

대용량 발전기 및 고압전동기 진단기술

김희동 책임연구원, 공태식 선임연구원 (한전 전력연구원 기술전문센터)



1. 서론

대용량 발전기 및 고압전동기(회전기) 고정자 권선은 장기간 운전하는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 영향으로 인해 절연재료 내부의 보이드(Void) 생성, 반도체층 손상과 단말권선(Endwinding) 표면 오손으로 상간방전(Phase to phase) 등에 의한 열화 및 냉각수 흡습과 누수가 서서히 진행하다가 최종적으로 절연파괴에 도달한다. 실제 국내에서도 12~20년 정도 운전된 가스터빈 발전기 고정자 권선의 절연열화와 단말권선에서 상간방전으로 인해 절연파괴가 발생하였다. 또한, 12~15년 정도 운전된 수냉각 발전기 단말권선에서 진동으로 인해 누수와 흡습이 발생하여 운전 중에 절연파괴된 사례도 있다.

기동정지가 빈번한 가스터빈 발전기가 증가함에 따라 회전자 층간단락, 접지 및 층간절연재료가 냉각 홀(Cooling hole)을 막아 국부적으로 온도가 증가하여 진동이 높아지거나 혹은 과열 발생 등에 의한 사고가 일어나고 있다. 복합화력 발전소에서 회전자 사고가 자주 발생하기 때문에 신속히 교체하기 위해 예비회전자를 구입하여 확보하고 있다. 또한, 발전기 고정자 권선이 절연파괴 되면서 철심이 크게 파손되거나 혹은 국부적 과열로 인해 규소강판의 층간절연 단락으로 고정자 철심이 손

상되는 사고도 발생하고 있다.

운전 중인 회전기 고정자 권선의 갑작스런 절연파괴 발생, 회전자 권선의 층간단락 및 발전기 고정자 철심의 손상 등으로 인한 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고 단시간에 복구가 곤란하기 때문에 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다. 따라서 회전기 고정자 권선의 절연열화를 판정하는 절연진단 기술, 회전자 권선의 층간절연 상태 및 고정자 철심의 건전성을 주기적으로 진단하여 사전에 고장을 예측할 수 있다.

2. 고정자 권선의 절연진단 기술

회전기 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 에폭시의 분해에 의한 가스압력이 증가하여 접착강도를 저하시켜 계면에서 박리(Delamination)를 발생시킨다. 기계적 응력은 마이카/에폭시 계면과 에폭시 리치(Rich)부분에서 각각 미소 균열을 발생시키고 동시에 이미 다른 원인에 의해 생성된 균열을 확대시



킨다. 전기적 응력은 박리, 균열과 같은 결합부분에서 부분방전이 발생하여 유전정접의 증가, 코로나 침식 및 트리 (Tree)가 진행하다가 마이카 조각이 존재하면 진전이 억제된다.

절연열화의 최종단계에서는 독립적으로 발생된 미소 균열이 상호결합하며, 이 부분에서 트리가 급속히 진전하여 절연파괴에 이른다 [1,2]. 외부환경에 의한 열화는 먼지, 오일 및 습분의 유입으로 인해 고정자 권선 표면에서 오손이 발생한다. 따라서 고압회전기 고정자 권선의 절연열화 상태와 열화정도를 평가하기 위해 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하고 있다 [3].

2.1 절연진단 시험 표준 (Standards)

회전기 고정자 권선 정밀 절연진단 시험에 포함되는 절연저항, 성극지수, 유전정접 및 부분방전 등에 관한 국제적인 표준 [4]은 표 1에 나타내었다. 초년도 계획예방정비공사시에 대용량 발전기 고정자 권선의 내부점검을 위해 회전자를 인출하고 5년 마다 육안검사를 시행하고 있다. 일반적으로 고압전동기 고정자 권선에 비해 절연상태가 매우 양호하기 때문에 운전연수에 상관없이 5년마다 절연진단을 수행하고 요주의로 판정되면 매년 절연진단을 통해 트렌드 (Trend) 관리가 필요하다. 따라서 회전기 고정자 권선의 절연진단 결과를 근거로 진단 주기를 설정하여 운영하고 있다 [5].

2.2 절연진단 업무흐름도

그림 1과 같이 회전기 절연진단 업무흐름도를 작성하여 운영하고 있다. 절연저항과 성극지수가 양호하게 판정될 경우에 절연진단을 시행하며, 1차 진단에 문제가 있는 경우에 회전자를 분리하고 분해점검 결과 양호할 경우에 2차 진단을 수행한다. 2차 진단에도 문제가 해결되지 않은 경우에 최종적으로

표 1. 회전기 진단시험 표준.

