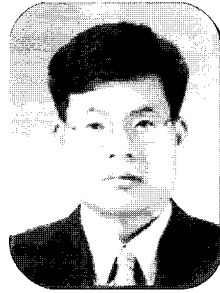




고압회전기 절연재료 기술



김희동
한전 전력연구원
선임연구원

1. 절연재료의 발전과정

발전기 및 고압전동기 절연재료는 고전압화, 대용량화, 소형화 및 신뢰성 향상을 위한 고분자 재료, 절연처리, 계측 및 평가기술 등의 진보와 더불어 발전하고 있다. 발전기는 20~30년 이상 장기간 사용함에 따라 열적열화, 부분방전열화, 발전기 특유의 전자력에 의한 진동, 부하변동 및 기동정지 등에 의해 발생하는 응력(stress)에 충분히 견딜 수 있는 내절연 기술이 필요하다. 최근 고압회전기 고정자 권선 절연재료는 대부분 마이카(mica)에 결합재(bonding material)와 보강재(backing material)를 혼합하여 테이프 형태로 제작하고 있다. 마이카는 주로 절연기능을 담당하고 결합재로 사용되는 에폭시는 마이카를 서로 접착시키는 역할을 하며, 보강재는 기계장치를 이용하여 마이카 테이프를 동도체(copper conductor)에 감을 때 테이프의 장력을 유지시켜 작업을 원활하게 한다.

1892년부터 마이카는 내부분방전성, 전기적 및 열적 특성 등이 우수하여 고압회전기 절연재료로 사용하였다. 1970년대 초반까지 마이카는 조각이 큰 플레이크(flake) 마이카를 사용하였지만, 양질의 마이카 자원이 고갈되어 집성 마이카로 대체되었다. 플레이크 마이카는 크기가 일정하지 않고 경계면에서 불균등한 전계를 형성하기 때문에 균일한 특성을 갖는 제품

의 생산이 어려웠다. 이러한 단점을 보완하기 위해 생산 공정이 간단하고 특성이 균일한 마이카 분말을 사용하는 마이카/에폭시 페이퍼(paper)를 1978년 GE(General Electric)에서 개발하였다. 미국, 일본 및 독일 등에서는 마이카 입자의 형상, 수지의 함침성, 절연강도 및 기계강도 등의 기초연구도 활발하게 진행하고 있다.

결합재는 1900년대 초기부터 얇은 조각으로 떨어지기 쉬운 단점을 갖고 있는 마이카를 판상으로 유지시키기 위해 개발이 시작되었다. 고정자 권선의 결합재는 1910년에 Haefely에 의해 셀락(shellac) 혹은 코팔(copal) 등의 천연수지가 소개되었으나 역시 부서지기 쉬운 단점을 갖고 있어 1920년대에 개발된 아스팔트 컴파운드(asphalt compound)를 1950년대 중반까지 사용하였다. 일반적으로 결합재로 용제(solvent)를 사용하면 진공가압함침(vacuum pressure impregnation)을 마치고 열경화 공정에서 거품이 발생하지만, 무용제(solventless)의 아스팔트 결합재는 거품이 일어나지 않음으로 절연물 내부에 미소 공극이 발생하지 않는 장점을 갖고 있다. 아스팔트 결합재는 열가소성(thermoplastic)의 특성을 갖고 있기 때문에 열에 의한 도체의 수축과 팽창을 발생시키며, 대형 화력발전기에 사용할 때는 고온에서 녹아 단말권선(endwinding)의 끝부분에서 테이프 층(tape layers)이

균열, 분리(separation) 및 박리(delamination) 등이 일어나는 단점을 발견하였다. 따라서 1950년대 초에 열경화성(thermosetting) 수지인 합성 폴리에스테르(polyester)와 에폭시가 열적 및 기계적 안정성 때문에 절연재료로 사용되었다. 1950년대 중반까지만 해도 진공가압합침 공정에서 사용되고 있던 아스팔트 결합재를 대체할 수 있는 무용제(無溶劑) 폴리에스테르가 먼저 개발되어 에폭시보다 넓게 사용하였다. 그러나 1970년부터 점성이 낮은 무용제 에폭시 수지는 폴리에스테르와 비교할 때 절연특성, 기계적 강도 및 신뢰성이 우수하고 습기와 화학 성분에 대하여 내구성이 강한 장점을 갖고 있어 현재는 대부분의 제작업체가 고압회전기 절연재료로 많이 사용하고 있다.

