

## 발전기 회전자의 층간단락 센서리스 진단기법 및 특성 해석

김선자\*, 전윤석\*, 이승학\*\*, 최규하\*  
건국대학교\*, 대덕대학교\*\*

### Sensorless Diagnosis Method and Characteristic Analysis of Short-Circuited Turn for Generator Rotor

Sun-Ja Kim\*, Yoon-Seok Jeon\*, Seung-Hak Lee\*\*, and Gyu-Ha Choe\*  
Dept. of Electrical Engineering, Konkuk Univ.\*, Daeduk College\*\*

#### ABSTRACT

Short-circuited can have significant effects on a generator and its performance. One of effective method detecting inter-turn short circuits on round rotor winding is a method using sensor detecting. But the method needs duplicate design of sensor for characteristic change according to types and forms of generator. Thus rotor shorted-turn diagnosis method without sensor is needed for detecting short turn when generator is driven. Diagnosis method without sensor depend on change of electric property in generator. For the reason, this paper presents characteristic analysis of shorted-turns in generator by detecting the output voltage of generator.

#### 1. 서 론

최근 복합화력 발전소의 가스터빈 또는 스팀터빈 발전기 회전자 권선의 층간단락은 출력제한, 진동 증가 및 성능저하 등 비정상적인 운전의 원인을 제공하며 심한 경우 발전기의 불시정지 및 장기간 정비를 요하는 고장을 일으키기도 한다. 특히 발전기의 회전자 권선에서 각각의 슬롯 내에 적층된 개별 권선사이에 층간단락이 발생하면 자속의 불평형과 비대칭적인 발열로 인한 진동의 변화를 일으킨다. 따라서 이로 인한 비정상적인 운전의 예방과 고가의 권선교체 비용이 요구되는 심각한 절연파괴가 발생하기 이전에 회전자 권선의 층간단락 현상을 감시하는 예방정비에 관한 관심이 증가되고 있다. 여러 가지 감지기법 중 감지센서를 이용한 발전기 운전중 계자권선 층간단락 감지기술은 조기진단 및 발전기의 안정운전에 중요한 역할을 담당한다. 그

러나 감지센서의 설계 시에 발전기 용량, 회전자와 계자의 공극크기, 권선 층수에 따라 감지센서의 크기 및 코일수 등이 결정되므로 각 발전기의 종류에 따른 전용 센서가 필요하게 된다. 따라서 센서에 대한 중복설계가 요구되며 이에 따른 비용이 증가하고 설계오류 발생시 재시공 상의 문제점이 발생하게 된다. 따라서 센서가 없는 형태의 감지기술에 관한 관심이 높아지고 있는데 이 기술은 전적으로 발전기 운전시 층간단락에 의한 전기적인 특성변화의 검출에 의존할 수밖에 없다. 이를 위하여 본 논문에서는 회전자 권선의 층간단락현상을 사전에 진단하여 정비계획을 수립, 예측정비 할 수 있도록 동기발전기의 센서 없는 형태의 회전자 층간단락 진단에 관하여 연구하였다.

#### 2. 센서리스 층간단락 진단기법

##### 2.1 진단원리

계자권선에 의한 이상적인 자속밀도의 분포는 정현파형으로 근사화 할 수 있다. 이 때 슬롯의 영향에 의한 누설자속은 이상적인 정현파형에 왜곡파형으로 나타날 수 있으며 이러한 누설자속의 위치는 슬롯의 위치와 같다. 이러한 자속밀도의 분포에 의하여 전기자에 쇄교되는 쇄교자속은 정현파형 형태의 기본파 자속밀도에 의한 쇄교자속 및 누설자속에 의한 쇄교자속 성분으로 나뉘어 지며 권선의 위치가  $\beta$ 에 존재할 때 다음 식과 같이 표현된다.