시험의 종류	표준
절연저항, 성극지수	IEEE Std 43-2000
유전정접	IEEE Std 286-2000
부분방전	IEEE Std 1434-2000
교류 내전압	IEEE Std 56-1977
직류 내전압	IEEE Std 56-2002

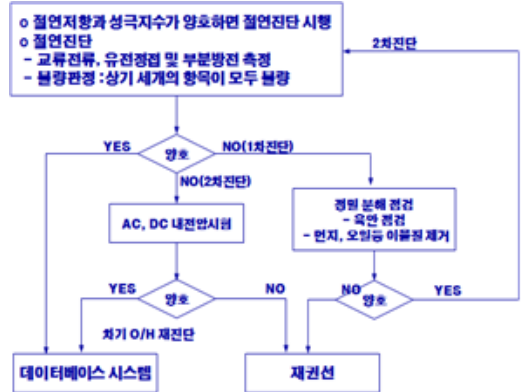


그림 1. 회전기 절연진단 업무흐름도.

는 교류 혹은 직류 내전압 시험에 의해 재권선을 실시하는 것이 최적의 유지정비와 비용 절감 측면에서 매우 효율적인 대안으로 판단된다.

2.3 절연진단 시험법

정지 중에 대용량 발전기 고정자 권선에서 절연진단 시험을 수행하였다. 정지 중에 고정자 권선의 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험을 위해 슈링브리지 (Schering Bridge), 커플링 커패시터 (Coupling Capacitor) 및 부분방전 측정기 (Partial Discharge Detector : PDD, Tettex Instruments TE 571)를 사용하였다. 슈링브리지는 전원장치 (HV Supply, Type 5283), 브리지 (Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터 (Rsonating Inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 그림 2(a),(b)는 발전기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전을 측정하기 위한 회로도를 나

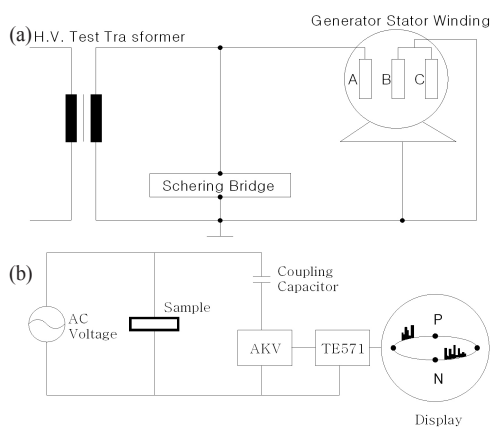


그림 2. 발전기 고정자 권선에서 절연진단 시험
(a) 교류전류 및 유전정접의 측정, (b) 부분방전의 측정.

타내었다. 발전기 고정자 권선에 웨링브리 지 (Tettex Instruments)를 연결하여 교류 전압을 인가하며, 커플링 커패시터 (Tettex Instruments, 4,000 pF)는 권선에서 유입 되는 신호를 커플링 유니트 (Coupling Unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40~400 kHz이다. 그림 2(a)에서 나타낸 바와 같이 발전기 고정자 권선은 커패시턴스 (Capacitance) 용량이 크기 때문에 중성점을 분리하여 상별로 진단하고 있다. 그러나 고압전동기는 커패시턴스 용량이 작고 대부분 중성점 분리가 되지 않기 때문에 주로 삼상 일괄로 절연진단을 수행하고 있다. 커패시턴스 용량은 고정자 권선의 주절연재료 (C_{in}), 권선의 반도체재료와 슬롯사이의 공극 (C_{air})의 크기에 따라 주로 결정된다. 500 MW 표준석탄화력 발전기 고정자 권선에서 한상의 커패시턴스 용량이 대략 242[nF]이며, 300 MW 양수발전기는 약 800[nF] 정도이다.

2.4 절연진단 결과 분석

정지 중 (Off-line) 절연진단 시험에서는

교류전류, 유전정접, 부분방전 크기 및 패턴 등을 측정하여 종합적인 평가와 분석을 통해 회전기의 절연상태를 양호, 요주의, 분해점검, 절연보강 및 권선교체 등으로 분류하여 판정한다. 전력연구원에서는 발전소에 설치되어 운전 중인 대용량 발전기 620대 및 고압전동기 9,140대의 절연진단 결과를 가지고 있다. 고압전동기 9,140대의 절연진단 데이터를 근거로 분석한 결과 다음과 같다. 절연상태 판정결과 양호 7,769대 (85%), 요주의 640대 (7%), 분해점검 320대 (3.5%), 절연보강 228대 (2.5%) 및 권선교체 183대 (2%)로 분류되었다.

