

발전기 운전중 회전자 진단기법 개발 동향

이 영 준

한국전력공사 전력연구원 발전연구실 선임과장

1. 머리말

전력수요의 급격한 증가와 더불어 '90년대 초부터 신규로 건설 및 가동되고 있는 발전소의 많은 부분을 복합화력발전소가 점유하고 있다. 이들 복합화력발전소의 발전기들은 많은 장점에도 불구하고 일일기동정지 및 빈번한 출력 증감발로 인하여 여타 기력이나 원자력발전기들보다 가혹한 운전여건으로 인하여 운전중 불시정지 우려가 상존하고 있으며, 특히 최근에 발전기 회전자에 의한 고장발생이 증가하는 추세에 있다. 특히 발전기 회전자 권선의 층간단락은 발전기 정상운전중 출력제한, 진동발생, 성능 저하 등 비정상적인 운전의 원인이 되며, 심한 경우 불시정지 및 장기간 정비를 요하는 고장을 일으키기도 한다.

발전기 회전자 권선은 각각의 슬롯 내에 적층된 개별권선 사이에 층간단락이 발생하면 자속의 불평형과 비대칭적인 발현으로 인하여 진동의 변화를 일으킨다. 따라서 이러한 비정상적인 운전의 예방과 고가의 권선 교체비용이 요구되는 심각한 절연파괴가 발생하기 이전에 회전자 권선의 층간단락 정도를 진단하여 효율적인 정비계획 수립을 위한 진단기법의 연구가 활발히 진행되고 있다.

발전기 회전자 권선의 층간단락 진단기법으로는 크게 정지중(off-line) 진단기법과 운전중(on-line) 진단기법으로 구분할 수 있다. 정지중 진단기법으로는 절연저항, 성극지수 및 분담전압 등을 측정하는데, 발전기의 운전정지가 필수적이며 효과적으로 단락현상을 찾아내기가 쉽지 않다. 이에 반해 운전중 진단기법은 발전기의 정지 없이 정상운전중 진단이 가능하다는 큰 장점을 가지고 있으며, 회전자 권선의 층간단락은 주로 발전기 운전중에 원심력 작용에 의해 나타나는 경우가

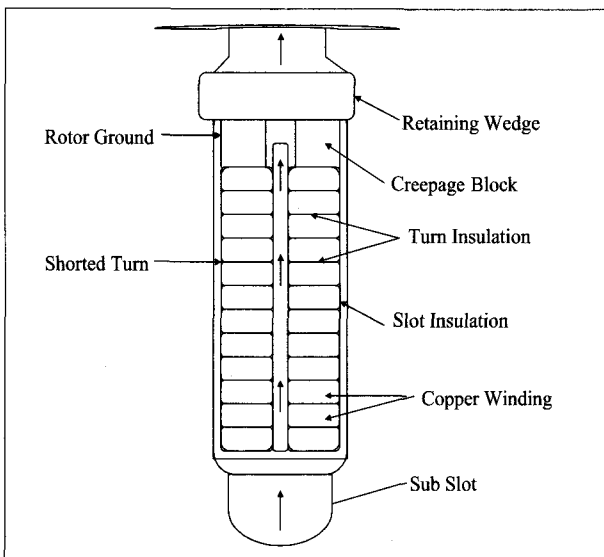
많아 진단의 신뢰성 면에서도 매우 탁월한 방법이다.

본고에서는 발전기 회전자 권선의 층간단락 현상 및 층간단락 발생시에 나타나는 현상에 대하여 알아보고, 현재 북미를 비롯한 선진국에서 보편화되어 현장에서 사용하고 있는 Flux Probe(Air-Gap Search Coil) 및 진단시스템을 이용한 운전중 진단기법에 대하여 소개하고, 실제 국내 현장 발전기에 대한 회전자 층간단락 진단시험의 결과를 분석 및 고찰하였다.

