

포화현상을 고려한 비율차동계전기의 동특성 해석

김 남 호* · 김 일 남** · 이 준 창***

Danamic Characteristics of Percentage Differential Relays Considering Saturation Effect

Nam-Ho Kim * · Il-Nam Kim ** · Juhn-Chang Lee ***

ABSTRACT

The effects of transient inrush currents on the dynamic characteristics of percentage differential relays are studied when the power transformers are reenergized. An algorithm of estimation the nonlinear magnetic property of power transformer and current trnasformer core are developed.

Using this method, we can analyze the effect of inrush currents on the trip region of the percentage differential relays corresponding to the variation of the phase angle and the residual magnetism at the instant of switch closing. Test results are used to verify the availability of the proposed algorithm. Finally a case study is performed to the 110 MVA main transformer in hydraulic power station.

I. 서 론

침두 부하를 담당하고 있는 수력발전소의 운전 특성상 소내전원교체 및 계통과의 병입으로 주변압기의 양단 차단기는 빈번하게 동기투입 되게 되는데^{1,2)} 주변압기 철심의 비선형성 때문에 투입시 과도돌입전류가 순간적으로 정격전류의 수배에 달할^{3,4,5)} 경우 투입 측에 연결된 약전계통에 상당한 영향을 끼쳐

기기의 절연을 파괴시킴과 불필요한 계전기의 오동작으로 인하여 막대한 재산의 손실과 근무자에게 긴장감을 주게된다.^{1,2)}

따라서 본 연구에서는 변압기 및 변류기의 비선형 자기포화특성을 다룰 수 있는 알고리즘을 개발하고 이 알고리즘의 유효성을 입증하기 위해 실험용 변압기를 사용하여 돌입전류의 파형을 분석하였고, 실제통에 사용되고 있는 비선형성의 주변압기와 CT의 포화 특성곡선¹⁷⁾, CT(변류기) 및 변압기의 각종 계 정수를 구해 이를 알고리즘에 적용시켜 변압기 돌입현상을 추적하였다. 또한 돌입

* 공과대학 전기공학과 교수

** 공과대학 전기공학과 대학원

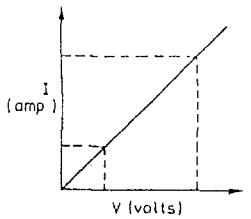
*** 한국전력공사 청평발전소

현상에 직접적인 영향을 주는 투입시 전압위상각과 잔류자속 값의 변화에 따라 비율차동계전기의 동작특성을 추적하여 계전기 최소 동작전류치 및 동작탭을 선정하는데 도움을 주고자 한다.

II. 돌입현상과 비율차동계전기의 일반적 특징

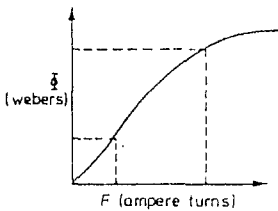
1. 자기특성 및 여자전류 발생원인

전기기기 제품중에 변압기, 변류기, 발전기, 모터, 솔레노이드, 릴레이는 자기회로 특성을 가지고 있다. 자기회로는 전기회로와 같은 선형관계를 유지하지 못하고 자속(ϕ)가 변함에 따라 기자력(F)가 변하는 비선형성의 포화 특성을 나타내고, 철심의 단면적 및 사용전압의 크기에 따라 히스테리시스 곡선의 모양은 변한다. 또한 자기회로인 변압기에 있어서의 중요한것 중의 하나는 정격자속(working flux level)의 결정이다.^{6,8,9}



$$R = \frac{V}{I} \text{ (constant)}$$

(a)



$$R_m = \frac{V}{\phi} \text{ (not constant)}$$

(b)

Fig.1 Comparison of electric & magnetic circuits.

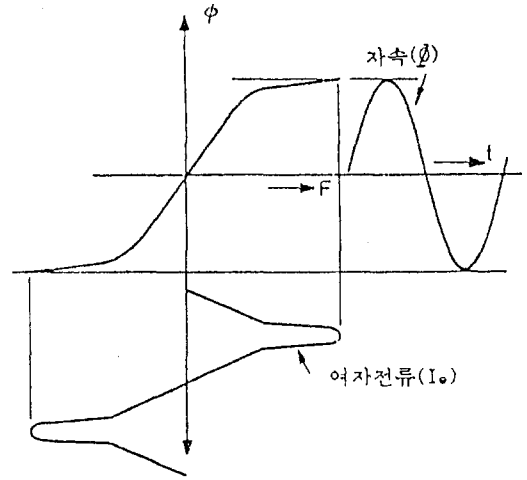


Fig.2 No load characteristic & magnetizing current.

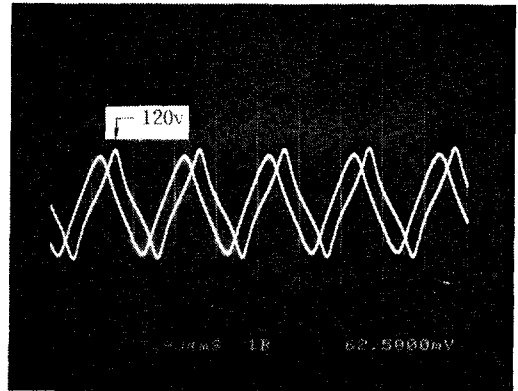


Fig.3 Magnetizing currents corresponding to voltage levels.

