

단락 전류 왜형방지를 위한 변압기 잔류자속제어

오승렬*, 박지훈*, 박중화*
LS산전(주) 전력시험기술센터*

Controlling the Residual Flux in Transformer to Prevent the Distortion of Short-circuit Current

Seung-Ryle Oh*, Ji-Hun Park*, Jong-Wha Park*
PT&T, LS Industrial Systems, Co., Ltd.*

Abstract - The residual flux(ψ_r) in transformer's iron cores cause the distortion of short-circuit current occasionally. And some considerable distortion effect on the validation of test results. To prevent this situation, there needs some suitable control of residual flux through the pretest. This paper deals with the how to control the residual flux in pretest and the comparison between the two test results which were obtained by different test method.

Key words: transformer, residual flux, short-circuit.

1. 서 론

1 연구 배경

전력계통의 환상형(ring shape) 구조화에 따른 고장전류의 증가 추세에 따라 전반적으로 전력기기의 차단 용량 또한 증가하고 있다. 이로 인해 최근 당사 시험소에서는 단락시험용 변압기의 정격 용량에 근접하는 단락 및 단시간 시험이 빈번하게 시행되고 있으며, 이러한 경우 이전 시험에 의해 변압기 철심에 존재하게 되는 잔류자속(ψ_r)은 단락 투입시 발생하게 되는 초기 과도자속과 함께 단락전류의 왜형을 간헐적으로 발생시키고 있다. 이러한 전류 왜형현상은 시험의 유효성에 영향을 줄 수 있기에 이를 최소화 시키는 방안이 요구 되고 있다.

지금까지 발표된 잔류자속에 관한 연구는 차단기 및 변압기의 수명측면에서 회로 투입시점에서 발생하는 돌입전류에 의한 전기적, 기계적인 스트레스를 최소화 하기위한 것이 주를 이루고 있다.[1]~[5] 하지만 이는 3상 차단기 투입시 각상의 투입 시점 즉, 투입 위상각을 달리 함으로써 얻어지는 결과이며 이러한 방법은 3상 동시 투입을 원칙으로 하는 규격시험에서는 적용이 어렵다고 할 수 있다. 또한 이러한 잔류자속의 영향은 IEC 60076-5 (2000-07)에 따르는 변압기 단락강도 시험에도 그 결과의 유효성에 크게 영향을 미치고 있으며 이러한 영향을 최소화하기 위한 방안으로 몇 가지의 시험 방법이 해외 시험소를 중심으로 소개된바 있다.[6]

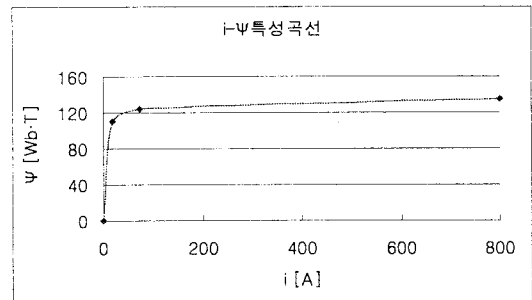
이 논문에서는 이러한 참고 문헌을 바탕으로 전력기기

의 단락 및 단시간 시험시 잔류 자속의 영향을 최소화시키기 위한 방안으로 수 cycle의 전압을 인가하는 Pretest를 통한 변압기 잔류자속 제어 방법을 소개하며, 실제 검증시험을 통해 그 결과를 비교 하여 효과를 입증 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 잔류자속 영향

변압기의 정격용량에 근접하는 시험의 경우 $i-\psi$ 특성곡선에서의 변압기 철심은 포화영역으로 이동될 수 있지만, 잔류 자속에 의한 오프셋(offset)이 발생하게 되면 정격 용량의 여유를 가지고 있더라도 변압기는 포화 영역으로 이동될 수 있다.



