

동기발전기 권선단락사고 고장진단 시스템

장낙원¹ · 이성환[†]

(원고접수일 : 2013년 4월 9일, 원고수정일 : 2013년 5월 10일, 심사완료일 : 2013년 6월 3일)

Fault diagnosis system of the short circuit conditions in windings for synchronous generator

Nakwon Jang¹ · SungHwan Lee[†]

요약: 전력설비 용량의 증가와 기술의 진보에 따라 회전기가 대용량, 고전압화 되고 있다. 그러므로 발전기 고장예방을 위한 진단시스템의 필요성이 점차 증대되고 있다. 따라서 본 논문에서는 동기발전기 불시 정지 사고에 따른 피해를 예방할 수 있는 고장진단 시스템을 개발하였다. 고장진단 시스템을 검증하기 위해 실제 동기발전기와 권선구조가 같은 소규모의 시험장비를 제작하였다. 또한 회전자권선의 단락을 진단하기 위해 홀센서와 검출시스템을 구성하여 정상상태 뿐 아니라 회전자권선 단락 등 다양한 고장상태에 대한 공극자속파형을 검출하였다.

주제어: 동기발전기, 회전기, 고장진단 시스템, 자기장, 권선단락

Abstract: As the increasing of capacity and technology of power facilities, rotating machines are getting higher at capacity and voltage scale. Thus the monitoring and diagnosis of generators for fault detection has attracted intensive interest. In this paper, we developed fault diagnosis system for monitoring the fault operations in bad power systems. In order to verify the performance of this fault diagnosis system, we made the small scaled testing system which has the same winding structure of the real synchronous generator. The magnetic flux patterns in air-gap of a small-scale generator under various fault states as well as a normal state are tested by hall sensors and the fault detection system.

Keywords: Synchronous generator, Rotating machine, Fault diagnosis system, Magnetic flux, Short circuit conditions in windings

1. 서론

전력설비 용량의 증가와 기술의 진보에 따라 터빈 발전기, 수차 발전기, 대형 전동기 등의 회전기가 대용량, 고전압화 됨에 따라 발전기 고장 예방을 위한 진단시스템의 필요성이 점차 증대되고 있다. 이들 회전기 고장의 대부분은 권선의 손상에서 기인하며 고정자와 회전자에서 발생하는 절연 고

장은 복구하는데 장시간이 요구되므로 회전기의 고장을 사전에 발견하고 불시정지에 따른 불가피한 경제적 손실을 예방하기 위해서는 상시 감시기능이 요구된다[1][2].

국외에서 사용되고 있는 대표적인 발전기의 고장 진단 방법으로는, 발전기 운전 중 고정자 권선 부위에서 발생하는 부분방전을 측정하기 위하여

[†]Corresponding Author: Division of Energy & Electrical Engineering, Uiduk University, Gangdong, Gyeongju, 780-713, Korea, E-mail: hwaney@uu.ac.kr, Tel: 054-760-1625

¹ Division of Electrical & Electronics Engineering, Korea Maritime University, E-mail: nwjang@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4413

커플러를 설치하여 고정자 권선의 고장진단을 수행하는 것을 들 수 있다. 또한 절연열화 상태의 진단은 부분방전분석기(PDA)를 이용하여 수력 발전기의 고정자 권선 고장진단에 적용하였으며, 1990년대 초부터는 터빈 발전기 분석기(TGA)가 개발되어 화력 발전기에 확대 적용되고 있다[3][4]. 그러나 기존의 동기발전기 고장 진단 방법은 정상 상태와 고장상태를 구분할 뿐 고장의 위치 및 그 심각성을 예측하기는 어려운 점이 있다. 또한 사전 진단의 경우 실제적인 사고 발생 후나 정기적인 점검 시 전체 발전기시스템의 정지 후 진단으로 사고 위치의 대략적 판단정도가 가능하다.

본 논문에서는 동기발전기 권선단락사고의 신속하고 정확한 감시진단 및 고장위치 파악을 위해 고장진단 시스템을 개발하였다. 또한 이를 실험을 통해 검증하기 위해 실제 동기발전기와 권선구조가 같은 소규모 시험장비를 제작하였고 고장진단 시스템의 홀센서와 검출시스템을 이용하여 권선단락사고에 대한 공극자속파형을 검출하였다.

2. 2극 동기발전기 제작

본 논문에서는 회전자 및 전기자 권선의 단락 시 공극 자속 파형 및 상전압 파형의 왜곡정도를 정상상태에 비교하기 위하여 모의사고용 2극 동기발전기를 설계 제작하였다. 회전자형태 및 전기자 권선의 형태가 대용량 동기발전기의 구조를 가지면서 규모만 축소하였다.

