

# 원통형 동기발전기 회전자의 층간단락에 관한 연구

김영준 · 김장목<sup>†</sup> · 이상혁 · 안진우<sup>\*</sup>

부산대학교 전자전기통신공학부 · <sup>\*</sup>경성대학교 메카트로닉스공학부

(2005. 4. 20. 접수 / 2006. 3. 30. 채택)

## Study of Shorted-turn for Cylindrical Synchronous Generator Rotor

Young-Jun Kim · Jang-Mok Kim<sup>†</sup> · Sang-Hyuk Lee · Jin-Woo Ahn<sup>\*</sup>

Division of Electrical Engineering, Pusan National University

<sup>\*</sup>Division of Mechatronics Engineering, Kyungshung University

(Received April 20, 2005 / Accepted March 30, 2006)

**Abstract :** This paper describes the methods for the detection of shorted-turn in the rotor of a cylindrical synchronous generator. A search coil is installed in the air-gap to detect the shorted-turn. The occurrence of a fault in the rotor winding results in a decrease of the induced voltages in the stator. And the magnitude of the rotor flux can be estimated by using the search coil and the estimated stator voltages respectively. And the magnitude of the estimated rotor flux is used for discriminating the rotor windings short or not by detecting the magnitude of the rotor flux. The method using a search coil located in the air-gap can detect not only the occurrence of a turn fault but also its position in the rotor winding. But the method using the estimated stator voltages gives the magnitude of the rotor flux, and only the number of a short-turn.

**Key Words :** shorted-turn, a cylindrical synchronous generator, search coil, estimated stator voltages, magnitude of the rotor flux

### 1. 서 론

복합화력발전은 일반 화력발전에 비해 그 효율이 우수하고 건설비가 저렴하여 점유율이 점차 확대되고 있는 추세이다. 이와 더불어 복합화력발전의 일일 기동정지 및 빈번한 출력 증감 등으로 인한 발전기 회전자의 고장도 점차 증가하고 있다. 특히, 발전기 회전자의 층간단락은 발전기의 진동을 상승시키고, 출력을 제한하며, 또한 발전기의 성능을 저하시키는 등 불시고장의 원인이 된다<sup>1)</sup>. 이러한 발전기 운전중 회전자의 이상상태를 조기에 진단하여 발전기 불시고장을 사전에 예방하는 것은 발전기의 안정 운전에 중요한 역할을 담당한다<sup>1-5)</sup>.

본 논문에서는 발전기의 불시고장으로 인한 산업적인 손실과 안전사고를 사전에 예방하고자, 심각한 절연파괴가 발생하기 이전에 회전자 권선의 층간단

락을 감지할 수 있는 방법에 대하여 기술하였다. 실험에 적용된 소용량의 2극 원통형 동기발전기는 정상 모델과 고장모델로 각각 설계 제작되었다. 발전기 회전자 권선의 층간단락 발생시, 발전기의 고정자 권선에 유기되는 전압으로부터 회전자 자속의 크기를 추정하여 진단하는 방법과 서치 코일에 유기되는 전압으로 회전자 권선의 층간단락을 진단하는 두 가지 방법에 대하여 연구를 수행하였다.

### 2. 층간단락 현상<sup>1)</sup>

발전기의 운전시간 경과 및 운전 스트레스로 인하여 동도체 사이의 접동(摺動), 혹은 마모로 인하여 발생된 동분의 퇴적이 증가하여 회전자 개별권선 사이에 층간단락 및 접지사고 등이 발생하는 원인이 된다. 동분의 발생원인은 접동에 의해 발생하는 현상이며, 원심력이 작은 터닝(turning)시에도 발생하는 것으로 판명되었다. 또한 층간단락 현상은 층간 절

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jmok@pusan.ac.kr

연지의 손상에 의해서도 발생할 수 있다<sup>1)</sup>. 복합화력 발전기의 경우 일일 기동정지 및 빈번한 출력 증감 발로 인하여 회전자 권선이 팽창, 수축을 반복하게 되고, 이로 인해 권선사이에 위치한 턴 절연이 열응력이나 한쪽으로 밀리거나 끊어지는 현상 등에 의해 손상됨으로써 층간단락 현상이 발생하게 된다.

### 3. 시스템 구성 및 시뮬레이션

#### 3.1. 시스템 구성

##### 3.1.1. 전동기-발전기 세트

본 실험을 위하여 원통형 동기발전기는 정상모델과 고장모델로 각각 설계 제작되었다. 회전자 권선의 층간단락 발생은 회전자 권선 수의 감소로 나타낼 수 있으므로 정상 모델 및 고장모델의 코일 수는 Table 1과 같이 제작되었다.

