

단락시험용 대전류변압기 돌입전류특성에 관한 연구

노창일, 나대열, 김선구, 정홍수, 김원만, 이동준, 김선호  
(한국전기연구원)

THE STUDY OF CHARACTERISTICS OF INRUSH CURRENTS FOR HIGH POWER SHORT-CIRCUIT TESTING TRANSFORMER

Chang-il Roh, Dae-Ryeol La, Sun-Koo Kim, Heung-Soo Jung, Won-Man Kim, Dong-Jun Lee, Sun-Ho Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - The inrush current of transformer cause saturation effects of recovery voltage for short-circuit power testing, the inrush current depends on the residual flux of the transformer core. when inrush current occurs, it contains a d.c. component and the high harmonic content of the current are of importance to relay protection of testing circuit. this paper describes of decrease method of inrush current for high power short-circuit testing transformer.

1. 서 론

단락시험을 실시하기 위하여 변압기에 전원을 인가 시 변압기 철심이 갖는 특성에 의하여 전압이 투입 시 위상과 잔류자속의 위상이 상이하면 잔류자속의 영향에 의하여 과도돌입전류가 발생하며 이 전류는 변압기 철심의 포화한계 이상이 되면 정격전류 이상으로 발생할 수 있으며 이 돌입전류의 직류성분과 고조파는 보호회로의 과전류 계전기가 오동작을 발생시킬 수 있는 원인을 제공하고 있다.

이 돌입전류는 여자된 변압기를 병렬 결선할 경우 포화현상이 생긴다. 이는 변압기가 큰 소음이 나며 보통 수초에서 십지여 수분까지 이상현상을 발생한다. 돌입전류는 크기는 변압기철심의 자속밀도에 의하여 좌우된다.

특히 단락시험용 변압기는 과여자 시 변압기가 보유한 자속밀도의 영향으로 시험전압 파형의 왜곡현상을 발생하여 회복전압(recovery voltage)의 측정이 불가능하여 정확한 시험전압의 인가여부를 판단할 수 없으며 이는 시험에 대한 신뢰성에 문제를 제기할 수도 있다. 이에 따라 변압기의 돌입전류의 발생원인과 실제시험회로에서 돌입전류에 의한 전압파형의 왜곡현상을 감소시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

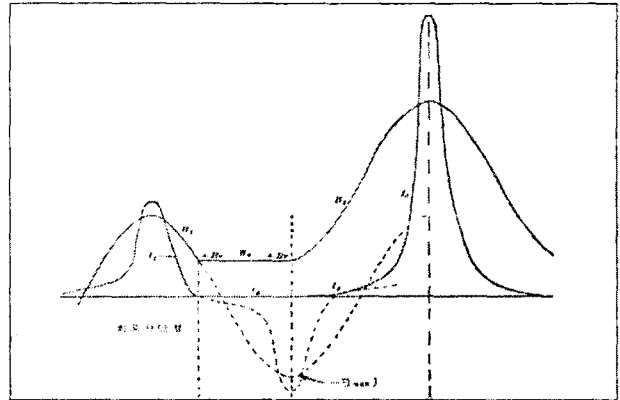
2.1 돌입전류의 발생원인

변압기의 철심에 잔류자속밀도와 동일한 전압위상으로 변압기에 전압을 인가할 수 있으면 자기적인 과도현상의 발생하지 않고 시험회로를 구성할 수 있지만 실제로 단락시험회로의 투입스위치(making switch)로 동일한 변압기와 잔류자속밀도와 동일한 위상각으로 투입은 불가능하다

현재 돌입전류를 저감할 수 있는 방법으로 다음과 방법이 사용되고 있으나 대전류용전인 단락시험인 경우는 사용이 불가능 하다.

