

Assessment of Insulation Condition in Operating Large Turbine Generator

金 熙 東*
(Hee-Dong Kim)

Abstract - Six stator slot couplers(SSC) and a flux probe sensor installed on the stator winding slots of large turbine generator. Assessment of insulation condition has been based upon the measurements of partial discharge(PD) of stator windings and shorted-turn of rotor windings in operating large turbine generator. The maximum PD magnitude(Qm), normalized quantity number(NQN), PD pattern and shorted-turn were measured using on-line insulation condition monitoring system. The NQN and Qm of slot PD side in the phase A are indicated the highest value in six SSC sensors. Monitoring system results showed that discharge at conductor surface and internal discharge were detected at the surface of stator winding and in voids of the groundwall insulation. Insulation of stator and rotor windings in large turbine generator was judged to be in good condition.

Key Words : generator, stator winding, rotor winding, insulation condition, assessment, PD, shorted-turn

1. 서 론

최근 국내에서 운전중인 대형 스팀터빈 발전기 고정자 권선에서 절연열화로 인해 절연파괴가 연속적으로 발생하고 있다. 제작할 때 양수발전-전동기 고정자 철심의 부적절한 조임, 대형 스팀터빈 발전기 단말권선(endwinding)을 상호 연결하는 용접부에서 냉각수 누설에 의한 흡습의 영향 및 장기적으로 운전함에 따라 열적, 전기적 및 기계적인 복합열화로 인한 절연열화가 주요한 원인으로 판명되었다[1, 2]. 열적 열화로 인해 마이카 테이프 사이의 결합력 감소로 에폭시 리치(rich) 영역에서 보이드(void) 발생, 전기적 열화로 인한 마이카 테이프 내부에서 크랙(crack)과 보이드 형성, 기계적인 진동에 의해 고정자 권선 이동으로 야기되는 마모 및 기계적인 스트레스(stress)를 많이 받고 있는 슬롯 출구의 취약부에서 절연열화가 진행된다. 그러나 대형 스팀터빈 발전기는 수소냉각을 사용하기 때문에 고압전동기에 비해 환경적인 열화는 거의 받지 않고 있다.

발전소에서 운전중인 발전기의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고, 단시간에 복구가 곤란하기 때문에 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다. 네델란드(Netherland)에서는 1983년부터 1997년까지 15년 동안 689대의 발전기에서 사고가 발생하였으며, 35%가 발전기 운전중에 고정자 권선의 절연열화로 인한 사고로 판명되었다 [3]. 미국 EPRI는 정격전압이 2.3kV 이상의 대용량 전동기가 설치되어 운전중인 발전소에서 7,500대를 조사한 결과,

37%는 고정자 권선에서 절연파괴가 발생한 것으로 발표하였다[4]. 또한, 발전기 회전자 권선에서 절연파괴가 10%로 나타나 고정자 권선과 회전자 권선에서 절연파괴가 50%정도를 차지하고 있다. 따라서 대형 스팀터빈 발전기 고정자 권선과 회전자 권선의 절연열화 상태를 실시간으로 진단하여 이상여부를 상시 감시하는 시스템이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 20년 이상 운전한 대형 스팀터빈 발전기(500MW, 22kV)의 고정자 권선과 회전자 권선의 절연열화 상태를 운전중에 감시하기 위해 고정자 권선에 SSC(stator slot coupler) 센서와 회전자 권선의 층간단락을 측정하는 자속감지기(flux probe) 센서를 설치하고 그 결과를 분석하였다. 실제로 운전중에 대형 스팀터빈 발전기 고정자 권선과 회전자 권선의 절연상태를 분석한 결과 모두 양호하게 나타났다.

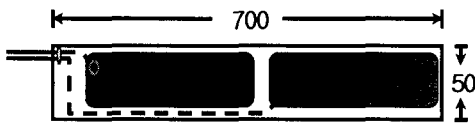
2. SSC 센서

그림 1은 SSC 센서(IRIS) 내부를 나타냈으며, 센서 크기는 두께 2mm, 폭 50mm 및 길이 700mm이다. 부분방전(partial discharge ; PD)에 의해 전자파(electromagnetic wave)가 발생되면 SSC는 안테나와 같기 때문에 전자파의 진행에 따른 시간차(time of arrival)에 의해 측정한다. 발생된 두개의 신호를 양끝에서 다시 두개의 동축케이블(RG-178)을 통하여 단말권선 방전(endwinding discharge)과 슬롯방전(slot discharge)으로 구별할 수 있다. SSC는 4kV이상의 발전기, 조상기 및 대형 고압전동기에 설치가 가능하다. SSC의 차단 주파수(cut-off frequency)의 특성은 10MHz에서 1GHz까지이며, 특성 임피던스는 50Ω이다. 정지중에 부분방전 측정기를 사용하여 측정된 부분방전 크기가 20pC일 경우에 SSC로 환산하면 크기가 약 1mV 정도가 된다.