2. 전압위상각이 돌입에 미치는 영향

정상운전 상태에서는 변압기 여자전류는 아주 작아서 문제되지 않으나, 무부하상태에서 1차측에서 전압을 인가하는 순간 변압기가 여자되기 전에 존재하는 잔류자속과 정상안정상태를 유지하려고 하는 초기과도자속과의 갭(gap) 사이에 일시적으로 변압기

철심에 흐르는 전류를 여자돌입전류라 한다.^{11, 12, 13, 14)}

$$v = R_1 i_1 + n_1 \frac{d\psi}{dt} \quad (2-1)$$

보통 1차권선저항 R_1 는 아주 작은 값이므로 전압강하를 무시하면

$$v = n_1 \frac{d\psi}{dt} \quad (2-2)$$

$$v = \sqrt{2} V_m \sin(\omega t + \theta)$$

위의 두 식으로부터

$$n_1 \frac{d\psi}{dt} = \sqrt{2} V_m \sin(\omega t + \theta) \quad (2-4)$$

미분방정식을 풀면

$$\psi = -\frac{\sqrt{2} V_m}{\omega n_1} \cos(\omega t + \theta) + \psi_t \quad (2-5)$$

전항 $-\frac{\sqrt{2} V_m}{\omega n_1} \cos(\omega t + \theta)$ 는 변압기 철심에서의 정상안정상상태 자속, 2항인 ψ_t 는 과도분으로서 변압기가 전원에 투입되는 위상각에 따라 변하게 된다.

식 (2-5) 에서

$$\psi = -\psi_m \cos(\omega t + \theta) + \psi_t \quad (2-6)$$

$$\psi_m = \frac{\sqrt{2} V_m}{\omega n_1} \quad (2-5)$$

$t=0$ 일 경우

$$\psi_0 = -\psi_m \cos\theta + \psi_{t0}$$

ψ_0 = 변압기 잔류자속

$-\psi_m \cos\theta$ = t 가 0일때 정상분 자속

ψ_{t0} = 초기 과도자속

변압기의 잔류자속이 없고 전압 위상각영에서 가압되는 경우

$$\theta = 0$$

$$-\psi_m \cos\theta = -\psi_m$$

$$\psi_0 = 0$$

$$\psi_{t0} = \psi_m$$

$$\psi = -\psi_m \cos(\omega t + \theta) + \psi_m \quad (2-7)$$

이때의 자속파는 그림 4와 같이 정격 최대 자속의 2배에 다다르게 된다.¹⁶⁾

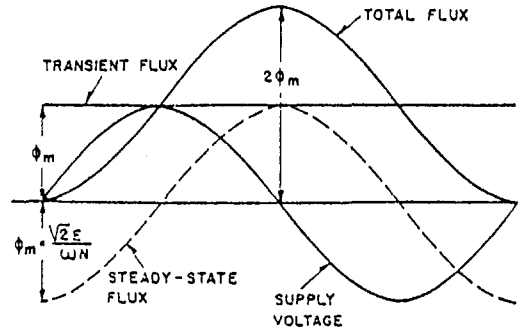


Fig. 4 Primary closed at zero voltage-zero residual flux.

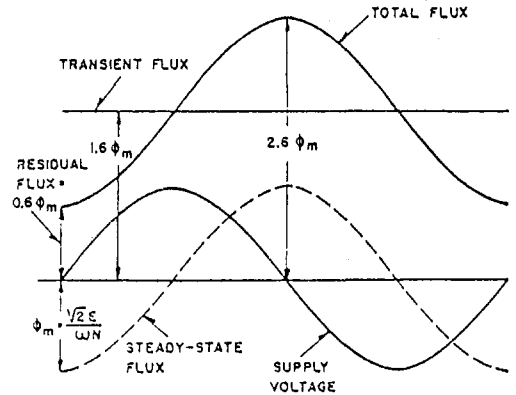


Fig. 5 Primary closed at zero voltage-60% positive residual flux.

3. 비율차동 계산방식 및 동작특성

그림 6에서 억제코일은 변류기를 통과한 전류가 동작코일에 흐르지 못하게 한 방식으로 외부사고 또는 돌입전류로 인한 과대전류가 억제코일을 통과할 때는 큰 차전류가 동작코일로 흐르지 못하게 하고 통과전류가 변압기 내부사고가 발생하여 억제코일에 흐른 차전류가 적을 경우에도 적은 차전류만으로 동작하도록 되어 있다.^{15, 18)} 최소동작 전류치

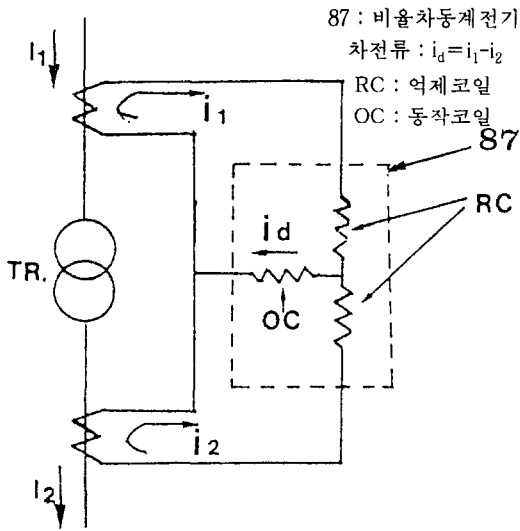


Fig. 6 Schematic diagram of percentage differential relay.