(1) 양호

고압전동기 절연진단 데이터를 분석한 결과 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등이 모두 기준값 이하로 나타나면 고정자 권선의 절연상태를 양호하게 판정한다. 절연상태가 양호하게 판정된 고압전동기 7,769대 중에 0.3%인 23대가 운전 중에 갑자기 절연파괴가 발생하였다. 이런 경우 고정자 권선의 주절연재료 내부에서 턴 (Turn)과 턴 사이의 단락이 주요한 원인이다. 따라서 우리 연구원에서도 턴 단락을 진단하기 위해 서지 (Surge) 시험 장비 (Advanced Winding Analyzer III with PP30, Baker)를 구매하여 절연진단의 신뢰도를 향상시키고 있다. 본 장비는 DC 30 kV까지 인가할 수 있어 저압전동기부터 고압전동기 (정격전압 13.2 kV)까지 시험이 가능하다.

(2) 요주의 (매년 진단)

고압전동기 절연진단 데이터를 분석한 결과 교류전류, 유전정접 및 부분방전 중에 두 항목이 양호하고 한 항목이 불량하면 요주의로 판정하고 매년 진단을 수행한다. 이런 경우 주기적으로 매년 절연진단을 실시하여 트렌드 (Trend)에 의한 데이터 관리를 통해 절연열화 정도를 분석함으로써 재권선 시점을



적절하게 판단할 수 있다.

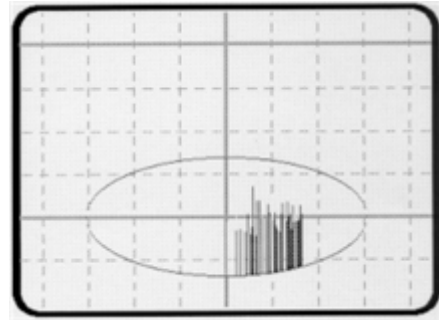
(3) 분해점검 (세척 후 건조)

현재 대부분의 화력발전소에서 고압전동기 정밀 분해점검을 3년마다 시행하고 있으나 사용 환경에 따라 정비주기를 단축하는 것이 필요하다. 특히, 석탄화력 발전소 미분기용 고압전동기는 분진 유입 가능성이 매우 높기 때문에 매년 정밀 분해점검을 실시한다. 평소 운전 시 베어링 오일의 유입 가능성이 높거나 환경적으로 취약한 고압전동기도 역시 매년 점검을 시행할 필요가 있다. 그리고 초년도 계획예방정비공사 중에 모든 고압전동기를 분해 점검하여 건설공사기간 동안 먼지 유입에 의한 고정자 권선 상태와 시운전기간 동안 빈번한 기동정지에 의한 손상 여부를 파악하여 기기마다 점검 주기를 다르게 설정해 놓으면 향후 설비 유지정비에 큰 도움이 될 것이다.

고압전동기 고정자 권선의 절연상태가 양호하여도 단말권선에 이물질이 유입되어 있으면, 표면 트래킹(Tracking)이 발생하여 절연파괴가 발생할 수 있다 [6]. 회전자를 분리하고 세척하여 건조한 후에 측정한 유전정접 특성은 거의 양호하게 분석되었다. 또한, 부분방전 크기도 먼지와 같은 이물질이 유입되어 있으면 초기에 크게 나타나다가 고전압에 의해 먼지가 타버리면 다시 감소한다. 고압전동기 고정자 권선에서 이물질을 세척하고 건조 후에 재진단을 시행하는 경우에 거의 대부분이 양호하게 판정되었다. 따라서 고압전동기 분해점검으로 판정된 경우 세척 후 건조하고 진단하면 모두 양호하기 때문에 9,140대 중에 양호 7,769대와 분해점검 320대를 합산하면 총 8,089대 (88.5%)는 양호로 분류할 수 있다.

(4) 절연보강 (재함침)

그림 3에서 나타낸 바와 같이 고정자 권선 표면의 코일과 슬롯의 상대적인 움직임으로



고압전동기 (PD-Range : 20 nC/div)

그림 3. 슬롯방전.