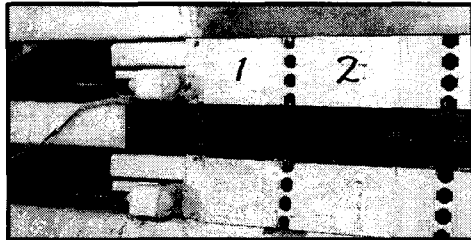
* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員 · 工 博

接受日字 : 2004年 1月 26日

最終完了 : 2004年 4月 23日



(a) SSC의 구조



(b) SSC

그림 1. SSC 센서

Fig. 1. SSC sensor

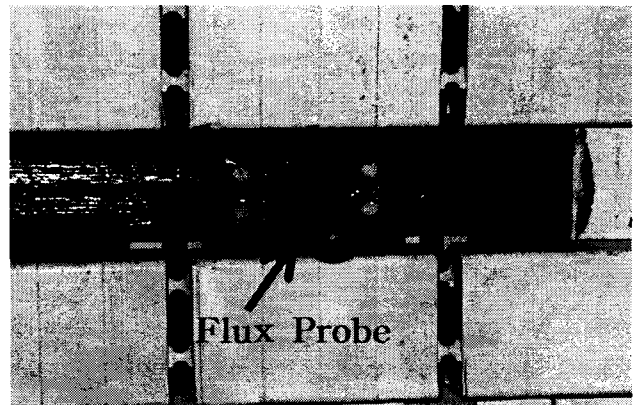


그림 2. Flux probe 센서

Fig. 2. Flux probe sensor

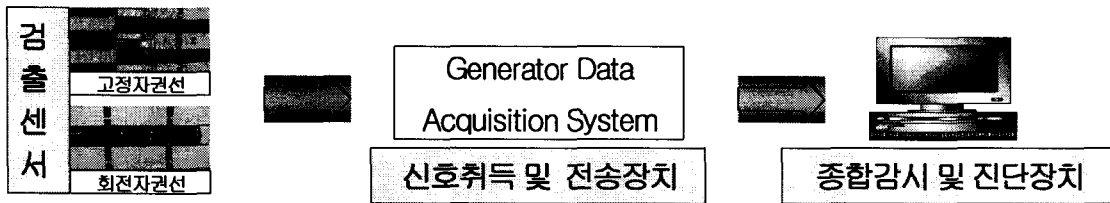


그림 3. 발전기 운전중 절연감시 시스템의 구성도

Fig. 3. A structure of on-line insulation monitoring system

3. 센서 설치

SSC 센서는 발전기 고정자 권선 웨지(wedge) 하부에 각 상당 2개씩 총 6개를 설치하였다. SSC 센서의 폭은 사전에 발전기 웨지 크기에 맞추어 설계하여 제작되었으며, 한 개의 SSC 센서를 설치하기 위해서는 엔드(end) 웨지로 부터 4개의 웨지를 제거해야 한다. 새로운 웨지를 설계할 때 SSC의 두께를 고려하여 1mm 작게 제작하고 나머지 1mm는 필러(filler)를 사용하여 조정한다. 기존의 웨지와 필러를 제거한 후 SSC 센서의 끝단을 절단하여 제거된웨지의 총길이에 일치시킨다. SSC 센서를 설치하고 새롭게 제작된 웨지와 엔드 웨지를 사용하였다. SSC 센서에서 인출되는 동축케이블은 철심(core) 홈 사이에 넣고 실리콘(silicon)으로 부착하여 고정자 진동에 의해 권선 고압부와 접촉되지 않도록 확고하게 설치하였다. SSC 센서의 동축케이블을 안전하게 인출하기 위해 관통 키트(penetration kit)를 사용하였다. 관통 키트는 발전기 하부에 설치하고 보호를 위해 단자박스(termination box)를 제작하였다. 단자박스는 SSC 센서에서 인출된 신호선과 발전소내 변성기 단자에서 인출된 기준전원(reference power)선을 연결하였다.

