

대형 터빈 발전기용 고정자 권선의 1000 thermal cycle 후 전기적 특성 변화

강명국*, 김태희**, 이재권*
 두산중공업(주) 터빈발전기BG 발전기설계팀*, 기술연구원 연료전지개발팀**

Electrical Degradation of Stator Bars for Large Turbine Generator after 1000 Thermal Cycles

Myung Guk Kang*, Tae Hee Kim**, Jai Kwun Lee*
 Generator Design Team*, Fuel Cell Development Team**, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

Abstract - Thermal and mechanical stresses, caused by repetitive start and stop and load fluctuation during long time operation, on winding stator bars are one of the main causes for electrical degradation of insulating materials. To understand the degradation process, we manufactured bar specimens with the same processes that make generator winding stator bars and the specimens were subjected to various degrees of thermal cycling. Measurements of the insulation properties, such as dissipation factor, tip-up and partial discharge, for un-aged specimens and for specimens aged by thermal cycling at 50, 100, 250, 500 and 1000 thermal cycles were performed. Finally all specimens were tested to obtain electrical breakdown voltages. In this paper we present the data and electrical degradation analysis results obtained during this program.

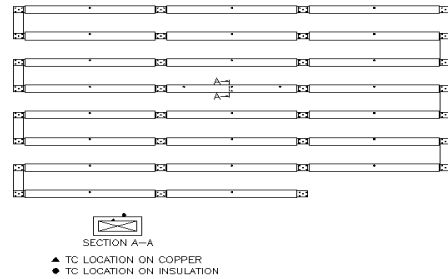


그림 1. 시편 바 및 온도센서 배치도

1. 서 론

최근 국내 발전소에서는 수명 연장이나 출력 증대를 목적으로 발전기의 재권선이나 교체에 대한 요구가 차츰 증가하고 있는 추세이다. 발전기는 특성상 장기간 연속운전이 불가피하며 이로 인한 절연의 열화 및 노후화는 자칫 불시정지나 최악의 경우 절연과피로 이어져 막대한 경제적인 손실을 초래할 수 있다[1]. 이러한 사고를 최소화하고 발전소 운전의 신뢰도를 향상시키기 위하여 절연상태에 대한 진단 및 평가기술의 확보는 필수적인 요소이다.

본 논문에서는 발전기 절연열화 요인 중 하나인 발전기의 반복적인 기동정지 및 부하 변동으로 인한 Thermal cycling 현상이 절연특성에 미치는 영향을 이해하기 위하여 시험하고 분석한 결과를 제시하였다. 이러한 현상을 모사하기 위하여 고정자 권선 시편을 제작하였으며 총 1000회의 인위적인 Thermal cycling을 시편에 인가하였다. Cycling 전후의 절연특성 변화를 파악하고자 많이 사용되는 Dissipation factor, Tip-up, Partial discharge 시험[2,3]을 수행하였으며, 마지막으로 절연과피 시험을 수행하여 절연과피전압을 측정하였다.

2. 시편제작 및 열 사이클 방법

2.1 시편제작

시편은 대형 터빈발전기용 고정자 권선의 제작공정과 동일한 프로세스를 통하여 제작하였으며 주절연 테이프를 1.4 미터의 구리소선 위에 감았다[4]. 절연등급 B와 F로 구분하였고 다시 안가전압(18kV, 22kV, 30kV) 별로 구분하였으며 상세한 내용은 표1에 나타내었다.

그림 1은 시편의 배치도이다. 각 시편을 전기적으로 연결할 때 시편간 접촉저항을 최소화하기 위하여 시편 양 끝단부는 절연 테이프를 입히지 않았고 각 소선을 브레이징 처리하였다.

표 1. 시편의 종류 및 수량

테이프 종류	권선 바 종류	시편 수량	정격전압 (kV)
상용 테이프	상용 B종	4	22
	상용 B종_HV	4	30
	상용 F종	4	18
	컨트롤 바	1	-
신규 테이프	신규 B종	5	22
	신규 F종	5	18

2.2 시험 설비

총 1000 사이클을 수행하기 위하여 최소 2개월 동안 안정적인 전원이 연속적으로 공급이 되어야 하므로 전원공급장치의 신뢰성은 매우 중요하다. 본 시험에서는 필요전류의 200 %를 공급할 수 있는 전원장치를 사용하여 안정도를 확보하였다.