2. 절연재료의 종류

2.1 고정자 권선의 절연재료

고압회전기 고정자 권선의 단면도는 그림 1과 같이 구성되어 있으며, 슬롯에 들어가는 절연재료는 소선 절연(strand insulation), 턴절연(turn insulation) 및 주절연(groundwall insulation) 등으로 분류할 수 있다. 소선절연재료는 글라스 섬유(glass fiber), 다글라스(daglas) 섬유, 합성 에나멜(synthetic enamel) 등이 사용되고 턴절연재료는 마이카 페이퍼, 폴리아미드/마이카 페이퍼(polyamide/mica paper), 에나멜/마이카 등으로 제작한다. 최근 마이카 대신에 크롬 산화물이 개발되었는데 에나멜/크롬 산화물은 부분방전(partial discharge) 내성이 우수하여 에나멜/마이카 대용물로 실용화 단계에 있다. 주절연재료는 마이카에 결합재와 보강재를 혼합하여 테이프 형태로 제작되어 마이카 테이프로 알려져 있다. 결합재는 에폭시 수지를 사용하고 있으며, 보강재는 지난 30년 동안 유리섬유 혹은 데이크론(dacron)을 사용하였으나 현재는 마이카/에폭시를 결합시킨 재료를 합성함으로써 테이프 형태로 만들어 고정자 권선을 제작하고 있다. 절연재료 함침방식은 진공가압합침 방식에서 레진리치(resin rich) 방식으로 발전하였고 권선 제조기술의 진보에 따라 절연계급도 F종으로 제작하고 있다.

고압회전기 고정자 권선의 종류는 다회권(multi-turn) 혹은 바(bar) 권선으로 분류할 수 있다. 다회권은

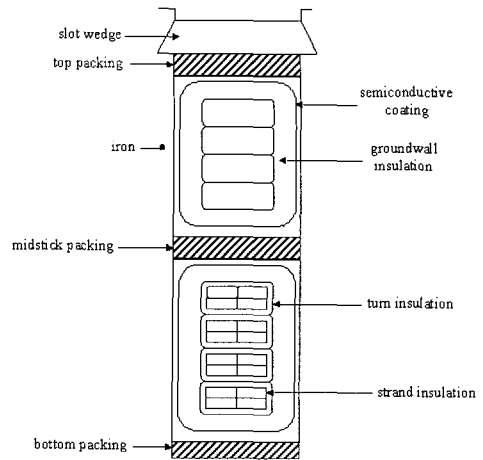


그림 1. 고정자 권선의 단면도.

소선절연, 턴절연 및 주절연 등으로 나뉘어지며, 바는 턴절연이 없기 때문에 단지 소선절연과 주절연만으로 구성되어 있다. 고정자 권선 절연재료의 주요한 기능은 고정자 철심과 도체 사이에 존재하는 전압차에 견딜 수 있도록 상호 분리시키는 역할을 한다. 전기적 분리(electrical separation)를 허용하는데 사용되는 가장 흔한 테이핑 재료는 글라스, 마이카 페이퍼 및 플레이크 마이카 등이 있으며, 모두 우수한 전기적 절연 특성을 갖고 있지만 기계적 성질은 약하다. 글라스와 마이카는 발전기에서 존재하는 100/120Hz와 같은 심한 진동에 노출되면 부서지는 경향이 있다. 권선 설계자는 절연재료에서 기계적 응력을 감소시키기 위해서 유기화합물과 같이 함침된 테이프를 선택한다. 가장 흔하게 사용되는 유기화합물은 아스팔트, 폴리에스테르 및 에폭시 등이 있다.

2.1.1 소선절연재료(strand insulation)

소선절연재료의 목적은 턴절연재료를 구성하는 개개의 소선을 절연시키는 역할을 한다. 턴은 축방향의 자계로부터 표피효과와 이탈전류(stray current) 손실을 감소시키기 위해서 3~7mm의 작은 소선들로 구성되어 있다. 소선은 좀더 큰 표면적(surface area)을 갖으며, 도체 중심보다 더 많은 전류를 흘린다. 그림 2



에서 나타낸 바와 같이 큰 도체를 상호 절연된 몇 개의 소선으로 분리하면, 발전기 효율은 몇 퍼센트 향상시킬 수 있다. 소선절연재료가 인가된 전압은 대개 1V 이하 즉 mV 범위이다. 소선에는 최소 응력이 존재하기 때문에 정상적으로 소선절연재료가 파괴되면 단지 이탈 손실이 증가한다. 그러므로 만약에 아킹(arcing)이 나타나면 소선과 소선이 단락되어 최종적으로 고정자 권선 파괴를 일으킬 수 있다. 소선절연으로 사용되는 재료는 제작사와 권선의 시대에 따라 변한다. 1960년 이전에 만들어진 회전기는 바니쉬(vernish), 에나멜 및 면(cotton) 등을 소선절연재료로 사용하였다. 최근에 만들어진 회전기의 소선절연재료는 폴리아미드, 폴리이미드 필름(polimide film), 글라스 혹은 테이크론/글라스, 필름과 글라스 및 마이카 페이퍼 등이다. 따라서 소선절연재료의 선택은 정상적으로 제작사의 경험, 기기 필요조건 및 경제성에 의존한다. 슬롯 누설자속에 의해 소선에서 발생된 와류 전압과 전류 때문에 소선절연재료가 파괴된다. 또한, 순환전류에 의해 증가된 온도가 열적열화를 가속화시켜 최종적으로는 주절연재료에서 절연파괴가 발생한다.