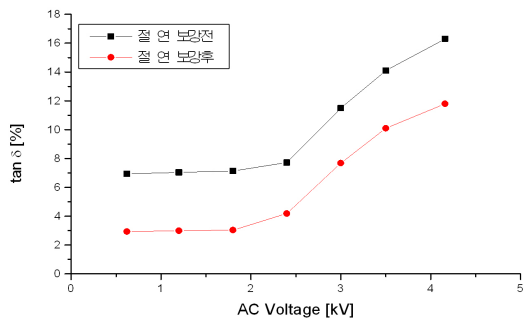


그림 4. 절연보강 전후에 tanδ-전압 특성.

인해 마모되어 반도체층을 손상시키면 슬롯방전이 발생한다 [7]. 반도체층이 손상됨에 따라 일부 권선의 접지상태는 나빠지고 권선 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에 방전을 일으킨다 [8]. 이와 같이 슬롯방전의 크기가 크게 나타날 때 절연보강을 판정한다. 그림 4는 원자력발전소에서 20년 동안 운전한 고압전동기 (260 kW, 4.16 kV) 고정자 권선에서 절연보강 전후에 유전정접의 변화를 나타내었다. 절연보강 전에 비해 유전정접이 크게 감소하였으며, 부분방전 크기도 절연보강 전에 비해 현저하게 감소하는 것은 재함침시에 바니쉬가 슬롯과 고정자 권선 사이에 양호하게 유입되기 때문이다. 예를 들면, 슬롯방전에 의한 부분방전 크기가 절연보강 전에 20,000~30,000 pC으로 크게 나타나도 절연보강 후에는 3,000~5,000 pC으



로 감소한다.

(5) 권선교체

고압전동기 고정자 권선 교체는 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기를 종합적으로 평가하고 있으며, 절연열화로 인해 주절연 내부에 공극이 발생하여 내부방전이 크게 나타나거나 도체표면에서 부분방전이 발생할 때 권선교체를 판정한다. 따라서 고압전동기 고정자 권선 교체로 판정된 183대 중에 18대 (10%)는 정격전압까지 절연진단 시험 중에 절연파괴가 발생하였다. 예를 들면, 정격전압이 6.6 kV인 고압전동기는 상전압 1.25배 (4.76 kV) 이상에서 절연파괴가 주로 발생한다.

3. 회전자 권선의 진단기술

가스터빈 발전기는 운전특성상 빈번한 주 말 기동정지와 출력 증감발로 인하여 회전자 권선에서 복합적인 응력이 집중되어 여러 가지 고장이 발생하고 있다. 발전기 운전 중에 강한 원심력에 의해 회전자 권선은 반경방향으로 압축력이 작용한다. 정지 중에는 회전자의 축 처짐을 방지하기 위해 저속으로 회전 (Turning)할 때 권선의 자중으로 인해 슬롯 내부에서 권선의 움직임이 발생한다. 또한, 반복된 기동과 정지로 야기되는 열적 및 기계적 응력으로 코일 (Coil)의 수축과 팽창이 반복하게 된다. 따라서 반복적인 응력으로 인한 피로와 부하 변동 시 코일의 발열로 동 도체와 절연재로 사이의 열팽창 계수 차이에 의한 상대적인 변위 등으로 인해 코일 간 층간절연물이 손상되고 위치가 이탈되는 경우 최종적으로 층간단락을 유발하게 된다 [9,10].

발전기 회전자 권선에서 층간단락이 단지 몇 개의 턴에서 발생한 경우에는 문제가 없지만, 여러 코일에서 다발적으로 발생한 경

우 절연재료가 경제적인 수명에 도달했음을 의미한다. 또한, 층간단락 발생률이 전체 코일 중에 5~10% 이상이 되면 각 극간 (N극과 S극)에서 자속 불평형에 의한 진동증가, 주 율 열 (I^2R)에 의한 온도 상승 및 코일의 턴 수가 감소함에 따라 여자기에서 계자전류 증가로 인해 과열 등이 발생한다 [11,12]. 특히, 여자기의 과열은 발전기의 정격출력을 제한하고 출력감발을 일으킬 수 있다.

장기간 운전된 가스터빈 발전기 회전자 권선에서 고장 발생이 현저하게 높게 나타나기 때문에 예방진단이 절실하게 필요한 실정이다. 발전기 회전자 권선의 건전성 진단은 절연저항, 성극지수, 분담전압 및 RSO (RSO : Recurrent Surge Oscillograph) 시험 등을 주로 정지 중에 시행하고 있다.