회전자 슬롯의 형태별로 동기발전기의 공극 자속 및 유기 전압을 검토한 결과, 회전자의 슬롯은 고조파 성분이 상대적으로 작게 나타난 방사형으로 제작하였다. Fig. 1은 방사형 슬롯 회전자를 나타내며, Fig. 2는 설계 제작되어진 동기발전기 회전자의 사진이다.

회전자의 슬롯수는 12슬롯이고, 고정자는 24슬롯이며, 고정자와 회전자 사이의 공극은 2mm이다.

Fig. 3은 층간단락 시험을 위한 전동기-발전기 세트의 사진이며, 전동기는 5kW, 8극의 영구 자석형 동기 전동기이다.

Table 1. Rotor specification of the models

극 수	2 극
회전자 슬롯당 코일 턴수 (정상모델)	36 턴
1차 회전자 슬롯당 코일 턴수 (고장모델)	2번 슬롯 : 27턴 (정상모델 코일 턴수의 75%)
2차 회전자 슬롯당 코일 턴수 (고장모델)	2번 슬롯 : 27턴 (정상모델 코일 턴수의 75%) 3번 슬롯 : 14턴 (정상모델 코일 턴수의 40%정도)
코일 사양	코일직경 1.0mm, PEW 구리선

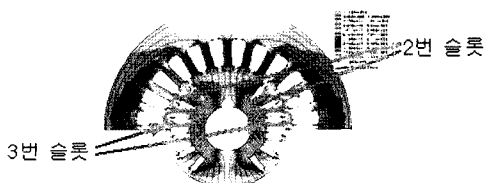


Fig. 1. Radial slot rotor.

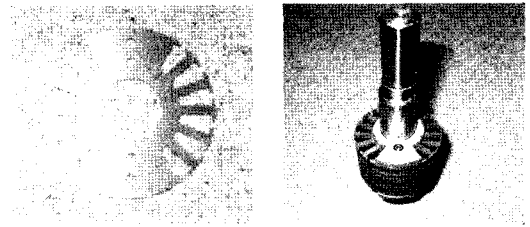


Fig. 2. Synchronous generator rotor.

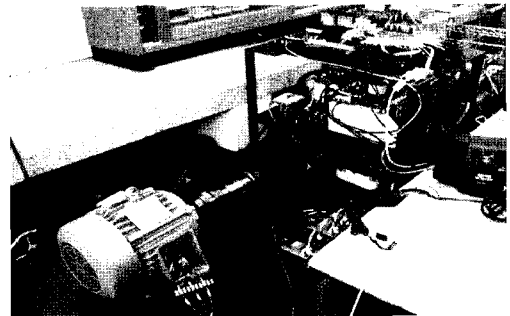


Fig. 3. Power conversion system and M-G set.

##### 3.1.2. 전체 시스템 구성

원통형 동기발전기의 회전자 권선의 층간단락을 진단하기 위한 전체 시스템은 Fig. 4와 같이 DSP(Digital Signal Processor) 제어 보드, 전력 변환 회로 그리고, 전동기-발전기 세트로 구성하였다.

#### 3.2. 컴퓨터 시뮬레이션

Fig. 5는 원통형 동기발전기 회전자의 12개 슬롯 분포에 따른 자속 파형을 나타내며, Fig. 6은 이상적인 동기발전기의 출력 전압을 얻기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 파형이다.

Fig. 7은 서치 코일에 유기되는 전압을 컴퓨터 시뮬레이션한 파형이다. 서치 코일에는 고정자와 회전자 사이의 공극 자속의 변화량에 비례하는 전압

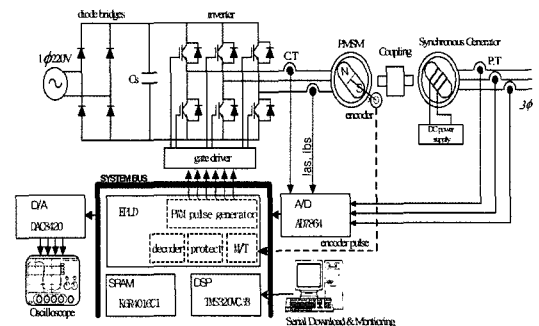


Fig. 4. Configuration of the system.