2.1.2 턴절연재료(turn insulation)

고정자 바 권선이 단지 하나의 턴(one turn)을 가지면, 바에는 턴절연재료가 필요하지 않다. 단지 다회권 권선만이 턴절연재료를 갖고 있으며, 전용의 턴절연

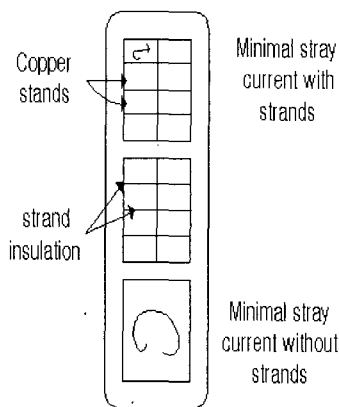


그림 2. 소선에서 이탈전류.

재료가 있고 없고는 권선 제작사에 따라 다르다. 턴절연재료의 목적은 턴사이에서 큰 유입 전류를 방지한다. 권선을 구성하고 있는 턴절연재료에 인가된 전압이 일정하게 유지하도록 회전기 설계시에 고려하여 만들어 진다. 회전기의 상전압, 직렬 혹은 병렬 코일 수, 코일에서 턴 수 등에 의존하여 전압응력이 계산된다. 전형적으로 턴절연재료에 걸리는 전압은 턴당 10~200V 이다. 예를 들면, 회전기의 정격전압이 13.8kV, 병렬당 21개의 코일 및 코일 마다 3턴일 때 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{상전압} &= 13.8\text{kV} / \sqrt{3} = 7967\text{V} \\ \text{volts/coil} &= 7967\text{V} / 21\text{coils} = 379\text{V/coil} \\ \text{volts/turn} &= 379\text{V} / 3\text{turns} = 126\text{V/turn} \end{aligned}$$

턴절연재료가 파괴되면 권선 내부에 아주 큰 순환 전류가 흐르게 된다. 그림 3에서 나타낸 바와 같이 단락된 턴을 통해 높은 전류가 발생하여 강한 자계를 형성하도록 완전한 순환회로가 만들어 진다. 결과적으로 단락 위치에 인접한 주절연재료에서 매우 높은 I²R에 의한 열응력으로 인해 즉시 주절연재료가 파괴된다. 파괴시간은 정확하게 알 수 없으나 고정점의 임피턴스에 따라 몇 초만큼 짧거나 혹은 몇 달만큼 길수도 있다. 턴절연재료로 사용되는 전형적인 재료는 구권선에서는 면이며, 신권선에서는 글라스, 테이크론/글라스 및 마이카 페이퍼 등이 있다. 턴측에 위치한 턴절연재료는 높은 전기적 응력을 받을 뿐만 아니라 도체 측에 인접한 곳에 위치해 있어 주절연재료보다 높은 온도에서 운전되고 있다.

2.1.3 주절연재료(groundwall insulation)

주절연재료의 목적은 동도체와 접지된 고정자 권선 사이의 단락을 방지한다. 주절연재료의 두께는 회전기의 정격전압에 주로 의존하며, volt/mm 응력은 제작사에 의해 선택된다. 예를 들면, 앞에서 설명한 13.8kV 회전기에서 접지응력이 가장 높은 전압이 7967V 이다. 제작사에 의해 선정된 최대 volt/mm 응력이 2.5kV/mm이면, 주절연재료는 적어도 두께가 3mm는 되어야 한다. 주절연이 두꺼울수록 슬롯에서 동도체는 얇아지고 동도체의 열응력은 커진다. 그러

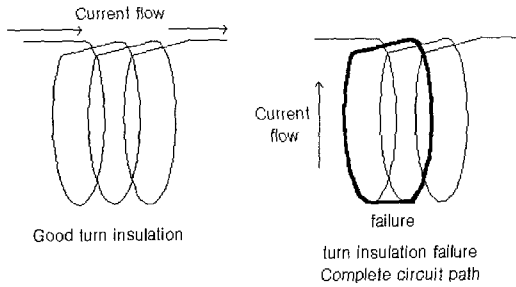


그림 3. 턴절연재료의 파괴.

므로 주절연이 얇을수록 전압응력은 더 커져서 전기적 파괴가 일어날 가능성이 높아진다. 주절연재료의 두께에 걸리는 전압응력은 권선의 정격전압과 권선 내부에서 코일 위치에 의존한다. 권선 끝쪽 코일에서 주절연재료에 걸리는 전압응력은 상전압이 될 것이다. 앞의 예제에서 상전압은 7967V 임으로 주절연 응력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

상전압 - (volt/ 코일×코일 위치)
 7967V - (398V/ 코일×1) = 7569V : 첫 번째 코일
 7967V - (398V/ 코일×10) = 3987V : 열 번째 코일
 7967V - (398V/ 코일×19) = 398V : 열아홉 번째 코일