3.1 회전자 권선의 RSO 시험법

가스터빈 발전기 회전자 권선의 층간단락 시험은 회전자가 인출되지 않은 상태에서 저속회전(Turning) 중에 RSO 장비를 사용하였다. 그림 5는 RSO 시험회로도를 나타내었으며, 시험전압은 약 5 V 이하의 직류 펄스를 사용하고 시간 영역에서 반사율 측정 방법으로 매우 안전한 시험이 가능하다. 발전기 회전자 권선 양측의 컬렉터 링 (Collector ring)에 낮은 전압의 스텝형상 펄스 (Step-shaped pulse) 파형을 입사한다. 두 개의 오실로스코프 화면으로 입사된 파형과 결함 부위에서 반사되어 합성된 파형을 채널 1 (Ch 1)에서 측정한다. 회전자 권선을 통과하여 투과한 파형은 채널 2 (Ch 2)에서 측정하며 시

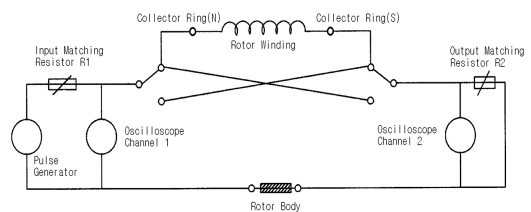


그림 5. RSO 시험회로도.



간축에 따른 전압 파형으로 나타난다.

회전자 권선이 접지되거나 층간단락에 의한 불연속성이 없다면 콜렉터 링 양측에서 검출된 두 개의 파형은 거의 동일하여 감지할 수 없는 리플 (Ripple) 성분을 포함한 하나의 파형으로 나타난다. 그러나 층간단락이나 접지와 같은 결함이 존재하면 그 부위에서 발생한 반사파에 의해 입사된 파형은 변형된다. 회전자 권선의 양측에서 입사된 파형에 의해 결함 위치에서 발생하는 반사파는 권선의 길이에 선형적으로 비례하여 시간차를 가지므로 측정된 파형에서 편차가 나타나게 된다. 오실로스코프의 채널 2에서 측정된 투과 파형으로부터 입사된 파형이 권선을 통과하는데 걸린 시간을 측정할 수 있으므로 고장의 위치가 시간 영역 스케일에 의해 추정될 수 있다.

RSO를 콜렉터 링에 결선하고 시험 실시 단계에서 권선 단부에서 파형이 반사되지 않도록 입력과 출력 측의 가변저항기를 적절히 조절한다. 오실로스코프의 입력측에서 두 개의 반사 파형을 측정하고 파형의 일치 여부를 비교하여 회전자 권선의 상태를 판별한다. 기본적으로 RSO에서 500 Hz의 반복적인 비율로 동기화된 가변 길이 펄스가 발생하며, 여기서는 약 120 μ s의 구형파가 측정되었다. 회전자 권선의 양측에서 입사된 펄스는 매칭 저항 (R2)에서 모두 흡수되고 각종 접합부에서 발생한다. 반대 극성의 반사파는 입력측으로 반사되어 측정된 합성 파형은 선단과 상단에서 왜곡된 형태가 나타난다. 이는 회전자 전체 권선이 갖고 있는 고유한 임피던스 특성이기도 하다. 회전자 권선의 접지나 층간단락과 같은 결함 부위에서 반사되는 파형은 임피던스 차이로 인해 큰 반사파가 발생한다. 양측에서 입사한 파형과 결함 위치는 거리에 차이가 있어 시간차를 가지므로 입사된 파형과 결함의 위치가 가까울수록 파형의 선단이 왜곡되고 거리가 멀어질수록 파형의 종단 쪽으로 편

차가 나타난다.

3.2 회전자 권선의 건전성 분석

기본적으로 RSO에서 500 Hz의 반복적인 비율로 동기화된 가변 길이 펄스가 발생하며, 여기서는 약 120 μ s의 구형파가 측정되었다. 회전자 권선의 양측에서 입사된 펄스는 매칭 저항 (R2)에서 모두 흡수되고 각종 접합부에서 발생한다. 반대 극성의 반사파는 입력측으로 반사되어 측정된 합성 파형은 선단과 상단에서 왜곡된 형태가 나타난다. 이는 회전자 전체 권선이 갖고 있는 고유한 임피던스 특성이기도 하다.

