

발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석

Analysis of Insulation Aging Mechanism in Generator Stator Windings

김희동

(Hee-Dong Kim)

Abstract

The mica/epoxy composite used in generator(rated 22 kV and 500 MW) stator windings was aged at 180 °C for up to 1000 hours in air and hydrogen. The degradation mechanism was investigated through the defect of evolution and microstructural analysis by performing SEM(Scanning Electron Microscope). As the thermal aging time increases, the number of voids per unit volume increases at the mica/epoxy interface of generator stator windings. The aged specimens in hydrogen showed retarded generation and growth of voids. Accelerated aging tests were conducted using the combination of thermal and electrical aging in air and hydrogen. The aging was carried out at a combined stress such as thermal aging at 110 °C, electrical aging at 5.5 kV/mm and frequencies 420 Hz in air, and electrical aging at 5.5 kV/mm and frequencies 420 Hz in hydrogen (pressure 4 kg/cm²). Thermal and electrical aging generates large voids at the mica/epoxy interface in air. Electrical aging in hydrogen also generates small voids, delaminations and cracks in mica tapes.

Key Words : Generator, Mica/epoxy, Stator winding, Degradation, Microstructure, Accelerated aging

1. 서론

대형 터빈발전기 고정자 권선의 주절연재료로 마이카/에폭시 복합재료가 사용되고 있으며, 운전 중에 열적, 기계적, 전기적 응력(stress) 및 외부환경에 의한 열화요인이 단독 혹은 복합적으로 작용한다. 열적요인은 열응력과 열분해로 분류되는데, 열응력은 기계적 응력과 더불어 균열(crack)을 발생시키고 열분해는 에폭시가 분해됨에 따라 가스 압력이 증가함으로써 접착강도를 저하시켜 계면에서 공극(void)을 발생시킨다. 기계적 응력은 마이카/에폭시 계면과 에폭시 리치(rich)부분에서 각각 미소균열을 발생시키고 동시에 이미 다른 원인에

의해 생성된 균열을 확대시킨다. 전기적 응력은 박리(delamination), 균열 및 공극과 같은 결합부분에서 부분방전이 발생하여 코로나 침식과 트리(tree)가 진행된다[1,2].

절연열화 현상은 운전이력에 따라 절연재료 내부에서 다수의 미소공극과 국부적으로 큰 공극이 발생하며, 운전시간이 길어지면 절연열화가 진행되어 공극의 양이 점차적으로 증가한다. 그러므로 절연열화는 절연층 내의 공극 발생과 확대에 의해 고전압을 인가하면, 공극에서 방전이 발생하여 탄화된 부분이 도전체로 되어 열화가 빠르게 진행된다. 또한, 평균적으로 공극의 양이 많을 때 혹은 국부적으로 큰 공극이 존재하면 절연과피 전압은 저하하는 것으로 알려져 있다[3]. Kimura 등은 마이카/에폭시 복합재료에서 열화 메카니즘(aging mechanism)을 분석하기 위해 열적, 기계적, 전기적 및 환경적 열화 등 복합열화 시험을 통해 절연

한전 전력연구원 발전연구실

(대전시 유성구 문지동 103-16)

Fax : 042-865-5304

E-mail : hdkim@kepri.re.kr)

2001년 8월 20일 접수, 2001년 12월 5일 심사완료

열화 과정과 모델을 제시하였다[4]. Y. J. Kim 등도 역시 마이카/에폭시 복합재료에서 절연열화 평가와 열화 메카니즘의 확인을 위해서 가속열화 시험(accelerated aging test)을 수행하였다[5].