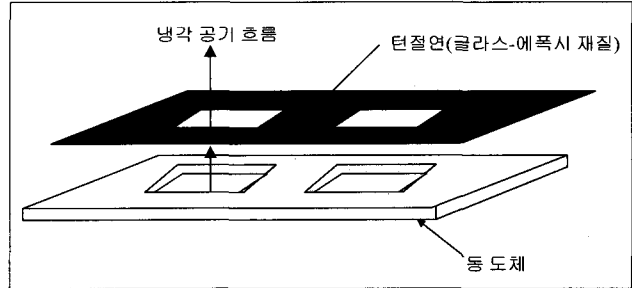
2. 발전기 회전자 권선

가. 구조 및 절연재료

발전기 회전자는 강(鋼)제의 원통형으로 단조시켜 슬롯을 만들고 슬롯절연, 턴절연 및 동도체로 구성된 권선을 집중권선 방식으로 삽입한 후 Retaining Ring을 사용하여 양쪽 끝을 고정시킨다. 그림 1은 회전자 권선의 슬롯 단면도와 구조를 나타냈으며, 슬롯 내의 권선은 대략 7~18개 정도의 동도체로 이루어져 있다. 각각의 동도체



〈그림 1〉 회전자 권선의 슬롯 단면도



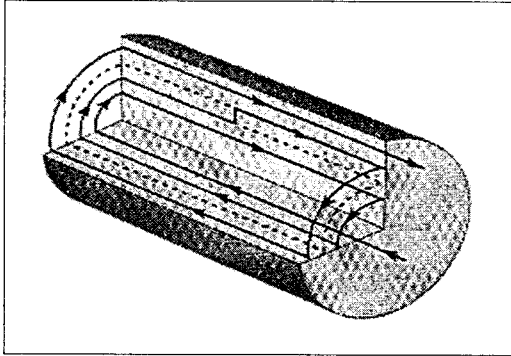
〈그림 2〉 동도체와의 턴절연

사이에는 그림 2와 같이 턴절연에 의하여 분리되어 있고, 슬롯절연에 의해 회전자 몸체와도 분리되어 있다. 턴절연의 재질은 글라스(Glass)/에폭시(Epoxy) 복합재료, 글라스/폴리에스터(Polyester) 복합재료 및 Nomex 등으로 구성되어 있고 수지(Resin)의 함유량이 43% 정도이며, 두께는 0.3~0.5mm의 테이프 형태로 제작하고 있다. 발전기 회전자 권선의 절연재료는 높은 원심력 및 인접 권선으로부터 가열됨으로 충분한 기계적 강도와 내열 특성을 갖고 있어야 한다. 따라서 발전기 회전자 권선 절연재료는 원심력을 감소시키기 위해 최대한 얇고 가벼운 재료를 사용한다.

나. 층간단락 현상

발전기 회전자 계자권선의 층간단락은 회전자 슬롯내의 개별권선 사이의 접촉에 의해 나타난다. 비대칭적으로 발생한 층간단락, 즉 N, S극 중 어느 한쪽 극에서 단락이 발생되었을 경우 비대칭적인 발열이 회전자에서 발생되며 이로 인하여 회전자의 휘어짐 현상이 발생한다. 이러한 휘어짐 현상은 여자전류의 변화와 함께 회전자의 불평형, 즉 축진동의 변화를 일으킨다. 그러나 이러한 축진동의 발생이 회전자 권선의 단락에 의한 것인지를 판단하기란 그리 쉽지는 않다.

그림 3은 회전자 권선에 층간단락이 발생되었을 경우의 영향을 나타내 주는 것으로서 단락 발생에 따라 전류가



〈그림 3〉 단락에 의한 회전자 권선 수의 감소

권선 전체에 흐르는 것이 아니라 일부 by-pass 됨을 보여준다. 즉 회전자 권선 수의 감소를 의미한다.

발전기 회전자 계자권선의 층간단락은 드물게 일어나는 현상으로 이 경우 정비를 필요로 한다. 특별한 경우에 층간단락 현상이 자발적으로 사라지는 경우가 있는데 이것은 절연상태가 호전된 것이 아니라 더 나빠질 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 단락, 특히 여러 지점에서 단락이 발생되었다는 것은 회전자 권선의 경제수명이 다 되었다는 것을 의미한다.

회전자 계자권선의 층간단락 발생으로 발전기 운전중에 나타날 수 있는 현상은 다음과 같다.