Figure 1과 Figure 2는 실제 제작 된 모의사고용 동기발전기의 고정자 설계도 및 사진이다. 고정자 슬롯 수는 총 36개이며 한 슬롯 당 도선 수는 8개로 한 슬롯 당 도선 수는 다음 두식에 의하여 정해진다.

$$N_{ph} = \frac{1\text{상의 전압}}{2.1 \times \phi \times \text{주파수}} \quad (1)$$

N_{ph} : 고정자 한 상당 도선수, ϕ : 자기장하

$$N_{1slot} = \frac{N_{ph}}{p \times q} \quad (2)$$

p : 극수, q : 매극매상 당 슬롯 수

Figure 3과 Figure 4는 제작 된 모의사고용 2극

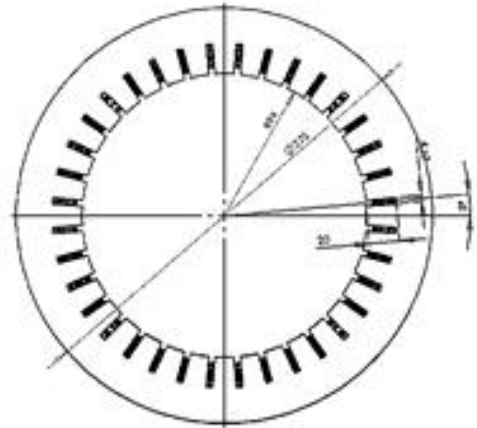


Figure 1: Structure of stator



Figure 2: Stator for synchronous generator

동기발전기의 회전자 설계도 및 사진이다. 회전자 한 pole 당 감길 계자 암페어 턴 수는 50 ATurn 이다. 회전자권선에 흐를 수 있는 전류는 NI 값 즉, 회전자권선의 암페어 턴 수 AT_f 값은 다음과 같이 결정된다.

$$AT_0 = 0.8 \times K_c \times K_s \times B_g \times 10^4 \times \delta \quad (3)$$

$$AT_a = 0.4 \times AC \quad (4)$$

$$AT_f = \sqrt{AT_0^2 + AT_a^2} \quad (5)$$

K_c : 카터계수, K_s : 포화계수

B_g : 공극에서의 최대 자속밀도

δ : 공극의 길이, AC : 전기장하

모의사고용 동기발전기의 설계를 바탕으로 동기 발전기 동특성 해석에 사용된 모델의 사양은 Table 1에 자세히 나타내었다.

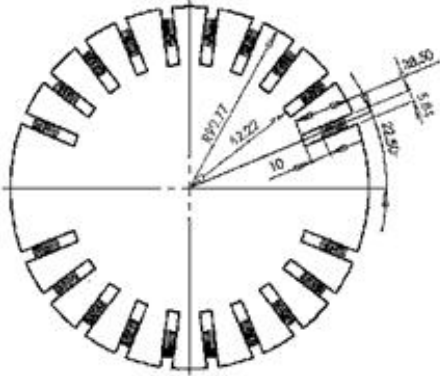


Figure 3: Structure of rotor



Figure 4: Rotor for synchronous generator

Table 1: Specification of synchronous generator

발전기	상출력 전압	5V	주파수	30Hz
	회전속도	1,800rpm	공극	3.23mm
	전기자 내경	188 mm	회전자 외경	181.54mm
전기자	전기자 슬롯수	36	전기자 층수	2층권
	슬롯당 권선수	8turns/슬롯	극수	2극
		4turns/층		
회전자	여자전류	1 A	여자전압	5V
	권선 수	5turns/슬롯	축 길이	200mm

3. 발전기 고장 검출시스템

3.1 공극자속 측정용 홀센서

한발발전기의 고정자와 회전자 사이 공극에서의 자속밀도를 측정하기 위해 자기 센서 중에서 가장 실용성이 높은 홀 효과를 이용한 홀 센서를 사용하였다. 본 연구에서는 Allegro 사의 A1302 홀 센서를 사용하였으며 그 사양을 Table 2에 나타내었다[5]. 공극자속 파형 획득을 위한 센서의 설치 위치는 축 방향 중심 부분과 슬롯 가장자리 부분 등 3지점에 설치하였다.