본 논문에서는 마이카/에폭시 복합재료의 절연열화 메카니즘을 분석하기 위해 열적 열화된 권선, 가속열화된 권선 및 실제 터빈발전기에서 26년 동안 운전되어 열화된 고정자 권선을 사용하였다. 열적 열화 권선은 공기와 수소중에서 시간별로 열화된 시편과 건전시편에서 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 열화시간 변화에 따른 미세구조를 분석하였다. 또한, 가속열화는 건전한 고정자 권선을 공기중에서 열적, 전기적인 복합열화와 수소중에서 전기적으로 열화시킨 권선 및 실제로 터빈발전기에서 26년 동안 운전되어 열화된 고정자 권선에서 절출한 시편도 SEM을 사용하여 절연열화 정도를 관찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 열적 열화 실험과 분석

열적 열화 실험장치를 제작하기 위해 플라스크(Schlenk flask), 실리콘 오일 및 가열장치 등을 사용하였다. 플라스크(규격 : $\phi 25$ mm \times 200 mm)는 반응중에 발생하는 내부압력에 견딜 수 있도록 두꺼운 유리로 되어 있을 뿐만 아니라 공기의 접촉을 막고, 내부온도를 측정하기 위해 온도계 부착이 가능한 것을 선택하였다. 실리콘 오일(KF-9600)은 점도가 1000 cSt이고 비점이 315 $^{\circ}$ C 이상인 것을 사용하였으며, 실리콘 오일이 항상 플라스크 전체의 약 70 % 정도가 유지하도록 제작하였다. 가열장치(heating mantle)는 제어밸브를 사용하여 시편의 열화온도를 180 $^{\circ}$ C \pm 5 $^{\circ}$ C로 일정하게 조절하였다.

8개의 플라스크 용기를 완전하게 건조한 후에 표준 석탄 화력발전기(정격전압 22 kV, 500 MW) 용으로 제작된 고정자 권선에서 절출한 80개의 시편을 넣은 다음 격벽(septum)으로 봉하고 내부에 존재하는 수분과 공기를 제거하기 위해 약 1시간에 걸쳐 진공탈기를 실시하였다. 플라스크의 격벽을 통하여 거의 바닥에 닿을 정도로 봉침(needle)을 설치하였으며, 내부가스를 유출시키기 위해 배출구를 제작하고 실험에 사용할 공기 혹은 수소로 약 30분간 세정(flushing)을 실시하였다. 그리고 풍선을 공기 혹은 수소로 채운 후 짧은 봉침을 사용

하여 플라스크에 설치하고 50, 200, 600 및 1000시간 동안 공기와 수소분위기에서 각각 열적 열화를 수행하였다. 공기와 수소분위기에서 시간별로 각각 10개씩 열적 열화시킨 시편 단면에서 SEM(Scanning Electron Microscope, 일본 JEOL, JSM-6400)을 사용하여 미세구조를 관찰하였다.

2.2 가속열화 실험과 장기간 운전된 발전기 고정자 권선의 분석

절연열화 정도를 분석하기 위해 운전중인 터빈발전기 고정자 권선에서 시편을 절출하기가 어렵기 때문에 실제 운전조건을 모의하기 위해 공기와 수소분위기에서 가속열화 실험을 수행하였다. 가속열화에 의한 절연열화 실험을 수행하기 위해 그림 1과 같이 발전기용 고정자 권선의 직선 부분만을 제작하였다. 전기적 가속열화는 전압과 주파수를 높여서 시험하는 것이 일반적인 방법이며, 통상적으로 고정자 권선의 절연내력은 2 kV/mm~3 kV/mm사이에서 유지하도록 설계되어 있다[6]. 따라서 가속열화 전압이 6 kV/mm이상일 경우 비정상적인 열화가 진행될 수 있으므로 부분방전이 발생하지 않는 한계값인 5.5 kV/mm(인가전압 27.5 kV, 고정자 권선의 절연두께 5 mm)와 주파수를 420 Hz로 높여서 시험하였다. 그리고 공기중에서는 고정자 권선에 열적(110 $^{\circ}$ C) 및 전기적(5.5 kV/mm, 420 Hz) 복합열화를 수행하였다. 공기중에서 열적열화 방법은 판형 히터(heater, 400 W)를 슬롯에 설치하고 발전기 운전온도를 일정하게 110 $^{\circ}$ C로 유지하도록 온도조절기(한영, DX-9)를 사용하였다.

