



## 회전기에 고장이 발생하는 이유

모터 및 발전기와 같은 회전기는 발전 및 산업 응용 분야에서 핵심이 되는 구성 요소입니다. 따라서 기계의 신뢰성과 가용성이 매우 중요합니다. 조기 고장은 예상치 못한 정전 및 기계의 손상을 초래하여 상당한 경제적 손실을 초래할 수 있습니다.

유지보수를 효과적으로 계획하려면 기계 구성 요소의 수리 또는 교체 시기에 대한 정확한 상태 정보가 있어야 합니다.

### 회전기에 고장이 발생하는 이유

기계의 중요 구성 요소를 평가하기 위한 몇 가지 방법과 계산법이 있습니다. 가장 실용적인 접근 방식은 다양한 부문에서 활동하는 여러 기계 운영자의 경험을 묻는 설문 조사 결과를 평가하는 것입니다. A1.10 CIGRE 실무 그룹으로부터 수렴한 수력 발전기 고장에 관한 설문을 예로 들 수 있습니다. 설문 조사 결과가 그림 1a에 나와 있습니다. 전 세계적으로 총 1,199개의 수력 발전기를 운영하는 16개 운영자에 따르면 가장 일반적인 기계 고장의 원인은 절연 손상입니다. 절연 손상 자체에 특정한 근본 원인이 있으며 이를 그림 1b에 나타냈습니다. 여기서의 회전하는 전기 기계에서 이러한 일반적인 문제가 어떻게 평가 및 감지되는지 설명합니다.

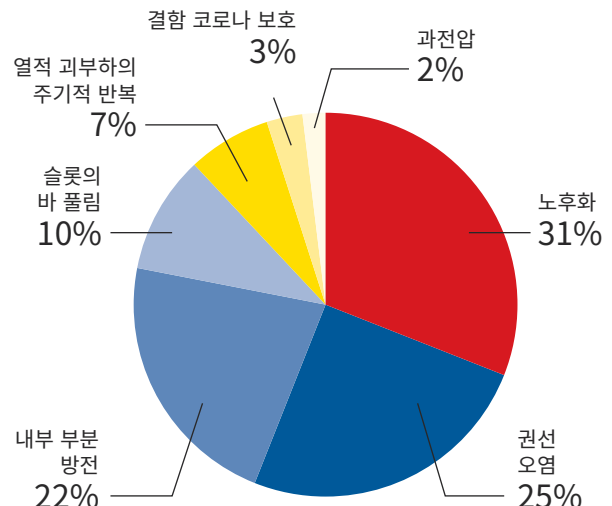
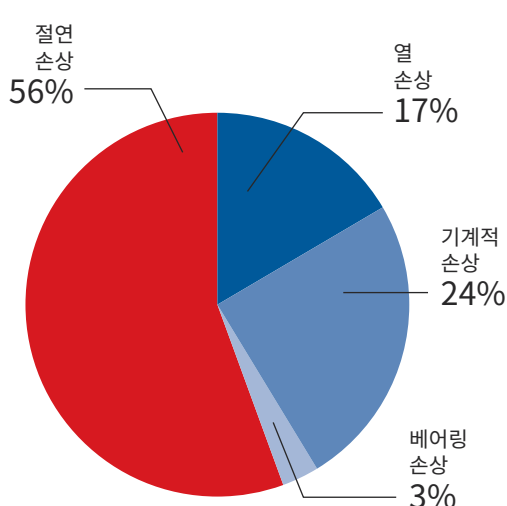


그림 1a(왼쪽): 수력 발전기 고장의 근본 원인에 대한 조사  
그림 1b(오른쪽): 절연 손상의 원인

출처: Brüttsch et al. "Insulation Failure Mechanisms of Power Generators", DEIS July/August 2008

### 절연체에 가해지는 스트레스 - TEAM

회전기는 수명 기간 동안 TEAM으로 약칭되는 열 스트레스, 전기 스트레스, 주변 환경 스트레스 및 기계적 스트레스와 같은 주기적이고 지속적인 다양한 스트레스 요인에 노출됩니다.