주절연재료의 파괴는 절연파괴이기 때문에 운전 지연을 발생시키고 정비하지 않고는 회전기의 운전을 재개할 수 없다. 주절연에서 사용되는 주요한 재료는 마이카라고 부르는 내코로나성 재료이다. 마이카는 전기적 및 열적으로는 매우 우수하지만 부서지기 쉬운 단점을 갖고 있기 때문에 기계적 응력으로부터 보호하기 위해서는 유기재료와 같이 함침하여 테이프 형태로 제작한다. 유기재료는 기계적 내력은 갖고 있지만 전기적 및 열적 응력에 의해 강한 영향을 받는다. 1970년대 이전에 사용된 구권선에서 사용된 유기재료는 아스팔트 혹은 마이카박층(micafolium) 이다. 두 재료 모두 열가소성이기 때문에 열적응력을 받으면 형태와 크기가 변하고 냉각되면 뒤뜰어진 형태를 유지한다. 새로운 권선에서는 에폭시 혹은 폴리에스테르와 같은 열경화성 수지를 사용한다. 열경화성 권

선은 정상적 운전 온도에서 열적응력에 의해 덜 영향을 받으며, 높은 운전 온도에서조차도 대개 뒤뜰어지지 않는다.

2.2 고정자 권선의 전압응력 억제

소선절연, 턴절연 및 주절연으로 구성된 정격전압 6kV이상에서 사용하는 고압회전기의 전압응력을 억제할 필요가 있다. 전압응력 억제의 목적은 고정자 철심 부분에 있는 고정자 권선 절연재료에서 균등한 응력을 갖게 할 뿐만 아니라 철심에 접촉되어 있는 절연재료의 외부에서 발생하는 표면방전을 제거한다. 그림 4에서 나타낸 바와 같이 전압응력을 억제하는데 사용되는 재료는 반도체성(카본 부착) 테이프/페인트와 완화(실리콘 카바이드) 테이프/페인트로 분류할 수 있다.

2.2.1 반도체층(semi-conductive layer)

그림 4는 상부 고정자 권선의 슬롯 단면을 나타냈으며, 권선 외부는 반도체 테이프를 감고 측면팩킹(side packing)과 같이 슬롯 내부에 설치되어 있다. 접지된 고정자 권선과 고정자 철심사이의 공기 보이드(air void)가 존재하며, 공기 보이드는 대부분 0.5mm 이하를 유지한다. 회전기가 제작되어 운전을 시작한

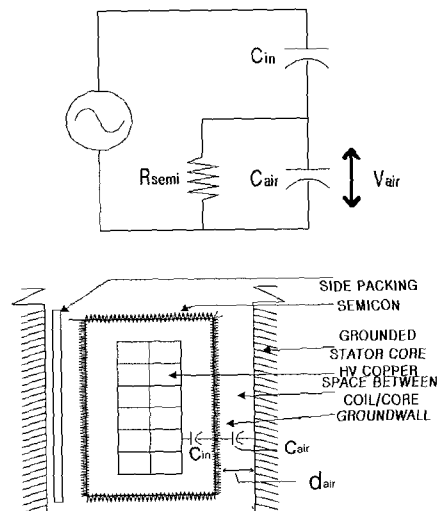


그림 4. 전압응력 억제.



첫해에 새롭게 설치된 고정자 권선 절연재료는 에폭시가 주올열에 의해 경화되어 크기가 약간 줄어들기 때문에 좀더 큰 공기 보이드가 생긴다. 절연재료와 공기 보이드는 두 개의 금속사이에 존재하여 다른 유전 특성을 갖는 재료처럼 캐패시터를 형성한다. 정격 선간전압이 캐패시터에 인가될 때 전압응력은 유전특성과 두께를 근거로 하여 각 유전체로 나누어진다. 따라서 공기 보이드 유전체에 걸리는 전압이 공기에서 전기적 파괴점을 초과하면 아크 혹은 부분방전이 발생된다.

$$E_{air} = V_{air} / d_{air} = 3kV/mm$$

공기 보이드에 걸리는 전압응력을 줄이기 위해서 페인트 혹은 테이프와 같은 반도체 재료가 슬롯안에 설치한 권선 외부에 사용된다. 공기 보이드 양단의 캐패시터를 단락시키기 위해 반도체 재료를 사용하여 부분방전 발생에 직접적으로 영향이 있는 전압형성을 억제한다. 반도체 표면이 양호한 상태를 유지하면 공기의 절연파괴를 야기할 수 있는 수준에 도달해도 고정자 철심과 권선 표면사이에 자연적으로 생긴 보이드 양단에 응력이 발생되지 않는다. 권선 표면의 견고한 접지가 접지재료 양단에서 균등한 전압응력을 유지시킨다. 수소냉각 회전기에서는 모든 보이드가 수소로 채워져 있으며, 수소에서 전기적 파괴점이 공기보다 높기 때문에 더 높은 인가전압 혹은 더 작은 보이드가 스파크 발생을 위해 필요하다. 반도체 코팅의 저항은 정상적으로 스퀘어(square)당 100~10000Ω 정도이다.

