

변압기 단락강도시험 성능평가에 관한 고찰

노창일, 김선구, 정흥수, 김원만, 이동준, 김선호
한국전기연구원

The Study of Characteristics evaluation of short-circuit tests for Power Transformers

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

Abstract - Power transformer shall be designed and constructed to withstand the mechanical and thermal stresses produced by external short circuits which include three-phase, single line to ground, double line-to-ground, and line-to-line faults on any one set terminals at a time. This paper presents the method of short-circuit test and means of evaluation during and after each test to judge the results of short-circuit tests.

1. 서 론

변압기 성능을 검증하기 위한 주요 시험 항목은 구조검사, 효율 및 전압 변동율 등의 특성을 측정하기 위한 철손 및 동손 시험과 절연내력을 검증하기 위한 상용 주파, 유도, 충격내전압을 실시하며, 연속정격 사용 중 변압기 내, 외부의 이상 유무 확인 및 온도상승여부 확인을 위한 온도상승시험과 운전 중 사고발생시 변압기의 이상 유무 확인을 위한 단락시험으로 구분할 수 있다. 시험항목 중 불량률이 가장 많은 단락시험은 변압기가 운전 중 선로에 3상 단락 및 선간 단락, 1선 지락, 이중지락 등의 고장이 발생했을 경우를 대비하여 변압기 고압 측 또는 저압 측을 단락하여 규격에 규정한 통전시간 동안 기계적, 열적인 손상 없이 견딜 수 있도록 제작 및 설계가 되었는지를 검증하기 위한 목적으로 시험을 실시한다.

따라서 본 논문에서 단락시험을 실시하기 위한 단락전류의 계산, 실제 시험회로의 구성, 시험방법, 시험결과와 판정등에 대하여 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 회로의 단락전류 계산

대칭3상 단락회로에서의 고장전류는 I_f 는 다음식으로 표시한다.

$$I_f = \frac{E}{Z} = \frac{100I_n}{\%IZ}$$

여기서 E : 상전압, Z : 1상당의 임피던스, %IZ : 용량에 기준한 정격전류 I_n 의 %임피던스이다.

단상단락에서는 선간이나 1선 지락인 경우는 위의 임피던스 값을 이용하여 단락전류를 계산할 수 없으나 1선 지락 사고인 경우는 임피던스강하에 의한 전압은 정전압 E_{leg} 와 같으며, 대칭 분 전류 I_1 ,

I_2 , I_3 는 각각 고장전류 $\frac{I_f}{3}$ 와 같다

$E_{leg} = \frac{I_f}{3} Z_1 + \frac{I_f}{3} Z_2 + \frac{I_f}{3} Z_0$ 로 되어서 I_f 로 정리하면

$$I_{fault} = \frac{3E_{leg}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \text{로 나타낼 수 있으며,}$$

상간단락인 경우는

$$I_{fault} = \frac{\sqrt{3} \times 100I_n}{\%IZ_1 + \%IZ_2} = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2} \text{로 구할 수 있다}$$

여기서 Z_1 : 정상 임피던스, Z_2 : 역상 임피던스, Z_0 : 영상 임피던스로 나타낸다.

2.2 시험회로의 단락전류 계산

시험회로의 단락전류계산은 변압기 정격용량, Tap전압, Tap 전류 및 무부하손 및 부하손실을 측정하여 산출된 % 임피던스값을 근거로 하여 산출한다. 단락시험에 있어서 단락전류는 대칭 단락전류와 비대칭 단락전류로 구분하여 인가하고 있으며 비대칭 단락전류 및 시험인가 횟수는 기계적인 손상(mechanical stress)을 검증하기 위한 것이며, 열적 손

상(thermal stress)은 대칭 단락전류 및 통전시간에 의하여 검증 한다.

- ANSI/IEEE 규격을 적용하면

$$\text{대칭 단락전류 } I_{sc} = \frac{100I_n}{Z_r + Z_s}$$

I_n : 해당 Tap 정격전류(교류분 실효치)

Z_r : 해당 Tap에서의 변압기 임피던스(정격용량을 기준한 %임피던스)

Z_s : 계통 임피던스 (통상 해당 값은 변압기 임피던스와 비교하여 현저히 작은 수치이므로 무시함)

- IEC 규격을 적용하면

$$\text{대칭단락전류 } I = \frac{U}{Z_t + Z_s} \text{ (kA), } Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r}$$

U : 계통 전압(kV)

Z_s : 계통 임피던스(생략함)

U_r : Tap 전압(kV)

Z_t : 시험권선의 단락임피던스(Ω)

z_t : 기준권선 %임피던스

S_r : 변압기정격용량(MVA)

시험전류의 통전시간은 IEC 규격에서는 배전용 변압기는 통상적으로 0.5s를 각 상에 3회를 인가함을 시험기준으로 하고 있으며 ANSI 규격에서는 0.25s를 기준으로 하여 각 상에 6회인가 있으며 6회 시험 중 1회는 장시간 대칭전류를 인가함을 원칙으로 하고 있다. 해당변압기의 정격용량에 따라서 시험시간은 대용량변압기에서 0.5s에서 최대 2s까지 시험을 실시하고 있다.

