

배전용 변압기의 단락시험 불량원인 및 그 대책에 관한 연구

(A Study on the Cause and Countermeasures of the Short-Circuit Test Failures of the Distribution Transformer)

박병락* · 박훈양 · 신희상 · 김재철**

(Byung-Rak Park · Hoon-Yang Park · Hee-Sang Shin · Jae-Chul Kim)

Abstract

This study aims to research and analyze the cause and countermeasures of the short-circuit test failures of the distribution transformer, which captures failure share at the highest level when carrying out its performance test. For this purpose, the research was done on the basis of 77 failure cases out of 998 tests in total performed by the Korea Electrotechnology Research Institute(KERI) from 2004 to 2010. Based on the research, the paper also includes analysis of the causes of the short-circuit test failures in its early stage of transformer development and proposes its countermeasures accordingly.

Key Words : Short-Circuit Test Failure, Distribution Transformer

1. 서 론

현대 사회는 산업의 고도화로 인하여 신뢰성있는 전력공급의 중요성이 매우 부각되고 있다. 전력설비의 가장 많은 부분을 차지하고 있는 설비는 배전용 변압기이다. 이러한 배전용 변압기는 1891년도에 미국에서 최초의 변압기라 할 수 있는 유입자냉식 변압기를 상용화하였으며, 우리나라는 1938년 10월에 동경지포 인천공장(과거 이천전기)에서 처음 제작되었다[1]. 배전용 변압기는 화재사고 예방, 유지보수 편의성, 효율 향상 등의 다양한 기능을 목표로 지속적으로 발전 및

개발되어 왔다. 최근에는 실리콘 절연유 또는 식물성 절연유를 이용한 친환경 제품 또한 선보이고 있다. 이와 같이 다양한 기능을 가진 배전용 변압기의 성능검증은 구매자의 요구로 공인된 표준에 따라 개발시험을 통하여 성능을 검증하게 된다[1]. 하지만 설계과정에서 충분히 고려되지 못한 기술적 문제점이 있는 경우 개발시험을 통해 문제점을 파악한다. 개발시험 시 문제점이 도출된다면 개발기간이 지연되고 기술적 문제의 보완을 위한 경비가 추가로 발생하여 기업의 손실을 초래하거나 배전용 변압기의 개발단가 상승을 야기한다. 뿐만 아니라 이러한 개발시험을 위한 대전력 시험설비 역시 대부분의 국내 제조회사가 보유하고 있지 않은 실정이다. 이와 같은 이유로 충분한 개발시험을 수행하지 못하여 배전용 변압기의 단락시험에서 불량은 지속적으로 나타나고 있다[2].

본 논문에서는 배전용 변압기 개발 시 불량 발생원

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부 박사수료

** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수

Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780

E-mail : jckimc@ssu.ac.kr

접수일자 : 2011년 3월 22일

1차심사 : 2011년 3월 25일, 2차심사 : 2011년 5월 2일

심사완료 : 2011년 5월 26일

인 점유율이 가장 높은 단락시험에 대하여 불량 원인을 조사, 분석하였다. 분석된 결과를 바탕으로 불량원인에 대한 보완대책을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 변압기 단락고장전류 통전 시 전자기계력의 영향

배전용 변압기에 단락고장전류 통전 시 전자기계력은 전류가 같은 방향으로 흐르는 경우에는 서로 당기고, 반대 방향으로 흐르는 경우에는 서로 반발하는 법칙에 따라 변압기 권선의 임피던스를 증가시키도록 작용한다. 또한 권선의 배치에 따라 작용하는 전자기계력의 영향은 상이하[3,5].