(1) 여자전류 변화에 따른 회전자 불평형

층간단락이 발생한 슬롯에서는 권선전류가 단락된 경로를 통해 흐르기 때문에 비대칭적으로 발열손실이 발생하며, 이는 I^2R 손실이다. 회전자의 온도변화는 회전자의 휘어짐 현상을 일으키며, 이는 층간단락의 발생수 및 위치에 따라 달라진다. 극에서 먼지점에서의 층간단락은 적은 영향을 주며, 극에 가까운 권선에서 발생한 층간단락은 회전자 불평형을 크게 일으킨다. 이는 회전자 발열이 비대칭적으로 일어나기 때문이다.

(2) 동일부하에서 더 많은 여자전류를 필요로 한다

층간단락 발생시 일정부하 유지를 위해서는 높은 여자

전류가 요구된다. 여자용량에는 한계가 있기 때문에 회전자 권선의 5~10% 보다 더 많은 층간단락은 매우 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

전류와 계자권선과의 관계는 $As = AnTn/Ts$ 이며 As , Ts 는 층간단락이 발생된 회전자의 계자전류와 Turn 수이다. 일정부하에서 계자권선의 손실(I^2R)은 다음에 따라 결정된다. 계자권선의 저항은 Ts/Tn 에 의해 감소되나 I^2 요소는 $(Tn/Ts)^2$ 에 의해 증가한다.

예를 들어 5000kW 여자시스템의 100개의 Turn중 2개의 Turn에서 단락이 발생한 경우 대략 전부하에서 100kW 정도의 손실이 증가한다.

$$I_s^2 = (I_n^2 R_n) (T_n / T_s) = (5000kW)(100/98) = 5102kW$$

(3) 높은 여자전류는 발전기 운전온도를 상승시킨다

층간단락이 발생하면 더 많은 여자전류가 흐르기 때문에 권선온도는 층간단락이 발생치 않은 경우보다 높게 상승한다. 이러한 온도상승은 I^2 에 비례하며, 100 Turn 중 2개의 Turn 단락은 4% 정도의 온도 상승을 가져온다.

층간단락의 가장 심각한 상황은 회전자 몸체와 소선 사이에 단락이 발생되었을 경우이다. 이러한 경우 큰 전류가 회전자 몸체를 타고 흘러 결국 회전자는 회복하기 힘들 정도의 커다란 손상을 입을 수 있기 때문이다.

북미대륙에서 운전되고 있는 발전기의 50% 이상이 하나 또는 더 많은 층간단락이 발생된 상태에서 운전되고 있다는 통계가 있으며, 새로운 발전기의 회전자 권선에서도 기동정지 피로가 발생하면 층간단락 현상이 나타날 수 있다. 만일 층간단락이 발전기의 안정운전에 영향을 미치지 않는다면 층간단락 해소를 위한 어떠한 조치를 취하는 것은 옳치 않다. 그것은 회전자 정비를 위해 인·출입시 더 많은 층간단락을 발생시킬 소지가 있기 때문이다.

3. On-line 충전단락 진단기법

가. Flux Probe

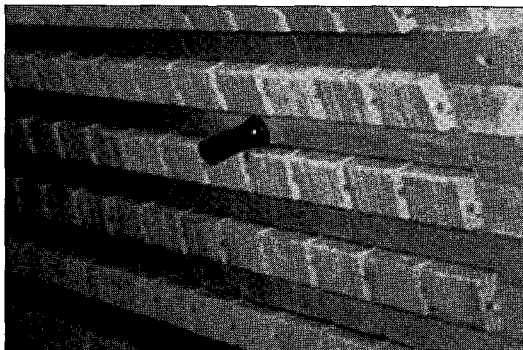
Flux Probe(air-gap search coil : 공극 탐지코일)는 발전기의 원통형 회전자 권선의 단락을 감지하는데 사용된다. Flux Probe에서 얻어진 측정치는 단락된 권선과 슬롯을 찾아내고, 또한 단락된 권선의 수를 판단하는 자료를 제공한다.