$$\phi(t) = \int_{\beta}^{\beta+\pi} B_m \sin \alpha dx \quad (1)$$

여기서,

- $\phi(t)$  : 기본파 자속밀도에 의한 전기자 자속쇄교
- $\alpha$  : 기계각
- $\beta$  : 전기자 권선의 위치
- $B_m$  : 기본파 자속밀도의 최대값

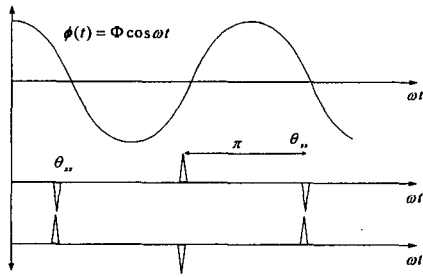


그림 1 wt에 따른 전기자 권선의 자속쇄교  
Fig. 1 Magnetic flux interlinkage according wt

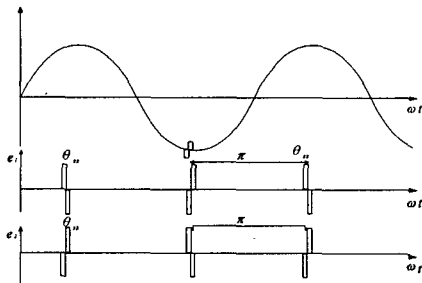
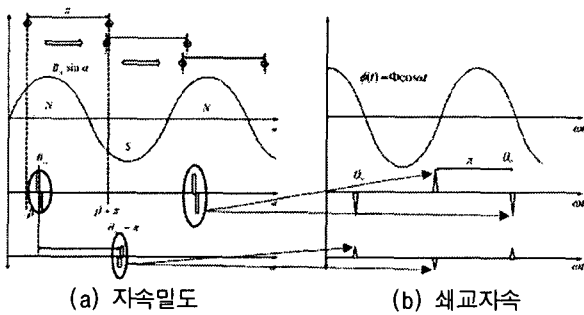


그림 2 전기자 출력전압  
Fig. 2 Output voltage of amature



(a) 자속밀도 (b) 쇄교자속  
(c) 출력전압  
그림 3 계자단락시 공극상의 파형  
Fig. 3 Waveform of airgap

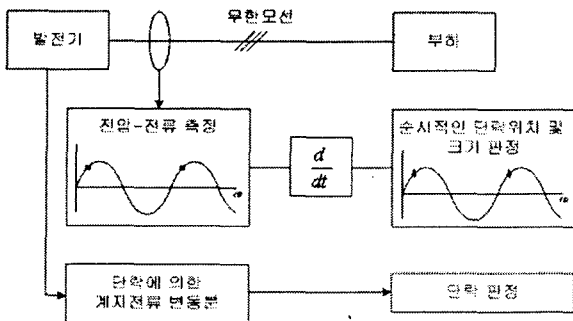


그림 4 센서리스 증간단락 진단알고리즘  
Fig. 4 Sensorless diagnosis algorithm

$$\phi_s(t) = \int_{\beta}^{\beta+\pi} B_s d\alpha \quad (2)$$

여기서,

$\phi_s(t)$  : 누설자속에 의한 전기자 자속쇄교

$B_s(\alpha)$  : 누설자속에 의한 자속밀도

이 때 권선의 위치가  $wt = \beta$ 일 때  $wt$ 에 따른 쇄교자속은 다음과 같이 표현 된다.

$$\phi(t) = \Phi \cos \omega t \quad (3)$$

$$\Phi = \frac{4}{p} B_m l_r \quad (4)$$

여기서,

$\Phi$  : 기본과 자속밀도의 최대값

$p$  : 극수

$l_r$  : 회전자 길이

이 때  $\phi_s$ 는 권선이  $\beta$ 에 위치할 때 쇄교에서 벗어 나게 되며  $\beta - \pi$ 에서 쇄교하게 되므로 이때의 쇄교자속은 그림 1과 같이 되며 이 때 한 개의 누설 자속 성분내 대하여 한주기 동안에 쇄교자속펄스는 두 개가 나타나게 된다. 따라서 전기자 출력전압은 전기자 반작용을 무시할 경우 정현파형 형태의 기본과 자속밀도에 의한 출력전압 및 누설자속에 의한 출력전압으로 나뉘어지며 다음 식과 같이 표현 되며 그림 2와 같이 나타나게 된다.

