

수냉각 고정자 권선용 바의 열 사이클 시험

김태희, 오세욱, 이재권, 손삼웅
 두산중공업(주) 기술연구원, 터빈BG

Thermal cycle test for water-cooled stator bar

Tae Hee Kim, Se Wook Oh, Jai Kwun Lee, Sam Yong Son
 R & D Center, Turbine BG, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

Abstract - 절연물에 가해지는 열화 중에서 열 사이클 (Thermal cycle) 열화를 모사하기 위하여, 대형 터빈 발전기 수냉각 고정자 권선용 바를 대상으로 IEEE Std 1310 규격에 따라 200 사이클의 열 사이클 열화 시험을 수행하였다. 바에 대한 절연 특성을 분석하기 위하여 시험 수행 전후의 Tan δ 및 Tip-up(%), Δ Tan δ, 부분방전의 최대 방전량 등을 측정하였고 또한 바를 절단하여 절연물 내의 박리와 도체와 절연물 간의 분리 등을 점검하였다. 최종적으로는 절연파괴 시험을 수행하여 절연파괴 강도를 측정하였다. 시험 결과 초기 절연 특성상의 현저한 변화는 없었으며 양호한 특성을 보였다.

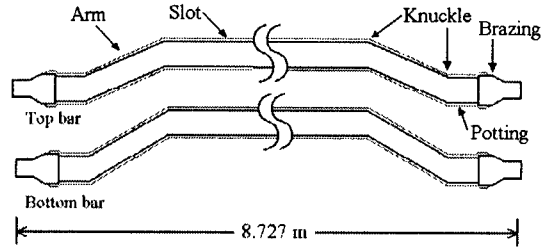


그림 1 고정자 권선용 상부 바와 하부 바의 외형

1. 서 론

대형 발전기나 고압 전동기와 같은 회전기기의 고정자 권선에는 열적 열화, 기계적 열화, 전기적 열화, 환경적 열화 등이 상존하고 이들 요인이 복합적으로 시스템에 작용하여 결국은 권선 절연 시스템을 열화시킨다. 열화가 지속된 상태에서 운전이 계속된다면 열화는 가속될 것이고 결국에는 절연 파괴로 이어져서 해당 시스템이나 전체 프로세스에 큰 손실을 야기하게 될 것이다.

그러므로 절연 시스템에 대한 열화 진단은 매우 중요하지만 절연 상태를 진단하기 위하여 측정된 시험 데이터를 바탕으로 복합적인 열화 요인들을 분석하는 많은 기술들이 아직까지 완전하지 못한 실정이다[1]. 이러한 기술적인 현실을 고려할 때 회전기기는 제품 출하단계에서부터 필수적인 성능 시험을 통한 절연 특성 자료를 데이터베이스화해야 하고 현장에 설치한 이후에도 On-line, Off-line 테스트를 병행하여 항상 절연상태를 감시해야 한다.

당사에서는 절연재의 수명을 평가하기 위한 기술 개발의 일환으로 대형 터빈 발전기 수냉각 고정자 권선용 바에 대한 절연 열화 시험을 수행하고 있다. 전기적 열화 시험을 모사하기 위하여 Voltage endurance 시험을 수행하여 그 결과를 제시하였으며[2], 본 연구에서는 재료 출력 부하에서 최대출력 부하로의 사이클이 반복될 때 발생하는 열적 열화에 대한 초기 절연특성의 변화를 분석하고자 한다.

본 시험을 위하여 제조 공정을 마치고 조립직전의 터빈 발전기 수냉각 고정자 권선용 바를 구성하는 상부 바 (Top bar)와 하부 바(Bottom bar)를 대상으로, 열 사이클(Thermal cycle) 열화에 대한 절연 특성의 변화를 분석하기 위하여 200 사이클의 열 사이클 열화 시험을 수행하였다.

상기한 열화 시험을 마친 바를 대상으로 시험 수행 전후의 Tan δ 및 Tip-up(%), Δ Tan δ, 부분방전의 최대 방전량 등을 측정하였고 절연파괴 시험을 수행하여 절연 파괴 강도를 측정하였다. 또한 시험용 바를 위치별로 절단(Dissection)하여 절연물 내의 박리와 도체와 절연물 간의 분리 여부를 검사하였다.