시편의 온도 제어는 미리 설정된 시작(40 ℃) 및 중지(155 ℃) 온도를 기준으로 동작하도록 설정하였고 냉각 프로세스를 위하여 시편 주위에 냉각팬을 설치하였다. 냉각팬 또한 시편의 온도에 따라 자동으로 전원 투입 및 차단되며, 일정한 냉각 속도가 유지되도록 VFD (Variable Frequency Drive)를 장착하여 팬의 회전속도가 온도에 따른 주파수 제어되도록 제작하였다.

2.3 시험 방법

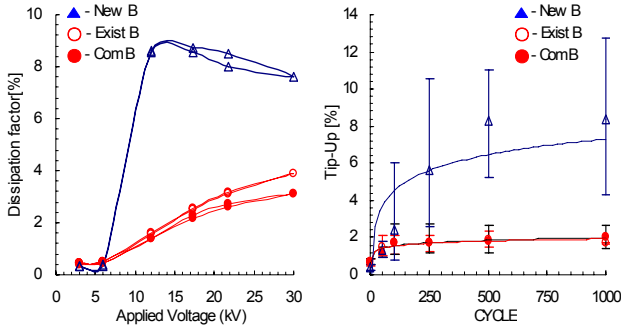
시험은 IEEE 규격[5]에 따라 수행하였다. 사이클의 정도에 따른 절연특성의 열화 진행정도를 파악하고자 모든 시편을 대상으로 열화 전 및 50, 100, 250, 500, 1000 사이클 이후에 Dissipation factor, Tip-up, Partial discharge를 측정하였다. 온도제어용 컨트롤 바를 시편 중앙에 설치하여 컨트롤 바의 주절연물 내부에 온도센서를 설치하여 시험 온도를 제어하였다. 온도 사이클은 40 ℃에서 155 ℃까지 이며 155 ℃에 도달한 후 즉시 냉각팬이 가동되어 시편을 40 ℃까지 냉각시키는 과정(사이클)을 총 1000회 반복시켰다. 온도 상승 및 하강 사이클 시간을 45분에 맞추기 위하여 예비 시편으로 사전 테스트를 실시하였고 그 과정에서 전원장치의 출력 전류 값과 냉각팬의 위치 등을 조정하였다.

3. 시험결과 및 고찰

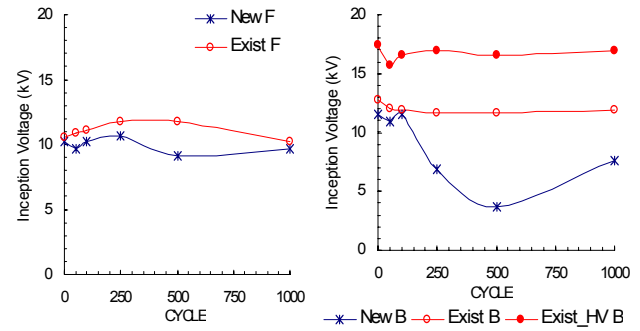
3.1 Dissipation factor 및 Tip up

열화 전과 각 사이클 진행 후의 Dissipation factor 및 Tip-up 변화를 그림 2에 도시하였다. 그림에서 (a)와 (c)는 1000 사이클 이후에 상전압에서 측정된 Dissipation factor 값이며, (b)와 (d)는 Tip-up 그래프로 여기서는 상전압 Dissipation factor와 상전압의 25%에서 측정된 Dissipation factor의 차를 의미한다. 각 사이클 후에 측정된 Dissipation Factor 변화는 Tip-up의 변화와 흡사한 패턴을 갖기 때문에 생각한다.