- ANSI/IEEE 규격을 적용하면

$$\text{비대칭 단락전류 } I_{sc}(\text{pk asym}) = K I_{sc}$$

K : $\frac{X}{R}$ 의 비율에 의하여 정해진 상수 값

R : 해당 변압기 Tap에서의 저항강하(%IR)

X : 해당 변압기 Tap에서의 리액턴스강하(%IX)

- IEC 규격을 적용하면

$$\text{비대칭 단락전류 } \hat{i} = I \times k \times \sqrt{2}$$

k : $\frac{X}{R}$ 의 비율에 의하여 정해진 상수 값

표준형 주상변압기(100KVA, 13200V/230V) 표1의 특성기록에 의하여 실제 단락전류를 Tap #1에서 계산하면 ANSI/IEEE 규격을 적용하면

$$\text{대칭단락전류 } I_{sc} = \frac{100 \times 7.246}{3.318} = 218.4 \text{ A}$$

$$\frac{X}{R} : 2.858 \rightarrow K : 1.910 \text{ 비대칭 단락전류 } I_{sc}(\text{pk asym}) = 417.1 \text{ A}$$

IEC 규격을 적용하면

$$Z_t = \frac{3.318 \times 13.8^2}{0.1 \times 100} = 63.188 \Omega$$

$$\text{대칭단락전류 } I = \frac{13800}{63.188} = 218.4 \text{ A}$$

$$\frac{X}{R} : 2.858 \rightarrow k \sqrt{2} : 1.923$$

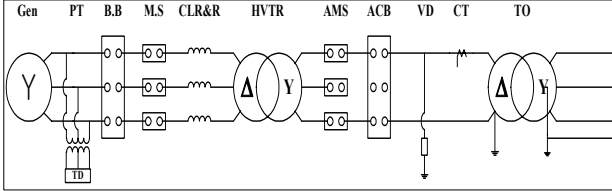
$$\text{비대칭단락전류 } \hat{i}(\text{pk asym}) = 1.923 \times 218.4 = 419.98 \text{ A}$$

되어서 ANSI/IEEE 값과 비교하면 거의 차이가 없다.

Tap 위치	Tap #1	Tap #2	Tap #3	
Tap 전압(V)	13800	13200	12600	
Tap 전류(A)	7.246	7.576	7.937	
임피던스	%IR	1.096	1.126	1.146
	%IX	3.132	3.265	3.320
	%IZ	3.318	3.454	3.513

〈표 1〉 변압기 특성 기록

2.3 단락시험 회로의 구성



〈그림 1〉 단락시험 회로

2.4 시험방법

비대칭 단락전류를 발생시키기 위하여 2.3의 시험회로에서 보조투입 스위치(AMS:Auxiliary Making Switch)를 사용하여 투입위상을 조정하며 시험전압 및 시험전류를 확인하기 위한 Calibration은 정격 시험전압의 50% 이하에서 실시한다.

- 시험전압 : 변압기 Tap 정격전압의 95% ~ 105% 범위 내 실시하며 최대 110%를 이내에서 실시한다.

- 시험전류 : 임피던스 변화를 고려한 후에 규정된 단락전류의 95% 이상인 경우 유효하며 시험전류는 변압기 전원단자에 변류기(CT: Current Transformer)를 연결하여 측정하며 측정전류는 시험전류 파형의 2.5 cycle 지점에서 측정된 값으로 한다.

시험전류의 측정에 있어서 전원 측에 연결된 변압기 권선이 삼각결선(Δ,Delta)인 경우 변류기를 통하여 직접 측정할 수 없으므로 2차 단락 권선이 성형(Y, Star)인 경우는 2차 측에서 측정하고 권수비에 따라 전원 측 시험전류를 산출하는 방식으로 하며, 1차 및 2차 권선이 삼각결선(Δ,Delta)인 경우는 삼각결선 중간에 변류기 접속이 가능한 경우는 변류기에 의하여 시험전류를 측정하고 변류기 접속이 불가능한 경우는 선로전류측정에 의하여 대칭전류를 측정하고 투입시간은 최대 비대칭전류가 발생하도록 조정한다. 3상변압기는 단상회로로 시험이 가능하며 측정전류는 실제3상회로 단락전류의 $\frac{\sqrt{3}}{2} I_f$ 가 된다.