그림 2에서 나타난 바와 같이 발전기 회전자 권선의 층간 단락 상태를 측정하는 자속감지기(flux probe, IRIS) 센서는 리테이닝(retaining ring)에서 30cm 되는 고정자 웨지 상부에 설치하였다. 회전자를 외부로 인출할 때 회전자 끝단의 흔들림으로 인해 자속감지기를 손상시킬 위험이 있어 웨지를 1mm 정도 가공하였다. 자속감지기로부터 인출된 동축케이블을 발전기 케이싱을 통해 외부로 연결하기 위해 드릴

(drill)을 사용하여 발전기 하부에 5mm 정도의 홀(hole)을 가공하였다. 홀을 완전히 밀폐하기 위해 특수 장치인 그랜드 세트(gland set)를 사용하여 용접하였다.

4. 발전기 운전중 절연감시 시스템 구성

그림 3은 발전기 운전중 절연감시 시스템의 전체적인 구성도를 나타냈다. 발전기 내부에 설치된 고정자 권선의 부분방전과 회전자 권선의 층간단락을 측정하는 SSC와 자속감지기 센서, 발전기 데이터 수집시스템의 하드웨어와 소프트웨어 및 절연감시 시스템으로 구성되어 있다. 발전기 데이터 수집시스템은 고정자 권선의 부분방전을 측정하는 TurboGuard (IRIS)와 회전자 권선의 층간단락 상태를 감지하는 FluxTrac(IRIS)으로 분류할 수 있다.

TurboGuard는 SSC 센서로부터 받는 신호가 미세하기 때문에 발전기 관통 키트에서 거리가 2.5m 이내에 설치하였다. 발전기 운전상태를 확인하기 위해 계전기실(relay room)로부터 변성기 신호, 발전기 전압, 유효전력, 무효전력 및 고정자 권선 온도 등의 보조 신호를 받아 TurboGuard에 연결하였다. TurboGuard의 전원은 전동기 제어함으로부터 110V를 인가받아 현장 판넬을 통하여 공급하였으며, 절연감시 시스템까지는 LAN 케이블을 사용하였다. LAN 케이블은 플렉시블 호스(flexible hose), 전선관 및 기존 트레이(tray)를 사용하여 절연감시 시스템까지 설치하였다. 또한, 자속감지기

센서로부터 입력된 신호는 FluxTrac를 통해 RS485 통신으로 절연감시 시스템까지 연결하였다. FluxTrac은 데이터를 저장할 수 없고 자속감지기로부터 받은 신호를 분석하여 절연감시 시스템으로 송신하는 역할을 한다.

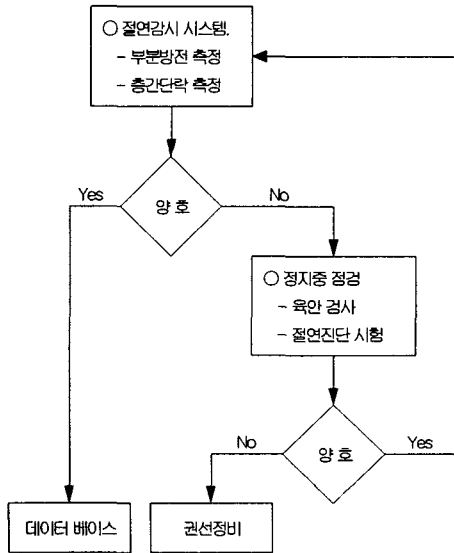


그림 4. 절연감시 시스템의 업무 흐름도
Fig. 4. Flowchart of insulation monitoring system

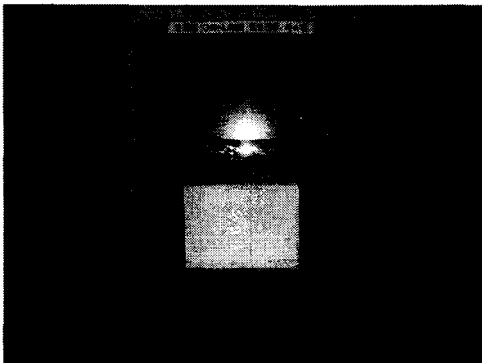


그림 5. 발전기 운전중 절연감시 시스템
Fig. 5. On-line insulation monitoring system of generator

그림 4는 절연감시 시스템의 업무 흐름도를 나타냈으며, 그림 3의 종합감시 및 진단장치에서 고정자 권선의 부분방전과 회전자 권선의 충전단락을 각각 측정하여 결과가 양호하면 데이터베이스에 저장된다. 그러나 정해진 기준값 보다 지속적으로 높게 나타나면, 발전기를 정지하여 육안점검과 정지중 절연진단을 통해 이상여부를 신속하게 판정해야 한다. 분석 결과 절연열화로 판정되면 권선을 정비하고, 양호하면 발전기를 다시 운전할 수 있다.