2.1.1 동심배치권선의 전자기계력

동심배치권선은 동일한 철심에 외측 및 내측 권선이 대칭 구조인 변압기이다. 그림 1에 나타난 것과 같이 동심배치권선에서 전자기계력은 반경방향 전자력과 축방향 전자력의 두 가지 힘이 있으며, 단락전류에 의한 누설자계도 축방향과 반경방향 성분이 있다. 여기서 축방향은 철심 및 권선의 중심축에 따라 흐르는 방향에 있고, 반경방향은 권선의 반경에 따라 흐르는 방사방향에 있다. 동심배치권선에서는 누설자계의 축방향 성분에 의해 두 권선 간의 공간을 확대하는 방사상 방향의 힘이 발생한다[4-5]. 즉 외측 권선 2는 직경을 확대시키고 원주 방향으로 인장응력을 받는다. 코일 도체는 이 응력에 견디어야 한다. 반대로 내측 권선 1은 원주방향으로 압축하게 되는 것으로 안으로 찌그러지지 않게 설계 및 제작을 필요로 한다. 그림 1 (a)와 같이 권선 끝 부분에서 누설자속의 구부러짐에 따라 누설자계의 반경방향 성분을 만들고 각각의 코일에 코일 힘이라고 하는 축방향 전자력이 있다. 이 코일 힘은 각 스페이스 사이에 있는 도체를 축 방향으로 구부러지게 한다. 이 코일 힘은 권선의 축 방향에 따라서 그림 1 (b)와 같은 분포를 나타내며, 코일 1은 코일 2, 코일 2는 코일 3을 밀고 또한, 코일 M은 코일

M-1, 코일 M-1은 코일 M-2를 권선 중앙부 방향으로 누른다. 이것을 내부압축력이라고 하며, 이 내부압축력은 그림 1 (c)와 같이 분포하고 있다. 내부압축력이

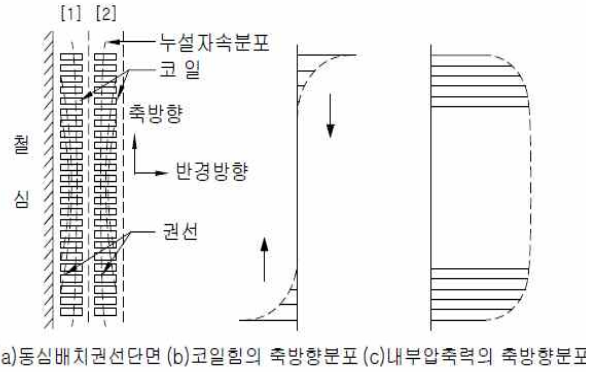


그림 1. 동심배치권선의 코일 힘과 내부압축력
Fig. 1. Forces of concentric coil and its compression force

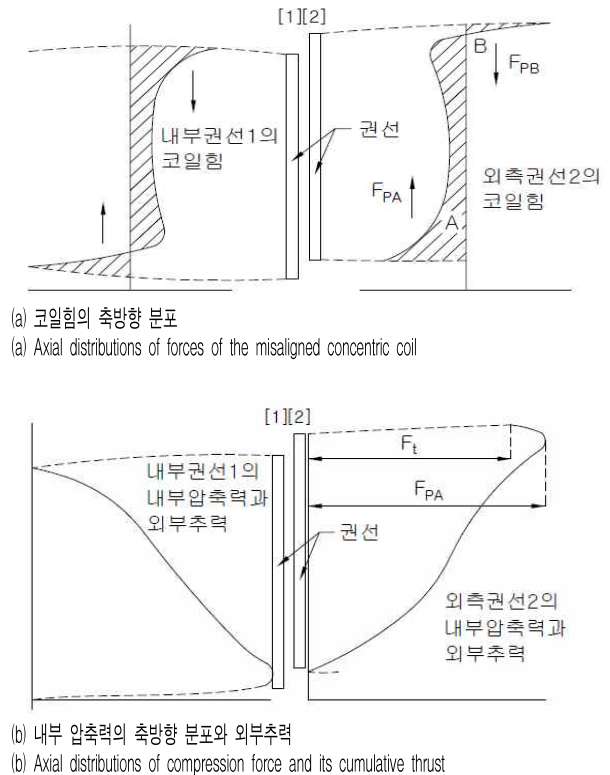


그림 2. 어긋난 구조 동심배치권선의 코일 힘과 내부압축력
Fig. 2. Forces of the misaligned concentric coil and its compression force

최대가 되는 권선 중앙부의 코일 및 코일 사이에 있는 스페이스의 강도가 문제시 된다[4-5].