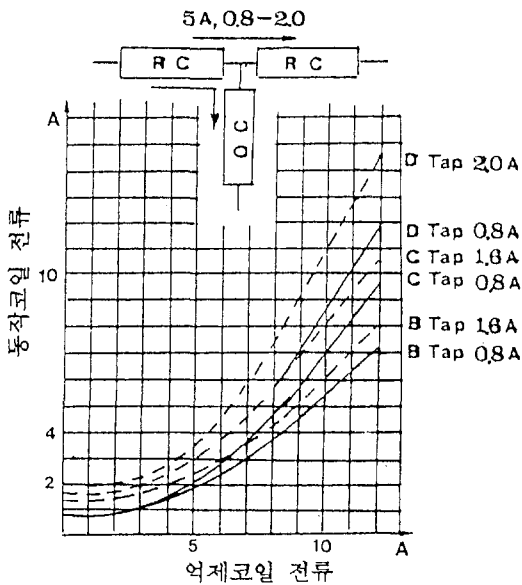


Fig. 7 Operation curve of percentage differential relay.

는 오차전류의 2배를 기준으로 보통 설정전류 탭값의 30%

- 변류기오차 10%
- 보상 CT의 차전류 오차 5%
- 보호계전기 오차 5%
- 기타 cable 소비전력의 오차분

억제코일의 유출전류 =

$$\frac{\text{통과전류}}{\text{전류 Tap 값}} \times 100(\%)$$

동작코일에 흐르는 차전류 =

$$\frac{I_1 - I_2}{\text{전류 Tap 값}} \times 100(\%)$$

동작비율은 =

$$\frac{\text{유입전류 } (I_1) - \text{유출전류 } (I_2)}{\text{유출전류 } (I_2)} \times 100(\%)^{12)}$$

III. 시뮬레이션

1. 포화특성 고려시의 알고리즘 개발

1-1. 변압기 포화특성요소

$V_a = 14.7(\text{kV})$, $V_b = 15.4(\text{kV})$

$I_a = 14.28(\text{A})$, $I_b = 23.4(\text{A})$

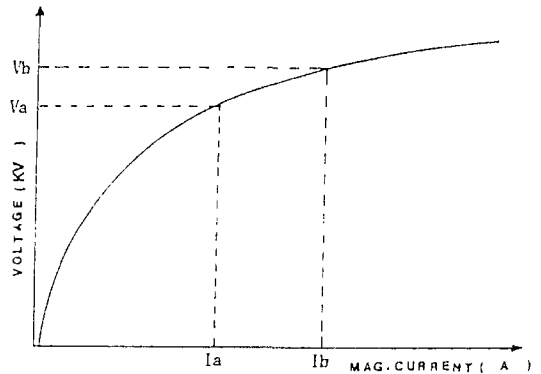


Fig. 8. Main transformer saturation curve

그림 8는 실제통에 사용되고 있는 110MVA 주변압기의 무부하포화곡선이다. 변압기 철심의 자화리액턴스와 여자전류를 알아보기 위해 NLR(Non linear regression)의 대수방정식(Algebraic equation)을 적용하여 곡선과 근사화한 방정식을 구한다.

$$y = \frac{b(1) \times X}{b(2) + X}$$

윗식에서, y는 변압기 실효전압치, X는 여자전류이고, $b(1) = 16306.21$, $b(2) =$

0.5495이다.

알고리즘의 주내용은 다음과 같다.

- 1) 비선형 무부하포화곡선에서 초기 $t=0$ 인 순간 자화리액턴스 L_m 은 무부하 정격리액턴스이고, time step의 사다리꼴 면적을 구한 후 과도방정식에 적용하여 여자전류 i_e 를 구한다.
- 2) step이 증가함에 따라 증가분의 면적과 자화리액턴스를 방정식에 대입하고, 새로운 적분상수 C 는 그 이전의 방정식에서 얻는다.
- 3) 정해진 시간에 도달하면 계산을 중지한다.

1-2. 변류기 포화특성요소

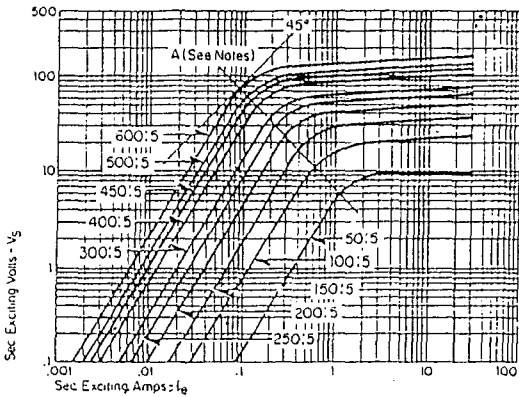


Fig. 9. CT saturation curve

그림 9은 CT 자화곡선이다. 이 곡선에서 NLR에 Froelich equation을 사용하여 상수를 구한다.

- 1) CT 비율 600 : 5의 NLR에 의한 equation은 위의 대수방정식과 같다.
 $b(1) = 385.6008, b(2) = 0.42975$
- 2) CT 비율 6000 : 5의 상수는
 $b(1) = 176.3191, b(2) = 0.00121$

2. 무부하상태에서의 1차특성

그림 10과 같이 변압기를 운전하려고 변압기 2차를 개방한 상태에서 전원을 1차권선에 $t=0$ 의 순간 스위치를 투입(投入)하는 경우 철손저항을 무시하면 등가회로는 다음과 같다.