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} = \omega N \Phi \sin \omega t \quad (5)$$

$$e_s(t) = -N \frac{d\phi_s}{dt} \quad (6)$$

여기서,

$e(t)$  : 기본과 자속밀도에 의한 출력전압

$e_s(t)$  : 누설자속에 의한 출력전압

이 때 계자권선이 정상일 경우 그림 3에서와 같이 두개의 극에서 발생한 쇄교자속에 의한 출력전압이 서로 상쇄됨으로서 출력전압은 기본과 자속밀도에 의한 출력전압만 나타나게 되나 한쪽 극에서 단락이 발생할 경우 그림 3에서 나타낸 바와 같이 쇄교자속에 의한 출력전압이 0이 되지 않음으로서 출력전압에 왜곡된 파형이 나타나게 되어 단락감지 여부 및 위치를 판정할 수 있다.

## 2.2 진단 알고리즘

그림 4에서는 이 때의 센서리스 단락감지 시스템의 진단 알고리즘을 나타내고 있다. 이 경우 발전기의 출력 전압 및 전류를 측정하여 쇄교자속에 의한 출력전압의 왜곡성분을 관찰함으로써 단락의 크

기 및 단락슬롯의 위치를 판별하게 된다. 이 때 출력전압 또는 전류를 미분할 경우 주파수 성분에 비례하여 출력의 크기가 증가하게 되므로 기본과 성분에 비하여 왜곡성분의 크기 증가가 확실하므로 판별이 용이하게 된다. 그러나 파형을 미분할 경우 이러한 왜곡성분 외에 전기적 잡음의 증가도 커지게 되는 단점이 발생하게 된다. 이 때 계자전류가 단락발생시 증가하게 됨으로 센서리스 단락감지 시스템의 경우 전압, 전류의 왜곡파형 및 계자전류의 변동분을 측정하여 단락판정을 하게 된다.

### 3. 시뮬레이션

그림 5는 본 논문에서 사용한 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다. 이 경우 발전기의 부하측은 이상적인 정현파 전압을 가지는 무한모선이며 발전기가 정상적인 상태에서의 계자자속은 이상적인 정현파 형태의 회전자계가 발생한다고 가정한다. 이 때 단락 발생시 계자자속의 변동이 생기게 되나 비대칭성분은 발전기 출력전압에 영향을 미치지 않게 됨으로서 단락에 의한 영향만 그림 6과 같이 펄스 형태의 영향을 미치게 된다. 그림 7은 12턴 중 5턴의 층간단락이 발생한 경우의 계자자속과 이 때의 발전기 내부 기전력을 나타내고 있다. 이 때 발전기의 출력측은 무한모선에 연결되어 있으므로 출력전압 측정의 경우 무한모선의 전압에 의한 영향에 의하여 발전기 층간단락시의 전압변화의 측정이 용이치 않은 단점이 있으며 그림 7에서 보이는 바와 같이 육안으로는 거의 관측이 불가능하다. 그러나 그림 8에서 나타낸 바와 같이 단락에 따라서 고조파 성분이 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 발전기 층간단락현상이 발전기 출력전압의 왜곡현상을 일으킴을 알 수 있으며 단락이 증가하게 될수록 고조파의 크기도 증가함을 알 수 있다.