2. 시편 및 시험 방법

2.1 시편의 선정

시험 대상 발전기의 출력 정격 사양을 표 1에 나타내었다. 본 시험은 제조 공정을 마치고 대형 터빈 발전기 수냉각 고정자 권선으로 조립되기 전의 바를 대상에서 상부 바와 하부 바를 각각 임의로 선택하였다. 선택시점은 고정자 권선에 필요한 바를 제조하는 과정에서 전체 바 생산의 1/3이 완료된 시점과 2/3가 완료된 시점으로 하였다.

당사에서는 제작된 바를 대상으로 표준시험(절연저항 측정, 고전압 인가 시험)에 대한 전수검사를 실시하고 그 시험을 통과하여야만 권선 조립단계로 들어간다. 본 시험에 사용될 바는 상기의 표준시험을 통과한 것 중에서 2개를 선택하였다.

상부 바와 하부 바의 외형도를 그림 1에 도시하였다. 그림에서는 명시되어 있지는 않지만 상부 바와 하부 바의 외형은 동일하지만 단면을 도시하여 볼 때 상부 바가 하부 바보다 세로 길이가 약 8 cm 정도 더 길다.

표 1. 시험 대상 발전기의 정격

항 목	정 격
출력 정격 전압	3상, 22 kV
주파수	60 Hz
용 량	1100 MVA
고정자 권선 냉각수 온도	< 70 °C

2.2 시험 방법

열 사이클 열화에 대한 절연 특성 변화를 시험하기 위하여 참고한 시험 규격으로는, 열 사이클 열화시험은 IEEE Std 1310의 시험 방법[3]을 따랐으며 유전 특성 시험은 IEEE Std 286과 IEEE Std 1434 권고에 따라서 Tan δ와 Δ Tan δ, 부분방전 시험을 수행하였다[1, 4].

열 사이클 시험의 경우 IEEE Std 1310에서 규정하고 있는 시험 방법과 정확하게 일치하지는 않는다. 예를 들

어서 IEEE 규격에서는 500 사이클의 시험을 예시하고 있으나 본 시험에서는 200 사이클의 시험만을 수행하였다. 이밖에도 IEEE 규격에서는 열 사이클 시험 후의 시험(Post-thermal cycle test)에 대하여도 명시되어 있지만 그 중에서 일부를 선택하여 실시하였다.

당사 규정의 표준시험 항목 중에서 절연저항 측정은 ASTM D 257을 따라서 500 V를 시편에 인가한 후 절연저항을 측정하고[5], 절연파괴 시험은 ASTM D 149를 적용하였으며 상과 대지간 경계 전압의 3배를 인가하는 내전압 시험을 1분간 수행하였다[6].

열 사이클 시험을 수행할 때, 시편 바에 대한 온도 증감은 40 °C에서 155 °C까지 가열한 다음 155 °C에 도달한 직후에는 바로 냉각 장치를 가동시켜 40 °C까지 냉각시키는 과정을 200 사이클 반복하였다. 시험 전후의 측정에 관해서는 표 2에 그 내용을 나타내었다.

표 2. 열 사이클 시험 전후의 절연특성 진단 시험

항목	비고
Dissipation Factor (Tan δ, Δ Tan δ)	- 시험전과 일정 사이클 후 - 인가전압: 2, 7, 12.7 kV _{AC}
Partial Discharge (최대 방전량)	- 시험전과 일정 사이클 후 - 인가전압: 12.7 kV _{AC}
Dissection	- 하부 바를 대상으로 실시. Knuckle, End arm, Brazing, Potting, Slot 부를 절단. 공극 수, 크기 등을 육안 검사.
Voltage Breakdown	- Dissection을 하지 않은 한 시편을 대상으로 실시. 절연파괴 강도 측정.

2.3 시험 장치

본 시험에서 사용한 주된 설비 중에서 시편의 가열에 필요한 전원 공급장치는 5000 A의 교류 전류를 안정적으로 장시간 공급해야 한다. 본 전원장치는 한국전기연구원 시험 설비를 이용하였으며 평균 온도 상승 속도는 약 2.5 °C/min이 되도록 설정하였다.

시편용 바의 냉각을 위하여 실험장 내부에 송풍기를 설치하여 냉각시 사용하였으며 평균 온도 하강 속도도 상승 속도와 동일하도록 준비하였다.

