms에 정격전압의 291 %인 최대값에 도달한다.

그림 4(c)와 4(d) 실선과 쇄선을 비교해 보면, 패턴이 거의 유사함을 알 수 있다. 두 파형이 다소 차이가 나는 이유는 비선형 히스테리시스 특성을 구간선형 자화곡선과 철손으로 근사화했기 때문이다. 실제로 히스테리시스 루프의 면적인 철손은 과도상태에서 계속해서 변화한다. 이러한 과도상태에서 크게 변하는 비선형 특성을 근사화 했음에도 불구하고, 제안한 해석방법으로 구한 쇄교자속과 PT에 걸리는 전압이 히스테리시스 특성이 포함된 EMTP-RV를 이용하여 모의 결과와 거의 유사함을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 제안한 방식이 PT철공진 해석에 적합하고, 90도와 같은  $\theta$ 값이 쇄교자속의 자연응답 크기를 증가시켜 PT 철공진을 야기한다는 것을 알 수 있다.

3.2 사례 2: 부족제동 모드 ( $\theta = 0^\circ$ )

그림 5는 사례 2의 결과를 나타낸다. 이것은  $\theta = 0^\circ$ 인 것을 제외하고 사례 1과 동일하다. 코어는 부족제동 모드가

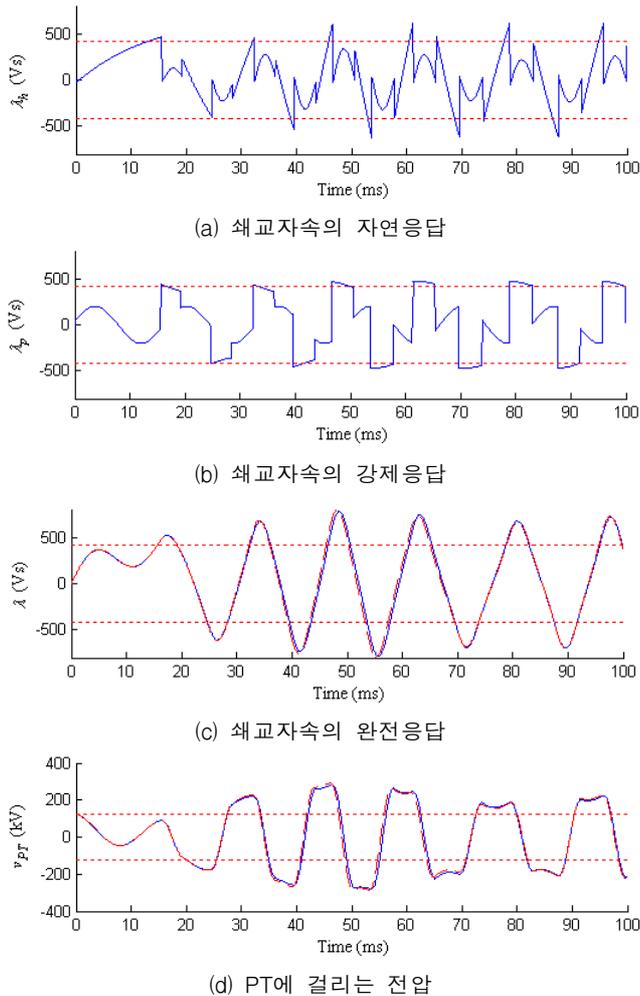


그림 6 사례 3에 대한 결과  
Fig. 6 Results for case 3

며,  $\theta$ 가 0도일 때  $A_3$ 는 포화점에 도달할 만큼 충분히 크지 않기 때문에, 쇄교자속은 포화점을 넘어 증가하지 않는다. 그림 5(a)에 나타난 자연응답은  $A_3$ 가  $-228.58$  Vs,  $\omega_b$ 가 23 rad/s인 지수적으로 감소하는 정현파이다. 그림 5(b)에 나타난 자연응답은 어떠한 옵션도 없고  $C_3$ 가 202.67 Vs인 정현파이다. 그림 5(c)에 보이는 것처럼 완전응답은 포화점을 초과하지 않는다. 사례 1과 다르게, 전압은 순수한 정현파처럼 보이나 지수적으로 감소하는 성분이 있다. 그림 5(c)와 5(d)에서 실선과 쇄선을 비교해 보면, 패턴이 거의 유사하나 사례 1에 비해 오차가 더 작아짐을 알 수 있다.

사례 1과 비교결과,  $\theta$ 가 0도 일 때 자연응답의 크기가 작아 포화를 일으키지 않아서 어떠한 철공진도 발생시키지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한, PT 철공진이 발생하지 않는 과도상태 해석도 가능함을 알 수 있다.

**3.3 사례 3: 과제동과 부족제동 사이에 모드 전이 ( $\theta = 90$ 도)**

그림 6는 사례 3의 결과를 나타낸다.  $R$ 값이 사례 1의 1/4인 4.85 MΩ인 것만 제외하고 사례 1과 동일하다. 이러한 경우에, 코어는 비포화 기간 동안 과제동 모드이나 포화 기간

동안엔 부족제동 모드이다.

그림 6(a)에서 쇄교자속 자연응답의 dc 성분 때문에, 코어는 CB 개방 후 15.6 ms에 포화된다. 이것은 사례 1보다 조금 늦다. 이러한 이유는 코어가 포화 이전에 부족제동 모드가 아니라 과제동 모드이기 때문이다. 포화와 비포화 기간 동안 쇄교자속은 각각 식 (11)과 (5)를 이용하여 구한다.