### 4. 실험 결과

센서리스 단락감지 시스템 구성을 위한 단락시의 발전기 출력전압을 살펴보기 위하여 표 1과 같은 2.2kW급 발전기를 이용하여 단락턴수를 조절하여 출력전압을 측정하였으며 단락에 따른 파형 및 FFT분석을 수행하였다. 그림 9에서는 발전기 출력전압 및 FFT 파형을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 단락이 발생할 경우 계자자속의 감소에 의하여 출력전압이 감소함을 알 수 있으며 단락이 어느 정도 증가하면 이러한 감소가 둔화하게 된다. 이는 턴수 감소에 따라 계자권선의 임피던스가 감소하게 됨으로서 계자전류가 증가하여 전체적인 자속감소가 둔화되기 때문이다. 마찬가지로

주파수 성분의 변화량도 기본과 성분 및 고조파 성분이 감소하다가 증가함을 그림 9에서 나타내고 있다.

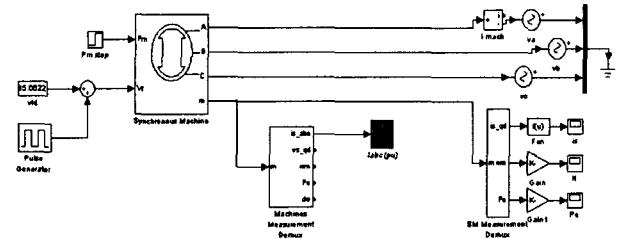


그림 5 시뮬레이션 회로도  
Fig. 5 Simulation circuit

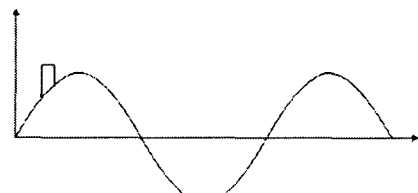
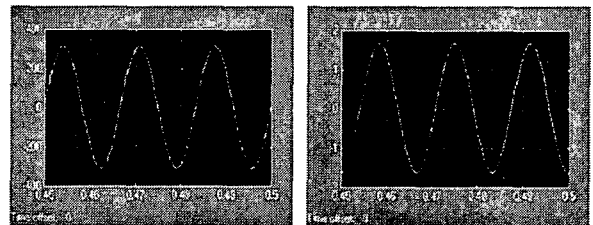


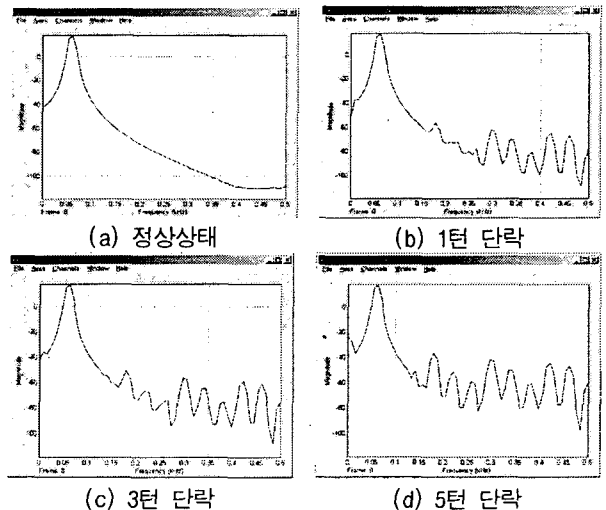
그림 6 이상적인 계자파형  
Fig. 6 Ideal flux density waveform



(a) 자속밀도 (b) 출력전압

그림 7 5턴단락시 계자파형

Fig. 7 Short turn flux density waveform



(a) 정상상태 (b) 1턴 단락

(c) 3턴 단락 (d) 5턴 단락

그림 8 단락턴수에 따른 출력전압의 FFT 파형  
Fig. 8 FFT waveform of output voltage according to short turn number

표 1 발전기 사양  
Table 1 Specification of generator

최대출력	2.2 kW
출력전압	220VAC
회전수	3,600 RPM
극수	2

값이 작으므로 감도가 나빠질 수 있다. 따라서 이를 극복하기 위하여 출력전압을 FFT 분석할 경우 단락에 의하여 고조파 성분이 발생함을 알 수 있었으며 이러한 고조파 성분의 증가를 통하여 단락의 유무를 판정할 수 있다. 그러나 이러한 감지방식은 아직 연구초기 단계에 있으며 보다 정확한 진단기법의 구축을 위해서는 향후 발전회사와 공동으로 실증시험 및 데이터 축적을 통한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