실험중 온도 측정을 위하여 열전대를 사용하였으며 각 지점에서 측정된 온도를 기록하기 위하여 Yokogawa의 차트 기록계를 사용하였다.

이밖에도 시험 장소 주위를 외부와 차단하여 시험이 진행되는 동안 시편 주위의 온도와 습도 변화를 최소화하고 또한 안전을 위하여 실험중 외부인의 출입을 금지시켰다.

IEEE의 시험 규격에서는 시험용 바를 최소 7개를 사용하도록 규정되어 있다. 이것은 4개의 시편과 온도제어용 바 1개, 가드용 바 2개로 구성되어 있다. 그러나 본 실험에서는 그림 2에서 도시한 것과 같이 제어용 바와 시편용 바 각각 1개씩으로 시험 장치를 구성하였다.

시편의 Tan δ와 Δ Tan δ 측정에는 Schering bridge

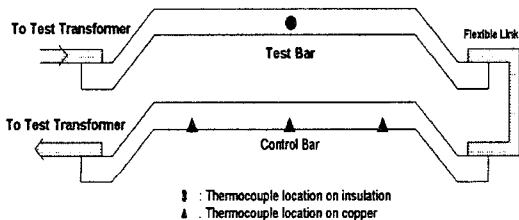


그림 2. 시편 가열 장치의 구성 개괄도

와 표준 커패시터가 내장된 Tettex 2818과 고전압 전원장치 5283를 사용하였으며 100 pF의 커플링 커패시터를 적용하였다. 부분방전시 최대 방전량을 측정할 때에는 Power Diagnostix Systems GmbH사의 ICMcompact 제품(Digital partial discharge detector)을 사용하였다.

3. 시험 및 결과 고찰

3.1 예비 시험 및 열 사이클 시험

열 사이클 시험시 바의 온도 상승 속도와 하강 속도를 규정한 대로 맞추기 위하여 시편에 실제 전류를 인가한 예비 시험을 수행하였다. 온도 상승시 인가 전류값과 온도 하강시 송풍기의 위치, 풍량 등의 조건을 고려하여 온도 상승과 하강 속도를 제어하기 위한 시험이었다.

예비 시험에서 사용하였던 시편은 모두 폐기하고 상부 바와 하부 바의 새 시편을 대상으로 열 사이클 시험을 수행하였다. 두 시편 모두 시험 전후로 외관상의 큰 변화를 보이지는 않았다.

표 2의 진단 시험을 포함한 전체 시험에 소요된 시간은 상부 바의 경우 약 431시간이 소요되었으며 하부 바의 경우에는 약 400 시간이 소요되었다.

3.2 유전특성 시험

열 사이클 시험을 수행하기 전과 10, 50, 100, 200 사이클 수행한 이후에 각각 Tan δ와 Δ Tan δ, 바의 정전용량 및 부분방전 변화량을 측정하였다.

Tan δ는 시편에 2 kV, 7 kV, 12.7 kV를 인가하여 측정하였고 Δ Tan δ는 12.7 kV에서의 Tan δ값에서 2 kV에서의 Tan δ값을 뺀 값에 대한 백분율로 나타내었으며 부분방전 시험시 최대 방전량(Q_m)은 인가 전압 12.7 kV에서 측정된 값이다.

시험 결과에 대한 분석에 앞서 본 연구를 통하여 구한 데이터를 기존의 문헌들로부터 제시되고 있는 값들과 직접 비교할 수는 없다[1]. 일반적으로 고정차 권선이 완전 조립된 상태에서 Off-line 시험을 수행하여 구한 결과와 본 시험에서와 같이 1개 혹은 2개의 바를 대상으로 구한 값에는 차이가 있을 수밖에 없다. 따라서 데이터를 해석함에 있어서 전반적인 추세를 확인하는 것이 중요하다.

그림 3에는 바의 Tan δ를 측정하기 위하여 열 사이클 시험 전과 각 사이클을 수행한 직후에 인가전압을 증가시켰을 때 바의 정전용량 변화를 도시한 그래프로, 상부 바의 정전용량이 하부 바의 정전용량보다 더 큼을 알 수 있다. 이것은 상부 바가 하부 바보다 단면적이 크기 때문이다. 그리고 열 사이클 시험의 여부와 상관없이 인가전압을 증가시켰을 때 바의 정전용량이 증가하는 것은 인가전압의 증가분보다 손실전류의 증가분이 크기 때문으로 판단된다.