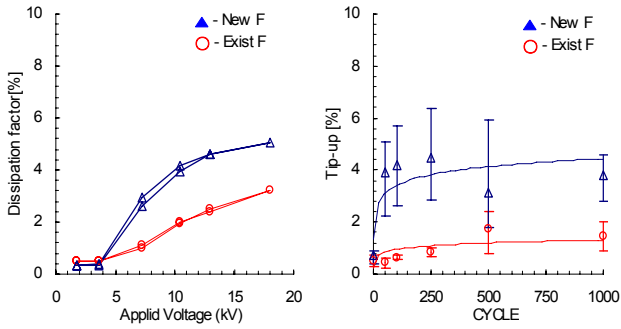
변화 추세를 보면, F종 B종 모두 비열화 상태에서는 신규 시편과 상용 시편이 유사한 값을 나타냈으나, 열화가 진행될수록 신규 시편의 특성이 급격하게 저하되었으며 상용 시편은 변화의 차이가 크지 않고 안정된 값을 보였다. 그리고 상용 시편에 비하여 신규 시편의 측정값 분포가 매우 큼을 알 수 있다. 신규 시편의 경우 B종은 100 사이클 이후부터, F종은 열화가 시작되면서부터 급격한 특성저하를 보인다. 이것은 절



(a) Class-B specimen's Dissipation factor (b) Tip-up



(a) Class-F specimen (b) Class-B specimen



(c) Class-F specimen's Dissipation factor (d) Tip-up

그림 2. Dissipation factor 및 Tip-up 변화 곡선

연소재의 시험단계에서는 확인되지 않았던 현상으로 구리소선과의 반응성이 상대적으로 취약하기 때문에 추측되며 구리 소선과 절연소재의 열 팽창률이 서로 다르기 때문에 사이클이 진행될수록 발생하는 공극의 수와 크기는 증가하는 것으로 알려져 있다. 상용 시편은 초기 100 사이클까지는 열화가 일정 정도 진행되었으나 전체적으로 볼 때 1000 사이클까지 특성변화가 크지 않다고 확인되었다.

3.2 부분방전 특성

열화와 부분방전 특성 간의 연관성을 파악하기 위하여 부분방전 크기와 펄스 빈도수를 측정하였으며 시험기기는 Soken사의 절연진단 시스템이다. 부분방전의 발생 패턴은 발생 위치와 그 원인 즉, 주절연층 내부, 권선 표면 반도전층 소손 등에 따라 다양하다[6]. 본 시험에서는 방전 패턴을 확인하고자 정극성과 부극성으로 나누어 전압을 인가하였다. 시험 결과 대부분의 시편에서 정극성 값이 높은 슬롯방전의 형태로 나타났다. 이것은 원인으로서는 시편표면에 전계분포를 완화시키는 테이프 및 페인트를 적용하지 않아 발생한 결과로 추정된다.

그림 3에는 열화에 따른 Vi(방전개시전압) 변화를 나타내었다. 신규 F종과 신규 B종의 Vi특성은 유사하지만 신규 B종은 500 사이클까지 열화가 진행될수록 Vi가 급격하게 저하됨을 알 수 있다. 이것을 제외한 시편들이 사이클 진행 전 후의 Vi 변화가 거의 없음을 고려할 때 신규 B종의 절연소재 특성이 불량하다고 판단할 수 있다. 그러나 고려해야 할 점은 Vi 특성과 상이 절의 Dissipation factor 등이 나쁘게 나타남에도 불구하고 표 2에서 제시한 절연과피 전압의 차이가 다른 시편과 크지 않다는 사실이다. 이것은 부분방전 특성만으로는 절연시스템의 건전성을 엄밀하게 판정하기 어렵다는 것을 의미한다.

기존 F종을 제외한 시편은 초기 사이클 진행 후에 Vi가 저하되다가 다시 증가하였다. 이것은 고정자 권선 절연시스템이 3층 구조로 이루어져 있고 각 절연층을 고정시키는 역할을 하는 Binder의 경화 특성에 기인한다고 판단된다. 터빈 발전기 고정자 바의 운전시간에 대한 절연특성이 초기에는 저하되지만 이후 유지되면서 일정 시간 경과 후에는 오히려 개선되는 특성을 보이는데 그 원인으로 Binder 경화특성이 지목된다.