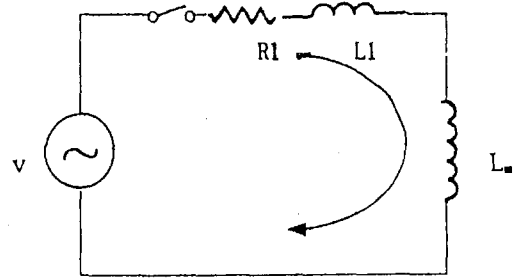


Fig. 10 Primary circuit of transformer.

$$v = V_m \sin(\omega t + \theta)$$

R_1 : Transformer Resistance of Primary Winding

L_1 : Transformer Inductance of Primary Winding

L_m : Magnetising Inductance

위의 회로에서

$$v = R_1 i_1 + L_1 i_1' \quad (3-1)$$

여기서 $L = L_1 + L_m$

회로방정식 식 (3-1)로부터 변압기 1차전류, 즉 여자전류는 식 (3-2)와 같이 유도된다.

$$i_1 = \frac{V_m}{L} e^{-(t/T_1)}$$

$$\int_{t_s}^t e^{-(\tau/T_1)} \sin(\omega\tau + \theta) d\tau$$

$$+ C e^{-(t/T_1)} \quad (3-2)$$

$$\text{여기서 } T_1 = \frac{L}{R_1}$$

L_m 값 변경시의 새로운 C 값을 구하기 위해서는 식 (3-1)의 제차해 (Homogenous equation)를 구하면

$$i_{1h} = C \exp(-R_1 t/L) \quad (3-3)$$

따라서 새로운 C 값은 다음과 같다.

$$C = i_{1(-)} / \exp(-R_1 t / L) \quad (3-4)$$

$i_{1(-)}$ 는 L_m 변화 직전의 전류값이다.

3. 부하변화에 따른 2차투입

1차로 환산한 변압기의 근사등가회로 (Approximate equivalent circuit) 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{여기서 } V_1 &= V_m \sin(\omega t + \theta) \\ R &= R_1 + a^2 R_2 + a^2 R_{load} \\ L &= L_1 + a^2 L_2 \end{aligned}$$

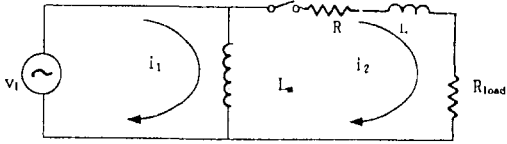


Fig. 11. Approximate equivalent circuit of transformer referred to primary.

여기서 R_1 , R_2 , L_1 , L_2 는 각각 1, 2차 권선의 저항 및 인덕턴스이며 a 는 변압기의 권수비 (turns ratio) 이다.

차단기 투입시 좌, 우측 회로에서 다음과 같은 회로방정식이 성립한다.

$$v_1 = L_m (i_1' - i_2' / a) \quad (3-5)$$

$$0 = (R/a) i_2 + (L/a) i_2' + L_m (i_2' / a - i_2') \quad (3-6)$$

이 두 식으로부터

$$i_2' + (R/L) i_2 = (a V_m / L) \sin(\omega t + \theta) \quad (3-7)$$

식 (3-7) 의 비제차 미분방정식의 해는

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{a V_m}{L} e^{-(t/T)} \\ &+ \int_{t_s}^t e^{(\tau/T)} \sin(\omega \tau + \theta) d\tau \\ &+ C e^{-(t/T)} \quad (3-2) \end{aligned}$$

$$\text{여기서 } T = \frac{L}{R}$$

L_m 값 변경시의 새로운 C 값은

$$C = i_2(-) / \exp(-Rt/L) \quad (3-9)$$

$i_2(-)$ 는 L_m 변화 직전의 i_2 전류값이다. 한편 식 (3-5) 로부터

$$\begin{aligned} i_1' &= (V_m / L_m) \sin(\omega t + \theta) \\ &+ i_2' / a + C_1 \end{aligned} \quad (3-10)$$

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{V_m}{L} \int_{t_s}^t \sin(\omega \tau + \theta) d\tau \\ &+ i_2 / a + C_1 \end{aligned} \quad (3-11)$$

L_m 값 변경시의 새로운 C_1 값은 식 (3-11) 에서 입력항인 우변이 0일때의 제차해가 다음과 같으므로

$$i_{1h} = C_1 \quad (3-12)$$

따라서 새로운 C_1 값은 바로 변경 직전의 i_1 값을 취하면 된다.

한편 여자전류값은 아래와 같다.

$$i_0 = i_1 - i_2 / a \quad (3-13)$$

IV. 시뮬레이션과 실험결과의 비교

1. 실험

Transformer Trainer TT 179는 크게 2부분으로 측정 Console과 실험용 Transformer로서 무부하시험 및 단락시험으로 각종 제정수를 얻는다.

안전장치로는 Console에 내장된 과부하 방지장치 및 활선에 인체접촉 방지를 위해 safety cover를 사용한 안전장치 회로가 있다.