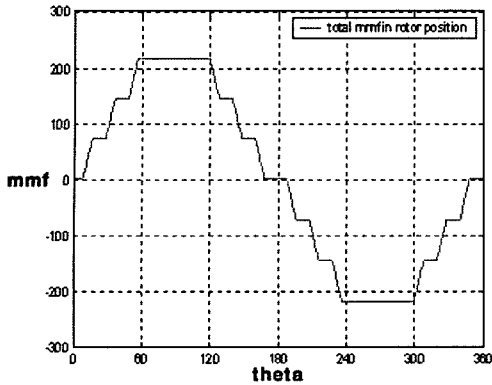


Fig. 5. Waveform of the rotor flux.

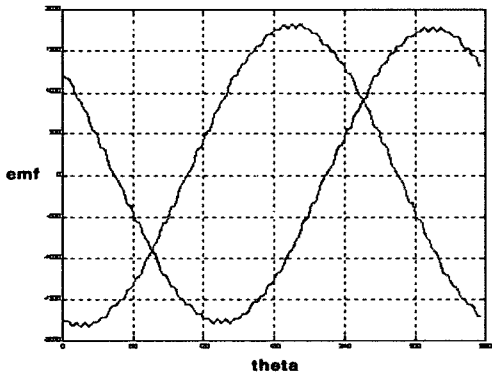


Fig. 6. Waveforms of the output voltage.

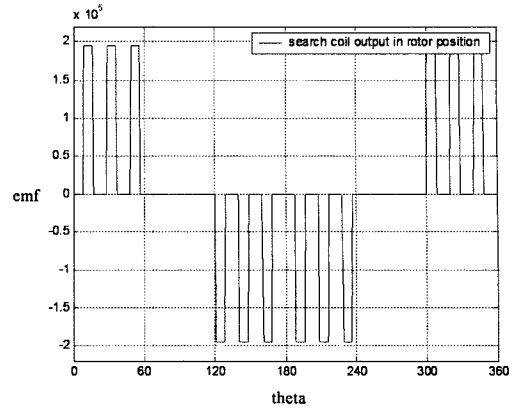
( $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ )이 유기되므로, 회전자의 각 슬롯에 위치한 코일의 정보를 얻을 수 있다.

실험에 사용하기 위한 서치 코일의 전압은 대략 0-10V의 크기의 전압이 나오도록 권선을 감는다. 이것은 공극자속의 변화량을 코일의 권선수와 곱이 공극전압에 대한 파형이다. 따라서 정확한 공극전압의 파형을 신호 처리하기 위해서는 직접 제어기의 A/D(Analog to Digital Converter)에 입력할 수 있는 전압의 크기로 선정하는 것이 실험을 수행하기가 편리하다.

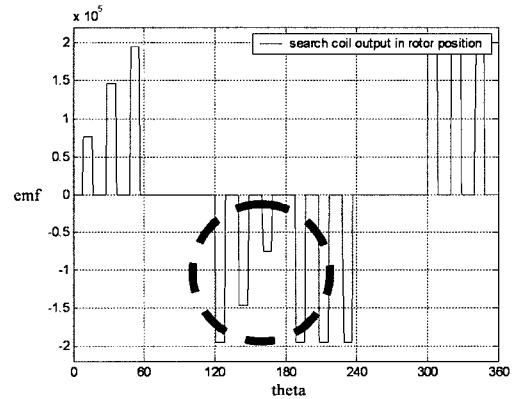
서치코일의 전압그림 7의 (a)는 정상모델에서의 서치 코일에 유기되는 전압 파형을 나타내며, (b)는 그림에서 알 수 있듯이 원안에 있는 2번 슬롯에는 25%의 층간단락이, 3번 슬롯에는 60%의 층간단락이 발생한 경우의 전압 파형을 나타낸다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 원통형 동기발전기의 전기자 반



(a) Normal coil



(b) In case of shorted turn

Fig. 7. Simulation waveform of the induced voltages in a search-coil.

작용으로 인한 영향을 없애기 위해 무부하 상태에서 모든 실험을 하였다. 또한 여러 운전 조건에서 결과를 얻기 위해 발전기의 회전자 속도와 여자 전류를 적절히 조절하였다.

Fig. 8은 정상 모델과 고장 모델의 원통형 동기 발전기에서 출력되는 선간 전압을 나타낸다. 발전기의 출력 선간 전압의 크기는 정상 모델에서 보다 고장 모델에서의 전압의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 이러한 정보를 바탕으로 회전자의 층간단락 정도를 파악할 수 있다. 회전자 권선에 층간단락이 발생되었을 경우, 전류가 권선 전체에 흐르는 것이 아니라 일부 by-pass되기 때문이다. 즉, 고장 모델에서의 자속은 결과적으로 회전자 권선의 턴 수의 감소로 줄어들게 되는 것이다.