- > Thermal(열) 스트레스: 온도 변화가 크면 절연체의 조기 노화로 이어집니다.
- > Electrical(전기) 스트레스: 작동 중 전압 스트레스와 부분 방전(PD) 활동은 절연체에 직접적으로 스트레스를 줍니다.
- > Ambient(주변 환경) 스트레스: 수분, 부식성 및 반응성 화학물질(가스, 산성 물질) 및 이물질(금속 부품, 재, 탄소, 윤활제)이 포함됩니다.
- > Mechanical(기계적) 스트레스: 슬롯과 끝 권선 영역의 전기력 및 다양한 정도의 열팽창이 포함됩니다.

### 절연체 구성

고전압 및 중전압 회전기의 절연체는 기계적 안정성을 보장하고 구리에서 나오는 열을 기계의 냉각 시스템으로 전도시키면서 전계 강도를 견디는 목적을 충족시키기 위해 그 중간 어디에선가 타협점을 찾아야 합니다. 그 결과, 제조업체는 그림 2와 같은 복합 절연 시스템을 채택하는 경우가 많습니다. 주 절연 또는 접지벽 절연은 에폭시 수지와 함께 mica로 구성됩니다. 이 부분에서 가장 많은 전기 스트레스가 발생합니다. 또한, 절연 시스템에는 서로 다른 재료 사이의 계면에서 지정된 전위를 확보하기 위해 일부 전도성 또는 반도체 레이어가 들어갑니다. 절연체 표면에서 매끄러운 접지 전위를 보장하기 위한 외부 코로나 보호가 그 한 가지 예입니다. 더 큰 기계는 또한 최종 잠재적 등급이 있고 종종 내부 코로나 보호장치를 가지고 있습니다.