회전자 권선의 접지나 층간단락과 같은 결함 부위에서 반사되는 파형은 임피던스 차이로 인해 큰 반사파가 발생한다. 양측에서 입사한 파형과 결함 위치는 거리에 차이가 있어 시간차를 가지므로 입사된 파형과 결함의 위치가 가까울수록 파형의 선단이 왜곡되고 거리가 멀어질수록 파형의 종단 쪽으로

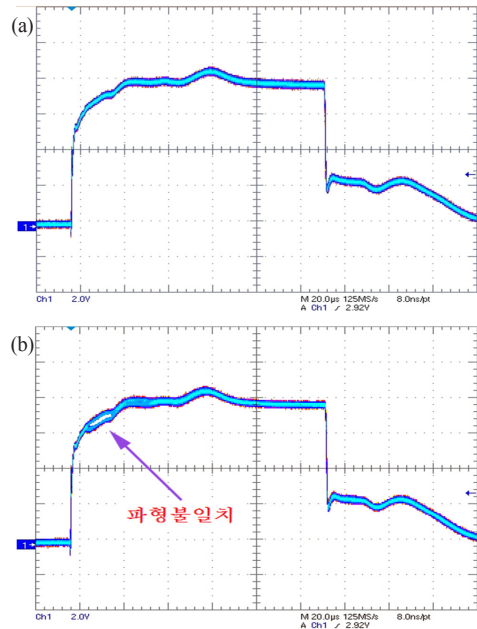


그림 6. RSO 파형의 패턴 (a) 양호한 파형, (b) 층간단락이 발생한 파형.



편차가 나타난다.

그림 6(a),(b)는 발전기 회전자 권선이 양호한 경우와 층간단락이 발생된 경우에 RSO 파형을 나타내었다 [13,14]. 그림 6(a)는 두 개의 파형이 일치하므로 층간단락은 발생하지 않았다. 그러나 그림 6(b)는 두 개의 파형이 일치하지 않으며, 두 개의 파형 중 아래 부분 파형이 변형되었음을 알 수 있다. 이는 회전자 권선에서 코일간 층간단락이 존재하고 있음으로 일부 반대 극성으로 반사되어 입사 파형이 감소되었기 때문이다. 반대측에서 입사된 파형에서 결함은 파형의 종단측으로 이동하여 다양한 감소 파형에 의해 뚜렷하게 나타나지는 않는다.

4. 고정자 철심의 진단기술

최근에는 복합화력 발전소 발전기에 의한 고장발생이 증가하는 추세에 있으며, 그 동안 큰 비중을 차지하지 않았던 고정자 철심의 손상 및 결함현상 등이 자주 나타나고 있다. 발전기는 고정자 권선과 회전자 권선에 비해 고정자 철심의 과열이나 손상이 발생할 때 사전에 감지 혹은 보호할 수 있는 장치가 없으므로 철심의 건전성과 결함에 의한 진전 상태를 점검하기가 어렵다. 특히, 발전기 고정자 철심에서 결함이 발생하면 순환하는 고장전류로 인해 전기적인 손실이 생성되고 국부적인 과열로 진전될 경우 고정자 권선이 손상됨에 따라 접지사고로 이어지는 고장을 유발하게 된다 [15]. 따라서 고가이면서 발전소의 핵심 설비 중에 하나인 발전기 고정자 철심의 건전성 여부를 진단하여 결함정도를 판정하는 일은 발전설비 운영에 있어서 신뢰성 확보와 경제적인 정비계획을 수립하는데 중요한 부분을 차지하게 되었다.

또한, 대용량 발전기 불시 고장으로 인해 갑자기 정지하게 되면, 장기간의 정비작

업이 소요됨에 따라 전력수급에도 불안요소가 발생하고 경제적인 손실부담으로 작용하게 된다. 발전기 고정자 철심이 심각한 손상으로 진전하기 전에 건전성 진단을 실시하여 비정상 상태에서 운전이 이루어지지 않도록 사전에 정비하는 기술이 필요하게 되었다 [15~18]. 그리고 발전기 고정자 권선과 회전자 권선의 절연상태를 사전에 평가하기 위해 운전 중과 정지 중 진단기술이 활발하게 발표되고 있다 [19,20]. 발전기 고정자 철심의 건전성을 평가하기 위해서 EL-CID (ELectromagnetic Core Imperfection Detector) 시험법은 다음과 같다.

그림 7에 나타난 바와 같이 저 자속 철심 시험법인 EL-CID를 사용하여 발전기 고정자 철심의 건전성을 평가하였다. 정상상태에서 주자속의 4[%] 정도만 인가시켜 시험을 실시하고, 센싱 헤드 (Sensing head)를 철심 표면 위로 움직이면서 결함영역에서 유도되어 흐르는 전류를 자기적으로 감지하는 방법이다.