그림 5는 계전기실에 설치된 발전기 운전중 절연감시 시스템을 나타냈다. 발전기 고정자 권선의 부분방전과 회전자 권선의 충전단락 상태를 각각의 모니터를 통해 모든 데이터를 감시할 수 있다. 따라서 각각의 절연감시 시스템에서 발전기 고정자 권선과 회전자 권선의 건전성과 절연열화 상태를 실시간으로 분석이 가능하다. 절연감시 시스템은 고정자 권선에서 전체적인 방전활동을 파악하기 위해 NQN(normalized quantity number), Qm(maximum PD magnitude)

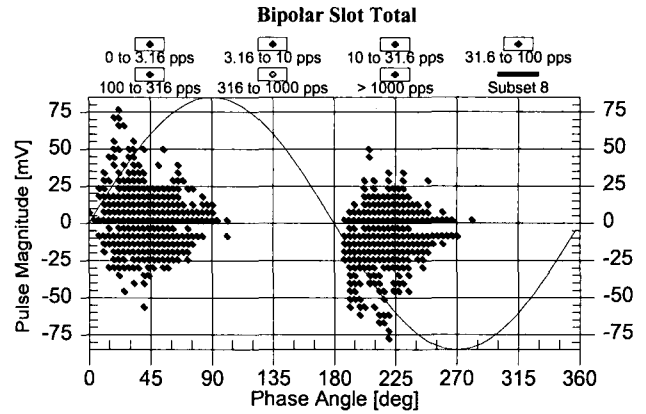
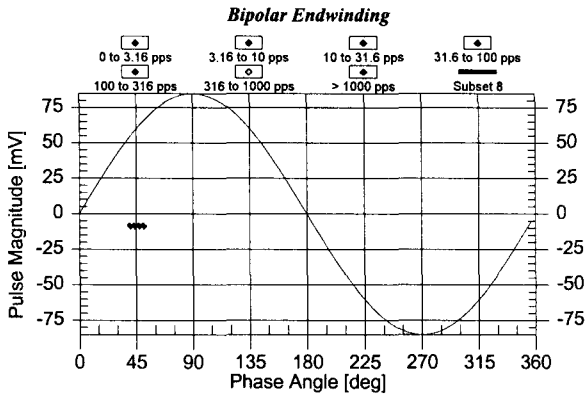
및 위상 등을 2차원과 3차원 해석이 가능하며, 트렌드(trend)를 분석함으로써 절연파괴를 사전에 예측할 수 있다. 특히, 2차원과 3차원 분석을 통해 부분방전 패턴 등을 확인할 수 있다. 부분방전 패턴은 결합 위치에 따라 내부방전, 슬롯방전, 표면방전 및 트리잉방전 등 여러 가지 형태로 발생한다. 모든 데이터를 원하는 시간별로 트렌드를 관리할 수 있고 경보치를 입력하여 설정값이상에서 경보를 발생시킨다. 그리고 Plant LAN을 통하여 다른 사무실에서도 PC로 연결하여 발전기의 모든 데이터를 확인할 수 있다.

5. 시험결과 및 고찰

표 1은 6개의 부분방전센서로부터 절연감시 시스템에 의해 측정된 NQN, Qm 및 부분방전 패턴 등을 나타내었다. 도체표면에서 방전(discharge at conductor surface)은 A상 S35와 C상 S21 센서 단말권선측에서 측정되었다. 표 1과 그림 6에서 보인 바와 같이 도체표면에서 방전은 정극성 펄스(positive pulse)에 비해 부극성 펄스(negative pulse)가 우세하게 나타난다. 도체표면에서 방전은 주절연과 소선절연 사이의 미소 공극(void)에 의해 발생하며, 함침 바니쉬나 수지에 의해 완전히 채워지지 않은 소선 사이와 전이된 소선의 교차점에서 형성된다. 미소 공극은 운전중에 열적 싸이클에 의해 역시 발생되고 주절연에서 분리된 동도체에서도 야기된다. 미소 공극에 의해 발생한 부분방전은 전기적 트리로 진전되며, 주절연, 소선절연 및 턴절연을 마모시키고 소선-소선, 턴-턴 사이를 단락시킨다[5].