Table 2: Specification of Hall effect sensor

Supply voltage	4.5 ~ 6 V
Sensitivity	1.3mV/G
Bandwidth	30 kHz
Temperature range	-40 ~ 125 °C



Figure 5: Hall effect sensor for measuring air-gap magnetic flux



Figure 6: 2 pole synchronous generator for fault test

Figure 5는 공극자속 파형 획득을 위해 공극에 설치된 자기장 센서의 사진이다. Figure 6은 제작 후 조립된 모의사고형 동기발전기이다. 그림에서 보는 바와 같이 대형동기발전기와 같은 구조로 설계 제작되어, 비돌극형 회전자 및 타여자 방식으로 운전된다.

3.2 자기장신호 검출 시스템

동기발전기의 공극에서 홀센서를 이용해 측정된 자속밀도를 디지털 신호로 변환하고 전송하는 자기장신호 검출 시스템을 제작하였다.

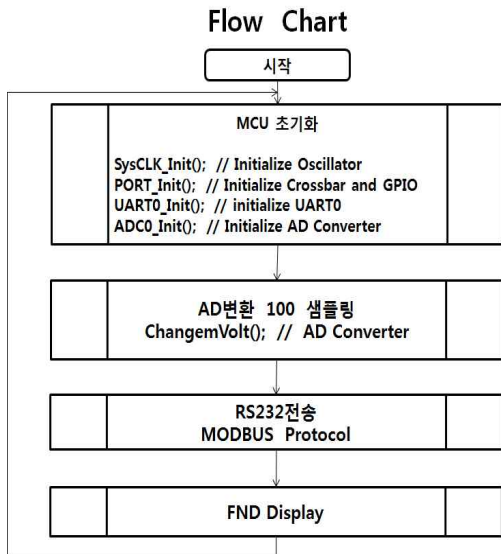


Figure 7: Algorithm of fault detection system for synchronous generator

발전기 회전자의 자장 데이터를 홀센서로부터 전압 형태로 입력받아 이를 100 샘플링이상 수행한 후 A/D 변환기를 통해 디지털화하여 컴퓨터 진단 시스템으로 전송하는 시스템이다. 전압 형태로 입력된 데이터를 샘플링하고 전송하기까지의 알고리즘을 Figure 7에 나타내었다. 자기장 신호 검출 시스템 사용된 CPU는 50MHz 10비트 A/D 변환기 능을 가진 C8051F130이다[6][7]. 계측한 데이터를 RS-232 MODBUS 프로토콜로 상위 시스템으로 전송한다[8]. 상위 시스템에서는 전송된 데이터를 이

용하여 MS Excel Spreadsheet, Visual Basic Editor 및 Magnet 프로그램을 통해 공극 사이의 자속을 파악 하였다. Figure 8에 동기발전기의 공극자속 검출을 위한 시스템의 H/W 블럭도를 나타내었다.

Hardware BlockDiagram

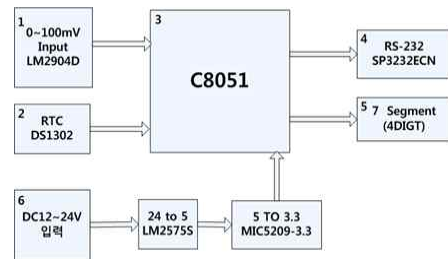


Figure 8: Block diagram of fault detection system

4. 발전기 고장진단 시스템 성능평가

4.1 고장진단 시스템

동기발전기의 고장을 진단하기위해 고장검출 시스템을 통해 측정된 출력 데이터의 분석 작업이 필요하다. 그 과정은 크게 데이터 파형의 커브 피팅과 피크 검출의 과정으로 나누어 질 수 있다 [9][10]. Figure 9 및 Figure 10에 본 시스템에 적용한 데이터 분석 알고리즘을 나타내었다. Figure 9는 최소 제곱, 최소 절대오차, 바이스퀘어 방법을 사용하여 (X, Y) 데이터 세트의 지수 피팅 알고리즘을 나타내었고, Figure 10은 다섯 개의 연속된 블록의 데이터를 사용하여 각 블록의 피크 위치를 검출하는 알고리즘을 나타내었다. 이와 같은 데이터 분석 알고리즘을 적용하여 발전기 권선단락 사고 진단 프로그램을 구현하였다. Figure 11은 측정된 데이터의 실시간 진단을 위해 제작한 프로그램 화면을 나타낸 것이다. 프로그램 상단의 그래프는 측정된 홀센서의 데이터를 분석 과정을 거쳐 나타낸 것이며 기준이 되는 정상상태의 데이터와 실시간으로 변하는 데이터를 나타낸다. 아래의 표 중 1행은 발전기의 각 슬롯의 번호이며 2행은 정상상태 시 각 슬롯의 피크 데이터이다. 3행은 실시간 측정되는 각 슬롯의 피크 데이터이다. 4행은 각 슬롯의 피크 데이터에 대한 기준대비 백분율을 나타낸다.