그림 2는 축방향 코일 배치가 상호 평행하지 않은 어긋난 구조의 권선배치인 경우에 코일 힘과 내부압 축력의 분포를 나타내고 있다. 이 경우에는 코일 힘 분포가 비대칭이 된다. 예로서 외측 권선에서는 상향 성분(빗금 A부분 면적) FPA와 하향 성분(빗금 B부분 면적) FPB와 사이에 차이가 발생한다. 이 차이 FPA-FPB에 해당하는 힘이 상향 외부로 밀어내는 힘 Ft=FPA-FPB로 나타난다. 이와 같이 수평방향으로 밀어 내는 힘을 추력이라고 한다. 상부에서 코일을 눌러 주는 지지물은 이 힘에 대하여 기계적 강도에 문제가 없도록 해야 한다[4-5].

2.1.2 교호배치권선의 전자기계력

교호배치권선은 권선을 몇 개의 군으로 나누어 고압 및 저압용을 교차 배치한 변압기로서 각 군의 고압 및 저압 권선 간에는 동심배치 권선의 반경방향 전자력에 해당하는 힘이 작용한다. 이와 같은 힘을 주방향 전자력이라고 하며, 이 전자력은 각 군을 구성하는 코일에 작용하는 힘(동심배치 권선의 코일힘에 해당)의 가산 값으로 된다. 군 상호간에는 내부압력을 상쇄하여 가장 바깥에 위치한 군의 전자력만이 외부로 밀어내는 힘이 나타난다[4-5].

2.2 배전용 변압기의 단락시험 방법

2.2.1 단락전류 계산

단락전류의 크기는 전력계통 및 변압기의 임피던스와 단락순간의 전압위상에 의해 결정된다. 변압기의 국제 표준인 IEC 60076시리즈에서 소용량 변압기의 단락시험에서 단락전류는 전력계통의 임피던스는 무시하고 계산하고 있다[4,6].

가. 단락전류의 AC 실효치(I_s)

$$I_s = \frac{100 \cdot I_n}{\%IZ} = \frac{100 \cdot I_n}{\sqrt{(\%IR)^2 + (\%IX)^2}} [A] \quad (1)$$

여기서 I_n = 정격전류(A)

$\%IZ$ = 변압기의 임피던스 전압(%)

$\%IX$ = 변압기의 리액턴스 전압(%)

$\%IR$ = 변압기의 저항 전압(%)

나. 단락전류 피크치(I_m)

단락전류 제1파고치의 피크치는 시험회로의 저항 성분 값과 리액턴스 성분 값의 비와 전원 전압위상 기준으로 단락고장 발생 시점에 따라 결정되며, 실제 변압기의 임피던스 값에 따라 다음의 식으로 계산한다.

$$I_m = (2fd) \sqrt{2} I_s [A] \quad (2)$$

$2fd$ 는 $\%IR$ 과 $\%IX$ 의 비율에 따라 결정된다[3,5].

2.2.2 단락시험 방법

변압기 저압측을 미리 단락시킨 상태에서 규정된 단락전류가 통전할 수 있도록 고압측 단자에 전압을 인가하여 시험을 실시하고, 단락시험에서 성능에 이상 없는지 여부는 임피던스의 변화율과 절연성능이 국내의 표준에서 정하고 있는 기준에 따라 판정한다[6].