2.2.2 응력완화 코팅(stress grading coating)

전압응력 억제의 두 번째 성분은 완화 코팅이라고 부르는 페인트 혹은 테이프 형태의 실리콘 카바이드이다. 단말권선 영역에서는 접지평면의 부족으로 인해 동도체와 같이 동등한 전위가 형성되도록 권선의 표면을 일정하게 유지해야 한다. 엔드(end) 권선은 정격 상전압이 인가되고 있으며, 슬롯 외부에 있는 반도체 테이프의 끝단은 표면전압이 갑자기 접지되어 높은 전기적 응력이 발생한다. 전기적 응력을 방지하기 위해서 제작사에서는 주절연재료의 반도체 코팅에

약간 중복해서 완화 코팅을 설치하여 단말권선 영역으로 7~12cm 확장한다. 그림 5에서는 완화 코팅의 위치를 나타냈으며, 완화 코팅의 설치 길이는 권선의 설계전압과 제작사의 경험에 의해 정해진다. 실리콘 카바이드 재료는 저항이 인가전압에 대해 감소하는 비선형 저항 특성을 갖는다. 완화 코팅의 목적은 접시된 반도체층에 대해 단말권선에서 높은 전압이 서서히 감소하여 부분방전이 발생하지 않게 한다. 응력완화 코팅 혹은 층이 없으면, 극부적으로 심한 전기적 응력이 가해져서 권선의 예상수명이 감소할 뿐만 아니라 부분방전도 발생될 것이다. 방전을 억제하는 가장 간단한 방법은 보이드가 없는 절연층을 갖도록 반도체 코팅의 끝 쪽을 완화 코팅으로 겹쳐서 감는다. 응력을 작게나마 감소시켜 가장 높은 응력발생 영역에서 공극이 줄어들면 부분방전 개시전압은 증가하고 방전 크기는 감소한다.

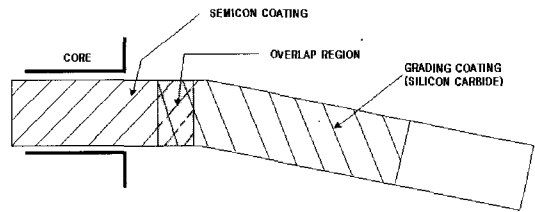
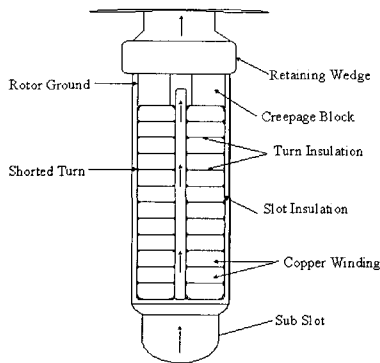


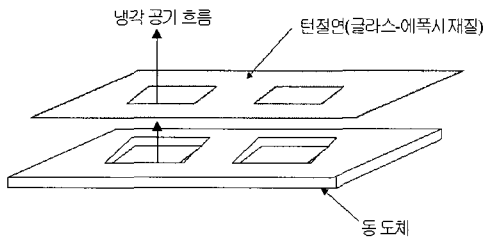
그림 5. 반도체 및 완화코팅의 위치.

2.3 회전자 권선의 절연재료

발전기 회전자는 강(鋼)제의 원통형으로 단조시켜 슬롯을 만들고 슬롯절연, 턴절연 및 동도체로 구성된 권선을 집중권선 방식으로 삽입한 후 리테이닝(retaining ring)을 사용하여 양쪽 끝을 고정시킨다. 그림 6은 회전자 권선의 단면도와 구조를 나타냈으며, 슬롯내의 권선은 대략 7~18개 정도의 동도체로 이루어져 있다. 각각의 동도체 사이는 턴절연에 의하여 분리되어 있고, 슬롯절연에 의해 회전자 몸체와도 분리되어 있다. 턴절연의 재질은 글라스/에폭시 재료, 글라스/폴리에스테르 재료 및 노멕스(nomex) 등으로



(a) 회전자 권선의 단면도



(b) 동도체와 턴절연

그림 6. 회전자 권선의 구조.

구성되어 있고 수지(resin)의 함유량이 43% 정도이며, 두께는 0.3~0.5mm의 테이프이다.

발전기 회전자 권선의 절연재료는 높은 원심력 및 인접 권선으로부터 가열됨으로 충분한 기계적 강도와 내열특성을 갖고 있어야 한다. 동도체 사이의 접촉면이 접동(摺動) 혹은 마모로 인해 발생된 동분의 퇴적이 증가하면 층간단락과 회전자 접지사고 등이 발생한다. 이러한 현상의 방지책은 권선을 전체적으로 분해하여 청소 후에 동일 턴(turn)의 동도체 간격을 적정하게 유지시킴으로써 상대적인 움직임이 없는 방법을 강구한다. 또는 얇은 절연 시트를 동도체 사이에 접착하는 방법으로써 베이킹(baking) 공정이 필요하다. 회전자 권선 조립 후 임시 블록(temporary block)으로 권선을 고정하여 회전자 원주방향 및 권선의 상층, 중층, 하층에 열전대(thermocouple)를 8곳에 설치