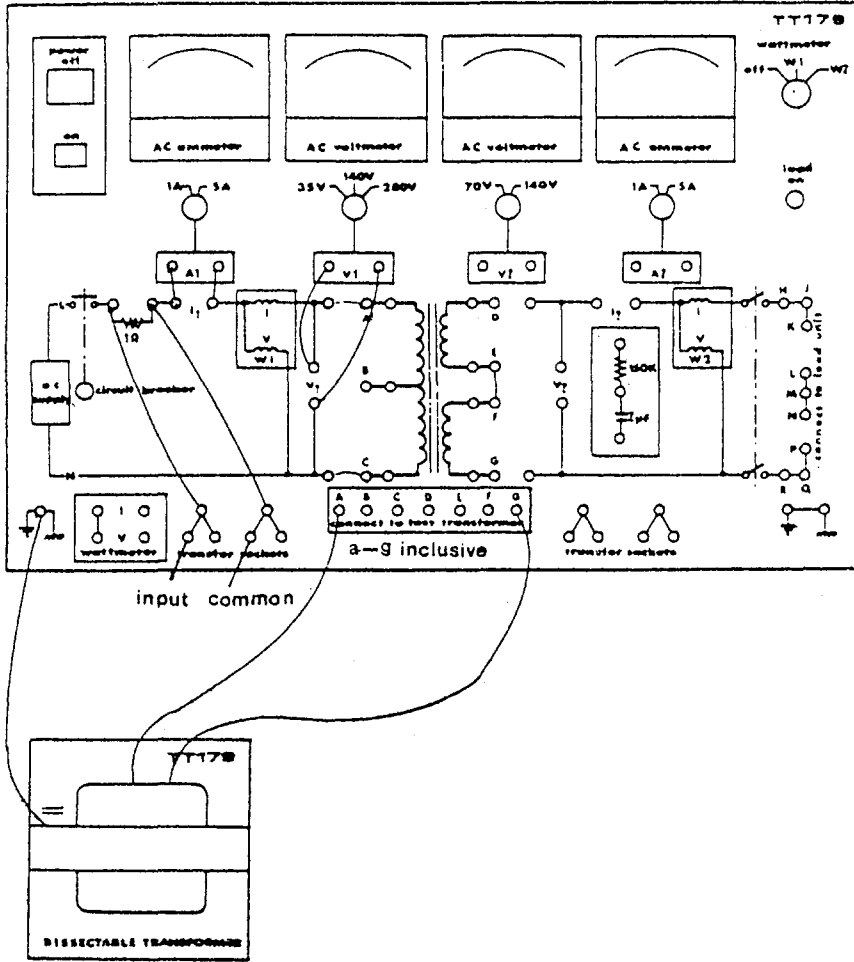


Fig. 12 Transformer testing apparatus.

- ※ 실험장비 : Console 1 Set. (변압기 실험용)
 실험용 변압기 1 EA. (1차전압 120V, 2차전압 65V/130V)
 슬라이더스. (용량 2 kVA)
 단상전력 1 EA.
 디지털 스토리지 스코프 1 Set.
 Load unit LU 178. (300Ω/22W, 150/36, 100/48, 75/80)

2. 결과의 비교

2-1. 무부하 상태에서의 1차투입

그림 13는 포화의 영향을 알아보기 위하여

실험용 변압기 2차측을 개방하고 1차측에서 스위치를 투입했을 때 최대돌입전류가 발생하는 전압 위상각이 0°일때 시뮬레이션한 여자전류 파형이다.

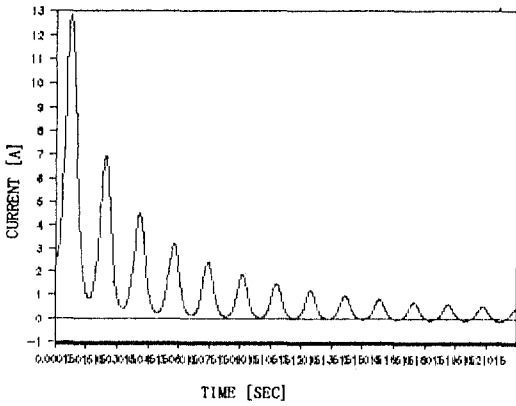


Fig. 13. Inrush currents with saturation effect at $\theta=0^\circ$.

표 1은 그림 13의 여자돌입전류 파형을 분석한 표이다.

Table 1. Example of inrush current wave analysis.

파형 degree	$\theta=0$	$\theta=\pi/6$	$\theta=\pi/3$	$\theta=\pi/2$
기본 파 분	100%	100%	100%	100%
직 류 분	144	136	110	5.8
제2고조파 분	25.2	29.5	39.8	2.83
제3고조파 분	5.8	2.99	9.5	33.6
제4고조파 분	3.3	5.5	5.6	0.1
제5고조파 분	2.9	1.8	4.4	4.9

그림 14은 스크로상의 여자전류 파형이다.

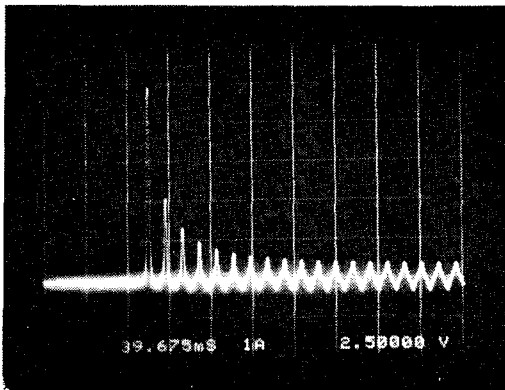


Fig. 14. Experimental result corresponding to Fig. 13.

그림 15는 스위치 투입시의 전압위상각이 돌입전류의 파형에 미치는 영향을 알아 본 것이다.

위상각 θ 가 0° 에 가까와 질수록 돌입현상이 심화됨을 보여주고 있다.

여기서 철심의 잔류자기는 없는 것으로 보았고, 위상각 θ 는 다음과 같다.

$A=0, B=\pi/6, C=\pi/3, D=\pi/2$ 이다.

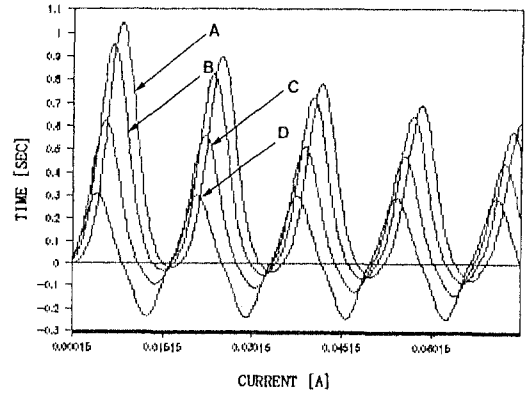


Fig. 15. Effect of phase angle on inrush currents.