표 1. 발전기 고정자 권선의 NQN, Qm 및 부분방전 패턴
Table 1. NQN, Qm and PD pattern of generator stator windings

발전기	NQN, Qm		부분방전 패턴			
	Endwind-ing PD	Slot PD	Endwind-ing PD	Slot PD		
A/S8	NQN	+	23	58	내부방전	내부방전
		-	37	61		
	Qm	+	14	29		
		-	18	29		
A/S35	NQN	+	3	9	도체표면에서 방전	내부방전
		-	7	10		
	Qm	+	0	7		
		-	5	8		
B/S7	NQN	+	0	42	-	내부방전
		-	1	51		
	Qm	+	0	22		
		-	0	25		
B/S22	NQN	+	50	0	내부방전	-
		-	54	0		
	Qm	+	27	0		
		-	27	0		
C/S21	NQN	+	3	3	도체표면에서 방전	내부방전
		-	5	2		
	Qm	+	0	0		
		-	4	0		
C/S36	NQN	+	40	0	내부방전	-
		-	41	0		
	Qm	+	22	0		
		-	21	0		

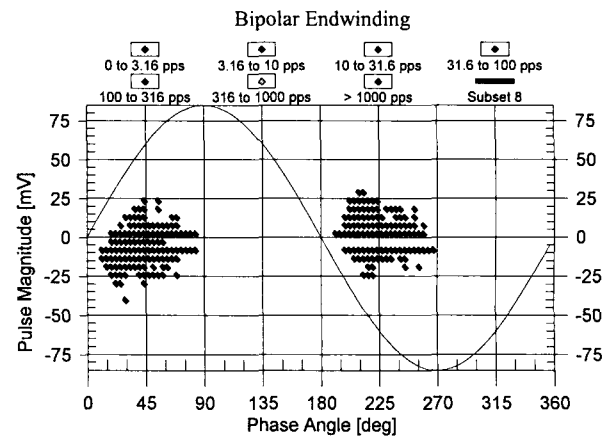


A상 S35의 단말권선측
그림 6. 도체표면에서 방전

(a) A상 S8의 슬롯측

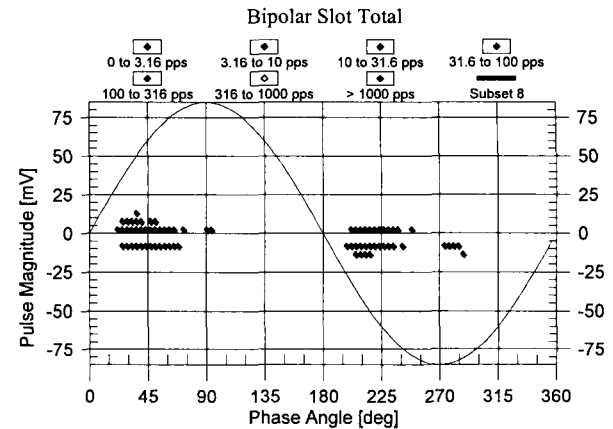
Fig. 6. Discharge at conductor surface

도체의 면은 항상 이상적이지 못하고 작은 각이나 곡선으로 이루어져 굴곡사이의 공기층은 도체표면에서 방전을 발생시킬 수 있으며, 몇 만 kW급의 초대형 회전기에서는 전계를 균일화시키기 위해 모서리 부분의 작은 각 또는 곡선부에 절연을 하기 전에 그래파이트(graphite) 같은 도전재료를 넣은 수지를 도포하여 표면을 매끈하고 평평하게 하고 있다. 그러나 중, 대형 회전기의 경우 이 정도의 굴곡은 진공가압함침(vacuum pressure impregnation) 처리로 완벽하게 보완됨으로 별도의 처리는 하지 않는다[6].