하고 권선에 약 680~800A를 가하여 100~140°C범위에서 10시간 정도 가열하여 수지를 접착시킨다. 회전자 권선의 열화와 파손에 미치는 주된 기계적 요인은 회전하면서 발생하는 연속적인 원심력과 기동, 정지, 부하의 반복에 따른 주기적인 힘이다. 따라서 발전기 회전자 권선 절연재료는 원심력을 감소시키기 위해 최대한 얇고 가벼운 재료를 사용하며, 실제적으로 215.7MVA 발전기에서 직류 전류 1403A와 직류 전압이 500V 정도 인가됨으로 고정자 권선에서 높은 교류 전압에 의해 발생하는 대부분의 열화과정은 일어나지 않는다.

3. 절연재료의 파괴 메카니즘

고압회전기 주절연과 턴절연의 분리는 권선작업 동안에 물리적 변형(physical distortion)의 결과로서 나타나며, 초기 보이드(void)는 함침 수지의 불완전한 충전과 경화에 의해 생성된다. 그림 7에서 나타난 바와 같이 보이드는 제작결함 혹은 턴절연과 주절연재료 사이의 결합력이 감소함에 따라 고압회전기 운전 중에 주로 발생한다. 그리고 동도체는 24개의 소선으로 구성되어 있으며, 동도체 배열이 균일하게 정렬되지 못한 것은 고정자 권선을 제작하여 슬롯에 설치한 후에 진공함침하면서 슬롯부분에 비해 상대적으로 취약한 단말권선에서 변형된 것으로 분석된다.

대부분 고압회전기의 절연파괴 메카니즘은 운전중에 발생하는 열적, 전기적, 기계적 및 환경적인 복합열화 혹은 제작 불량에 의한 결합형성이 주요한 원인으로 발표하고 있다. 턴절연은 각각의 턴이 서로 접촉하는 것을 방지하도록 얇게 절연되어 있으며, 턴과 턴 사이의 전압이 정상적인 운전상태에서는 단지 수십 볼트 정도이다. 그러나 턴절연과 주절연재료 사이의 경계(interface)에서 보이드 생성은 제작 불량과 장기간 운전에 따른 열적 및 기계적 복합열화에 의해 발생되고, 이부분에서 전기적 응력이 충분히 크게 인가될 때 부분방전을 일으킨다. 부분방전은 턴절연재료에서 침식(erosion)을 생성하고 턴과 턴 사이의 단락 발생으로 절연재료를 급격하게 열화 시킨다. 주절연재료에서는 수십년동안 부분방전을 견딜 수 있지만, 얇은 턴절연재료는 내부분방전성이 작기 때문에 상대적으로

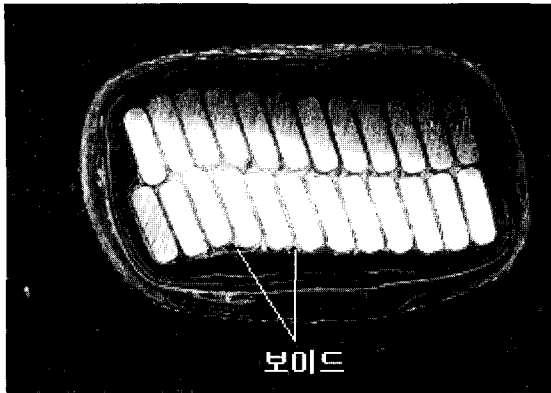


그림 7. 절연재료의 보이드.

짧은 시간에 열화로 인해 분해 된다. 따라서 정상적인 운전전압에서 인접한 턴사이의 절연이 약화됨에 따라 턴이 단락되고 과열로 인해 절연파괴가 발생한다. 직선바 표면에서 오염은 고정자 철심이 접지에 효과적으로 연결되어 전계에 대한 영향이 미약하다. 그러나 단말권선(endwinding) 표면은 운전중에 축적된 오염, 먼지, 기름 등으로 인해 미세하게 도전성을 갖고 있으며, 절연재료 내부에서 전계강도의 증가로 인해 턴사이의 절연재료를 파괴한다.

외국에서 조사, 발표한 자료에 따르면 일본에서는 수력발전기 사고중 고정자 권선(50%), 여자기(18.5%), 축수(13.5%), 회전자 권선(7%), 기타(11%) 등으로 조사되었으며, 고정자 권선의 사고원인은 절연열화(44.9%), 뇌해(26.3%), 파급사고(12.3%), 기타(16.5%) 등으로 나타났다. 또한, 3kV급 유도전동기 125대의 고장 원인중 고정자 권선(46.4%), 회전자(9.6%), 축수(28.8%), 기타(15.2%) 등으로 나타났다. 네델란드(Netherlands)에서는 1983년부터 1997년까지 15년동안 689대의 발전기에서 사고가 발생하였으며, 35%가 발전기 운전중에 고정자 권선 열화로 인한 사고로 판명되었다. 미국 EPRI는 정격전압이 2.3kV 이상의 대용량 전동기가 설치되어 운전중인 발전소에서 7500대를 조사한 결과, 37%는 고정자 권선에서 절연파괴가 발생한 것으로 발표하였다.