위상각 θ 는 $\pi/2$ 이고, 잔류자기는 $A>B>C>D$ 이다.

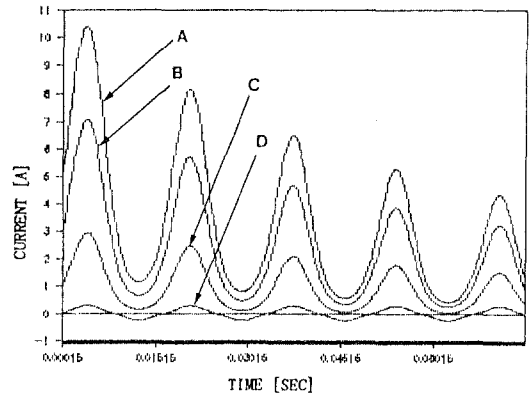


Fig. 16. Effect of residual magnetism on inrush currents.

그림 17은 1차 투입시의 돌입전류를 감소

시킬 수 있는 방안으로 1차권선 저항 R_1 에 $5[\Omega]$ 의 직렬저항을 삽입한 것이다. 여기서 $\theta=0^\circ$

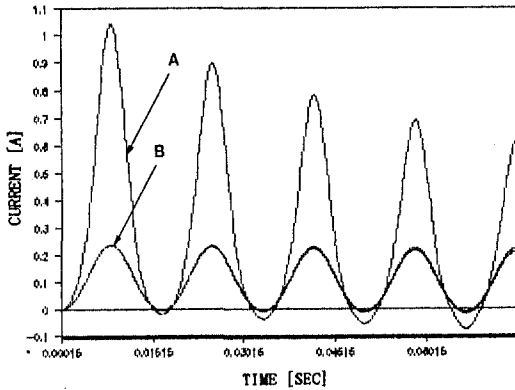


Fig. 17. Effect of resistor insertion on inrush currents.

A : No resistor insertion, $R_1=1.4[\Omega]$
 B : Resistor insertion, $R_1=1.4+5=6.4[\Omega]$

2-2. 부하변화에 따른 2차투입

그림 18은 포화 고려시 변압기 1,2차 전류의 파형을 나타낸 것으로, 1차전류는 철심의 포화로 인한 여자전류의 영향을 받으나 2차전류는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 여기서 $\theta=\pi/3.0$ 이고, 잔류자기는 없다.

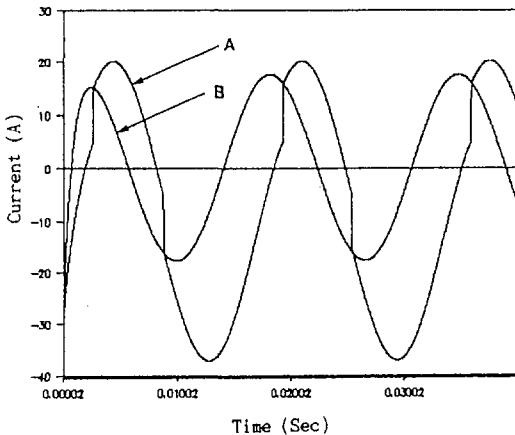


Fig. 18. Primary (A), secondary (B) currents with saturation effect.

A, B are 1st., 2nd. currents at $\theta=\pi/3$.

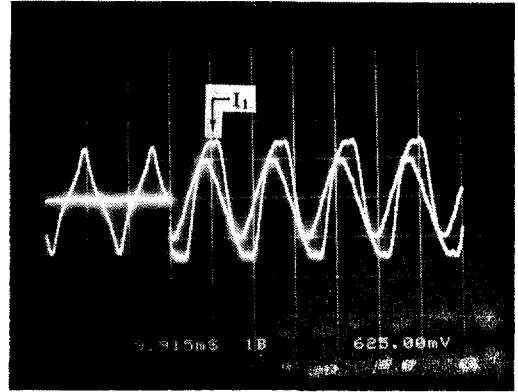


Fig. 19. Experimental result corresponding to Fig. 18.

그림 20은 부하변화에 따른 여자전류의 변화를 보여주고 있다. 스위치 투입시 부하가 클수록 돌입현상이 줄어들게 됨을 알 수 있다.

여기서 위상각 θ 는 0, 잔류자기는 없는 경우를 모의한 것이다.

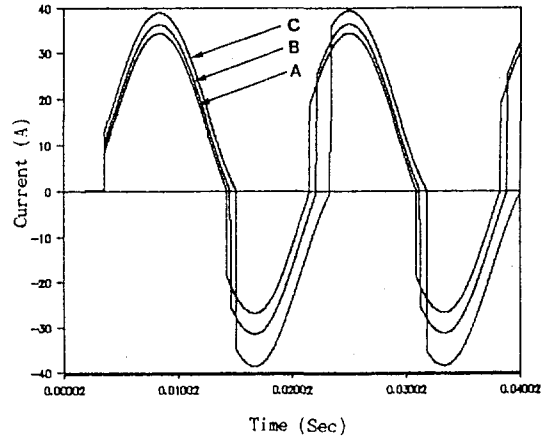


Fig. 20. Effect of load variation on inrush currents

A, B & C are 0, 5, 10 $[\Omega]$ respectively

V. 실 계통 적용 및 비율차동계전기의 동특성

1. 실 계통 적용

주변압기 용량 110MVA, 전압 14,700/154,000[V]인 각종 계 정수

$$\text{권수비 } a = \frac{154}{14.7 \times 1.7321} = 6.048$$

%Z=10.454[%]이며, 퍼센트 저항강하를 무시하고 양분하여 구하면 $X_1=0.1027[\Omega]$, $X_2=11.269[\Omega]$ 이다.