(b) B상 S22의 단말권선측

내부방전(internal discharge)은 B상 S22, C상 S36 센서의 단말권선측과 A상 S8, S35, B상 S7 및 C상 S21 슬롯측에서 측정되었다. 표 1과 그림 7에서 보인 바와 같이 정극성 PD와 부극성 PD가 거의 동일하기 때문에 부분방전 패턴이 내부방전으로 분석되었다. 내부방전은 제작할 때 바니쉬나 수지의 부적절한 함침 혹은 절연층의 박리와 같이 열화과정에 의해 발생한다. 장기간 운전에 따라 주로 열적 및 전기적 열화에 의해 주절연 사이의 계면에서 보이드가 만들어진다[6]. 부분방전 크기가 A상 S8의 슬롯측과 B상 S22의 단말권선측은 그림 7(a)에서 나타낸 바와 같이 거의 유사하고 가장 크게 분석되었다. 그림 7(b), (c)에서 나타낸 바와 같이 B상 S7의 슬롯측과 C상 S36의 단말권선측, A상 S8의 단말권선과 A상 S35의 슬롯측이 모두 유사하게 분석되었다. 마이카/에폭시 복합재료를 사용하는 발전기 고정자 권선인 경우에 $NQN > 150$, $Q_m > 100mV$ 이상이면 절연열화로 판정하고 있다[6]. 실제로 발전기에서 측정된 NQN 과 Q_m 의 크기가 각각 61, 29mV이하로 분석되어 고정자 권선의 절연상태는 삼상 모두 양호하게 평가되었다. 경보는 현재 측정값의 1.5배 이상이면 1차 경보, 2배 이상이면 2차 경보가 발생하도록 설정하였다. 2차 경보가 발생하고 트렌드 결과가 지속적으로 높게 나타나면, 발전기를 정지하여 육안점검과 정지중 절연진단을 통해 이상여부를 신속하게 판정해야 한다.



(c) A상 S35의 슬롯측

슬롯방전(slot discharge)은 도체표면에서 방전과는 대조적으로 부극성 펄스에 비해 정극성 펄스가 크게 나타난다. 주절연과 슬롯의 상대적인 움직임으로 인해 반도체 코팅(semiconducting coating)이 손상됨에 따라 일부 주절연의 접지상태는 나빠지고 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에서 슬롯방전을 일으킨다[6].

그림 7. 내부방전
Fig. 7. Internal discharge

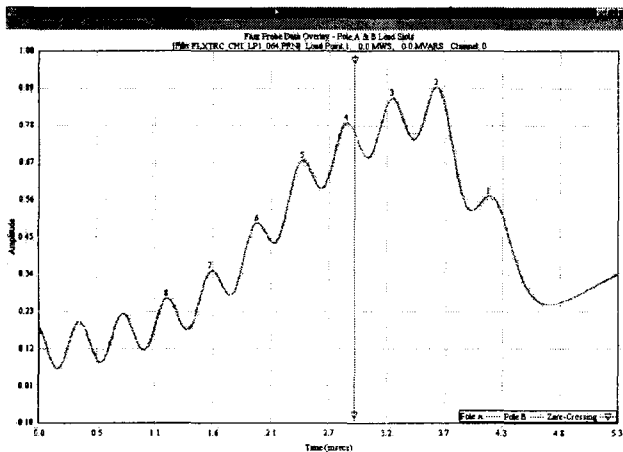
발전기 회전자 권선의 1번 권선은 5턴이며, 2~8번 권선은 모두 6턴으로 구성되어 있다. 자속감지기는 발전기 회전자 권선 슬롯의 누설자속을 감지하는 센서로서 발전기 고정자 권선의 웻지에 설치된다. 자속감지기는 각각의 회전자 권선에서 발생하는 자속의 변화에 상응하는 전압을 유기하여 파형으로 나타낸다. 최대 자속밀도는 각 극의 leading edge 권선에 의해 발생되며, 극에서 멀어질수록 자속밀도의 크기는 점차적으로 작아진다. 전압파형의 크기는 회전자 슬