2.3 배전용 변압기 개발시험과 단락시험 불량

2.3.1 변압기 개발시험

표 1. 변압기 종류별 개발시험건수(2004~2010년)
Table 1. Number of development tests for each transformer test purpose(2004~2010)

품 목	건수
유입식 변압기	244
유입식 주상변압기	310
유입식 지상변압기	79
에폭시 몰드 변압기	304
건식 변압기	58
가스절연변압기	3
합 계	998

배전용 변압기에 대하여 최근 7년 동안 한국전기연구원에서 실시한 개발시험의 품목별 수행건수는 표 1과 표 2와 같다. 시험 대상 변압기의 대부분은 배전용 유입식 주상 변압기와 수용가용 에폭시 몰드 변압기이다. 하지만 유입식 주상 변압기와 에폭시 몰드 변압기는 상대적으로 연구개발이 오래 진행됨에 따라 시험 불합격률이 다른 종류의 변압기에 비해 적게 나타나는 것으로 분석되었다.

표 2. 변압기 시험 용도별 개발시험 건수(2004~2010)

Table 2. Number of development tests for each transformer test purpose(2004-2010)

년도	건 수			
	형식시험	항목시험	참고시험	합계
2004	26	35	24	85
2005	42	55	21	118
2006	36	82	19	137
2007	51	29	12	92
2008	60	67	29	156
2009	83	111	30	224
2010	67	92	27	186
합계	365	471	162	998

※ 개발시험 년 평균 증가율 : 13.9%

2.3.2 변압기의 개발시험에서 단락시험 불량

표 3은 공인된 표준에 따라 개발시험을 실시하고 불량을 판정하는 형식시험과 항목시험에 대한 시험 결과이며 단락시험이 다른 시험항목에 비하여 불량 점유율이 높게 나타나고 있다. 본 논문에서는 변압기의 개발시험 불량을 감소시키기 위하여 불량 점유율이 가장 높은 단락시험에 대하여 원인을 조사, 분석하고 보완대책을 도출하고자 한다.

여기에서 구분한 불량 시험종류의 정의는 다음과 같다.

- 1) 단락시험 : 변압기 2차측을 단락시킨 상태에서 규정된 단락전류 통전 시 열적 및 기계적 내력에 대한 성능 검증을 위하여 실시하는 시험
- 2) 절연시험 : 절연성능을 검증하기 위하여 실시하는 시험으로서 임펄스내전압시험, 상용주파 내전

압, 유도내전압시험, 부분방전시험 등을 포함하고 있다.

- 3) 온도특성시험 : 변압기의 정격전류를 통전시킨 상태에서 온도상승 한도를 검증하는 시험
- 4) 전기적 특성 및 기타 시험 : 변압기의 임피던스, 각변위, 비오차 등 전기적 특성을 확인하는 시험과 위의 1)~3)에 포함되지 않은 시험

표 3. 개발시험 불량 점유율

Table 3. Failure share of development tests

불량 시험종류	건수	점유율(%)
단락시험	77	55.4
절연시험	33	23.7
온도상승시험	21	15.1
전기적 특성 및 기타 시험	6	5.8
합 계	139	100

※ 형식시험 및 항목시험 건수(판정 대상) : 836건

※ 형식시험 및 항목시험 전체 불량률 : 16.6%

2.4 배전용 변압기 단락시험 불량원인 및 보완대책

표 4. 단락시험 불량발생 공정

Table 4. Failure causing process of short-circuit tests

종 류	불량구분	
	설 계	제 작
유입식 변압기	9	6
유입식 주상변압기	6	6
유입식 지상변압기	12	7
에폭시 몰드변압기	6	1
건식 변압기	2	1
합 계	35	21

단락시험 불량이 발생한 77건에 대하여 불량 원인을 조사, 분석하고 도출한 보완대책은 표 4와 같다. 불량이 발생한 총 77건 중 56건은 조사, 분석이 가능하였으나 제조회사의 부도, 생산 등으로 21건은 불가능하였다. 변압기 내부 지락고장 발생 시 외부로 절연유 유출 여부를 검증하는 동압력시험 불량 3건은 변압기의

2차 단락고장과 관계가 없으므로 조사, 분석에서 제외하였다.