Flux Probe는 계자권선 슬롯의 누설자속을 감지하는 것으로서 발전기의 고정자와 회전자 사이의 공극에 설치된다. Probe는 회전자의 회전에 의한 자속의 변화에 상응하는 전압을 유기하며, 유기되는 전압은 패러데이(Faraday)의 전자유도법칙에 의해 다음식과 같다.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} [V]$$

즉, 유기되는 전압은 Probe 코일의 권선 수와 슬롯 주변의 누설자속의 함수로서 충전단락이 발생한 슬롯에서는 누설자속이 감소되므로 유기되는 전압값이 전전한 슬롯에 비하여 작게 된다. 따라서 단락된 권선이 있는 두 슬롯은 전압파형의 값이 감소되어 나타나 이 전압파형을 분석하여 단락이 발생한 권선의 위치 및 발생수 등을 알 수 있다.

그림 4는 Permanent Flux Probe의 설치모습으로 Probe의 설계는 발전기 Air-Gap의 길이에 따라 결정되



〈그림 4〉 Flux Probe Installation

며, 또한 Retaining Ring의 외경, 고정자 철심의 내경 등의 상태에 따라 결정된다. Probe Tip은 회전자 표면으로부터 2" 이하에 위치하며, Retaining Ring과 0.5" 정도의 간격을 둔다. 따라서 회전자 인·출입시 상호 간섭되지 않는다. Probe는 발전기 외부 케이싱에 설치되는 제어단자에 연결되며, 이 제어단자를 통하여 Probe로부터의 출력신호를 받는다.

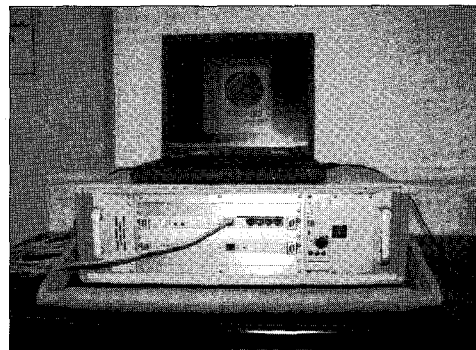
나. 충전단락 진단시스템

(1) 진단시스템(Hardware)

국산화로 개발한 발전기 회전자 충전단락 진단시스템은 크게 센서 출력신호를 수집, 처리하는 데이터 수집시스템(Data Aquisition System), 그리고 충전단락 진단상황을 사용자가 알기쉽게 화면에 나타내주는 Display PC로 구성되었으며, 그림 5는 개발 완료된 진단시스템 실물이다.

(가) 데이터 수집시스템

데이터 수집시스템은 센서 출력신호를 증폭, 처리해 주는 Signal Conditioner, 그리고 DSP Module, CPU Module, Power Supply 등으로 구성되었다. 모든 모듈은 표준 VMEbus로 이루어져 있으며, 6U 크기의 Subrack에 구성되었다. 단락감지 센서로부터의 전압파형 신호를 Signal Conditioner를 통해 필요한 신호만이



〈그림 5〉 충전단락 진단시스템

증폭되어 DSP 및 CPU 모듈로 보내져 단락진단 알고리즘 계산을 통한 시험결과를 Display PC로 보낸다.

(나) 데이터 Display PC

데이터 Display PC는 시험의 편리성을 고려해 이동하기 편한 노트북(Notebook) PC로서 사용자에게 발전기 회전자 권선의 단락상황 등의 정보를 제공한다. Display 화면은 사용자가 직관적으로 인지하기 쉽도록 다양한 그래프와 도표로 표시해 준다.

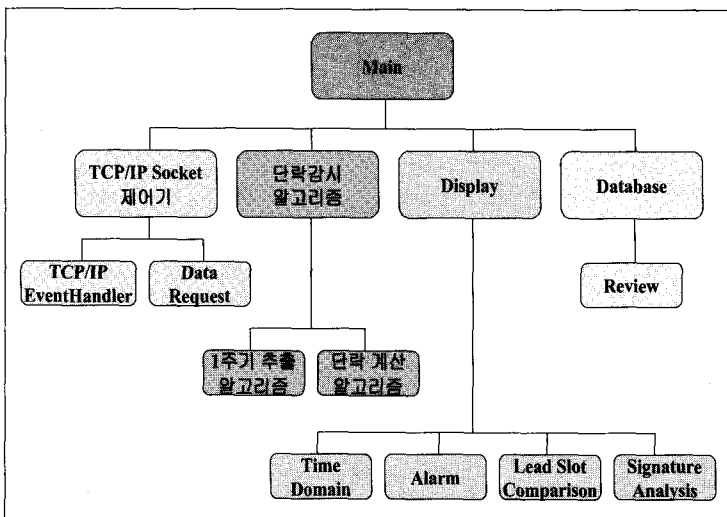
(2) 진단용 소프트웨어(Software)