<그림 1. 시험소 단락시험용 변압기 $i-\psi$ 특성곡선>

단시간 내전류 시험은 단락 초기에 발생하는 피크전류에 의해 기계적 강도와 정격단시간 동안 통전되는 RMS (Root Mean Square)값에 의해 제품의 열적 내력을 검증하는 시험으로서 이러한 변압기 포화는 시험전압의 왜형을 초래할 수 있으며 또한 과도한 여자 돌입전류를 발생시켜 그 시험결과에 영향을 미치게 된다. 단락 전류와 동일한 방향의 여자 돌입 전류는 시험전류에 더해져 가혹한 조건을 만들며, 그 반대의 경우에는 요구되는 전류값에 이르지 못하게 할 수도 있게 된다. 물론 이러한 단락시험의 경우 변압기 여자 돌입전류는 단락전류에 비해 아주 작은 값이므로 측정된 전류는 왜형이 없는 것처럼 보이지만 전압과의 선형성과 시뮬레이션에 의해 복원된 정상단락전류 값과는 그 차이를 보이게 된다.[7]

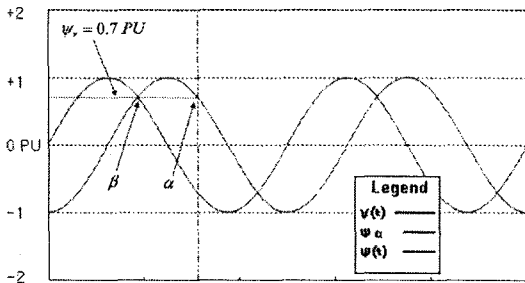
2.2 잔류자속 영향 최소화를 위한 투입시점 제어

지금까지 발표된 연구의 대부분은 변압기의 잔류자속의 영향을 최소화하기 위해 잔류자속 측정 시스템을 통해 측정된 자속을 기준으로 최적 투입시점($\alpha_{optimal}$)을 계산하여 3상 차단기 투입을 제어하는 구조적 흐름을 가지고 있다.

전압 순서값이 $v = V \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \omega t$ 일 경우

$$\alpha_{optimal} = \cos^{-1} \left(\left| \psi_r \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{V \cdot \sqrt{2}} \right) \right| \cdot \omega \right) \quad \text{---< 식 1 >}$$

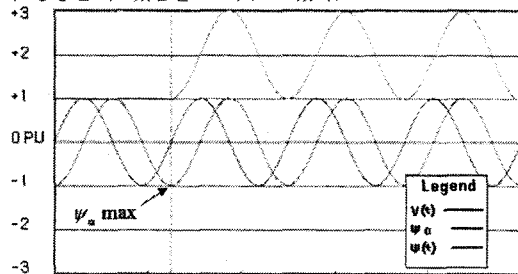
만일 아래 그림과 같이 0.7 PU의 잔류자속이 측정 되었다고 가정 하면 위 식에 의해서 계산된 2개의 시점(α, β) 중 차단기의 RDDS(Rated of Decrease of Dielectric Strength)를 고려하여 전기적 스트레스를 최소화 시키는 최적 투입시점을 결정하게 된다.



<그림 1. 차단기 최적 투입 시점 결정>

2.3 잔류자속 제어

위에서 설명했듯 각 상의 투입시점을 달리하여 잔류자속의 영향을 최소화 하는 방법과는 달리 대부분의 단시간 및 단락 시험은 규격에서 요구하는 값의 비대칭 전류를 발생시키기 위해 해당 상(phase)의 전압 영점에서 회로를 동시에 투입하게 된다. 이러한 경우 변압기 철심에 존재하는 잔류자속이 없더라도 과도 자속은 최대 1 PU의 오프셋을 발생 시키게 된다. 아래의 그림은 최대 1 PU의 자속이 변압기에 잔류 되어 있을 경우, 전압 영점에서 회로 투입시 발생하는 자속 오프셋은 최대 2 PU까지 형성될 수 있음을 보여주고 있다.