Fig. 9는 3상 좌표계의 출력 전압을 2상의 동기 좌표계로 변환하여 나타낸 전압 파형이다. 권선의 층간단락 비율이 높을수록 고장 모델에서의 전압의 크기가 정상 모델보다 작음을 알 수 있다.

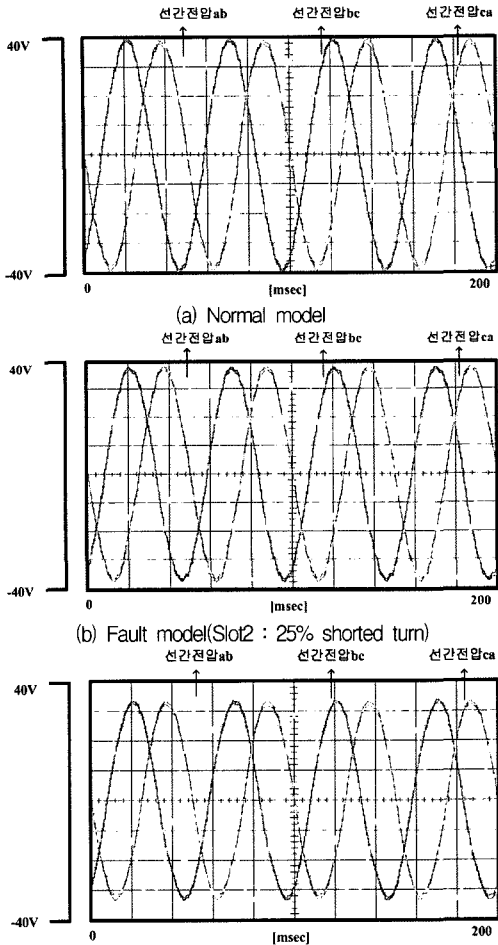


Fig. 8. Waveform of the output line voltage at 1200rpm.

Fig. 10은 계자전류와 동기발전기 출력전압의 특성을 그래프로 나타낸 것으로, 선형적인 특성을 보이고 있으며, 층간단락 발생시 같은 크기의 전압을 출력하기 위해서 더 많은 여자전류가 필요함을 알 수 있다. 따라서 고정자 권선에서 출력되는 전압의 크기로부터 회전자 자속의 크기를 예측할 수 있으며, 이를 통해 층간단락 발생의 유무정도를 판별할 수 있다. 실제 시스템에서는 계자전류와 동기발전기 출력전압 사이의 관계를 data화하여 층간단락 발생의 정도를 예측할 수 있다.

Fig. 11은 서치 코일을 원통형 동기발전기에 설치하여 자속의 변화에 따라 서치 코일에 유기되는 전압을 나타낸 것으로, 유기된 전압은 층간단락이 발생한 슬롯의 위치를 정확히 검출하고 있다. 슬롯2에서는 권선의 25%가 층간단락이, 슬롯3에서는 권선의

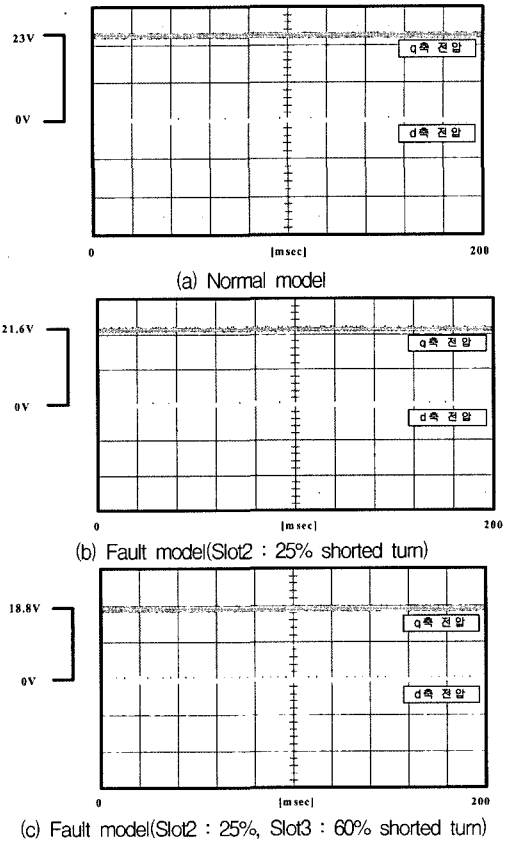


Fig. 9. Transformation to a rotating reference frame at 1200rpm.