그림 6(b)에 나타난 강제응답은 dc 옵션을 갖고,  $C_1$ 이 199.96 Vs,  $C_3$ 이 56.27 Vs인 정현파이다. 이러한 값은  $\theta$ 가 아니라  $1/LC_{th} = a^2 - \beta^2$ 에 의존한다. 그림 6(d)는 식 (6)과 (12)로부터 계산한 PT에 걸리는 전압이다. 이러한 경우에, 전압은 CB 개방 후 46.6 ms에 정격 전압의 226 %인 최대값에 도달한다. 그림 6(c)와 6(d)에서 실선과 쇄선을 비교해 보면, 패턴이 거의 유사하나 사례 1에 비해 오차가 더 작아짐을 알 수 있다

사례연구결과, 제안한 방식이 PT철공진 해석에 적합함을 알 수 있고, 과제동 모드로 인해 코어 쇄교자속은 사례 1보다 더 낮게 증가한다는 것을 알 수 있다.

**4. 결 론**

본 논문은 과도상태에서 PT 철공진의 해석적 분석기법을 제안하였다. 본 논문에서 PT 철공진을 해석하기 위해, 철심 코어는 간단한 2 선분 코어 모델로 모델링하였다. 쇄교자속에 대한 비선형 ODE가 선형 상계수 ODE로 변환되었다. 간단한 코어 모델에서 코어가 포화 또는 비포화에서, 각각의 상태는 세 가지 모드인 과제동, 임계제동, 부족제동 중에 하나가 된다. 각각의 상태에서 쇄교자속과 전압은 선형 상계수 ODE의 해를 해석적으로 구하였다.

본 논문에서 제시한 해석방법으로 철공진 현상을 해석한 결과, 쇄교자속의 자연응답은 강제응답보다 더 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 또한, 쇄교자속 자연응답의 크기는 CB 개방각에도 의존한다는 것을 알 수 있었다. 게다가, 과제동 모드는 쇄교자속의 증가를 지연시키고 PT 철공진 방지에 도움을 준다는 것을 알 수 있었다. 코어의 2선분 모델을 이용한 철공진 해석의 적합성 여부를 확인하기위해, EMTP-RV를 이용하여 모의한 결과와 비교하였다. 제안한 해석방법의 결과는 정확한 코어 모델을 사용한 경우와 거의 유사하여 제안한 방식이 적합함을 알 수 있었다.

제안한 과도상태 해석은 철공진 현상을 해석적으로 이해하는데 더 효과적이고, PT 철공진을 방지하거나 억제회로를 설계하는데 사용할 수 있다.

**참 고 문 헌**

[1] Slow Transients Task Force of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of Systems Transients Using Digital Programs, "Modeling and analysing guidelines for slow transients—part III: the study of ferroresonance," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 15, no. 1, pp. 255–265, Jan. 2000.  
[2] Y. G. Li, W. Shi, and F. R. Li, "Novel analytical solution to fundamental ferroresonance—part I: power frequency excitation characteristic," IEEE Trans.

Power Deliv., vol. 21, no. 1, pp. 788–793, Apr. 2006.

[3] P. Ferracci, “Ferroresonance, cahier technique no. 190,” Groupe Schneider, 1998.

[4] O. M. Baycura, and J. C. Donovan, “An unsymmetrical mode of ferroresonance,” IEEE Trans. Magnetism, vol. MAG-7, no. 4, pp. 890–895, Dec. 1971.

[5] Y. G. Li, W. Shi, and F. R. Li, “Novel analytical solution to fundamental ferroresonance—part II: criterion and elimination,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 21, no. 2, pp. 794–800, Apr. 2006.

[6] R. P. Aggarwal, N. S. Saxena, B. S. Sharma, S. Kumar, and S. Krishan, “Failure of electromagnetic voltage transformer due to sustained over-voltage on switching—an indepth field investigation and analytical study,” IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 11, pp. 4448–4455, Nov. 1981.

[7] E. Kreyszig, *Advanced engineering mathematics*, 9th Ed, John Wiley & Sons, 2006.

[8] H. Endo, I. Marinova, T. Takagi, S. Hayano, and Y. Saito, “Dynamics on ferroresonant circuit exhibiting chaotic phenomenon,” IEEE Trans. Magnetism, vol. 40, no. 2, pp. 868–871, Mar. 2004.

[9] Electromagnetic Transients Program Theory Book, Chapter 6, 1995.

[10] E. B. Shim, J. W. Woo, and S. O. Han, “Digital time-domain simulation of ferroresonance of potential transformer in the 154 kV GAS insulated substation,” KIEE International Transactions on PE, vol. 11A, no. 4, pp. 9–14, Dec. 2001.

[11] “EMTP-RV Reference Manual,” CEATI International Inc. [Online]. Available: <http://www.emtp.com>.

저 자 소 개



**강 용 철 (姜 龍 澈)**

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박). 현재, 전북대학교 전기공학과 교수.

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



**이 병 은 (李 炳 恩)**

1975년 11월 7일생. 1999년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

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



**정 태 영 (鄭 太 英)**

1982년 4월 17일생. 2004년 중국 절강대학교 전기공학과 졸업. 2006년 전북대학교 대학원 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394  
E-mail : huanxiang417@hotmail.com



**김 연 희 (金 烟 熙)**

1979년 4월 10일생. 2006년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2008년 전북대학교 대학원 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394  
E-mail : love35021@chonbuk.ac.kr