<그림 2. $\psi_r=1$ PU에서의 전압 영점 투입>

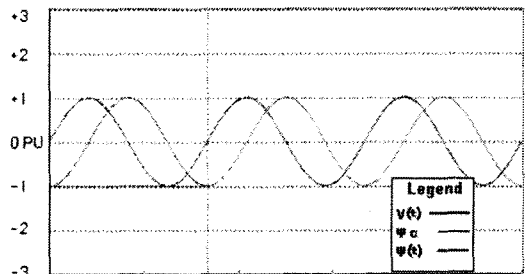
인가전압이 $v = V \cos \omega t$ 이며 α 시점에서 페로 될 경우 발생하는 자속 ψ_i 는 아래의 식으로 표현 될 수 있다.

$$\psi_i = (V/\omega) \sin \omega t + \psi_o \quad \text{---< 식 2 >}$$

$$\psi_o = \psi_r - (V/\omega) \sin \alpha \quad \text{---< 식 3 >}$$

위의 <그림 2>와 <식 2>에서 알 수 있듯 전압 영점에서 페로 될 경우 자속은 최대 지점(ψ_o, \max)에서부터 시작되며 여기에 이전 시험에서 발생된 반대 극성 1 PU의 잔류자속이 더해져 2 PU의 오프셋이 발생 하게 된다. 하지만 이 경우에 동일 극성 1 PU의 잔류자속이 변압기에 잔류 하였다면 <식 3>에 해당하는 부분은 0이 될 것이며 자속 오프셋은 발생하지 않을 것이다.

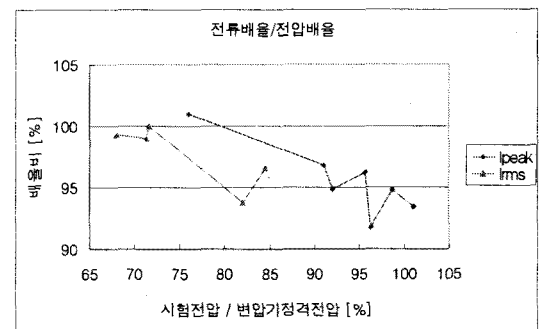
이와 같은 원리에 근거하여 당 시험소에서는 실제 100 % 시험시 발생하게 될 자속 오프셋을 없애기 위해 70 % 또는 100 %의 Pretest를 통해 적당한 크기의 자속을 변압기에 잔류시킴으로써 자속포화 영향을 최소화 시키는 시험 방법을 개발하게 되었다. 아래 <그림 3>는 100 %의 Pretest를 통해 잔류자속의 크기와 방향을 제어할 경우 실제 시험(actual test)시 오프셋이 없는 자속이 발생하는 것을 보여주고 있다.



<그림 3. Pretest를 통한 잔류자속 제어>

2.4 실측 데이터에 의한 결과 검증

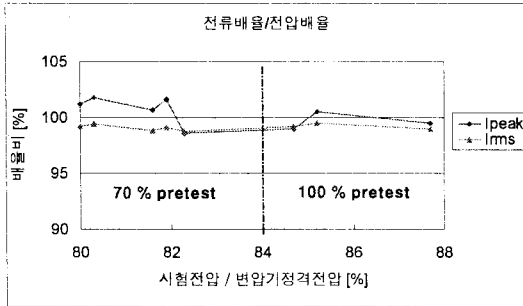
잔류자속 제어 방법 및 그 효과에 대한 검증은 2006년 4월 27일, 5월 24일 양일간에 이루어진 저압 선박용 배전반의 단락 내력 강도 시험에 의해 이루어 졌다. 아래의 <그림 4>는 Pretest를 실시하지 않았을 경우, 회로 교정을 위한 50 % 시험과 실제 100 % 시험에서의 전압 vs. 전류 선형성을 비교하기 위한 것으로 배율비가 100 %에 근접 할수록 선형성이 크다는 것을 나타낸다.



<그림 4. Pretest를 실시하지 않은 경우 배율>

위 그림에 나타나듯 전압 배율을 100 %로 볼 때 피크전류 및 정격단시간 동안 시료에 가해진 전류 RMS의 배율은 비선형적인 형태를 보이며 대부분이 100 %에 미치지 못하고 있다. 1회의 피크전류가 여자 돌입전류의 영향으로 100 % 이상의 배율을 보이고 있으나 가장 나쁜 경우는 전압 배율의 92 %에도 미치지 못하는 결과를 보이고 있다.