이 논문은 2002년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구에 의하여 연구되었습

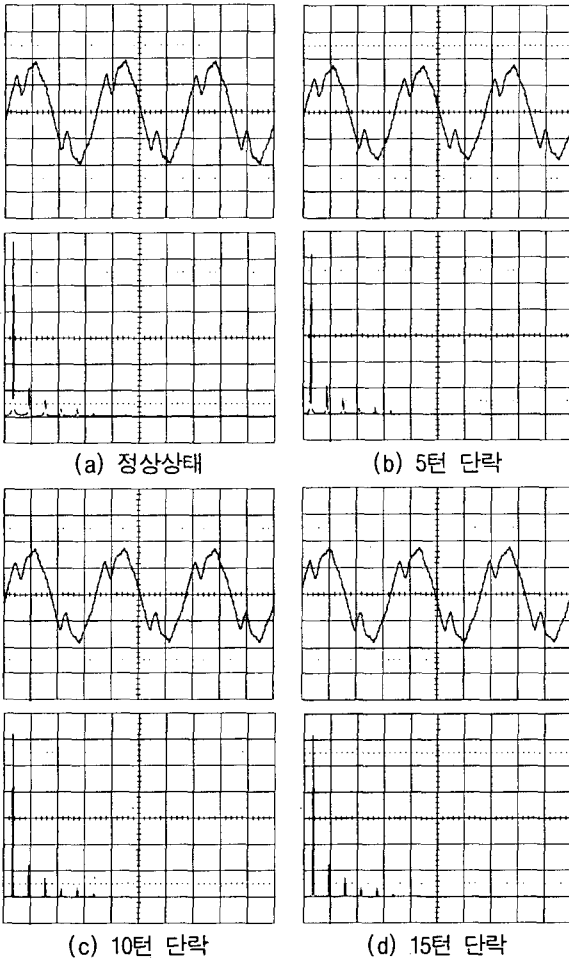


그림 9 출력전압(200V/div) 및 FFT 파형(0.2kHz/div)  
Fig. 9 FFT waveform of output voltage

## 참 고 문 헌

- [1] 이영준, 김희동, 박종정, 주영호, 조지원, 한상욱, 전력연구원, 인천대학교, 충남대학교, "발전기 회전자 층간단락진단 기법", 대한전기학회, 춘계학술대회 논문집, 5, 1998.
- [2] 남중하, 최규하, 이승학, 정석운, 류벽우, 주영호, 이영준, "발전기 계자의 층간단락 감지기 개발", 대한전기학회, 하계 학술대회 산학 특별위원회 특별 Session 및 전시회 논문집, pp. 121-124, 7, 2001.
- [3] Vincent Del Toro, "Basic Electric Machines", Prentice-Hall International Editions, 1990.
- [4] M. P. Jenkins, "On-Line Monitoring of rotor Shorted Turns", IEE Conference Publication No. 401, pp. 55-60, 1994.
- [5] E. Wochnagg, "Turbogenerator Field winding Shoted Turn Detection by AC Flux Measurement", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, pp. 427-431, 1994.
- [6] O. J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd and W. T. Fink, "Detection and Location of Interturn Shorted Circuits in the Stator Windings of operating motors", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, pp. 652-658, June 1994.

## 5. 결 론

본 논문에서 발전소의 주요 고장중의 하나인 발전기의 회전자 층간단락을 감지하기 위한 진단방식 중 발전기의 출력 전압을 관찰하는 센서리스 진단 기법에 관해 알아보았다. 출력전압과 계자자속과의 관계를 시뮬레이션 및 실험을 통한 결과로 판단하였으며 단락발생시 파형에 왜곡이 발생하며 이를 통하여 발전기의 단락 위치 및 단락 턴수의 판별이 가능함을 알 수 있었다. 그러나 이러한 출력전압의 왜곡성분은 전체적인 파형의 크기에 대하여 그