발전기 회전자 권선의 층간단락을 감지 및 진단하는 소프트웨어는 범용의 PC 환경에서 누구나 손쉽게 사용할 수 있도록 하기 위하여 Windows 98이나 2000에서 사용 가능하도록 하였으며, 여타 Windows 프로그램과 같은 인터페이스(Interface)를 갖도록하여 진단시스템을 사용하는 사람에게 최대한 편의를 제공하도록 하였다. 그림 6에서는 진단용 소프트웨어의 구성도를 나타내었다.

Main은 시스템을 초기화하고 TCP/IP Socket 제어기를 설치한다. TCP/IP Socket 제어기는 Ethernet으

로부터 전송되는 데이터를 수집, 가공, 처리하며 필요한 만큼의 정보가 모이면 단락감시 알고리즘을 호출하도록 되어 있다. 단락감시 알고리즘은 H/W 모듈로부터 전송된 데이터를 이용하여 회전자 권선의 단락상황을 산출하며, Display는 단락감시 알고리즘의 결과를 사용자가 쉽게 인식할 수 있도록 Time Domain, Alarm, Lead Slot Comparison, Signature Analysis 등의 다양한 화면으로 나타내 주며 그림 7과 같다.

그림 7(a)는 단락감지 센서로부터 얻어진 각 극별 전압파형이며, (b)는 각 극별로 전압파형을 겹쳐서 나타내어 사용자가 각 극별로 전압파형의 차이점을 한눈에 알아볼 수 있도록 한 것이며, (c)는 각 극별, 권선별로 전압값의 피크치를 비교한 그래프로서 단락이 발생한 경우 각 극별, 권선별로 편차가 심하게 나타난다. 그림 8(d)는 알람 설정치 이상의 편차가 발생한 경우 알람이 발생하도록 하여 사용자가 경각심을 갖도록 하였다. 이러한 시험결과는 데이터베이스(Database)로 자동 저장되어 시스템 사용자가 필요시 기 시행된 시험결과를 언제든지 살펴볼 수 있도록 하였다.