불량원인은 축방향 또는 반경방향으로 발생하는 힘에 따라 설계와 제작을 구분하여 조사, 분석하였으며, 보완대책은 설계불량에 대하여 도출하였다. 불량원인 분석에서 설계에 따라 제작하였음에도 불량이 발생한 것은 설계불량, 그러하지 않은 경우에는 제작불량으로 분류하였다.

2.4.1 축방향으로 발생한 힘에 의한 불량 원인 및 보완대책

단락전류 통전 시 축방향으로 발생한 힘에 의해 형성된 설계 불량은 표 5에서 나타낸 것과 같이 24건으로서 표 7에 나타낸 반경방향으로 발생한 힘에 의한 불량 11건 보다 훨씬 높게 나타나고 있다. 이는 축방향으로 발생하는 힘에 대응하는 권선 상하 고정 부분의 설계 및 제작이 완전하지 못하다고 볼 수 있으며 세부적인 불량 원인의 분석 결과는 표 5와 같다. 그림 3은 변압기의 단락시험 시 단락전류에 의해 철심 측에 위치한 저압 권선이 밀려 올라와 기계적손상이 발생한 사진이다. 그림 4는 단락시험 시 상하부의 권선이 중앙부로 미는 코일 힘에 의해 가장 높은 내부압축력을 받는 중앙부의 권선 색션간 지지 스페이서가 손상되고 이탈된 사진이다. 이와 같이 권선을 지지하는 구조물이 손상되거나 변형될 경우에 변압기의 임피던스가 증가하게 된다. 이러한 임피던스의 변화율이 표준에서 허용하는 범위를 벗어나게 되면 불량으로 판정한다. 보완대책으로는 대부분이 표 6과 같이 권선 또는 철심을 고정하는 부속품의 기계적 강도를 높이는 방향으로 설계 변경하는 방안을 도출하였다. 고정 부속품은 상하 및 원주 방향 권선 조임쇠, 클램프, 지지블록 등을 포함하고 있다. 이는 쉽게 이탈되지 않은 구조로 변경, 손상을 방지하기 위하여 재료 두께 및 형상 변경을 통한 기계적 강도의 강화, 지지절연물의 손상을 방지하기 위한 재질 변경 등에 대한 내용이다. 대부분의 고장원인은 발생하는 전자기계력에 대한 충분 대책을 완비하지 못해 발생한 고장이다. 단락시험이 아닌 실제 변압기 운영에 있어서도 보완대책이 마

련되지 않는다면 변압기 제작사와 더불어 소비자 또한 잠재적 피해를 얻을 가능성이 크다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서 제시한 보완대책을 설계에 반영하여 단락시험을 실시한 결과 개선된 점을 확

표 5. 축방향 힘에 의한 불량원인
Table 5. Failure causes by axial forces

불량원인	건수	
	설계	제작
철심 고정용 조임쇠 변형으로 철심이 변형되어 임피던스 증가	3	3
권선을 지지하는 후레임 변형	2	
권선 상부 지지절연물 파손으로 권선이 돌출되거나 이탈	6	
권선 상하부 고정용 조임쇠 변형으로 1차 또는 2차 권선이 상하로 이탈	7	
고압권선 측면 조임쇠 변형으로 권선이 변형	3	
고압 권선 색션 사이 설치 스페이서 이탈로 권선이 변형(함몰)	1	
2차 결선용 지지예자 기계력 부족으로 파손, 2차 권선 리드선 손상	2	
바니쉬 함침 불량으로 권선이 변형되거나 손상됨		3
2차 권선과 전원 버스 용접불량 및 2차리드선 고정 불량, 에나멜 피복 손상 등 작업 미숙으로 불량 발생		9
합 계	24	16



그림 3. 단락시험 시 저압 권선이 이탈된 22.9[kV] 지상설치형 변압기 내부

Fig. 3. Inside view of a breakaway low-voltage winding of 22.9[kV] pad mount transformer by short-circuit test

인 할 수 있었다.