따라서 절연파괴는 절연재료 내부의 보이드, 이물질 및 도체 표면의 돌기 등이 있는 경우에 전계가 집중되어 트리(tree) 발생의 개시와 트리 진행을 조장하는

원인이 된다. 보이드 선단부에서 발생한 트리는 충전제에 도달하면 그 계면을 따라 진행하고 충전제 직경을 넓혀 트리관 내의 전압강하를 생기게 한다. 그 결과 트리 선단의 전계가 약해져 트리 속도는 지연된다. 그러나 트리관 내의 부분방전이 어느 기간 동안 지속되어 트리 관벽이 탄화되면 트리 선단의 전계는 다시 강해지고 트리도 진행을 개시한다. 이와 같이 진행되는 트리가 다음 충전제에 도달하면 같은 방식의 과정을 반복하면서 결국에는 전경로 절연파괴에 이른다. 그림 8은 열적 및 전기적 복합열화로 절연파괴된 플레이크 마이카 혹은 집성 마이카의 절연층 내부에서 진행되는 파괴 메카니즘을 나타내었다.

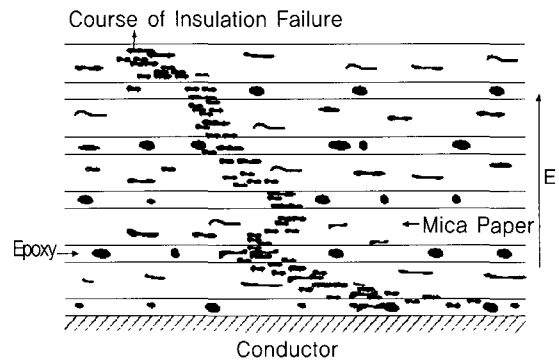


그림 8. 절연재료의 파괴 메카니즘.

4. 운전중 부분방전 감시 시스템의 개발 현황

발전소, 제철소 및 화학플랜트 등과 같은 주요한 산업설비에서 운전중인 고압회전기의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성과 기업 생산성을 저하시키고, 단시간에 복구가 곤란하기 때문에 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다. 따라서 선진국에서도 고압회전기 고장방지에 대해 지대한 관심을 갖고 있으며, 사전에 절연열화 상태를 예측하기 위해 기술개발을 지속적으로 수행하고 있다.

1980년대 초반부터 캐나다 Ontario Hydro사는 수력발전기에서 부분방전 시험을 위해 회로 링 부스(ring bus)에 영구적으로 용량성 커플러를 설치하고

운전중 부분방전 진단 장비인 PDA(partial discharge analyzer)를 직접 연결하여 측정하였다. 무엇보다도 운전중 부분방전 측정은 운전동안에 열적, 전기적 및 기계적 응력 등을 규칙적으로 받는 절연물에 대해서 직접적으로 열화정도를 분석할 수 있다. 1980년대 후반부터 운전중인 발전기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하여 절연열화 상태를 진단하는 연구가 본격적으로 이루어졌다. 수력발전기의 고정자 권선을 진단하는 PDA가 캐나다의 FES사에서 개발되었다. IRIS 사에서는 위상분석 기능이 추가된 PDA-partner를 개발하였으며, 1990년대 초반부터는 화력발전기 고정자 권선의 진단을 위한 TGA(turbine generator analyzer)를 상품화하였다. 현재는 고압전동기 및 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 운전중에 상시감시 할 수 있는 시스템도 개발하여 캐나다, 미국 등 북미에 널리 보급되어 사용중에 있다. 1980년대 후반부터 독일 Siemens는 21개의 수소냉각 발전기에 설치된 커플링 유닛(coupling unit)를 경유하여 운전중 부분방전을 측정하도록 RF(radio frequency) 모니터를 설치하였다. 1990년대 후반부터 스위스 ABB, 일본 Mitsubishi 등에서도 발전기와 고압전동기 운전중 부분방전 감시 시스템을 개발하여 사용중에 있다.

국내에서도 1990년대 초반부터 의암, 춘천수력 발전기에 케이블 커플러(cable coupler), 서울화력 발전기에 SSC(stator slot coupler)를 설치하고 PDA와 TGA를 사용하여 운전중에 주기적으로 부분방전을 측정하였다. “발전기 수명평가 및 진단 시스템 개발” 연구과제를 수행하여 발전기 운전중 진단 시스템의 기초기술을 개발하였으며, “양수발전소 발전-전동기 상시감시 시스템 개발” 연구과제 시작품을 삼랑진양수발전소 발전-전동기의 고정자 권선 부분방전, 회전자 권선 층간단락 및 공극 등을 상시감시 할 수 있는 시스템을 설치하여 운영중에 있다. 2001년도에 전력연구원과 한국전기연구원에서 공동연구로 수행한 “발전소 고압전동기 절연감시 시스템 개발” 과제의 연구시작품을 국내에서는 최초로 보령화력발전소 고압전동기 10대에 설치하였다. 여기서 얻은 운전중 감시기술과 절연진단 기술을 바탕으로 포항산업과학연구원으로부터 수탁 받은 “교류전동기 고정자 권선 결함감지를 위한 부분방전 분석기술 개발” 연구과제를

전력연구원에서 자체적으로 수행하였다. 전력연구원 독자 모델 개발과 신뢰성 향상에 주력하여 개발된 감시 시스템은 여러 가지 표본 코일을 통한 시험실과 현장시험을 완료하고 포항제철(주) 광양제철소와 LG Power(주) 안양열병합발전소에 성공적으로 설치하였다.