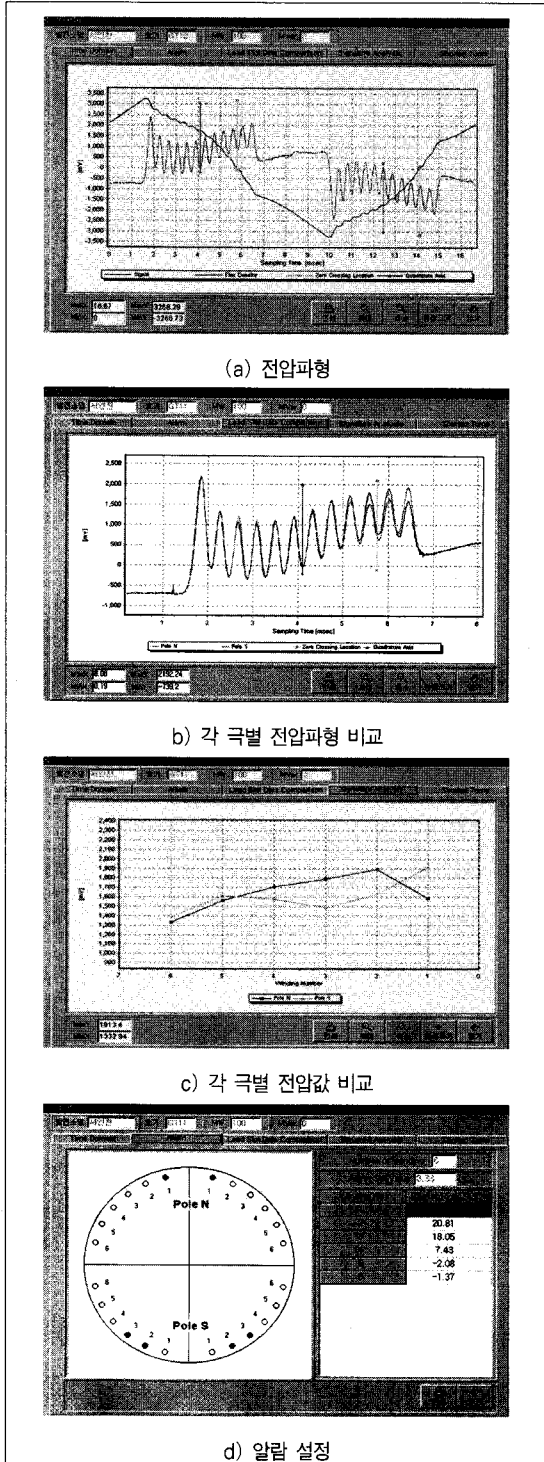


〈그림 6〉 소프트웨어 구성도

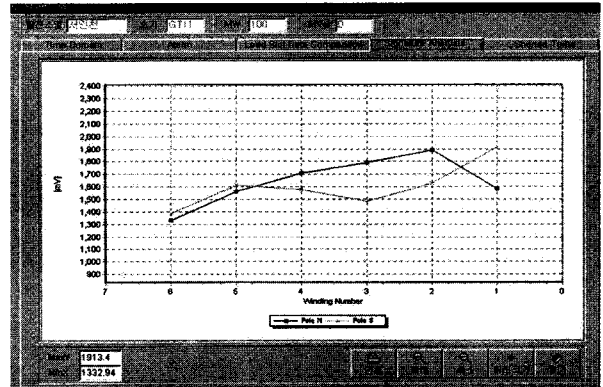
다. On-Line 층간단락 진단

새로운 회전자 권선의 층간단락 감지기술은 발전을 거듭하여 층간단락을 갖는 권선과 그의 영향을 받는 코일의 층간단락 발생 수를 확인할 수 있다. 시험 데이터는 Flux Probe와 진단시스템에 의해 발전기 정상운전중 얻어지며, 시험의 신뢰성을 위해 데이터는 무부하에서 전부하에 이르기까지 다양한 부하대에서 취득한다.

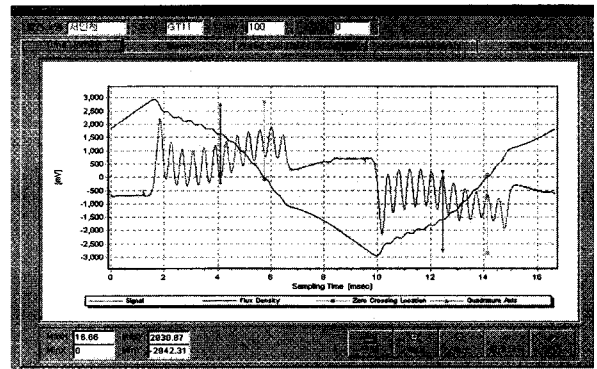
그림 8은 Flux Probe에 의해 회전자 계자 권선의 누설자속이 전압파형으로 유기된 전압파형이며, 그림 9은 전압파형을 분석하여 각 극별, 권선별로 Matching시킨 그래프로 단락



〈그림 7〉 주요 Display 화면



〈그림 8〉 Flux Probe 전압파형



〈그림 9〉 각 극별, 권선별 비교 그래프

이 심하게 발생한 경우 편차가 심하게 나타난다.

회전자 권선의 층간단락 발생수를 계산하는 것은 발전기 회전자의 한 슬롯내에 삽입된 권선의 층 수에 따라 결정된다. 예를 들어 한 슬롯이 12개의 개별 Turn으로 이루어진 경우의 계산방법은 아래와 같다.

표 1과 같이 시험대상 발전기가 12개의 개별 Turn으로 이루어진 경우 3번 권선의 N, S극 전압값의 편차율이 8.5%였다면 이 발전기의 3번 회전자권선의 슬롯 내에는 1개의 층간단락이 존재함을 의미하는 것이다. 또한 N/S극 편차율의 값이 “+”(N극 전압값이 큰 경우)인 경우 층간단락이 S극에서 존재함을 의미하며, “-”(S극 전압값이 큰 경우)인 경우는 층간단락이 N극에서 존재함을 나타낸다.