대용량 발전기 고정자 철심을 시험할 때에는 여자권선의 용도에 맞게 넓은 도체 면적을 가진 케이블이 감겨져야 한다. 또한, 철심의 실제 자속을 측정할 수 있도록 감지코일 (Search coil)을 설치하는 것이 바람직하며, 철심을 감은 여자권선의 위치는 유용한 데이터를 얻는데 중요한 역할을 한다. 특히, 권선이 철심 안쪽에 바로 감겨지는 것보다 여

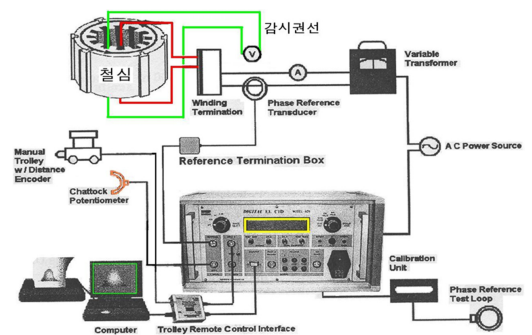


그림 7. EL-CID 시험의 구성도.



자권선 내경 중심축을 따라 늘어지도록 하는 것이 중요하며, 손상된 영역을 분석하는데 기준으로 설정하기 위해 철심에 번호를 부여하는 것이 필수적이다. 이렇게 함으로써 다음번 시험결과와 쉽게 비교할 수 있는 장점이 있다.

시험절차는 먼저 고정자 철심 둘레로 여자용 케이블 (Toroidal winding)을 설치하고 감지코일과 센서장치 (Chattock 전위계) 등을 연결한 다음 감지코일 전압을 결정하여야 한다. 장비설치가 모두 완료되면, 주 자속의 4[%]가 되도록 시험전압을 인가하고 철심을 따라 감지코일이 움직(Scan)하면서 철심 절연상태를 측정하면 된다. 이때 측정전류는 mA (Milliamperere)로 기록되며, 기준값 (제작사 권고 : 100 mA)을 넘는 철심영역은 절연물질로 표시하고 신호의 극성을 점검하여야 한다. 특히 고정자 권선이 들어가 있는 경우 손상이 육안으로 식별되지 않기 때문에 신호의 극성에 따라 손상영역을 알아내기 위해 극성 판별은 중요하며 이때 시험자의 경험과 기술수준이 요구된다.

여자용 시험전압은 발전기 정격에 따라 계산되며, 아래 식 (1)과 (2)는 2병렬 권선 구조의 72개 슬롯 (Slot)을 갖고 있는 발전기 (정격전압 13.8 kV)를 시험할 때 감지코일 전압 (V_T)의 계산 예를 나타내었다.

$$V_T = 0.004 \times \frac{V_{p-p}}{2\sqrt{3}Kt_p} = 0.04 \times \frac{13,800}{2\sqrt{3} \times 0.92 \times 12} \quad (1)$$

$$= 14.43[V]$$

$$t_p = \frac{Slot수 \times Slot당 권선수}{상수 \times 병렬회로수 \times 상당권선수} \quad (2)$$

$$= \frac{72 \times 2}{3 \times 2 \times 2} = 12$$

여기서 $V_{p,p}$: 발전기 단자전압(선간)
 t_p : 상간 직렬권선 회로수(턴수)
 K : 권선 분포 및 단절계수의 합산치 (발전기의 경우 0.92 적용)
 고정자 철심길이 : 3.25[m]

5. 결론

고압전동기 고정자 권선이 이물질 유입으로 예측되어 회전자를 인출하고 세척과 건조 작업을 마치고 나서 절연진단을 수행하면 절연상태가 모두 양호하게 판정되었다. 슬롯방전이 나타난 경우 절연보강을 완료하면 부분방전 크기가 현저하게 감소하였다. 회전기를 단순히 운전년수에 따라 분해점검, 절연보강 및 권선교체 등을 결정하는 것보다 직접적으로 절연진단을 통해 평가하는 것이 훨씬 더 과학적이고 경제적인 방법이다. 발전기 회전자를 분해하지 않고 RSO 시험을 통해 측정 파형을 분석함으로써 회전자 권선의 건전성 여부를 정확하게 평가할 수 있었다. 또한, 발전기 고정자 철심에서 EL-CID 시험결과 고장전류의 크기가 100[mA] 이하로 나타나면 양호하게 판정하며, 철심 내부에서 작은 결함도 감지가 가능하다. 따라서 전력설비, 화학설비 및 철강설비 등과 같은 산업체에서 사용되는 회전기를 주기적으로 진단시험을 실시하여 절연열화 상태와 트렌드를 분석함으로써 예측정비, 수명연장 및 안정적인 운전에 크게 기여할 수 있다.