5. 결론

현재 대부분 고압회전기 절연재료는 마이카/에폭시 복합재료가 주로 사용되고 있으며, 절연재료의 평균적인 전계강도는 2.2~2.7kV/mm 이고 열적 등급도 F종(155°C)이다. 결합재로서 에폭시 대신에 실리콘을 사용하게 되면 열적 등급도 H종(180°C)으로 향상시킬 수 있다. 고정자 권선의 표면에서 발생하는 코로나방전을 감소시키기 위해 슬롯과 단말권선 부분에 대해 반도체성과 응력완화 테이프를 사용한다. 반도체성 테이프는 검은 도전성 페인트인 카본을 사용하여 권선의 슬롯부분에 대해 표면방전을 방지한다. 반면에 응력완화 테이프는 비선형 저항 특성을 갖는 실리콘 카바이드를 사용하여 단말권선에서 높은 전압을 서서히 감소시켜 부분방전이 발생하지 않도록 한다. 발전기 회전자 권선의 절연재료는 직류 전압이 500V 정도 인가됨으로 고정자 권선에서 높은 교류 전압에 의해 발생하는 대부분의 열화과정은 발생하지 않는다. 따라서 기동정지로 인해 높은 원심력과 인접 권선으로부터 가열됨으로 충분한 기계적 강도와 내열특성을 갖고 있어야 한다.

고압회전기 절연재료는 열적, 전기적, 기계적 및 환경적인 복합열화 혹은 제작 불량으로 인한 결함부에서 부분방전이 발생하여 최종적으로 절연파괴가 일어난다. 절연열화 상태의 표시로서 부분방전은 운전중 감시를 위해 민감하고 적절한 방법이지만 부분방전 크기를 한번 측정하여 절연열화 정도를 평가하는 것은 절대적인 척도가 될 수 없다. 따라서 고압회전기 운전중 부분방전 감시기술은 고정자 권선 절연재료의 건전성 평가를 위해 가장 확실한 방법이며, 신뢰성 있게 감지되면 국부적으로 제한된 절연재료 결함을 찾을 수 있는 유일한 측정법이다. 현재 캐나다, 미국, 독일 등과 같은 선진국에서도 발전기와 고압전동기



운전중 부분방전 감시 시스템을 개발하여 사용중에 있다. 국내에서도 감시 시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 성공적으로 개발하여 시험실과 현장시험을 완료하고 터빈발전기와 고압전동기에 설치하였다. 감시 시스템은 절연열화 상태를 실시간 트렌드로 분석하여 사전 예측정비를 수행함으로써 절연파괴에 의한 돌발적인 고장 억제, 설비의 운전 신뢰성 향상 및 고장으로 인한 경제적인 손실 감소 등에 크게 기여할 것으로 판단되었다.

참고 문헌

- [1] I. M. Culbert, H. Dhirani, and G. C. Stone, Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI, EL-5036, Vol. 16, p. 2-1, 1989.
- [2] G. C. Stone, Partial Discharge Seminar, Iris Power Engineering, INC., Vol. 1, p. 5, 2000.
- [3] W. McDermid, "Insulation systems and monitoring for stator windings of large rotating machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 9, No. 4, p. 7, 1993.
- [4] A. Roberts, "Stress grading for high voltage motor and generator coils", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 4, p. 26, 1995.
- [5] 김희동, 주영호, "고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, p. 513, 1999.
- [6] 김희동, "발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석", 한국전기전자재료학회 논문지, Vol. 15, No. 2, p. 119, 2002.
- [7] G. Stone and J. Kapler, "Stator winding monitoring", IEEE Industry Applications Magazine, p.15, 1998.
- [8] P. Gruneward and J. Weidner, "Possibilities and experience with off-and on-line diagnosis of turbine generator stator winding insulations", CIGRE, Paris, 1994.
- [9] H. Zhu, V. Green, M. Sasic, and S. Halliburton, "Capacitive couplers with increased sensitivity on-Line PD measurement in stator windings", IEEE International Symposium on Elect. Insul., p. 261, 1998.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 김희동

◆ 학력

- 1985년 홍익대 전기공학과 공학사
- 1987년 홍익대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1998년 홍익대 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 2002년 일본 큐슈공업대학 초빙연구원
- 1990년 - 현재 한전 전력연구원 선임연구원