〈표 1〉 층간단락 발생 수 계산의 예

단락 수	N, S극 전압값의 편차율	단락 수	N, S극 전압값의 편차율
1	1 / 12 = 8.33(%)	7	7 / 12 = 58.33(%)
2	2 / 12 = 16.66(%)	8	8 / 12 = 66.66(%)
3	3 / 12 = 25.00(%)	9	9 / 12 = 75.00(%)
4	4 / 12 = 33.33(%)	10	10 / 12 = 83.33(%)
5	5 / 12 = 41.66(%)	11	11 / 12 = 91.66(%)
6	6 / 12 = 50.00(%)	12	12 / 12 = 100(%)

4. 층간단락 진단시스템을 이용한 현장시험

가. 시험대상 발전기 사양

개발된 회전자 층간단락 진단시스템을 이용하여 단락 감지 센서가 설치되어 있는 국내 최대의 복합화력발전소인 서인천복합화력발전소 가스터빈발전기 5대에 대하여 현장시험을 시행하였으며, 시험대상 발전기의 사양은 표 2와 같다.

〈표 2〉 시험대상 발전기 사양

항 목	규 격	항 목	규 격
정격용량	229,741kVA	회 전 수	3,600 rpm
정격전압	18kV	절연등급	F 종
정격전류	7,369A	냉각방식	수소냉각
역 률	0.9	상업운전	1997
계자전압	375V	제 작 사	G.E (美)
계자전류	1,819A	회전자 권선 수	6 (pole 당)
극 수	2	권선 층수	12

나. 시험방법

시험의 신뢰성을 높이기 위해 데이터 측정은 발전기 기동시부터 전부하에 이르기까지 각 발전기별로 무부하에서부터 전부하에 이르기까지 10MW 단위로 출력을 증발하면서 17가지의 다양한 부하대에서 측정하여 각 부하대별로 측정된 데이터를 분석하여 결과를 판정하였다.

다. 시험결과 및 고찰

발전기 정상운전중 회전자 권선의 층간단락을 정확하게 판정하기 위해 각 호기별(총 5대)로 무부하에서 전부하에 이르기까지 17가지의 다양한 부하대에서 진단시스

〈표 3〉 회전자 층간단락 시험결과

호기	층간단락 발생 Turn 수												층간단락 발생율 (%)	
	Winding Number													
	1		2		3		4		5		6			계
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S			
9	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	4	2.78
10	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	3	2.08
11	3	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	8	5.55
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

템으로 측정된 전압파형을 동시에 분석한 결과는 표 3과 같다. 표 3에서 보는 바와 같이 9, 10, 11호기 발전기는 층간단락이 존재하는 상태로 운전중임을 알 수 있었으며, 12, 14호기 발전기는 매우 건전함을 알 수 있었다. 특히 11호기 발전기의 경우 층간단락 발생률이 전체 회전자 권선의 5.55%를 차지하여 가장 심각함을 알 수 있었다.

5. 맺음말

본고에서는 발전기 정상운전중 회전자 권선의 층간단락 여부를 진단할 수 있는 진단기법을 소개하였고, 진단시스템을 국산화 개발 완료하여 현장 발전기에 대한 실제 층간단락 진단시험을 시행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 발전기 회전자 진단시스템을 이용한 발전기 운전중 회전자 권선의 층간단락 진단시험은 단락이 발생한 권선의 위치 및 발생 수 등을 정확히 판별할 수 있다.
- ② 발전기 회전자 권선에 대한 진단시험을 통해 이상 유무를 사전 진단가능하게 되어 회전자 권선 정비나 재권선을 위한 효율적인 정비계획 수립이 가능하게 되었다.
- ③ 향후 현장의 발전기 회전자 진단시 본고에서 소개한 층간단락 진단시험이 널리 활용될 것으로 기대되며, 진단시스템의 국산화 개발 및 진단기술력 확보를 통해 그 동안 외국업체에 의뢰해 시행할 경우에 발생되었던 고가의 외화 경비를 절감할 수 있게 되었다.