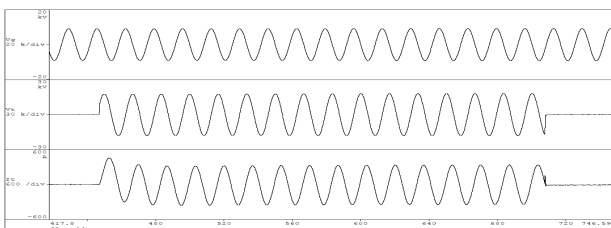
2.5 시험결과 판정

단락강도시험 중 다음 사항을 고려하여 시험을 실시하여야 한다

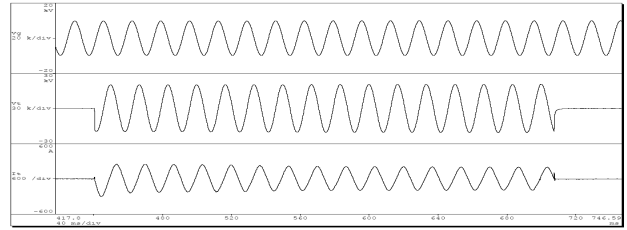
- 시험 중 Gas 또는 Oil 압력계가 단락강도시험 중에 내부고장으로 동작 여부를 확인한다.
- 각 Test후 Reactance를 측정하여 변화율을 확인한다.
- 시험 중 측정된 시험전압 및 전류 파형의 변화를 확인 한다.

단락강도시험 후 다음 각 항에 이상이 없는 경우는 단락시험에 문제점이 없다고 판정한다.

- 육안검사 : 변압기를 해체하여 철심 및 권선을 육안 검사하여 기계적인 변형흔적 유무를 검사하며 측정결과 이상이 없으면 분해 점검할 필요가 없으나 변형 흔적이 발생 시는 철심과 권선을 분리하여 점검하여야 한다.
- 절연시험(유도내전압, 상용주파내전압, 충격내전압) : 규정된 시험전압의 75% 전압을 인가하여 이상이 없어야 한다.
- 시험전압 및 전류 파형 측정 : 시험 중 시험전압 및 전류 파형의 급격한 변화가 발생하지 아니하여야 하며 그림2는 단락시험중 이상이 없는 경우이며 그림3은 권선 및 철심의 내부고장으로 시험전류가 급격히 변화한 발생한 경우이다.



〈그림 2〉 시험 파형(양호)



〈그림 3〉 시험 파형(불량)

- 임피던스 변화의 허용치 : 단락강도시험 전, 후의 %임피던스를 측정하여 규격에서 정한 표1의 변화율 허용치의 변화가 생기지 않아야 한다.

분류		% 임피던스(Z_t)	변화를 허용치(%)
1	단상(kVA)	5~500	2.99%이하 3.0% 이하
	3상(kVA)	15~500	
2	단상(kVA)	501~1,667	- 원형 동심배치권선 : 2%
	3상(kVA)	501~5,000	
3	단상(kVA)	1,668~10,000	- 비원형 동심배치권선 : 7.5%
	3상(kVA)	5,001~30,000	
4	단상(kVA)	10,000초과	- 2%
	3상(kVA)	30,000 초과	

〈표 2〉 임피던스 변화 허용치

- 저압충격시험(LVI : Low-Voltage Impulse Tests) : 단락강도 시험 전, 후의 저압충격시험 파형을 비교하여 변화가 없어야 한다.

- 여자전류 : 단락강도시험 후 측정된 무부하 전류의 변화율은 시험전의 측정치 보다 적철심 변압기의 경우는 5%, 권철심 변압기는 25% 이내여야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는 변압기 단락시험에 대한 단락전류 계산 및 단락시험방법 및 시험결과 판정에 대한 내용을 기술하였다. 단락시험을 실시하기 위한 적용규격으로는 IEC 60076-5 와 ANSI/IEEE C57.12.00을 적용하여 시험을 실시하고 있지만 배전용 변압기의 경우는 각 상에 대하여 IEC는 0.5초 동안 3회 시험을 실시하고 ANSI/IEEE에서는 0.25초 동안 6회를 시험을 실시하기 때문에 대칭단락 시험전류는 동일하지만 열적 손상(thermal stress)은 ANSI/IEEE규격으로 시험하는 경우가 I^2t 가 크고 기계적인 손상은 ANSI/IEEE은 2회인가하고 IEC 규격이 비대칭전류로 3회 인가하므로 기계적인 손상은 IEC 규격으로 시험하는 경우가 가혹한 시험이 될 수 있다.

단락시험에 있어서 3상변압기의 단락시험인 경우 전류의 측정의 문제점으로 전원 측에 연결된 변압기 권선이 삼각결선(Δ,Delta)인 경우 전류 불평형에 의하여 상전류의 측정이 불가능하여 시험은 단상회로로 결선하여 시험을 실시하고 있으며 이는 3상 시험으로도 동시측정이 가능할 수 있도록 함이 추후 해결해야할 문제이다.

〈참 고 문 헌〉

[1] IEC 60076-5 " power transformer"p.9-39 2002-06
 [2] ANSI/IEEE Srd C57.12.00 " liquid immersed distribution, power , and regulating transformers" p.35-4 2000
 [3] S. Austen Stigant & A.C. Franklin " transformer books" p586-588 1976,