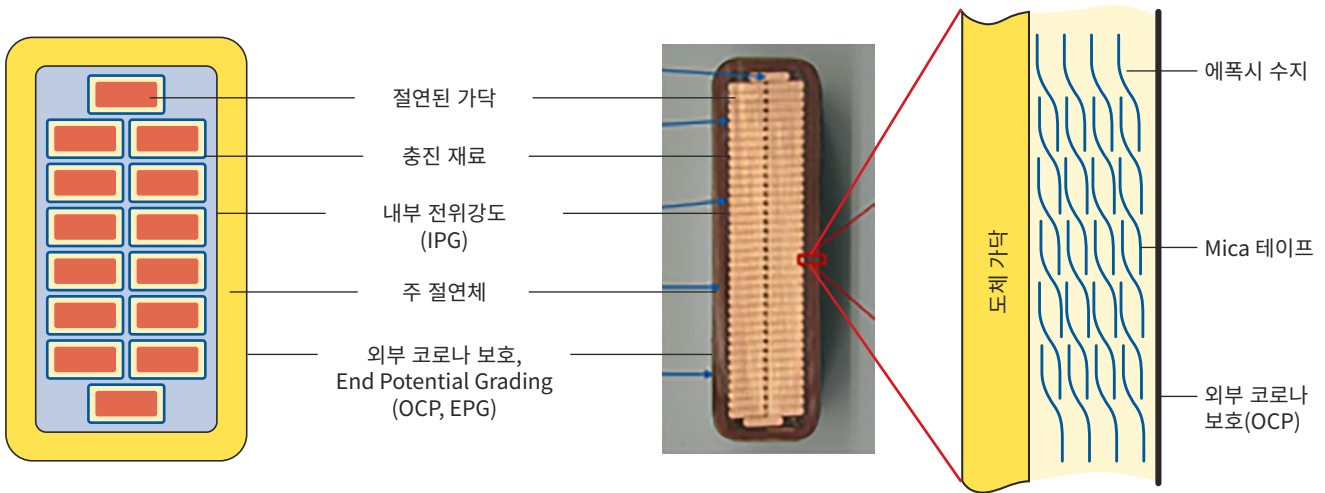


그림 2: 고전압 기계의 절연 구성

### 고정자 권선에서 가장 일반적인 접지벽 절연 결함

#### 공극

에폭시/mica 절연체에서 특정 수준의 공극 또는 공동이 존재하는 것은 제조 공정에서 발생하는 일반적인 현상입니다. 제조업체마다 생산 공정이 다르기 때문에 새로운 기계에서 발생하는 경미한 결함 수준에도 차이가 있습니다. 위에서 언급한 TEAM 스트레스로 인해 시간이 지남에 따라 추가적인 공동이 생기게 됩니다.

적합하게 제조된 절연 시스템이라면 작은 공동을 견디는 일은 문제가 되지 않습니다. 그럼에도 불구하고 이러한 작은 공동은 PD의 원인이 되어 더 큰 절연 결함으로 이어질 수 있습니다. 이러한 결함이 큰 문제로 불거지려면 시간이 걸리므로 시간 경과에 따라 이러한 부분 방전 상태를 점검해야 합니다.

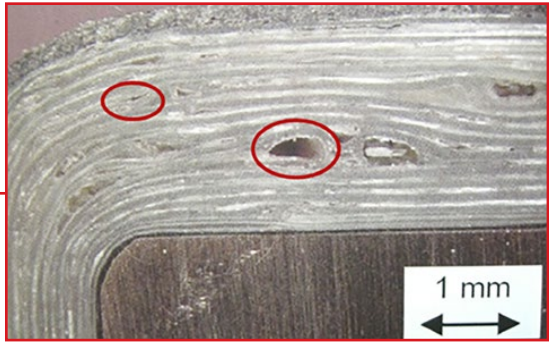
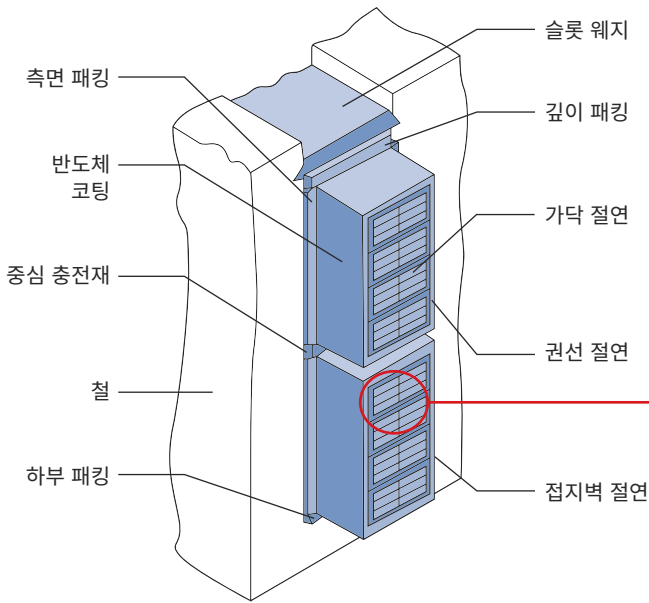


그림 3: 절연 구성 및 접지벽 절연의 큰 공극을 보여주는 현미경 이미지  
출처: Vogelsang et al. "Performance testing of high voltage generator and motor insulation", Dec 2005