이외에도 NQN과 Qmax 특성 변화도 분석하였다. 이러한 parameter들은 그 변화특성이 해당 시편의 표면처리상태에 따라 변하는 것도 있었지만 대체적으로 상용시편의 NQN 및 Qmax 특성은 큰 특성저하가 없었으나 신규 시편의 특성 저하는 상대적으로 크게 측정되었다.

3.3 절연과피전압

시편 수량을 반씩 나누어 500 사이클 및 1000 사이클 진행 후 절연과

그림 3. 방전개시전압 변화곡선

피 시험을 실시하였다. 전압 인가는 ASTM D149에 기술된 단계별 파괴 시험법[7]을 적용하였고 이때 초기 전압은 30 kV, 전압 인가 후 1분을 유지한 후 절연과피가 일어나지 않으면 다시 5 kV를 증가시켰고 절연과피가 발생할 때까지 반복하였다. 그리고 주 전극과 집지 간 코로나 발생을 방지하고자 절연유에 담긴 상태에서 시험을 수행하였다.

시험 결과를 표 2에 제시하였다. 결과적으로 B종 시편은 정격전압의 3.6배, F종 시편은 4.5배 이상의 내전압 특성을 가졌다. 앞서 기술한 것처럼 신규 B종 시편에 대하여 500 사이클과 1000 사이클 열화 후 절연과피 전압에는 큰 차이가 없었으며 상용 B종 시편과 비교시 500 사이클 경과시 3.2 kV, 1000 사이클 경과 후의 시편에서는 오히려 신규 시편의 절연과피 전압이 약 1 kV 높았다. 참고로, 상용 B종_HV 시편은 98 kV에서 1분 유지할 때 까지 절연과피가 발생하지 않았다.

표 2. Electrical breakdown voltages

Cycle	상용 B종_HV*	상용 B종	신규 B종	상용 F종	신규 F종
500	98 이상	82.1	78.9	91.9	92.6
1000	98 이상	78.6	79.5	82.5	91.6

3. 결 론

대형 터빈 발전기용 고정자 권선에 대한 절연 진단 및 수평평가 기술 개발의 일환으로 고정자 권선 시편을 제작하여 1000회의 thermal cycling을 수행하였으며, 절연 특성을 분석하기 위하여 열 사이클 전후 Dissipation factor, Tip-up, Partial discharge, 절연과피강도 시험을 수행하였다.

상용 테이프의 경우 열 사이클 열화가 진행되면서 특성 저하가 보였으나 차츰 안정화되었다. 특히 신규 30kV 용 시편에서는 절연특성이 매우 우수함을 확인하였다. 신규소재 시편은 열화가 진행될수록 절연상태가 급격히 저하되었지만 절연과피 특성에서는 큰 차이가 없었다. 따라서 이에 대한 상관관계의 분석과 절연소재의 특성 개선이 필요하다.

본 시험을 통해 열 사이클 시험을 위한 시편제작 및 시험방법을 확립하였으며, 열 사이클이 진행됨에 따라 절연 특성이 변화하는 것을 확인하였고, 향후 신규 테이프 개발 및 절연특성 평가를 위한 기본 data를 확보하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ontario Hydro Research Division, Motor and Generator Insulation Life Estimation, Vol.1, EPRI TR-100185, 1992.
- [2] Emery, "Partial Discharge, Dissipation Factor, and Corona Aspects for High Voltage Electric Generator Stator Bars and Windings", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, pp. 347-361, 2005.
- [3] 電気学会技術報告, 絶縁寿命限界と推定, 第882号, 電気学会, 2002.
- [4] 김태희 외 2인, "터빈 발전기용 비열화 고정자 권선 바의 절연 특성", 대한전기학회 2005 하계학술대회 논문집, pp. 2097-2098, 2005.
- [5] IEEE Std 1310-1996, IEEE Trial Use Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Generators.
- [6] IEEE Std 1434-2000, IEEE Trial Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
- [7] ASTM D 149-92, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.