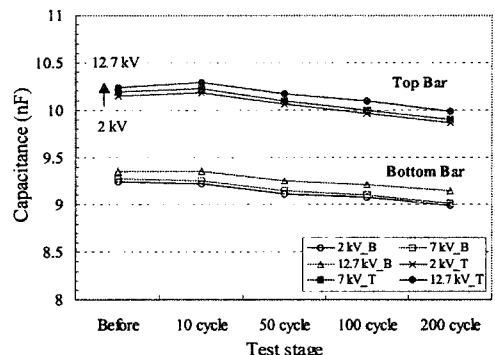


그림 3. 열 사이클 전과 각 사이클 이후에 측정된 인가전압에 대한 바의 정전용량 변화

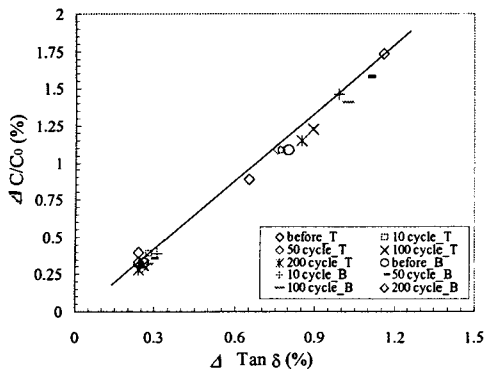


그림 4. $\Delta \text{Tan } \delta$ 와 $\Delta C/C_0$ 와의 변화 그래프.

그림 4에는 $\Delta \text{Tan } \delta$ 의 변화에 대한 $\Delta C/C_0$ 와의 변화를 도시하였다. 여기서 C_0 는 시험에 2 kV를 인가한 경우의 정전용량으로 설정하였다. 그림속의 직선은 $\Delta \text{Tan } \delta$ 의 변화가 제일 큰 데이터에 대한 추세선을 도시한 것으로 시험의 종류나 열화 정도에 상관없이 $\Delta \text{Tan } \delta$ 와 $\Delta C/C_0$ 두 변수의 상호관계가 매우 밀접함을 보여준다. 이것은 두 변수가 모두 절연체 내 공극의 정도를 의미하는 변수이기 때문이다[7].

그림 5와 6에는 각각 상부 바와 하부 바에 대한 실험 전과 각 사이클 직후에 측정된 Tip-up(%), $\Delta \text{Tan } \delta$ 과 최대 방전량(nC)의 변화를 도시하였다.

최대 방전량의 변화 추세를 보면, 상부 바의 경우는 시험의 여부와 관계없이 큰 변화가 없으나 하부 바에서

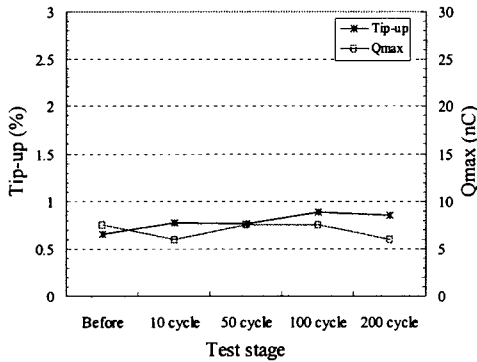


그림 5. 상부 바의 Tip-up과 최대 방전량 변화

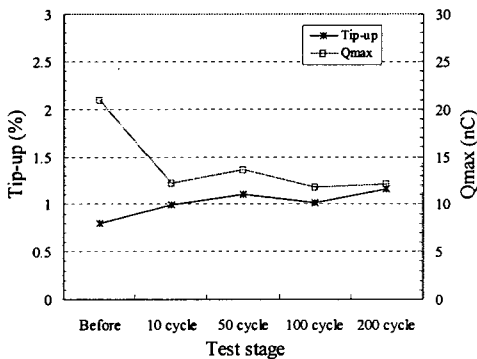


그림 6. 하부 바의 Tip-up과 최대 방전량 변화

는 초기에 상대적으로 높은 값을 지시하였으나 시험 이후에는 전체적으로 안정된 값을 보인다. 그리고 상부 바에 비해 하부 바에서 조금 높은 값을 보인다. 전체적으로 매우 양호한 특성을 가지는 것으로 판단된다.