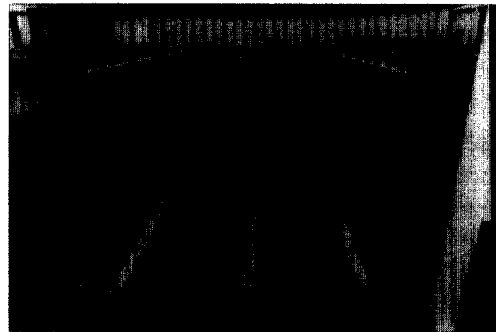


그림 1. 공기중에서 발전기 고정자 권선의 실험장치.
Fig. 1. Experimental apparatus of generator stator windings in air.

수소냉각은 우수한 냉각기능을 갖고 있을 뿐만 아니라 내부가 깨끗하여 열적 열화와 환경적 열화를 거의 받지 않기 때문에 전기적 열화만을 수행하였다. 가압수소(4 kg/cm²) 상태에서 고정자 권선의 전기적 열화 시험장치를 그림 2와 같이 제작하였으며, 고정자 권선에 5.5 kV/mm, 420 Hz를 인가하기 위하여 77 kV급 Bushing을 Chamber 상부에 설치하였다.

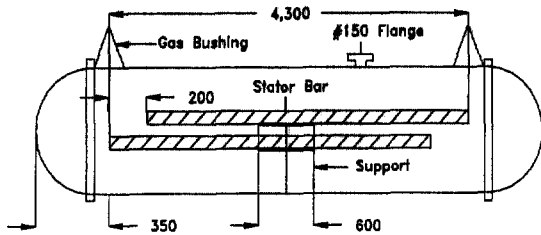


그림 2. 수소중에서 발전기 고정자 권선의 실험장치.
Fig. 2. Experimental apparatus of generator stator windings in hydrogen.

정격전압과 정격 주파수에서 고정자 권선의 수명은 대부분 100,000시간을 초과하므로 420 Hz로 높여 권선의 평균수명이 20,000시간 이내가 되도록 M-G(Motor-Generator) Set(William I. Horlick Co., 420 Hz)를 제작하였으며, 50 kV까지 인가할 수 있는 고전압 발생장치(AVO Biddle Instrument)는 전력용 변압기와 제어장치로 구성하였다. M-G 시스템의 입력은 3Φ, 200 V, 80 A, 60 Hz이며, 출력은 1Φ, 480 V, 420 Hz이다. 전력용 변압기는 50 kV, 1 A, 420/60 Hz 겸용으로 사용할 수 있도록 설계되어 가속열화와 측정시에 사용하였다. 수소중 가속열화 시험은 4 kg/cm²의 가압 수소 탱크 안에서 실시하였다. 공기와 수소중에서 1800시간 동안 열화시킨 고정자 권선과 건전한 권선의 직선 부분에서 절출한 시편에 대해 SEM를 분석하였다.

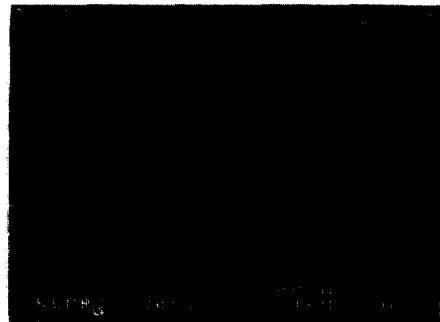
실제 화력발전소에서 26년 동안 운전된 터빈발전기(정격전압 24 kV, 300 MW)는 주로 전기적 및 기계적 열화를 받고 있기 때문에 절연열화 정도를 비교하기 위해 고정자 권선의 직선 부분에서 절출한 시편에 대해서도 SEM를 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열적 열화에 의한 미세구조 분석