60%가 층간단락이 발생하였음을 실험파형에서 나타내고 있다.

본 실험을 위한 서치 코일은 공극자속의 크기, 발전의 회전수, 그리고 코일의 턴수를 고려하여 최고 출력전압이 5V의 출력이 나오도록 하면 된다.

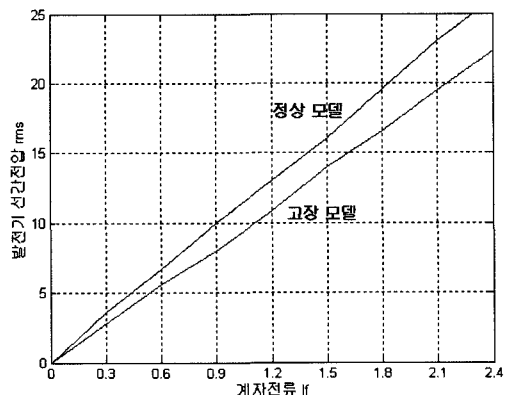
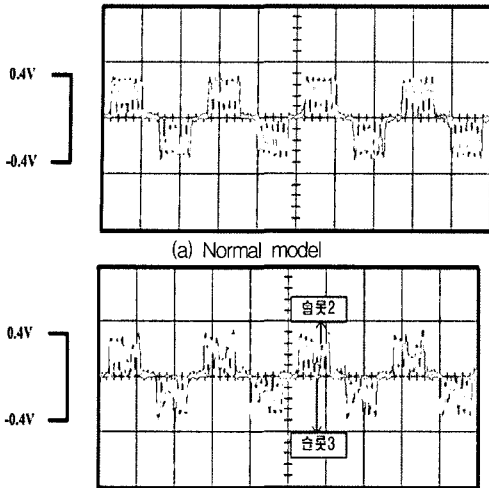


Fig. 10. Field current-output voltage characteristic(1200rpm).



(b) Fault model(Slot2 : 25%, Slot3 : 60% shorted turn)  
 Fig. 11. Waveform of the induced voltages in a search-coil at 1200[rpm].

이상과 같은 실험에서 동기발전기의 출력전압의 크기만을 이용하였을 경우에는 회전자 층간단락의 대략적인 비율만을 알 수 있었으나, 서치코일을 이용한 경우에는 설치의 어려움은 있지만 회전자 층간단락이 발생한 슬롯의 위치 및 층간단락 비율을 정확히 파악할 수 있었다.

### 5. 결론

발전기 고정자 권선의 유기전압 정보만을 이용할 경우 층간단락 비율이 커질수록 발전기의 출력 전압의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 이 전압의 크기 정보로부터 회전자 자속의 크기를 예측할 수 있었다.

즉, 회전자 자속센서 없이 회전자 자속 크기만을 추정하여 회전자 권선의 층간단락 유무정도를 파악할 수 있었다. 그러나 서치 코일을 사용한 경우에는 설치의 어려움은 있지만, 서치 코일에 유기된 전압 파형으로부터 층간단락이 발생한 슬롯의 위치 및 층간단락 비율 등을 정확히 판별할 수 있는 장점이었다.

**감사의 글 :** 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- 1) 한국전력공사 전력연구원, “발전기 회전자 On-Line 단락 감시시스템 개발”, 1993.3.
- 2) “Generator Field Winding Shorted Turn Detector”, General Electric, GE6987A, April. 1992.
- 3) “Generator Winding Shorted-Turn Detector Condition Monitor”, GeneralTech, NY, USA.
- 4) “The Need for Shorted-Turn Detection System”, GeneratorTech, Inc., Internet Website <http://www.GeneratorTech.com>.
- 5) 김선자, 전윤석, 이승학, 최규하, “발전기 회전자 층간단락에 대한 특성 해석”, 전력전자학술대회 논문집, 2003.
- 6) A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans, “Electric Machines, Fifth Edition in SI Units”, Metric Editions, 1992.
- 7) C. B. Gray, “Electrical Machines and Drive Systems”, John Wiley & Sons, 1989.
- 8) Arthur R. Bergen, Vijay Vittal, “Power Systems Analysis, Second edition”, Prentice Hall, 2000.