$\Delta \text{Tan } \delta$ 값의 변화는 사이클의 횟수가 늘어날수록 증가함을 보인다. 그러나 그림 7과 8의 $\text{Tan } \delta$ 변화 그래프를 참조하면 $\text{Tan } \delta$ 의 급격한 변화가 없기 때문에 $\Delta \text{Tan } \delta$ 의 변화 특성 역시 매우 양호한 것으로 판단된다.

그림 7과 8에는 인가 전압 및 열 사이클 당 $\text{Tan } \delta$ 의 변화 특성을 도시하였다. 먼저 인가 전압이 증가하면 $\text{Tan } \delta$ 도 증가하지만 7 kV를 전후하여 그 기울기가 조금씩 급해지고 있음을 알 수 있다. 또한 사이클 횟수가 증가할수록 그 변화가 더 커지고 있다. 이 전압 부근에서 누설전류의 양이 상대적으로 증가하는 것을 전류 모니터를 통하여 알 수 있지만 그림 5와 6의 부분방전량이 전체적으로는 안정적인 형태를 보이므로 시험의 절연 정도는 안정적인 것으로 추정된다.

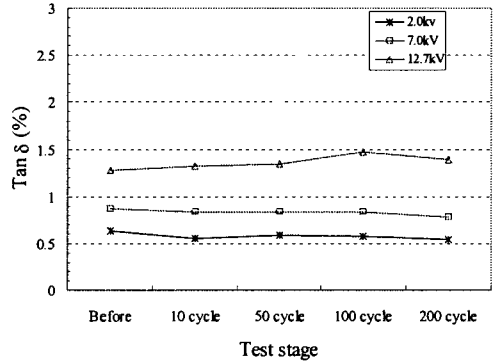


그림 7. 상부 바의 사이클 당 $\text{Tan } \delta$ 변화

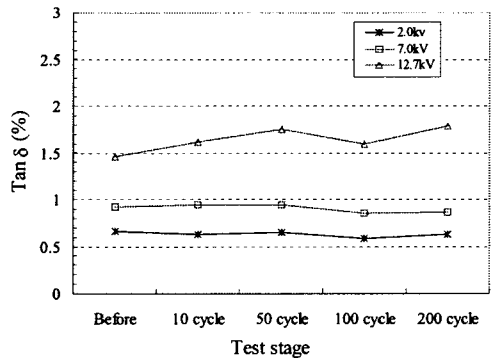


그림 8. 하부 바의 사이클 당 $\text{Tan } \delta$ 변화

3.3 육안 검사

지금까지의 시험을 마친 하부 바를 대상으로 내부 단면을 육안 검사하기 위하여 시험을 절단(Dissection)하였다. 본 검사를 통하여 주절연 내부에 박리(delamination) 발생 여부와 구리 소선과 주절연 사이가 분리 여부를 검사한다. 또한 하부 바를 절단하고 남은 부분 중에서 슬롯 직선부는 다시 절연파괴 시험에 이용하였다.

그림 1에 도시한 것과 같이 시험을 슬롯 직선부와 Knuckle부, Arm부, Brazing부, Potting부로 나누어서 절단하였다. 이 중에서 슬롯 직선부의 절단 사진을 그림 9에 예시하였다. 그림에서와 같이 절단면은 매우 깨끗하고 상태가 우수하였으며 박리나 주절연과 구리 소선의 분리와 같은 징후는 발견되지 않았다.

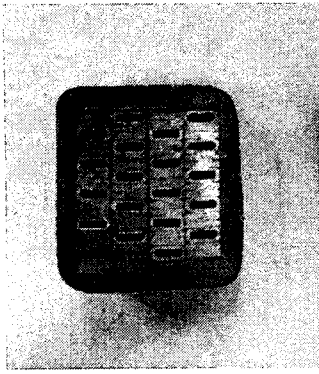


그림 9. 하부 바 슬롯부 절단면

3.4 절연파괴 시험

열 사이클 및 유전 특성 시험을 거친 상부 바와 육안 검사를 수행하고 남은 시편 1의 슬롯 직선부 일부를 대상으로 절연파괴 시험을 수행한다. 상부 바는 다시 슬롯 직선부와 Arm부로 나누어 절단한 이후에 각각 별도로 시험하였다.

