

발전기 회전자 턴 단락 현상에 따른 전자계 특성 해석

조 원영*, 김 병국*, 조 윤현*, 황 돈하**, 강 동식**, 김 용주**
 *동아대학교, **한국전기연구원

Electromagnetic Characteristics Analysis of Generator
 with the shorted turn rotor field winding

*Dept. of Electrical eng., Dong-A University, **KERI

Abstract - Large generators are subject to high mechanical and electrical stress which may lead to deterioration of the insulation. The rotors, in particular, may develop short circuits particularly and there is a need for the operators to be aware of this situation.

In this paper, the electromagnetic characteristics of the generator with shorted turns in rotor field winding is analyzed by FEM and the detection algorithm method of the shorted turn rotor slot position is proposed.

1. 서 론

최근 들어 증가하는 전력 수요를 충족하기 위한 발전소의 증가에 따라 발전기 회전자 내부의 층간 단락 및 권선간 단락으로 인한 고장 발생이 점차 증가하는 추세에 있다. 발전기 회전자 권선의 열화와 손상은 저속과 고속 운전 시에 발생하는 원심력의 차이, 빈번한 기동 정지 및 부하 변동에 따른 주기적인 힘이 복합적인 요인으로 작용한다. 운전 중에 받는 연속적인 원심력과 터닝(Turning) 운전 시에 원심력 변화로 인한 슬롯 내 권선의 움직임, 빈번한 기동과 정지로 야기되는 반복적인 피로 및 부하 변동 시에 권선의 발열로 동 도체와 절연 재료 사이의 열팽창 계수 차이에 의한 상대적인 변위 등으로 인해 층간 절연의 위치가 이탈되어 단락이 발생한다. 또한, 장기간 운전에 의한 싸이클 피로는 동 도체 표면에 균열을 생성하며, 냉각용 공기흡입 필터 등의 문제로 흡입 공기 성분 중에 포함된 먼지나 도전성 물질 등의 영향으로 고장이 발생한 것으로 나타났다. 발전기 운전 중 회전자에 의한 고장 발생은 진동 상승과 출력저하는 물론 발전기의 불시 정지를 수반하며 장기간 정비를 요하는 큰 고장으로 파악될 우려가 있다.[1]

현재 발전기 회전자 권선의 건전성 진단은 절연저항시험, 성극지수시험, 분담전압시험, 코일 접지위치 확인시험, 임피던스시험, 서지(Surge) 시험 등 주로 정지중(Off-Line)시험에 의존하고 있다. 정지 중 시험은 발전기 정지가 수반되어야 하기 때문에 정확하게 회전자 권선에서 층간 단락이 발생한 권선의 위치와 턴수(turn number) 등을 탐지하기가 매우 어렵다. 그리고 발전기 운전중에 발생한 층간 단락 현상이 정지중에 사라지는 경우가 있어 운전중(ON-line)에 비해 신뢰성이 저하한다. 회전자 단락이 단지 몇 개의 층간에서 발생한 경우는 문제가 없지만, 여러 권선에서 다발적으로 발생한 경우 회전자 권선 절연재료가 경제적인 수명에 도달했음을 나타내 준다. 또한 층간단락 발생율이 전체 권선중에 5~10% 이상이 되면 각 극간에서 자속 불평등으로 인해

축 진동에 영향을 미칠 수 있다.[2][3]

이에 본 연구에서는 발전기 회전자 계자권선의 턴 단락에 따른 전자계 현상을 유한요소해석을 수행하여 턴 단락에 따른 전자계 특성을 해석하였다. 또한 이러한 현상을 고장 검출을 위한 센싱 방법과 턴 단락이 발생한 턴 수와 발생 위치를 정확히 판별할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

2. 발전기 제원과 회전자 구조

2.1 발전기 제원

표 1은 본 연구에서 해석에 사용된 발전기 제원을 나타낸다.

표 1. 발전기 제원

항 목	사 양	항 목	사 양
정격 출력[MW]	473	고 정 자 [mm]	외 경 2440
극 수	2		내 경 1232
주 파 수 [Hz]	60		슬롯 높이 180
		슬롯 폭 37	
정격전압 [kV]	19	회 전 자 [mm]	외 경 1048
정격속도[rpm]	3600		내 경 650
			슬롯높이 32
적층길이[mm]	4890	개구 폭 44	

2.2 단락 감지 센서

단락 감지 센서는 발전기 고정자 웨지(wedge)에 설치되어 정상 운전 중 회전자 각 슬롯에서 자속 변화를 측정하게 되며, 회전자 구조는 그림 1과 같다. 회전자 여자 권선의 턴 단락 현상을 고찰하기 위하여 공극 내에 센서를 장착한다. 센서는 서지 코일을 설치하며, 서지 코일에 유기되는 유기 전압은 식 (1)과 같은 패러데이(Faraday)의 전자유도법칙에 의해 권선수와 자속의 함수로 나타난다. 유기 전압은 층간단락이 발생하는 경우 슬롯에서의 턴 수가 감소함에 따라서 채교 자속이 감소함으로 건전한 슬롯에 비하여 유기전압이 낮아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 원리를 이용하여 회전자 단락을 감지하여 발전기 회전자의 건전성을 분석한다.