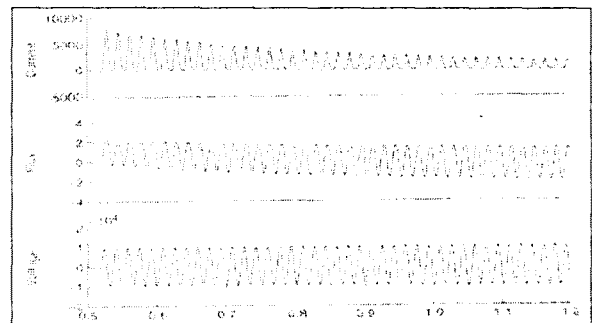
- 투입스위치를 2단 투입하는 방법, 즉 직렬저항을 사용하여 인가전압을 1/2로 감소하여 투입 후 회로가 안정된 다음 저항을 감소하여 정상 투입하는 방법으로 용량이 큰 저항 제작의 어려움, 저항과 변압기의 투입위상의 문제점이 있음.
- 잔류자속을 제거하는 방법 : 변압기 단자간에 자화전류와 같은 충전전류의 콘덴서를 접속함.
- 변압기를 고압측으로 투입하는 방법 : 고압권선의 %인덕턴스가 크므로 돌입전류는 감소되며 외측에 고압권선이 제작된 변압기에 한함.

그림1의 잔류자속밀도와 돌입전류에서 변압기의 전원을 차단하면 자화전류 I는 히스테리시스 곡선을 따라서 zero로 되며 잔류자속밀도는 B<sub>r</sub>로 된다. 전원이 차단하지 않고 계속 통전하면 자화전류 및 잔류자속밀도는 점선으로 표시된 형태로 나타낼 수 있지만 전원을 해제한 경우는 자화전류는 zero로 되고 잔류자속밀도는 +B<sub>r</sub>이 된다. 그림1의 중앙부에서 자속밀도가 점선 -의 최대치 -B<sub>max</sub>에서 전원을 인가하여 여자가 되면 돌입전류는 최대로 되어서 잔류자속밀도는 B<sub>2</sub>에서 시작하여 B<sub>3</sub>의 경로로 이동한다. 인가전압이 정현파인 경우는 역기전력과 자속밀도의 파형은 정현파가 되어서 곡선 B<sub>3</sub>의 자속밀도의 포화특성과 관련이 없이 정현파가 될 수 있지만 자속밀도의 포화가 발생하는 경우는 여자전류 및 자속밀도에도 변형을 초래하여 자속밀도 곡선 B<sub>3</sub>로 되며 자화전류는 I<sub>3</sub>로 된다. 곡선 B<sub>3</sub>의 최대치는 이론적으로 (B<sub>res</sub> + 2 B<sub>max</sub>)가 되지만 변압기가 통상적인 설계로 될 경우는 자기회로의 포화를 나타내는 파고치의 자화전류 I<sub>3</sub>가 흐른다.



〈그림 1〉 변압기 잔류자속밀도와 자화전류

변압기철심의 포화현상이 발생하면 과여자전류가 발생하여 전압의 극성이 1/2 cycle에서 바뀌면 철심의 최대자속은 무부하상태의 자속보다 적게 되고 변압기 돌입전류는 DC분을 포함한 비대칭 전류가 그림2의 파형으로 나타난다.



〈그림 2〉 변압기 돌입전류파형

2.2 돌입전류의 크기

자속밀도에 대응하는 전류는 철심의 히스테리시스 루우프, 또는 자화곡선에서 구할 수 있으나 히스테리시스 루우프나 자화곡선도 대단히 높은 자속밀도에 대한 것은 구할 수가 없기 때문에 이들을 이용한 돌입전류의 크기를 계산할 수는 없다. 일반적인 철심인 경우 다음식과 같이 계산할 수 있다.