75°C로 환산한 저항값은 $R_1=0.008546[\Omega]$, $R_2=0.397[\Omega]$

철심의 자화리액턴스는

$$Z_m = \frac{14700}{14.28} = 1029.41[\Omega]$$

Table 2. Main transformer results of load test.

전류	손실	여자전압	탭 전 압	
A	KW	V	HV [kv]	LV [kv]
412	384	16100	154	14.7

Table 3. Main tr. results of load test.

전 압 [kv]	여 자 전 류 [A]				여자손실 [W]
	U	V	W	평균	
16.15	46.3	45.5	46.8	46.2	139.1
15.45	23.5	23.0	23.7	23.4	117.6
14.70	14.22	14.13	14.49	14.28	101.6
13.95	9.35	9.33	9.42	9.38	85.3
13.25	6.90	6.90	6.90	6.90	73.9
13.00	6.12	6.09	6.09	6.10	70.1

1-1. 실 계통 적용

그림 21은 실계통에 사용되고 있는 주변압기의 포화현상을 알아보기 위해 돌입전류의 파형을 추적하여 시뮬레이션한 여자전류 파형이다.

여기서 위상각 θ 는 0° 로 모의했고, 양 파형 간의 약간의 편차는 돌입에 영향을 주는 요소들의 값을 정확하게 알 수 없기 때문이다.

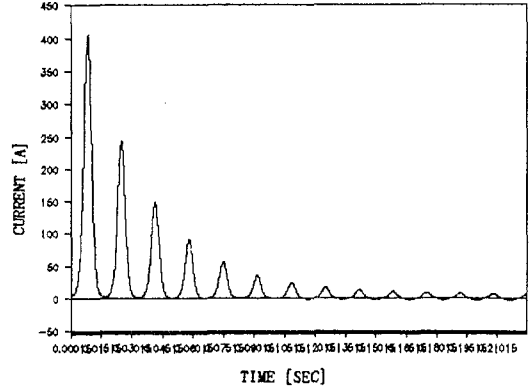


Fig. 21. Inrush currents with main transformer effect

그림 22은 위상각이 0° 일때 차단기의 투입시 주변압기 포화곡선과 CT포화곡선을 고려한 것이며,

A파형은 변압기 돌입전류에 의한 변류기 1차전류이고, B파형은 변류기 포화특성을 고려한 변류기 2차전류인 계전기에 유입되는 전류이다.

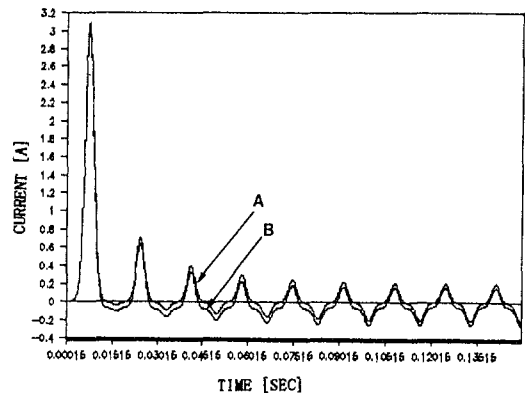
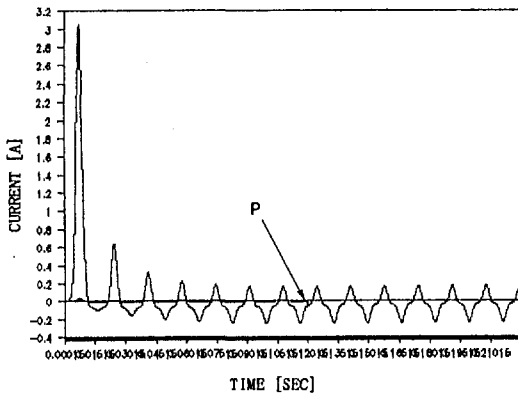


Fig. 22. Percentage differential relay considering saturation effect.

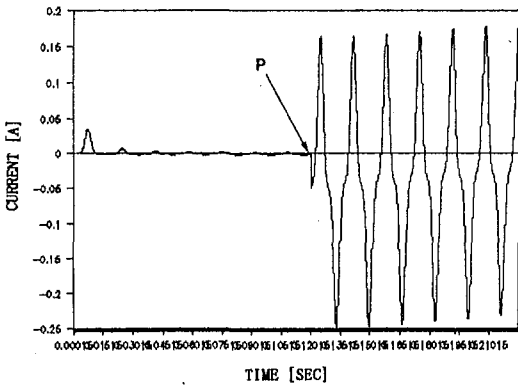
그림 23은 감도저감 방식의 비율차동계전 방식을 사용했을때 여자전류 파형이다.

A는 변류기를 통과한 과도전류의 파형이다.

B는 비율차동계전기의 동작코일에 흐르는 전류 값이다.



(A)



(B)

Fig. 23. Differential relays with sensitivity delay for transformer protection.

2. 비율차동계전기의 동특성

그림 24은 비율차동계전기의 동작특성곡선(Operating characteristic curve)이다.