그림 3은 마이카/에폭시 복합재료에서 건전시편의 주사형 전자현미경(SEM) 사진을 나타내었다. 회색부분은 마이카 테이프로서 마이카 박편과 에폭시로 이루어져 있으며, 검은부분은 에폭시층이고 일정 간격으로 유리섬유(glass fiber)가 배열되어 있다. 그림 3(a)에서 나타낸 바와 같이 마이카/에폭시 복합재료의 건전시편은 마이카 테이프(tape) 내부의 층간계면 사이에서 미세공극(small void)이 거의 관찰되지 않았다. 그러나 그림 3(b)는 마이카 테이프의 배열이 제작 불량으로 인해 불균일한 부분이 형성되어 있으며, 균열(crack)이 포함되어 있음을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5에서는 공기와 수소분위기에서 50, 200, 600 및 1000시간 동안 열화시킨 시편의



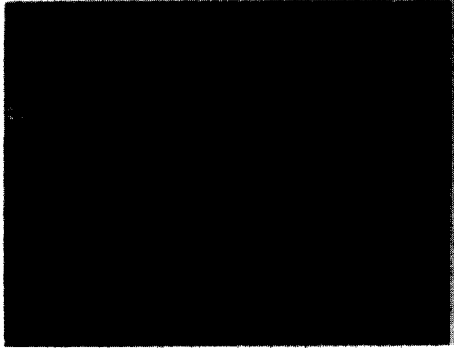
(a) 정상 영역



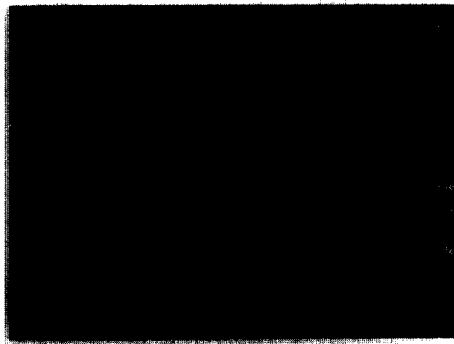
(b) 비정상 영역

그림 3. 건전한 발전기 고정자 권선에서 SEM 사진.
Fig. 3. SEM micrographs of control generator stator windings.

SEM 사진을 나타내었다. 그림 4는 공기분위기에
서 열화시킨 시편이 절연열화가 진행함에 따라 마
이카 테이프 사이의 층간계면에서 공극들이 형성
되고 있으며, 공극 숫자와 크기도 열화시간이 길어



(a) 50시간



(b) 200시간



(c) 600시간



(d) 1000시간

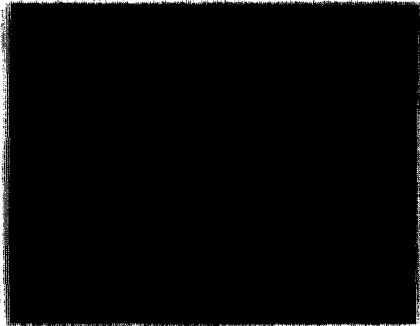
그림 4. 공기중에서 열화된 고정자 권선의 SEM 사진.

Fig. 4. SEM micrographs of aged stator windings in air.

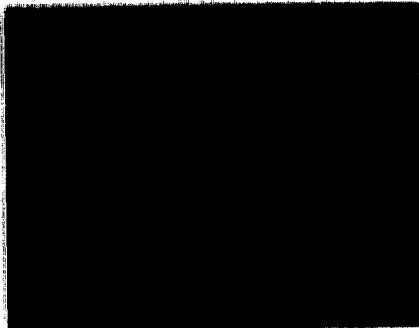
질 수록 지속적으로 증가하고 있다. 또한, 50~100 μm 크기의 공극이 마이카 테이프 사이의 층간계면, 즉, 에폭시 리치(epoxy rich) 영역에서 발생되었다. 실제로 그림 4(b) 200시간, 그림 4(c) 600시간 및 그림 4(d) 1000시간 동안 열화시킨 시편에서는 열화시간이 길어질 수록 공극 크기와 숫자가 증가하는 것을 알 수 있었다.