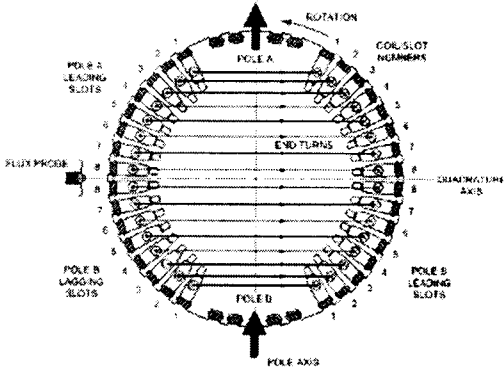


그림 1. 회전자 구조

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} [V] \quad (1)$$

여기서, e 센서의 유기기전력, N 센서의 코일 턴수, ϕ 자속, t 시간을 나타낸다.

유기되는 전압 파형은 계자 권선 각 슬롯의 누설 자속 분포를 나타내며, 단락된 권선이 존재하는 슬롯은 전압 파형의 크기가 감소하여 나타나 파형 분석을 통해 층간 단락이 발생한 계자 개별권선의 위치 및 발생 수 등을 알 수 있다. 그림 2는 발전기 내부에 장착된 센서를 나타낸다.[4]

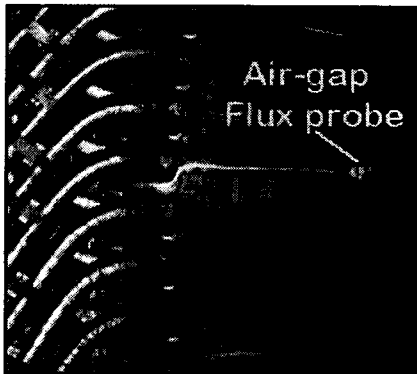


그림 2. 발전기 고정자 내부 센서 장착도

2.3 층간 단락 턴수 계산

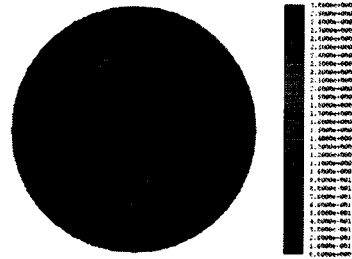
회전자의 한 슬롯 내에 삽입된 권선의 개별 턴수에 따라 회전자 권선의 층간단락 턴 수를 계산하게 된다. 본 연구에서는 한 슬롯이 8개의 개별 턴으로 이루어진 경우를 해석 대상으로 하며 각 턴 단락에 따른 턴수 계산 방법을 표 1에 나타내었다. 표 1에서 해석 대상 발전기 회전자의 3번 권선에서 N, S극 전압 값의 편차율이 37.5%였다면 이 발전기의 3번 회전자 권선의 슬롯내에서 3개의 층간 단락이 존재함을 의미한다. 또한 N/S극의 편차율이 “+”(N극 전압값이 큰 경우)인 경우 층간단락이 S극에서 존재함을 의미하며, 편차율이 “-”(S극 전압값이 큰 경우)인 경우는 층간단락이 N극에 존재함을 나타낸다. 이로써 층간 단락 턴수 및 단락 위치를 판별해 낼 수 있다.

표 2. 단락 턴수 계산법

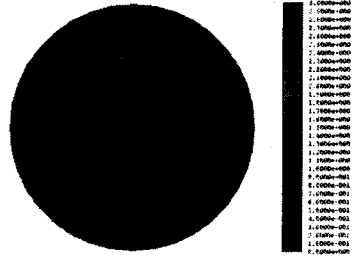
단락수	전압편차율	단락수	전압편차율
1	1/8=12.5 [%]	5	5/8=62.5 [%]
2	2/8=25.0 [%]	6	6/8=75.0 [%]
3	3/8=37.5 [%]	7	7/8=87.5 [%]
4	4/8=50.0 [%]	8	8/8=100 [%]

3. 자계 해석 결과 및 고찰

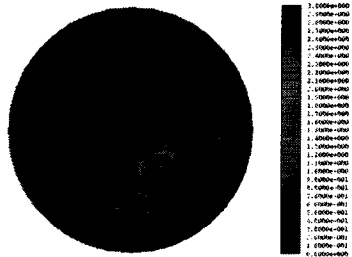
발전기의 회전자 계자 권선 내에 턴 단락이 되었을 때 턴 단락 위치 및 턴 단락수를 결정하는 모니터링 감지 시스템의 알고리즘을 개발하기 위하여 그림 2의 회전자 구조를 가지는 발전기에 대한 유한요소해석을 수행 하였다. 그림 3은 건전한 경우와 3번 슬롯, 4번 슬롯에 대한 각각의 경우 전자기 해석을 하고, 식 (1)을 기초로 하여 서치 코일에 유기되는 전압을 구하였다. 그림 4는 이때 공극 자속밀도고선을 나타낸다.