투입전압의 위상각은 돌입현상에 큰 영향

을 미치게 되므로 주어진 전압탭 부하에서 위상각과 잔류자기를 변화시키면서 1,2차 전류의 편차전류값을 구하였다.

왜형파인 편차전류를 푸리에변환(Fourier Transformation)에 의하여 주파수분석을 하고 이들로부터 실효값을 구하였다.

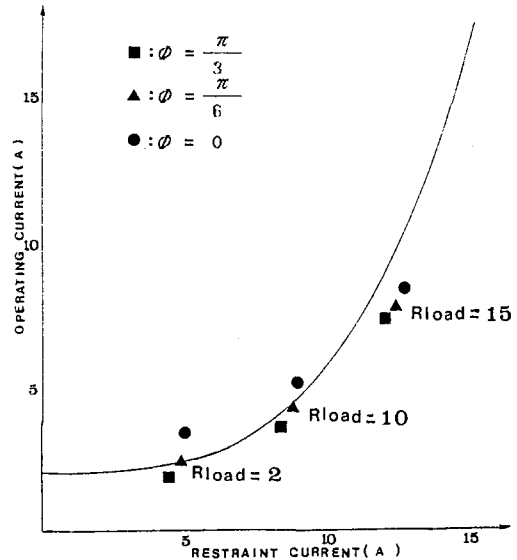


Fig. 24. Dynamic characteristics of percentage differential relay.

VI. 결 론

전력용 변압기가 차단기에 의하여 계통에 병입시 변압기 철심의 포화특성으로 인하여 발생하는 과도돌입전류가 비율차동계전기의 동작특성에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 변압기의 1차 및 2차 투입시 무부하 포화특성에 의한 비선형 자화특성을 고려한 경우 여자전류의 특성을 알아 볼 수 있는 프로그램을 개발하였으며 실험에 의하여 시뮬레이션 결과의 유효성을 입증하였다.

또한 비율차동계전기의 입력단에 연결되어 있는 변류기 역시 포화특성으로 인하여 돌입전류의 특성에 영향을 미치게 되므로 비

선형 특성을 고려한 CT 2차전류 특성을 시뮬레이션 하였다. 위의 결과로부터 비율차동계전기의 동특성에 포화로 인한 돌입현상이 미치는 영향을 해석하였다. 투입위상각이 작아지고 잔류자기가 클 수록 동작점이 차단영역 경계치에 근접하다가 차단영역 내에 들게 되어 비율차동계전기로 하여금 오동작을 일으키게 되는데 이러한 현상은 부하가 작아질 수록 심화된다. 따라서 부하가 증가된 상태에서 2차측 차단기를 투입하면 돌입전류에 의한 계전기의 오동작을 방지할 수 있으나 이 경우엔 2차측 전류가 갑자기 증대되기 때문에 각종 부하에 좋지 않은 영향을 주게 되므로 변압기 용량에 따른 적정 수준의 투입시의 부하값을 제시할 필요가 있다. 계전기의 오동작을 방지할 수 있는 방법으로는 투입측 차단기와 변압기권선 사이에 저항을 삽입함으로써 돌입현상을 급격히 줄일 수 있게 된다.

이 외에도 차단기에 투입지령을 내리더라도 돌입이 발생되지 않는 전압위상각이 90°에서 이루어질 수 있는 장치를 개발한다든지 혹은 투입전에 변압기철심에 잔류하는 잔류자속을 제거할 수 있는 장치의 개발이 요구된다.

참 고 문 헌

1. 韓國水資源公社, “제5회 기술발표문집”, pp. 73-172, 1988.
2. 韓國水資源公社, “제9회 기술발표문집”, pp. 333-385, 1990.
3. Westinghouse Electric Corporation, “Applied Protective Relaying, A Silent Sentinels”, Newark, N. J., 1976.
4. A. R. Warrington, “Protective Relays—their theory and practice”, 3rd ed., Vol. 3, Chapman & Hall, 1977.
5. C. D. Hayward, “Prolonged inrush current with paralleled transformers

- affect differential relays”, Trans. AIEE, 60, PP. 1096-1101, 1941.
6. 植木久之 著, “母線と電力機器の保護繼電システム”, 電氣書院, PP. 28-31, 152-156, 1980.
7. 木村久 著, “變壓器の設計工作法”, 電氣書院, PP. 158-161, 1981.
8. 教材編纂委員會, “電氣機械”, 朝元社, PP. 220-246, 1987.
9. 朴旻鎬, “誘導機器”, 東明社, PP. 184-192, 1985.
10. A. Wright, “Electrical Power System Protection”, 1st ed., Chapman & Hall, PP. 179-208, 1993.
11. 申大承, “보호계전시스템 기술”, 기다리, PP. 133-141, 1993.
12. Type DT92 three-phased biased differential relay, Asea Brown Boveri, Publication CH-ES 65-60, Vol. 1, Buyers Guide 1990.
13. L. L. Lai, “Simulation of power station protection equipment”, University of Aston in Birmingham, Thesis, 1984.
14. 小林進 著, “保護繼電技術”, 電氣書院, PP. 84-87, 245-251, 1973.
15. General Station Engineers of The Westinghouse Electric Corporation, “Electrical Transmission and Distribution-Reference book”, 4th ed., Ninth Printing, 1964.
16. 金南豪, “옴셋이 過電流繼電器의 保護協調에 미치는 影響”, 서울대공대 博士學位論文, 1993.
17. 中山敬造編, 李相浩譯, “保護繼電system”, 新岩文化社, PP. 38-76, 1977.
18. H. H. Happ, “Piecewise Methods and Applications to Power Systems”, John Wiley & Sons, Inc., 1980.