공기분위기에 열화시키는 달리 수소분위기에 50시간 열화시킨 시편은 그림 5(a)에서 나타난 바와 같이 층간계면에서 공극이 거의 관찰되지 않았다. 그러나 그림 5(b)에서 보인 바와 같이 200시간 이상 열화시킨 시편에서는 공기분위기와 마찬가지로 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 공극이 생성되었다. 그림 5(c)는 600시간 이상 열화시킨 시편의 층간계면에서 미소공극의 크기가 10~30 μm 로 공기분위기에 비해 약간 작지만 숫자는 훨씬 많이 나타났다. 전체적으로 볼 때 수소분위기에 열화시킨 시편에서는 열화시간이 길어질 수록 층간계면에서 미소공극의 숫자는 현저히 증가할 뿐만 아니라 크기도 조금씩 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 고정자 권선이 장기간 고온에서 운전되면 에폭시 혹은 폴리에스테르로 결합된 절연재료 테이프 층간에서 분리가 발생한다. 그리고 수소분위기에 열화시킨 시편의 공극 크기가 공기분위기에 비해 현저하게 작게 나타난 것은 수소가 공기에 비해 냉각기능이 우수하기 때문으로 판단

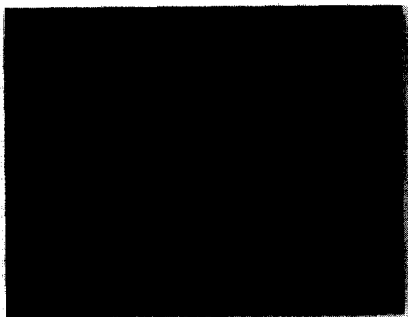
된다. 따라서 공기분위기에서 열화시킨 시편에 비해 수소분위기의 시편이 훨씬 더 오랫동안 절연수명을 유지할 것으로 사료된다. 실제 터빈발전기에서도 공기중에 비해 수소가 채워진 상태에서 절연진단을 수행할 때 부분방전 크기가 낮게 측정되는 것은 수소자체의 압력이 방전억제력을 갖기 때문이다[7].



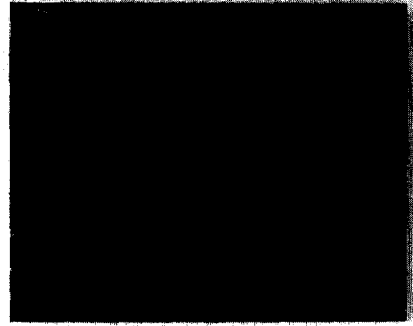
(a) 50시간



(b) 200시간



(c) 600시간



(d) 1000시간

그림 5. 수소중에서 열화된 고정자 권선의 SEM 사진.

Fig. 5. SEM micrographs of aged stator windings in hydrogen.

3.2 가속열화된 권선과 장기간 운전되어 열화된 고정자 권선의 분석

마이카/에폭시 복합재료를 주절연으로 사용하는 표준 석탄 화력발전기(정격전압 22 kV, 500 MW) 고정자 권선을 제작하여 공기와 수소중에 권선을 설치한 후 420 Hz, 27.5 kV 전압을 인가하여 실험실에서 가속열화 시험을 수행하였다. 그림 6은 공기중에서 열적(110 ℃), 전기적(5.5 kV/mm, 420 Hz) 및 가압 수소중에서 수소압력 4 kg/cm², 전기적(5.5 kV/mm, 420 Hz)으로 가속열화시켜 1,800시간이 경과한 후 열화시편의 SEM 사진을 나타내었다. 그림 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 크기가 100 μm인 공극과 박리가 많이 존재하고 있다. 열적 및 전기적으로 가속열화된 시편에서 복합열화로 인해 분해가스(decomposition gas) 생성과 결합력 감소로 에폭시 수지의 분자구조가 변형하여 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 접착성이 약화되어 공극과 박리가 발생한 것으로 사료된다. 또한, 고정자 권선이 주로 장시간 동안 고온에서 열적 열화를 받음에 따라 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 접착제로 사용된 에폭시가 분리되는 현상도 주요한 원인이다.