표 6. 축방향 힘에 의한 불량에 대한 보완대책
Table 6. Countermeasure for failures by axial forces

보완대책	건수
철심 고정용 조임쇠를 일체형으로 변경 또는 평철 추가로 강도를 높임	3
후레임 철판 강도 변경(2.3t→3.2t) 및 형상 변경(밴드→판)	2
권선 상부지지 절연물 재질 변경(프레스 보드→베크라이트, 비치우드, 우드라이트)하거나 크게하여 강도를 높임	6
권선 고정용 조임쇠를 일체형으로 변경 또는 평철 추가 등으로 강도를 높임	7
고압권선 외측 조임쇠의 기계적 강도를 높임(두께 변경 또는 평철 추가)	3
스페이서 두께를 5mm 크게하고 권선지지 상하 후레임의 압축력을 높임	1
지지재 강도가 높은 것으로 변경 및 상부 후레임 구조 변경	2
합 계	24

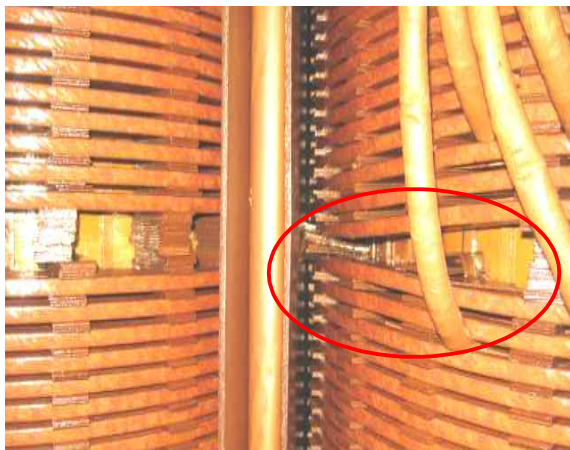


그림 4. 단락시험시 권선 색션 간 스페이서가 이탈된 22.9[kV] 유압식 변압기 내부
Fig. 4. Inside view of a breakaway spacer of 22.9[kV] oil-immersed transformer by short-circuit test

2.4.2 반경방향으로 발생하는 힘에 의한 불량 원인 및 보완대책

불량 발생원인은 반경방향으로 발생하는 힘에 의해 외측권선 조임쇠가 손상되거나, 내측 권선이 철심 방

향으로 찌그러지는 부분이 생기는 것이 대표적이며 세부적인 불량 원인을 조사한 결과는 표 7과 같다. 그림 5는 22.9[kV] 지상설치형 단락시험시 내측권선이 철심 방향으로 찌그러진 내부 사진이다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 보완대책으로는 외측권선의 조임쇠의 기계적 강도를 높이거나, 철심과 2차측 권선 사이 지지물의 간격을 좁히고 조임쇠 및 지지물의 강도를 높게 하도록 하고, 권선 전체가 이탈된 경우에는 단락전류 통전 시 발생하는 전자력을 절반으로 줄이기



그림 5. 단락시험시 내측권선이 철심 방향으로 찌그러짐이 발생한 22.9[kV] 지상설치형 변압기 내부
Fig. 5. Inside view of the inside winding bent towards Core of 22.9[kV] pad mount transformer by short-circuit test

표 7. 반경방향 힘에 의한 불량원인
Table 7. Failure causes by lateral forces

불량원인	건수	
	설계	제작
권선 측면 조임쇠 변형 또는 이탈로 인해 임피던스 값이 초과	2	
철심과 2차 권선 사이 지지력 부족으로 2차 권선이 철심 방향으로 변형	7	1
1, 2차 권선 사이가 벌어짐에 따라 임피던스 값이 초과	1	
권선의 기계적 강도 부족으로 1차 권선이 크게 변형됨	1	
몰드 주형 시 작업불량으로 1차 권선 층간 단락 발생		1
합 계	11	2

위하여 구조를 외철형에서 내철형으로 설계를 변경하는 보완대책을 도출하였다. 표 8에 나타난 보완대책을 배전용 변압기 설계 시 반영한 제품에 대하여 단락시험을 통하여 불량 원인이 해소되었음을 확인하였다.