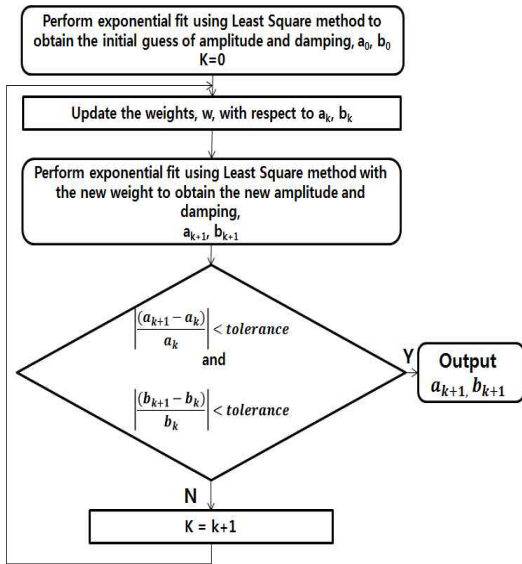


Figure 9: The flow chart of exponential fitting

```

for i = 1 to 5
[Acquire data]
if (i == 1)
Initialize = True
else
Initialize = False;
endif

if (i == 5)
EndOfData = True
else
EndOfData = False;
endif

Set polarity (peaks or valleys), width, threshold
Call PeakDetector function

Copy the output values to different variables so they will not be overwritten during the next iteration.
next i
    
```

Figure 10: The algorithm of peak detection

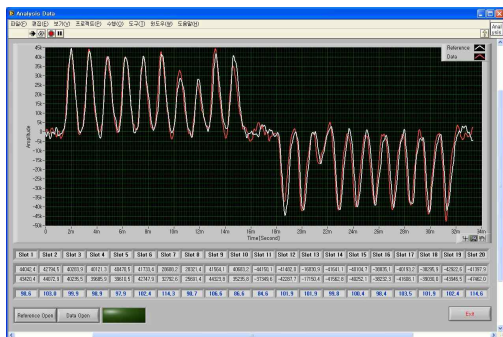


Figure 11: The screen of diagnosis program

4.2 시스템 평가를 위한 모의시험

제작된 모의사고용 동기발전기를 이용하여 회전자 및 전기자권선의 단락 시 공극 과형 및 각상의 사고전압패턴에 대한 전체 시스템의 성능평가를 위한 실험을 수행하였다. 모의 사고 동기발전기의 구동에는 Diesel 기관을 이용하였으며, 각 상 유기전압 및 공극자속을 측정할 수 있도록 외부에 단자를 설치하였다.

먼저 회전자권선이 단락상태가 아닌 정상상태의 공극에서의 자속과형을 측정하였다. Figure 12는 측정된 정상상태의 공극자속과형이다. 실험에서 직접 측정된 자속밀도 값을 전압으로 환산한 값을 나타내었다.

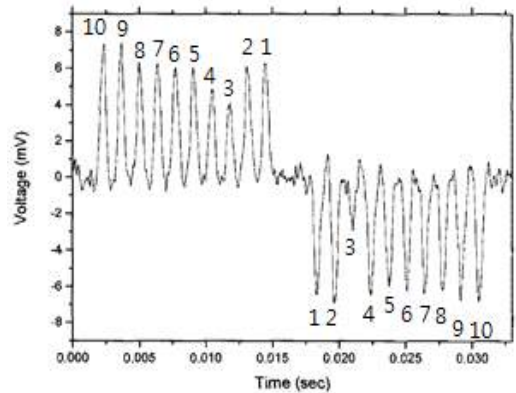


Figure 12: Air-gap magnetic flux at normal state

회전자 권선의 단락 실험을 위해 정상상태 권선을 단락실험 시 사고부분을 단락시켜 재 권선 하여 실험하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 회전자 1,3,5번 슬롯에서 2선, 3선, 4선 단락을 모사하여 측정하였다. Figure 13은 회전자 1번 슬롯에서 단락사고를 모사 했을 때 공극 자속 과형이다. Figure 12의 정상상태 공극자속과형과 단락권선 수 및 단락위치에 따라 1번 슬롯에 해당하는 자속 과형의 변화가 측정되었다. 1번 슬롯에서 단락이 났을 경우 테이블의 Slot1의 정형화 수치가 작게 나타나며, 그 값을 고장 DB와 비교했을 경우 단락사고 Case 2에 해당됨을 알 수 있다(Table 4).