롯 주위의 누설자속 분포를 나타내며, 층간단락된 권선이 존재하는 슬롯에서 파형의 크기가 감소하므로 파형 분석을 통해 층간단락이 발생한 권선의 번호와 턴수 등을 알 수 있다. 층간단락 발생 유무 판정은 측정 자속의 편차율에 의해 분석하며, 편차율은 회전자 권선의 N극과 S극 사이의 차이를 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 1번 권선은 5턴, 2~8번 권선은 모두 6턴임으로 편차율이 각각 20%, 17%이상이면 한 개의 턴에서 층간단락이 발생한 것으로 판정한다. 따라서 표 2와 그림 8(a), (b)에서 나타낸 바와 같이 N극과 S극이 상호 일치하여 편차율이 매우 낮기 때문에 발전기 회전자 권선 8개의 모든 턴에서 절연상태가 양호하게 분석되었다. 그러나 층간단락이 발생한 다른 발전기는 표 3과 그림 9(a), (b)에서 나타낸 바와 같이 N극과 S극이 3번 권선에서 가장 높은 차이를 보이고 있다. 실제로 발전기 회전자 권선의 1~7번 권선은 모두 7턴임으로 편차율이 14.3%이상이면 한 개의 턴에서 층간단락이 발생한 것으로 판정한다. 다른 권선의 편차율이 1.1~3.3%로 낮게 나타났지만 3번 권선의 편차율이 10.9%로 측정되어 대략 한 개의 턴에서 층간단락이 발생한 것으로 판정할 수 있다. 회전자 총권선중에 전체적인 층간단락 발생율이 5%이상이면 요주의, 10%이상이면 정비가 필요하다. 발전기 회전자 권선의 층간단락 발생율이 10%이상일 때 여자기 계통의 과열, 성능저하 및 진동증가 등으로 인해 점검과 정비를 수행해야만 한다[7].

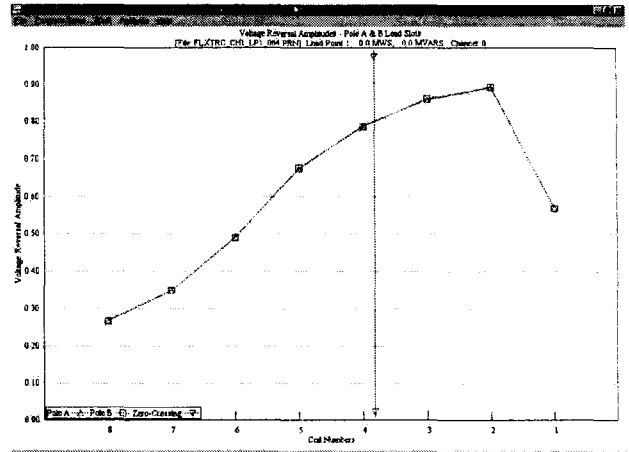
표 2. 층간단락이 없는 발전기의 전압 크기

Table 2. Voltage amplitude of generator without shorted turn

권선 번호	턴수	N극	S극	N/S	편차율(%)		분석결과
					측정치	기준치	
1	5	0.575	0.573	1.003	0.3	20	양호
2	6	0.900	0.899	1.001	0.1	17	양호
3	6	0.865	0.867	0.998	0.2	17	양호
4	6	0.798	0.793	1.007	0.7	17	양호
5	6	0.684	0.685	0.999	0.1	17	양호
6	6	0.499	0.500	0.998	0.2	17	양호
7	6	0.355	0.357	0.996	0.4	17	양호
8	6	0.274	0.274	0.000	0.0	17	양호