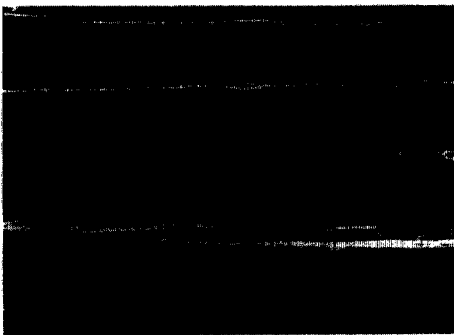
열적 열화는 고정자 권선 내부에서 유기 고분자가 열분해되거나 산화되는 화학적 과정이며, 내부 가스 압력이 증가하여 마이카 표면에서 에폭시의 결합력이 감소한다. 따라서 마이카와 에폭시 사이의 계면에서 박리를 발생시키고 전체적으로 결합의 수가 증가하여 공극을 발생시키는 것으로 발표

하고 있다[4]. 그림 6(b)의 수소중에서 전기적으로 열화된 시편은 마이카 테이프 내부에서 미소공극과 박리가 존재하며, 수소 자체가 우수한 냉각기능을 갖고 있음으로 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 결합력을 유지시켜 주는 반면에 마이카 테이프 내부에서 마이카와 에폭시의 계면이 분리되고 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 열적 열화 혹은 열적 및 전기적으로 복합열화시킨 시편과 실제 운전조건에서 열적, 전기적 및 기계적으로 복합열화된 시편 사이의 열화과정을 비교하기 위해 26년 동안 터빈발전기에서 운전되어 열화된 고정자 권선 절연재료의 단면을 SEM으로 관찰하여 그림 7에 나타내었다. 고정자 권선은 수냉각 방식으로 권선 내부의 동도체(copper)에 냉각매체인 순수가 흐르고



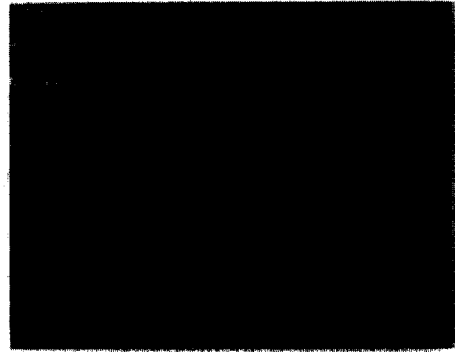
(a) 공기중에서 열적, 전기적으로 열화된 시편



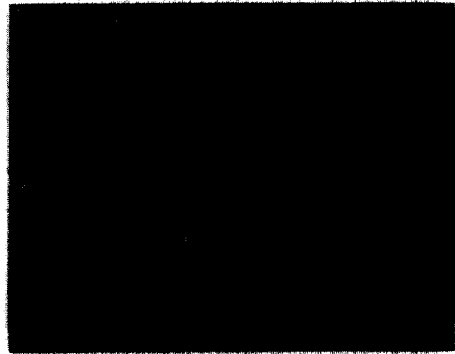
(b) 수소중에서 전기적으로 열화된 시편

그림 6. 공기와 수소중에서 열화된 고정자 권선의 SEM 사진.

Fig. 6. SEM micrographs of aged stator windings in air and hydrogen.



(a) 정상 영역



(b) 비정상 영역

그림 7. 발전기 고정자 권선으로 사용된 시편의 SEM 사진.

Fig. 7. SEM micrographs of stator windings used in the generator for 26 years.

외부는 수소분위기이며, 열적 열화가 180 ℃에서 1000시간 동안인데 비해 주로 약 80 ℃ 이하에서 주기적인 기동정지에 의한 온도변화, 전기적 및 기계적인 열화를 받은 절연재료이다. 그림 7에서 나타낸 바와 같이 열적 열화를 거의 받지 않았기 때문에 마이카 테이프 사이의 층간계면에서는 공극을 볼 수가 없었다. 그러나 마이카 테이프 내부에서 기계적 열화에 의해 주로 박리와 균열이 발생되며, 전기적 열화에 의해 더 큰 공극과 균열로 성장하는 것은 수소분위기에서 가속열화된 그림 6(b)의 결합과 일치하고 있다.