Table 3: The short circuit fault cases of rotor

슬롯	Case	단락 레이어	단락 권선수
S1	C1	2_3	2
	C2	3_4	2
S3	C3	4_5	2
	C4	2_3_4	3
S5	C5	3_4_5	3
	C6	2_3_4_5	4

Table 4: The fault diagnosis table of rotor windings

슬롯 번호	정상상태 공극자속 피크값 [mV]	실시간 각 슬롯 피크 데이터 [mV]	초기상태 대비 각 슬롯의 현재 피크 데이터
1	39385.4	32088.1	0.81
2	43101.2	40426.9	0.94
3	27123.1	25360.7	0.94
4	34361.4	30433.5	0.89
5	41216.7	44156.2	1.07
6	38618.0	43064.3	1.12
7	43051.0	38546.8	0.90
8	42244.2	43270.7	1.02
9	41796.5	44163.6	1.06
10	44878.1	43826.0	0.98

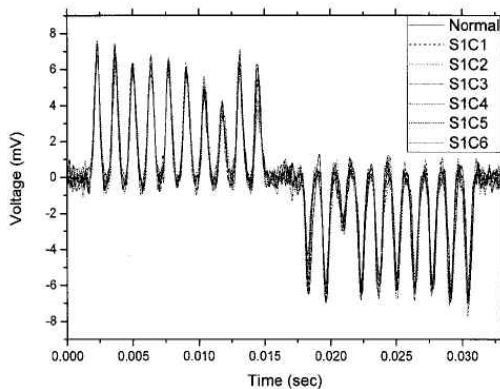


Figure 13: Air-gap magnetic flux according to number of shorted conductor at slot 1

5. 결 론

본 논문에서는 동기발전기의 전기적 상태를 파악하여 불시 정지 사고에 따른 피해를 예방할 수 있는 고장 모니터링 시스템을 개발하였다. 동기발전기의 권선단락사고의 정확한 진단을 위하여 모의용 2극 동기발전기를 설계 제작하였다. 회전자권선의 단락을 진단하기 위해 홀센서와 검출 시스템을 이용하여 회전자 및 고정자 슬롯 내에서 발생하는 공극자속파형을 모니터링 하였다. 또한 제작된 동기발전기의 모의사고 실험을 통해 회전자 권선 단락 사고 시 발생하는 공극자속 파형의 변화를 검출하여 단락위치를 진단할 수 있었다.

참고문헌

- [1] R. C. Patterson, "A quantum leap into the IED age", The 39th Rural Electric Power Annual Conference, pp. (B1)-1-5, 1996.
- [2] W. A. Elmore, C. A. Kramer, and S. E. Zocholl, "Effect of waveform distortion on protective relays", Industry Applications Society Annual Meeting, 1991, Conference Record of the 1991 IEEE , vol. 2, pp. 1802-1811 vol.2 1991.
- [3] J. P. Sturgess, M. Zhu, D. C. MacDonald, "Finite-element simulation of a generator on load during and after a three phase fault", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 7, pp. 787~793, Dec. 1992.
- [4] R. Wamkeue, I. Kamwa, M. Chacha, "Line to line short circuit based finite element performance and parameter predictions of large hydrogenerator", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 18, pp. 370-378, Sept. 2003.
- [5] Hong-Kyw Choi, Nak-Won Jang, Hong-Seung Kim, "Electro-thermal chatacteristic of hole-type phase change memory", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 1, pp. 131-137, Jan. 2009.
- [6] Nak-Won Jang, Chun-Hee Woo, Sung-Hwan

- Lee, "A study on the design of the bay controller for generator protection and control", *Trans. The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 59P, no. 1, pp. 46-56, Mar. 2008.
- [7] Nak-Won Jang, Jeong do park, Sunghwan Lee, "A study on the digital protective relay for generator fault protection", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 33, no. 8, pp. 1232-1238, Nov. 2009.
- [8] Sung-Hwan Lee, "A study on the protection and measuring algorithm of IED in load condition", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 527-532, May 2012.
- [9] R. Burch, F. N. Najm, P. Yang, and T. N. Trick, "A monte carlo approach for power estimation," *IEEE Trans. on Very Large Scale Integration systems*, vol. 1, no. 1, pp. 63-71, March 1993.
- [10] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.