다.철심의 가능 최대자속밀도는  $130 \frac{\text{kilolines}}{\text{in}}$ 로 나타낼 수 있다. 철심의

단면적을 A<sub>c</sub>로 하면 그림의 최대 자속은 (B<sub>res</sub> + 2B<sub>max</sub>)A<sub>c</sub>가 되지만 이중에서 130A<sub>c</sub>kilolines는 철심의 내부를 흐르고 나머지 (B<sub>res</sub> + 2B<sub>max</sub>-130)는 여자권선내의 실효공심단면적(實效空單面積) A<sub>w</sub>로 흐른다. ((B<sub>res</sub> + 2B<sub>max</sub>+130) A<sub>w</sub>/A<sub>s</sub>  $\frac{\text{kilolines}}{\text{in}}$ 의 자속밀도를 공심부에 발생하려면 대단히 큰 암페어 턴을 필요로 하기 때문에 공심부의 자속과 병렬로 철심 속에는 130  $\frac{\text{kilolines}}{\text{in}}$ 의 자속밀도가 있는 것으로 판단된다. 따라서 과포화영역에서의 돌입전류는 권선의 공심인덕턴스와 공심부자속으로 부터 계산할 수 있다.

$$\text{공심부 자속밀도 } B_s = \frac{Ac}{As} ((B_{res} + 2B_{max} - 130) \frac{\text{kilolines}}{\text{in}}) \quad (1)$$

권선의 높이를 hin, 턴수를 n이라 하면 최대순간의 돌입전류는

$$I_{max} = \frac{1000hB_s}{3.2n}$$

$$= \frac{10^3}{3.2nA_s} hA_c (B_{res} + 2B_{max} - 130) \quad (2)$$

규소강판의 경우 잔류자속밀도는 최대자속밀도  $B_{max}$ 의 60%이며 조인트의 특성과 철심 단위길이 당 조인트 수에 따라 다소 변화하지만 철심이 길고 조인트 특성이 뛰어난 것일수록 작아진다. 따라서 돌입전류는 잔류자속밀도의 영향을 받는다. 잔류자속밀도를 최대자속밀도의 60%로 가정하면 다음 표로 나타낼 수 있다

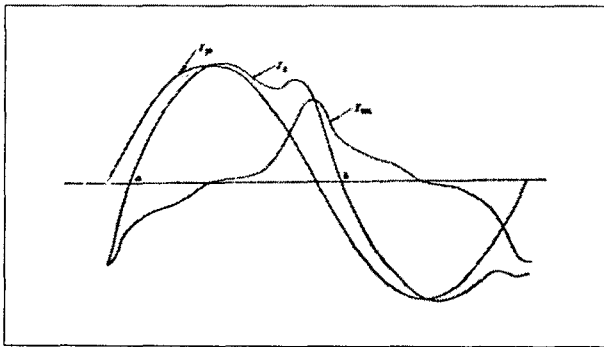
<표 1> 돌입전류와 잔류자속밀도와의 관계

최대자속밀도 ( $B_{max}$ )	잔류자속밀도 ( $B_{res}$ )	$\phi$ space	돌입전류과고치
60	0	0	$\infty$
60	36	26	
70	0	10	5.2
70	42	52	
80	0	30	2.6
80	48	78	
90	0	50	2.1
90	54	104	
100	0	70	1.9
100	60	130	

**2.3 잔류자속밀도의 영향을 미치는 요소**

잔류자속밀도의 크기는 전류차단의 순간의 따라 전압, 전류 및 철심의 잔류자속의 3요소로 결정되며 철심이 가진 고유 히스테리시스특성으로 전류 차단 시 전류영점은 자속의 영점교차점에서 전압의 영점교차점으로 이동함으로써 잔류자속이 +인 상태에서 -의 예상자속의 투입이 이루어지면 철심의 자속포화에 의한 돌입전류가 발생하여 그림1의 과도잔류자속밀도 상태가 되어서 최대 돌입전류가 발생한다.