(a) 건전한 경우



(b) 3번 권선 3턴 단락된 경우



(c) 3번과 4번 권선에서 각각 3턴 단락된 경우

그림 3. 자속 밀도 분포도

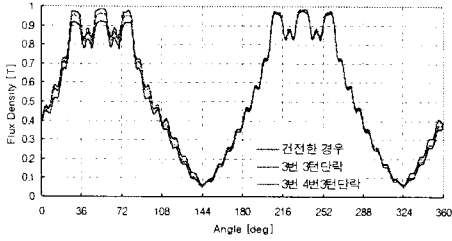
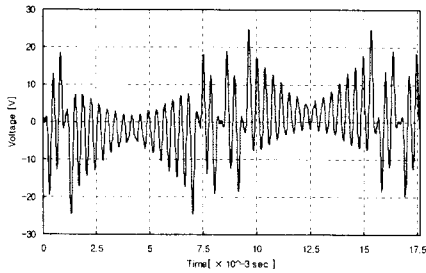


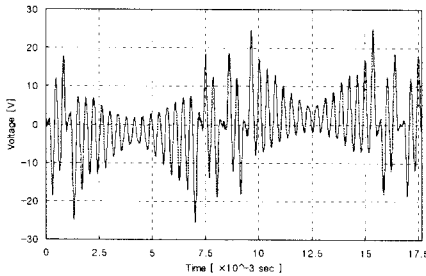
그림 4. 턴 단락에 따른 공극 자속 밀도

그림 5는 서치코일 센서에서 유기된 기전력 파형을 나타낸다. 그림 5(a)의 건강한 경우는 상측과 하측의 파형의 차이가 발생하지 않으나 그림 5(b)와 같이 3번 권선에서 3턴의 턴 단락이 일어난 경우 3번째 역기전력 파형의 상측과 하측의 차이가 나타남을 알 수 있다. 그리고 그림 5(c)과 같이 3번과 4번 권선이 각각 3턴의 턴 단락이 발생한 경우 3번째와 4번째 역기전력 파형 또한 차이가 남을 알 수 있다.

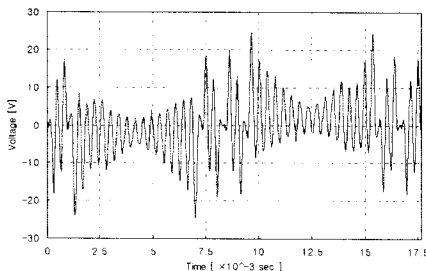
그림 6는 각각의 역기전력 파형을 확대하여 나타낸 곡선이다. 건강한 경우에 비하여 턴 단락이 발생한 경우 역기전력 파형의 변화가 뚜렷함을 알 수 있다.



(a) 건강한 경우



(b) 3번 권선 3턴 단락된 경우



(c) 3번과 4번 권선 각각 3턴 단락된 경우

그림 5. 유기기전력 파형

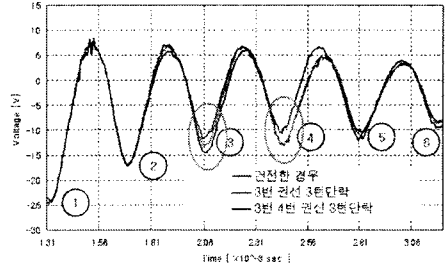


그림 6. 유기기전력 파형 비교

4. 결 론

본 연구에서는 발전기 턴 단락에 따른 전자기적 현상을 구현하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 발전기 턴 단락에 따른 공극 자속 밀도의 변화를 분석한 결과 상측과 하측의 공극 자속 밀도 차가 단락 수에 비례하여 증가 하였다. 또한 고장 진단을 행하는 입력 신호를 공급하기 위하여 공극 자속 밀도 검출용 자속 센서를 설치한 결과 센서에서 발생된 출력 파형을 통하여 단락된 턴의 위치를 정확히 파악할 수 있었다. 본 논문을 발전기 고장 진단을 행하는데 기초 자료로 활용할 경우 많은 도움이 되리라 판단된다. 차후 턴 단락으로 인한 공극 자속 밀도의 변화가 기계적 진동에 미치는 영향에 대한 연구가 행하여져야 할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] D.R. Albright, Interturn Shot Circuit Detection, Generatortech. Inc., pp. 1-8, 1993.
- [2] E. Woschnagg, "Turbogenerator Field Winding Shorted Turn Detection by AC Flux Measurement", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No 2, pp.427-431, 1994.
- [3] Gonzalez, A., Baldwin, M. S., Stein, J., Nilsson, N.E. "Monitoring and Diagnosis of Turbine Driven Generators", Prentice Hall 1995, Chapter 3.4.
- [4] Albright, D.R. "Interturn Short-Circuit Detector for Turbine Generator Rotor Windings", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-90 Number 2, March/April 1971.
- [5] Moore, B. Personal communication. National Electric Coil Company.