참고 문헌

- [1] P. Walker and J. N. Champion, "Experience with Turn Insulation Failures in Large 13.2 kV Synchronous Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp. 670-677, 1991.
- [2] K. Mreuger, S. Oulski and H. Krivda, "Current Method of Insulation Life Expectancy for Power Apparatus", T. IEE Japan, Vol. 114-A, No. 12, pp. 845-852, 1994.
- [3] 김희동, "4.16kV 및 6.6 kV 전동기 고정자 권선의 절연 열화 판정 기준", 대한전기학회 논문지, Vol. 58, No. 4, pp. 788~794, 2009.
- [4] G. C. Stone, "Recent Important Changes



in IEEE Motor and Generator Winding Insulation Diagnostic Testing Standards", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 41, No. 1, pp. 91~100, 2005.

[5] R. E. Fenton, B. E. B. Gott and C. V. Maughan, "Preventative Maintenance of Turbine-Generator Stator Windings", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 1, pp. 216~222, 1992.

[6] J. H. Dymond, N. Stranges, K. Younsi and J. E. Hayward, "Stator Winding Failures : Contamination, Surface Discharge, Tracking", IEEE Trans. on Industry Applications, pp. 577~583, 2002.

[7] Claude Hudon and Mario Belec, "Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, pp. 297~319, 2005.

[8] A. Wilson, "Slot Discharge Damage in Air Cooled Stator Windings", IEE Proceedings-A, Vol. 138, No. 3, pp. 153~160, 1991.

[9] 김희동, 이영준, 박종정, 주영호, "발전기 회전자 권선의 운전중 층간단락 탐지", 대한전기학회 논문지, Vol. 48C, No. 3, pp. 192~199, 1999.

[10] M. P. Jenkins, "On-Line Monitoring of Rotor Shorted Turns", IEE Conference Publication No. 401, pp. 55~60, 1994.

[11] 김희동, 김병한, 황규호, "가스터빈 발전기 회전자 권선용 글라스/에폭시 복합재료의 화학적, 열적 및 유전특성", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 12~15, 1999.

[12] D. R. Albright, Interturn Short-Circuit Detection, Generatortech, Inc., pp. 1~8, 1993

[13] 김희동, 김병래, "가스터빈 발전기 회전자 권선의 절연상태 평가", 대한전기학회 논문지, Vol. 57, No. 10, pp. 1818~1821, 2008.

[14] R. T. Hindmarch and J. W. Wood, "Developments in Detecting Interturn Shorts in Generator Rotors using the RSO Technique", Dielectric Materials, Measurements and Application Fifth International Conference, pp. 305~308, 1988.

[15] Sang Bin Lee, G. B. Kliman, M. R. Shah, N. K. Nair and R. M. Lusted, "An Iron Core Probe Based Inter-Laminar Core Fault Detection Technique for Generator Stator Cores", IEEE Trans. on Energy Conversion,

Vol. 20, No. 2, pp. 344~351, 2005.

[16] Digital EL-CID Operating Handbook, Adwell International Ltd, pp. 1~8, 2003.

[17] Sang Bin Lee, G. B. Kliman, M. R. Shah, Dongwook Kim, W. T. Mall, N. K. Nair and R. M. Lusted, "Experimental Study of Inter-Laminar Core Fault Detection Techniques Based on Low Flux Core Excitation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, No. 1, pp. 85~94, 2006.

[18] 김희동, 김병래, "EL-CID를 이용한 발전기 고정자 철심의 건전성 평가", 대한전기학회 논문지, Vol. 58, No. 2, pp. 356~362, 2009.

[19] 김희동, "운전중인 대형 터빈발전기에서 절연상태 평가", 대한전기학회 논문지, Vol. 53C, No. 6, pp. 324~329, 2004.

[20] 김희동, 김병래, 최형주, "터빈 발전기 회전자 권선의 층간단락 분석", 대한전기학회 논문지, Vol. 60, No. 8, pp. 1555~1559, 2011.

저자약력



성명 : 김희동

◆ 학력

- 1985년
홍익대학교 공과대학
전기공학과 공학사
- 1987년
홍익대학교 대학원 전기공학과
공학석사
- 1998년
홍익대학교 대학원 전기공학과
공학박사

◆ 경력

• 2002년

• 현재

일본 큐슈공업대학교

초빙연구원

한전 전력연구원 기술전문센터

책임연구원



성명 : 공태식

◆ 학력

- 1997년
충북대학교 공과대학
전기공학과 공학사
- 2004년
충남대학교 대학원
전기공학과 공학석사

◆ 경력

• 현재

한전 전력연구원 기술전문센터

선임연구원