마이카 테이프 내부에서는 열적 열화보다 전기적 및 기계적 열화에 의해 마이카와 에폭시 사이에서 박리가 균열로 성장된 것으로 판단된다. 그림 4와 그림 5의 SEM 사진에 의하면, 180℃에서 열적 열화된 시편의 마이카 테이프 사이의 층간계면

에 발생하는 공극은 화학적 반응이나 구성원소의 변화에 따라 예측시가 재배치된 결과를 나타내고 있다. 그러나 이러한 반응은 실제 터빈발전기에서는 운전온도가 낮기 때문에 활성화되지 않은 것으로 분석된다.

발전기 냉각방식은 매체에 따라 크게 공기냉각, 수소냉각 및 수냉각으로 분류한다. 공기냉각은 열적, 기계적, 전기적 및 환경적 열화 등을 복합적으로 받고 있으나 수소냉각은 수소 자체가 공기에 비해 냉각능력이 우수하기 때문에 열적 및 환경적 열화보다 주로 기계적 및 전기적 열화를 더 받고 있다. 실제 터빈발전기에서 26년 동안 열화된 시편을 분석한 결과 운전온도가 비교적 낮게 유지되기 때문에 열적 열화보다 전기적 및 기계적 열화에 의한 응력(stress)이 마이카 테이프 내부에서 마이카와 에폭시 사이의 결합력(bonding)을 감소시키는 것으로 나타났다.

3.3 절연파괴 메카니즘 분석

그림 4와 그림 5는 열적 열화에 의해 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 공극이 발생되었으며, 그림 6(a)는 공기중에서 열적 및 전기적인 복합열화로 인해 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 공극과 마이카 테이프 내부에서 박리가 발생되었다. 또한, 그림 6(b)와 그림 7은 수소중에서 전기적 열화와 실제 발전기에서 기계적 및 전기적 복합열화로 인해 마이카 테이프의 내부에서 공극과 박리가 발생되었다. 따라서 공기와 수소중에서 열적 열화된 권선, 가속열화 시험에서 열적, 전기적 복합열화된 권선 및 실제 터빈발전기에서 사용되어 열화된 권선의 기계적 및 전기적 복합열화에 의해 절연파괴 경로를 그림 8과 같이 나타낼 수 있으며, 최근에 보고된 모델과 유사성을 갖고 있다[8].

그림 8에서 나타낸 바와 같이 발전기 고정자 권선의 절연파괴 경로는 장기간 운전 혹은 열적 열화에 의해 동도체와 마이카 테이프 사이의 에폭시 층이 분리되며, 전기적 및 기계적 복합열화에 의해 마이카 테이프 내부에서는 박리 생성과 확대가 장기적으로 지속된다. 따라서 박리, 공극 및 균열을 갖고 있는 결합부분에서 부분방전이 지속적으로 발생하여 고정자 권선의 절연열화가 진행되어 철심에 접지되면서 최종적으로 절연파괴가 발생한다 [9, 10]. 그러므로 절연파괴는 발전기 운전중에 열적, 전기적 및 기계적인 복합열화에 의한 장기적인 절연열화가 주요한 원인임을 알 수 있다. 종래의 마이카/에폭시 복합재료의 절연파괴 경로는 마이카

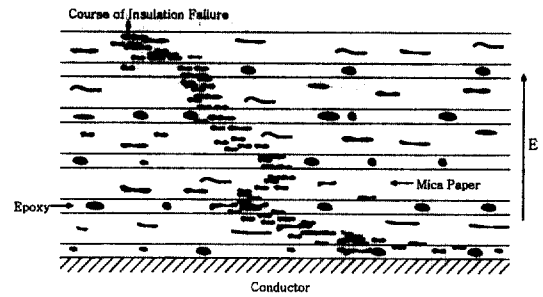


그림 8. 발전기 고정자 권선의 절연파괴 메카니즘.
Fig. 8. Insulation breakdown mechanism of generator stator windings.