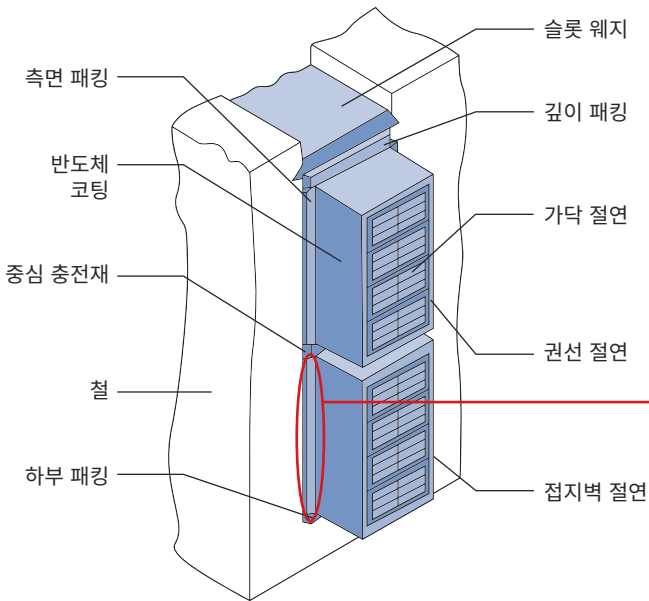
**층간 박리**

절연체 내에서 디본딩(debonding)으로 알려진 층간 박리는 절연 층 사이에 큰 공동이 형성되는 현상을 수반합니다. 또한, 구리와 주 절연 층 사이에서 층간 박리가 발생할 수도 있습니다.

층간 박리는 미세 공극과 관련된 PD 활동과 비교해 더 높은 PD 활동을 초래합니다. 그 주된 이유는 정상 작동 중에 여러 재료 및/또는 온도 사이클로 인해 발생하는 기계적 장력 때문입니다.

**느슨한 코일 또는 바**

전자기계적 힘이 지속적으로 권선과 상호 작용합니다. 시간이 지남에 권선 고정 시스템에 결함이 생기거나 올바르게 적용되지 않으면 권선이 느슨해집니다. 따라서 외부 코로나 보호가 공격을 받아 마모됩니다. 결함이 감지되지 않으면 진동으로 인해 주 절연체의 성능이 저하되기 시작하여 기계 고장으로 이어지게 됩니다. 결함은 특징적인 PD 증상을 가지며 PD 측정을 통해 확인할 수 있습니다.



진동을 통한 OCP의 기계적 마모

그림 4: 진동 바의 절연 구성과 일반적인 증상.



### 끝 권선 영역의 오염 및 불완전한 거리

불완전한 거리(위상 분리기) 또는 권선 오염과 같은 구조상의 문제로 인해 끝 권선 영역에서 PD 활동이 발생합니다. 권선의 이 부분에서 다른 일반적인 문제는 외부 코로나 보호 및 전위강도 사이의 약한 결합에서 기인합니다. 오염 및 PD 활동의 예가 아래에 나와 있습니다(그림 5).

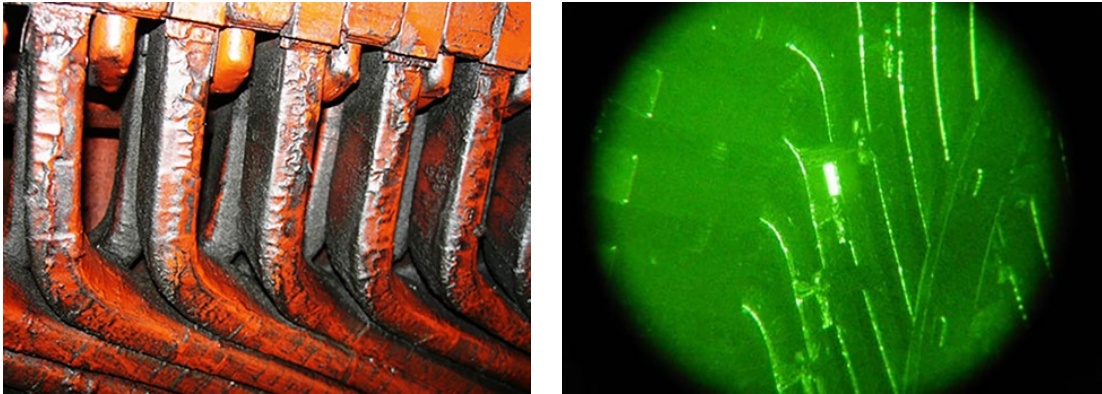


그림 5: 권선 종단 부분에서 오염 및 PD 활동을 보여주는 예

위에서 논의한 문제들은 주 절연체와 관련됩니다. 회전기의 다른 구성품들은 종종 다른 문제의 영향을 받기도 합니다. 일부 예는 다음과 같습니다.