시험방법은 ASTM D149 Method B 단계별 파괴 시험법을 적용하여 절연파괴 시험을 수행하였다[6]. 슬롯 직선부와 Arm부의 길이 방향 중앙부와 절단면의 구리 도체부분에 각각 전압 인가용 전극을 연결하기 때문에 절연파괴 시험시 양 전극간에 표면 방전이 발생하지 않을 만큼 충분한 길이를 확보해야 한다. 그래서 시험은 대기 중에서 시편에 고전압을 인가하였을 때 연면 방전이 발생하는 것을 막기 위하여 절연유에 시편이 완전히 잠기도록 담긴 상태에서 수행하였다.

단계별 파괴 시험은 60 Hz, 30 kV를 초기 전압으로 시작하여 단계별로 2 kV씩 상승시키면서 절연 파괴 전압까지 증가시켰으며 시험 결과는 표 3에, 최대 인가 전압과 지속 시간을 함께 나타내었다. 시편이 사용될 대상 발전기의 정격 전압이 22 kV이므로 시편은 위치에 따라서 발전기 정격 전압의 4배에서 4.4배 이상 내전압 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

표 3. 절연파괴 시험 결과

시 편	최대 전압	지속 시간	V _B
하부 바 직선부	98 kV	16 초	96.5 kV
상부 바 직선부	90 kV	26 초	88.9 kV
상부 바 곡선부	100 kV	18 초	98.6 kV

4. 결 론

본 연구에서는 대형 터빈 발전기 수냉각 고정자 권선용 상부 바와 하부 바를 대상으로, 열 사이클 열화에 대한 초기 절연 특성의 변화를 분석하기 위하여 IEEE Std 1310 규격에 따라 200 사이클의 열 사이클 열화 시험을 수행하였다. 절연 특성의 분석을 위하여 시험 수행 전후의 Tan δ 및 Tip-up(%), 부분방전의 최대 방전량 등을 측정하였고 데이터를 제시하였다.

데이터를 분석한 결과 시편의 종류나 열화 정도에 상관없이 Δ Tan δ와 ΔC/C₀의 상관관계는 매우 밀접함을 보였으며 또한 최대 방전량의 변화 추세에서는 상부 바와 하부 바 모두 큰 변화가 없었으며 하부 바의 값이 조금 큰 추세를 나타내었다.

Δ Tan δ 값의 변화는 사이클의 횟수가 늘어날수록 증가함을 보였으나 Tan δ의 급격한 변화가 없기 때문에 Δ Tan δ의 변화 특성 역시 매우 양호한 것으로 판단된다.

열 사이클 당 Tan δ의 변화 특성에서는 사이클 횟수가 증가할수록 Tan δ의 변화가 커졌다. 이것은 누설전류의 양이 상대적으로 증가하기 때문이며 최대 부분방전량이 안정적이었기 때문에 시편의 절연 정도는 안정적인 것으로 추정된다.

주절연 내부에 박리 발생, 구리 소선과 주절연 사이가 분리된 곳 등을 조사하기 위하여 시편을 절단하였고 육안 검사를 수행하였으나 그와 같은 징후는 없었으며 단면의 상태는 매우 양호하였다.

ASTM D149의 단계별 파괴 시험법을 적용하여 절연 파괴 강도를 측정한 결과 발전기 정격 전압의 4 ~ 4.4배의 절연파괴 강도를 확인하였다.

본 시험을 통하여 열 사이클 변화에 대한 대형 터빈 발전기 수냉각 고정자 권선용 바의 절연 특성과 유전 특성 시험, 육안 검사와 절연파괴 전압 시험 등을 수행하였으므로 그 결과 초기 절연 특성이 매우 우수함을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Std 1434-2000, IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating machinery.
- [2] 김태희와 3인, "대형 발전기 고정자 권선용 바의 절연 특성 시험", 대한전기학회 고전압 및 방전응용기술 연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 16-19, 2003. 4.
- [3] IEEE Std 1310-1996, IEEE Trial Use Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Generators.
- [4] IEEE Std 286-2000, IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-up of Electric Machinery Stator Coil insulation.
- [5] ASTM D 257-92 Standard Test Methods for D-C Resistance or Conductance of Insulating Materials.
- [6] ASTM D 149-92 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.
- [7] EPRI Final Report by Ontario Hydro Research Division, Motor and Generator Insulation Life Estimation, Chapter 3, (EPRI TR-100185, V1), 1992.

본 연구는 산업자원부 전력산업기술개발사업으로 수행되었습니다.