테이프 사이의 층간계면을 따라 공극이 발생되어 절연파괴가 진전하는 것으로 알려졌지만, 현재는 그림 8에 나타낸 절연파괴 메카니즘이 신뢰성을 얻고 있다. 열적, 기계적 및 전기적 열화와 가속열화된 고정자 권선의 절연열화 특성을 분석하여 절연파괴 메카니즘을 정확하게 평가함으로써 발전기의 유지관리, 예측정비 및 수명평가에 직접적으로 활용할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 발전기 고정자 권선의 절연재료로 사용되는 마이카/에폭시 복합재료를 수소와 공기중에서 열적 열화된 권선, 가속열화된 권선 및 실제 터빈발전기에서 장기간 운전되어 열화된 고정자 권선의 절연열화 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마이카/에폭시 복합재료를 공기와 수소중에서 열적 열화시켜 주사형 전자현미경을 사용하여 관찰한 결과 열화시간이 길어질수록 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 공극 크기와 숫자가 증가하였으며, 공기에 비해 수소중에서 공극의 크기는 작았지만 숫자는 훨씬 많게 나타남을 확인하였다.
2. 공기중에서 열적, 전기적 복합열화를 받은 시편은 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 공극과 마이카 테이프 내부에서 박리가 발생되었으며, 수소중에서 전기적으로 열화된 시편은 마이카 테이프 내부에서 박리와 공극이 생성되었다. 그리고 26년 동안 터빈발전기에서 운전되어 열화

된 고정자 권선은 마이카 테이프 내부에서 박리와 공극이 발생되었으며, 수소중에서 전기적 열화에 의해 가속열화된 권선의 결합과 일치하였다.

3. 공기와 수소중에서 열적 열화, 가속열화 시험에서 열적, 전기적 복합열화와 전기적 열화 및 실제 터빈발전기에서 운전되어 열화된 권선의 절연열화 과정을 미세하게 분석하여 절연파괴 메카니즘을 제시하였다. 운전중인 터빈발전기는 열적 열화보다 전기적 및 기계적 열화가 절연수명에 크게 영향을 미치고 있음을 규명함에 따라 터빈발전기 고정자 권선의 유지관리, 예측정비 및 수명평가에 직접적으로 활용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] K. Mreuger, S. Oulski, and H. Krivda, "Current method of insulation life expectancy for power apparatus", T. IEE Japan, Vol. 114-A, No. 12, p. 845, 1994.
- [2] 오무송, 김태성, "절연파괴 예측을 위한 트리 방전의 영상처리에 관한 연구", 전기전자재료 학회논문지, Vol. 14, No. 1, p. 26, 2001.
- [3] 川島國定, 전기설비의 진단기술, 일본 전기학회, p. 129, 1991.
- [4] K. Kimura and Y. Kaneda, "The role of microscope defects in multistress aging of micaceous insulation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 3, p. 426, 1995.
- [5] Y. J. Kim and J. K. Nelson, "Assessment of deterioration in epoxy/mica machine insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 5, p. 1026, 1992.
- [6] R. C. Sheehy, T. R. Blackburn, and J. Rungis, "Multistress aging of high voltage stator bars", Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, p. 776, 1994.
- [7] H. Mimura, E. Koyanagi, S. Kenjo, T. Yamauchi, and M. Tari, "Insulation effects of hydrogen gas for cooling turbine-driven generator", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-18, No. 5, p. 536, 1983.
- [8] 고체절연재료의 계면효과조사전문위원회, "고체 절연재료의 계면효과", 일본전기학회기술보고, 제488호, p. 16, 1994.
- [9] 김희동, 김희곤, 김태완, 강도열, "발전기 고정자 권선에 사용되는 마이카/에폭시 복합재료의 기계적 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, Vol. 10, No. 4, p. 327, 1997.
- [10] 김희동, 주영호, "고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성", 한국전기전자재료학회 1999춘계학술대회논문집, p. 513, 1999.