- > 권선간 단락
- > 연결(접촉) 문제
- > 끊어진 병렬 가닥
- > 접촉부의 납땜 불량

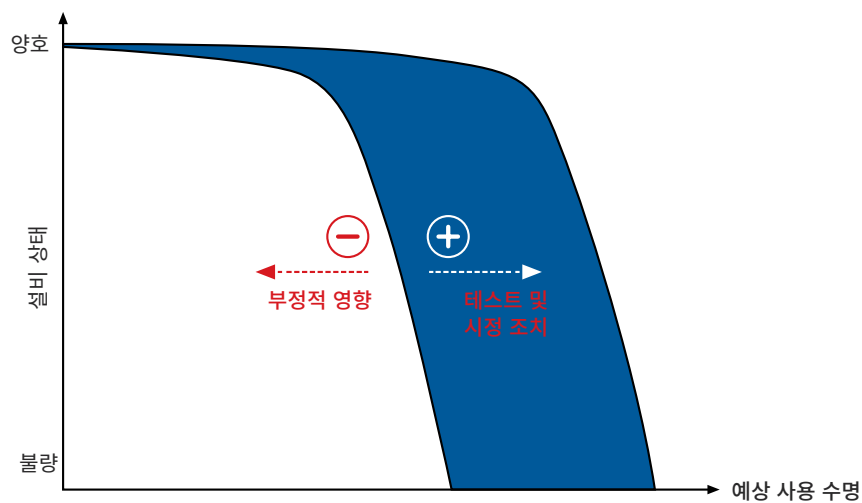


그림 6: 상태 기반 유지보수를 통해 수명을 연장하는 이상적인 개념

### 예상 수명 연장

전기 네트워크의 다른 모든 설비와 마찬가지로 회전기도 일정한 예상 수명을 가지고 있습니다. 언급한 바와 같이 열, 주변 환경, 기계적 및 전기적 스트레스와 같은 부정적인 영향으로 인해 수명이 단축됩니다.

회전기의 고장과 가동 중단을 방지하려면 정기적 또는 주기적인 유지보수가 필수적입니다. 다양한 진단 측정을 통해 위험도를 평가하여 기계 상태에 따라 유지보수 일정을 올바르게 계획할 수 있습니다.

### 테스트 개요

다음 표에는 가장 일반적인 문제와 이를 감지하는 데 사용되는 전기 테스트 방법에 대한 개요가 나와 있습니다.

테스트한 기계 부품	점검해야 하는 내용	권장 전기 테스트													
고정자 권선	부분 방전(PD)	■	■	■											
	오염	■	■	■		■								■	
	절연 특성 저하	■	■	■		■								■	
	내전압성					■									
	절연 무결성					■	■							■	
	연결 문제								■						
	권선 내 결함													■	
로터 권선	권선 내 결함											■	■		
	높은 접촉 저항										■				
고정자 코어	코어 결함														■
		캐패시턴스, 소산 계수(tan δ) / 역률 측정	부분 방전(PD) 측정	온라인 PD 모니터링	내전압 시험	절연 저항, 극성 지수 및 유전체 흡수율 측정	DC 권선 저항 측정	접촉 저항 측정	Pole drop 시험	가변 주파수 응답 분석	유전체 응답 분석	전자기 결함 테스트			

표 1: 회전 전기 기계의 일반적인 문제와 이를 감지하기 위한 테스트 방법