표 8. 반경방향 힘에 의한 불량에 대한 보완대책
Table 8. Countermeasures for failures by lateral forces

보완대책	건수
권선 고정용 조임쇠를 일체형으로 변경 또는 평철 추가 등으로 강도를 높임	2
철심과 2차권선 사이 지지 절연물의 설치 간격을 좁혀 기계적 강도를 높임	7
1, 2차 권선이 벌어지거나 1차 권선이 크게 변형된 경우에는 외철형을 내철형으로 설계 변경	2
합계	11

3. 결론

배전용 변압기의 개발시험 불량 중 55.4%를 점유하고 있는 단락시험의 불량 원인은 단락고장 전류로 인해 발생한 축방향의 권선 전자기력에 견디지 못하고 손상된 경우가 가장 많았다. 단락시험 불량발생 원인별로는 축방향 힘에 의한 불량이 40건(71.4%), 반경방향 힘에 의한 불량이 13건(23.2%), 기타 3건(5.3%)이며, 공정별로는 설계 불량이 35건(62.5%), 제작 불량이 21건(37.5%)으로 조사, 분석되었다.

본 논문에서는 제작 불량을 제외하고 설계 불량 부분에 대하여 세부적으로 불량 원인을 조사, 분석하고, 보완대책을 도출하여 설계를 보완함으로써 단락시험에서 불량 발생 원인이 해소되었음을 확인할 수 있었다. 향후 다양한 기능의 배전용 변압기 개발 및 설계 단계에서, 이러한 전자기력에 대한 보완대책을 적용한다면 초기 불량을 줄이고, 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 신제품의 개발 기간 및 시험 비용을 줄일 수 있으므로 제품 경쟁력 향상에 기여할 것으로 기대된다.

References

- (1) 박병락, 정흥수, 이동준, 김선호, 김재철, “전력용 변압기의 개발시험 결과분석 및 불량원인 고찰”, 2010년도 대한전기학회 전력기술부회 추계학술대회 논문집, pp. 76-78, 2010. 11. 5.
- (2) 한국전력공사, “전력용 변압기 운영 지침서”, pp. 1-43, 2002.
- (3) A.C. Franklin, D.P. Franklin, “The J&P Transformer Book”, Butterworth Heinemann, pp. 666-680, 11th Edition.
- (4) 박만호, “유도기기”, 동명사, pp. 184-200, 1993. 8. 25.
- (5) 變壓器專門委員會, “短絡時における變壓器巻線の機械的強度について”, 日本電氣學會技術報告(1部) 第89号, pp. 1 - 13, 昭和44年5月.
- (6) 한국전기연구원, “대전력시험기술”, 제11회 기술교육 교재 Vol.4 No.11, pp. 127-152, 2001. 7. 2.

◇ 저자소개 ◇



박병락(朴炳樂)

1952년 2월 23일생. 1978년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2011년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1980년~현재 한국전기연구원 본부장.
Tel : (055)280-1600
E-mail : brpark@keri.re.kr



박훈양(朴訓養)

1968년 1월 10일생. 1995년 건국대학교 행정학과 졸업. 2011년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 (주)에너테크 대표이사.
Tel : (032)322-8584
E-mail : ceo@enerkeeper.com



신희상(申熙尙)

1980년 9월 16일생. 2007년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.
Tel : (02)817-7966
E-mail : shs8828@ssu.ac.kr



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수.
Tel : (02)820-0647
E-mail : jckim@ssu.ac.kr