아래의 <그림 5>는 잔류자속 제어를 위해 실제 시험 전 70 % 또는 100 % Pretest를 실시한 경우에 얻어진 결과이다. 70 % 전압으로 Pretest를 실시한 경우 전압 배율과 비교해 볼 때 1 ~ 2 %의 편차를 보이고 있으며, 100 %의 Pretest를 행한 경우에는 1 % 이내의 편차를 보이는 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이는 Pretest를 통해 의도된 크기와 극성으로 변압기에 잔류된 자속이 회로 투입시 발생하는 과도 자속을 $i-\psi$ 특성 곡선의 knee point 넘지 않는 직선 영역에 존재하도록 작용했기 때문인 것으로 풀이된다.



<그림 5. Pretest를 실시한 경우 배율>

RMS전류 값과는 달리 단락 초기 발생하는 비대칭전류는 물론 투입스위치의 정밀도에 따라 그 값의 차이를 보이게 된다. 참고로 당 시험소의 투입스위치의 투입정밀도는 ± 0.1 ms 이며 이 값은 위에서 진행된 검증 시험결과에 거의 영향을 미치지 않을 만큼의 정밀도를 가지고 있다고 할 수 있다.

3. 결 론

현재까지 외국의 전력회사를 중심으로 발표된 논문은 3상 차단기의 각각의 투입 시점을 달리 함으로써 잔류자속의 영향을 최소화시키는 방법을 소개하고 있다. 하지만 규격에서 요구하는 비대칭 전류를 얻기 위해 대부분 전압 영점 사고를 모의하는 대전력 시험에서는 이러한 방법을 적용하기에는 다소 무리가 있다고 할 수 있다. 이 논문에서는 대전력 시험에서 잔류자속에 의한 변압기 포화를 방지하기 위한 하나의 방법으로 Pretest를 실시하여 그 영향을 최소화 하여 전압과의 선형성을 유지시킬 수 있다는 것을 실제 시험을 통해 입증 하였다. 또한 개발된 시험 방법은 70 % ~ 80 %의 전류를 직접 인가시

키는 Pre-magnetizing 과는 달리 전압만을 인가시킴으로 실제 시험 전 시료에 가해지는 열적 기계적 스트레스를 감소시킬 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] CIGRE Working Group 13.07 "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers (2nd Part)" - ELECTRA No.185 August, 1999
- [2] CIGRE Working Group A3.07 "Controlled switching of HVAC circuit breakers" - 19 January, 2004
- [3] CIGRE Working Group A3.07 "Controlled switching of HVAC circuit breakers-benefits" - 19 January, 2004
- [4] A. Mercier, A. Salibi, Y. Filion, E. Portales. "Transformer controlled switching taking into account the core residual flux - A real case study" - CIGRE 2002
- [5] Haruhiko Kohyama, Kenji Kamei, Hiroki Ito "Application of Controlled Switching System for Transformer Energization Taking into Account a Residual Flux in Transformer Core" CIGRE 2005
- [6] A.L.J. Janssen, L.H. te Paske, W.A. van der Linden, R.P.P. Smeets. "Magnetic Saturation at Short-Circuit Tests on Power Transformers" - IEEE 2001
- [7] 오승렬, 윤지호, 박지훈, 박종화 "변압기 포화시 정상 전류 예측에 관한 연구" 2005 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회
- [8] John H. Brunke, Klaus J. Fröhlich, "Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching-Part I: Theoretical Considerations" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001
- [9] Omer Bourgault, Gaston Morin "Analysis of a harmonic overvoltage due to transformer saturation following load shedding on Hydro-Quebec-NYPA 765 kV interconnection" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, January 1990

- [10] IEC Standard 60076-5 (2000): Power transformers - Part 5: "Ability to withstand short circuit"