(a) N극과 S극 사이의 파형



(b) 전압크기와 권선수 사이의 관계

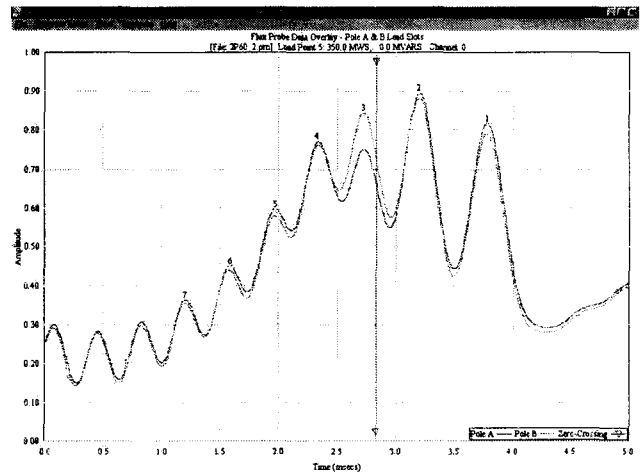
그림 8. 발전기 회전자 권선이 건전한 상태

Fig. 8. The healthy condition of generator rotor windings

표 3. 층간단락이 발생된 발전기의 전압 크기

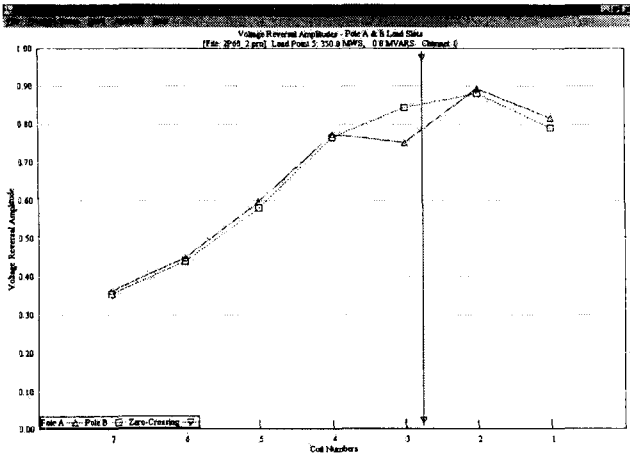
Table 3. Voltage amplitude of shorted turn generator

권선 번호	턴수	N극	S극	N/S	편차율(%)		분석결과
					측정치	기준치	
1	7	0.822	0.796	1.033	3.3	14.3	양호
2	7	0.900	0.887	1.014	1.4	14.3	양호
3	7	0.757	0.850	0.891	10.9	14.3	단락
4	7	0.778	0.769	1.011	1.1	14.3	양호
5	7	0.601	0.583	1.030	3.0	14.3	양호
6	7	0.453	0.444	1.020	2.0	14.3	양호
7	7	0.366	0.357	1.025	2.5	14.3	양호



(a) N극과 S극 사이의 파형

참 고 문 헌



(b) 전압크기와 권선수 사이의 관계

그림 9. 발전기 회전자 권선에서 층간단락 발생
 Fig. 9. Shorted turn of generator rotor windings

6. 결 론

발전기 운전중에 고정자 권선의 NQN과 Qm의 크기가 각각 61, 29mV이하로 측정되어 고정자 권선의 절연상태는 삼상 모두 양호하게 평가되었다. 부분방전 크기는 A상 S8의 슬롯측과 B상 S22의 단말권선측에서 가장 크게 분석되었다. 부분방전 패턴은 도체표면에서 방전과 내부방전으로 분석되었으며, 도체표면에서 방전은 동도체와 주절연재료 사이에서 보이드, 내부방전은 주절연재료 내부에서 보이드가 발생되고 있음을 확인할 수 있었다. 운전중에 부분방전 크기와 패턴을 측정함으로써 보이드와 같은 결함요소를 분석하여 절연열화 정도를 평가할 수 있다. 운전중에 발전기 회전자 권선에서 층간단락이 발생한 권선 번호와 턴수를 정확하게 분석이 가능하며, 발전기 회전자 권선의 층간단락 정도를 측정한 결과 모든 권선에서 양호하게 분석되었다. 따라서 발전기 운전중 절연감시 시스템은 절연열화 상태를 실시간 트렌드로 분석하여 사전에 예측정비를 수행함으로써 절연파괴에 의한 돌발적인 고장 억제, 설비의 운전 신뢰성 향상 및 고장으로 인한 경제적인 손실 감소 등에 크게 기여할 것으로 판단되었다.

- [1] 김희동, “발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석”, 한국전기전자재료학회 논문지, Vol. 15, No. 2, pp. 119~126, 2002.
- [2] 김희동, 주영호, “고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성”, 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 513~517, 1999.
- [3] A. J. M. Pemen and J. W. Noteboom, “Life Extension and Condition Monitoring of Generator”, IERE Workshop, pp. 1~5, 1997.
- [4] G. Stone and J. Kapler, “Stator Winding Monitoring”, IEEE Industry Applications Magazine, pp. 15~20, 1998.
- [5] I. M Culbert, H. Dhirani, and G. C. Stone, Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI, EL-5036, Vol. 16, pp. 3-25~3-28, 5-13~5-14, 1989.
- [6] G. C. Stone, Partial Discharge Seminar, Iris Power Engineering Inc., Vol. 1, pp. 56~78, 2001.
- [7] D. R. Albright, Interturn Short-Circuit Detection, Generatortech. Inc., pp. 1~8, 1993.

저 자 소 개



김희동 (金熙東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년 일본 큐슈공업대학 초빙연구원. 현재 한전 전력연구원 선임연구원
 Tel : 042-865-5261
 Fax : 042-865-5304
 E-mail : hdkim@kepri.re.kr