변압기 부하의 경우 변압기의 전원을 차단 시 R-L의 지상회로 인 경우는 잔류자속밀도에 영향은 없으나 R-C의 진상회로는 영향이 있다. 그림3에서

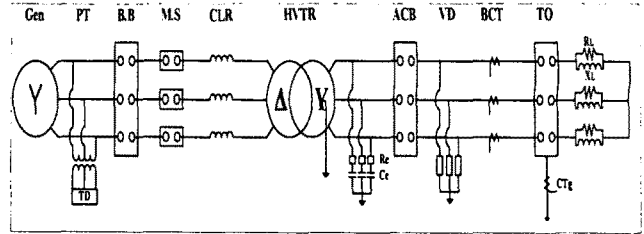


<그림 3> 잔류자속밀도에 미치는 부하의 영향

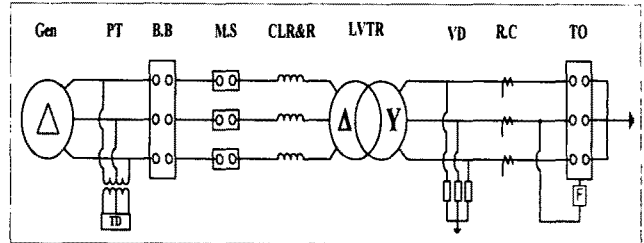
자화전류를  $I_m$ , 역을1의 부하전류를  $I_p$ , 합성전류를  $I_t$ 라 하면  $I_t$ 가 영점에서 전류가 차단되면 잔류자속밀도는 최대가 된다. 지상회로에서는 전류영점에서의 잔류자속밀도가 최대가 되지만 진상회로인 용량성 부하인 경우는 부하의 진상전류분위 자화 전 보다 작으면 합성전류는 지연역율이 되며 자화전류의 최대치와 합성전류와의 영점에서의 최대치는  $90^\circ$  이하이며 전류 영점에서의 잔류자속밀도는 최대치가 된다. 부하의 진상전류분위 자화 전 보다 크면 합성전류는 지연역율이 되며 자화전류의 최대치와 합성전류와의 영점에서의 최대치는  $90^\circ$  보다 크기 때문에 전류영점에서의 자화전류는 최대치가 아니므로 잔류자속밀도도 작다

**2.4 단락시험중 돌입전류 저감대책...**

단락시험중의 돌입전류를 감소하기 위한 방안으로 단락변압기의 잔류자속밀도가 zero인 상태로 투입을 하여야 하나 이는 실 시험중에서는 거의 불가능하며 이를 보완하기 위한 방안으로 (그림 4)의 고압회로인 경우 단락 변압기의 1차 전압을 투입스위치(MS) 후 보조차단기(ACB)를 사용하여 돌입전류가 소멸된 후 단락시험을 실시하는 경우와 (그림 5)저압회로인 경우 인위적으로 단락변압기의 잔류자속을 투입스위치(MS)의 위상각을  $180^\circ$  조정 투입하여 단락변압기의 잔류자속을 소멸하여 시험을 실시하는 경우로 실제 회로에서 응용할 수 있다



<그림 4> 고압단락회로



<그림 5> 저압단락회로

**3. 결 론**

단락시험을 실시하기 위하여 변압기를 여자 시 돌입전류에 영향을 미치는 요소는 투입스위치 투입시의 인가전압의 위상과 변압기 철심의 잔류자속의 영향으로 나타남을 단락시험회로를 통하여 알 수 있었다. 그러나 이와 같은 시험회로의 문제점으로 단락시험용 변압기를 변압기 정격전압으로 과여자 할 경우는 돌입전류의 영향으로 전압파형의 왜곡현상을 억제할 수 없었다. 추후 과제는 변압기의 제작 시에 잔류자속을 급속히 감쇠시킬 수 있는 변압기 철심의 및 히스테리시스특성의 왜곡현상이 없도록 설계에 반영함으로써 문제점을 해결하고자 한다.

**[참 고 문 헌]**

- [1] Lou van der Sluis. "Transient in power system"p. 95-97. 2001
- [2] Allan Greenwood. "Electrical transients in power system" p. 592-596 1990
- [3] IEC 60076-7 " power transformer"p.49-51 2005-12