

# 이산 웨이브렛 변환을 이용한 동기발전기 회전자 층간단락 진단에 관한 연구

金長睦<sup>†</sup>, 金詠俊<sup>\*</sup>, 安珍雨<sup>\*\*</sup>, 金興根<sup>\*\*\*</sup>, 鄭泰旭<sup>\*\*\*\*</sup>

## A Study of Shorted-Turn Detection in the Cylindrical Synchronous Generator Rotor Windings via Discrete Wavelet Transform

Jang-Mok Kim, Young-Jun Kim, Jin-Woo Ahan, Heung-Geun Kim, and Tae-Uk Jung

### 요 약

본 논문에서는 이산 웨이브렛 변환을 이용하여 원통형 동기발전기 회전자 권선의 층간단락을 진단하는 방법에 대해 기술하였다. 제안하는 방법에서는 회전자 권선의 층간단락 진단을 위해 다중해상도 분석을 이용하여 회전자 전류를 여러 스케일 영역으로 분할한 후, 각 영역에서의 신호의 에너지 값을 비교하였다. 실험적인 결과는 특정 회전자 슬롯 내에 25%, 42%, 67%, 83%, 99% 단락이 발생한 경우와 정상적인 경우를 비교한 것으로, 그 편차는 층간단락 비율에 반비례하여 나타났다. 이러한 실험적인 결과는 제안한 이산 웨이브렛 변환을 이용한 방법이 원통형 동기발전기 회전자 권선의 층간단락 진단에 적절함을 보여준다.

### ABSTRACT

This paper describes a method for the detection of shorted-turn in the cylindrical synchronous generator rotor windings based on the discrete wavelet transform. Multi-resolution analysis(MRA) based on discrete wavelet transform provides a set of decomposed signals in independent frequency bands, which contain independent dynamic information due to the orthogonality of wavelet function. In the proposed method, shorted-turn detection in rotor windings is based on the decomposition of the rotor currents, where wavelet coefficients of these signals have been extracted. Comparing these extracted coefficients is used for diagnosing the healthy machine from faulty machine. Experimental results are presented for healthy, and machines with 25%, 42%, 67%, 83%, 99% inter-turn short circuits in a rotor slot. Deviation of wavelet coefficients in healthy mode from faulty modes depicts the inverse proportion of shorted-turns. Experimental results show the effectiveness of the proposed method for shorted-turn detection in the cylindrical synchronous generator rotor windings.

**Key Words** : detection, shorted-turns, rotor windings, discrete wavelet transform

### 1. 서 론

복합화력 발전소의 가스터빈 또는 스팀터빈 발전기는 운전 특성상 일일기동정지 및 계통 부하의 변동에 따른 빈번한 출력 증감발 등으로 인하여 회전자 권선의 층간단락에 의한 고장발생이 증가하고 있다. 회전자 권선의 층간단락은 회전자의 열적 불평형을 초래하여 발전기의 진동을 상승시키고, 출력을 제한하며, 또한 발전기의 성능을 저하시키는 등 불시고장의 원인이 된다.<sup>[1]</sup> 이러한 발전기 회전자의 이상 상태를 조기에

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 부산대 전자전기공학부 부교수

E-mail : jmok@pusan.ac.kr

<sup>\*</sup>정회원, 현대자동차 기술연구소

<sup>\*\*</sup>정회원, 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수

<sup>\*\*\*</sup>정회원, 경북대학교 전자전기공학부 교수

<sup>\*\*\*\*</sup>정회원, 한국생산기술연구원 관주연구센터 선임연구원

접수일자 : 2005. 9. 29      1차 심사 : 2005. 10. 21

2차 심사 : 2006. 11. 3      심사완료 : 2006. 11. 16

진단하여 발전기 불시고장을 사전에 예방하는 일은 발전기의 안정운전에 중요한 역할을 담당한다. 기존의 서치코일(search coil)을 이용한 운전중 회전자 권선의 충전단락 진단기법은 회전자 권선의 건전성 및 충전단락 여부를 신뢰성 있게 판정할 수 있지만, 서치코일의 제작 및 설치상의 어려움과 이에 따른 비용을 초래하는 등의 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 기존의 서치코일을 이용하지 않고 회전자의 전류 정보를 이용하여 회전자 권선의 충전단락을 감지할 수 있는 진단기법에 관한 연구를 수행하였다. 발전기 회전자 전류에는 전기자 반작용의 영향으로 인하여 회전자 충전단락에 의해 발생하는 부가적인 고조파 성분이 포함되어 있으므로, 이 회전자 전류신호를 분석하여 회전자 권선의 충전단락을 진단할 수 있다. 회전자의 전류 신호는 시간 영역과 주파수 영역의 정보를 균형적으로 확대·축소할 수 있는 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)을 이용하여 분석하였으며, 실험결과 및 분석을 통해 제안한 진단기법의 가능성을 검증하였다.

## 2. 이산 웨이브렛 변환을 이용한 회전자 권선의 충전단락 진단

### 2.1 웨이브렛 이론

#### 2.1.1 웨이브렛 변환

푸리에 변환(Fourier Transform)은 시간에 따라 주파수 성분이 변조되는 신호에 대해서는 신호의 주파수 특성을 정확히 표현하지 못하므로 비정형(non-stationary) 신호의 분석에는 적합하지 않다. 또한 단구간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform)은 모든 주파수 대역에 대하여 동일한 크기의 윈도우를 사용하므로, 비정형 신호의 분석을 위해서는 적절한 크기의 윈도우의 선택이 중요하지만 이 적응적인 선택에는 많은 어려움이 있다. 따라서 이러한 비정형 신호 분석의 대안으로 제시된 것이 웨이브렛 변환이다. 웨이브렛 변환은 영역의 크기가 가변되는 윈도우를 사용하므로 고주파 대역에서는 좁은 폭의 윈도우를, 저주파 대역에서는 넓은 폭의 윈도우를 사용한다. 웨이브렛은 식 (1)과 같이 정의되어진다.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 변수  $a$ 는 압축계수,  $b$ 는 전이계수이며, 함수  $\psi_{a,b}$ 는 모 웨이브렛(mother wavelet,  $\psi$ )을 확장

및 평행 이동한 함수이다. 압축계수는 웨이브렛의 크기 즉 스케일을 변화시키는 역할을 하며 이 계수에 해당하는 신호의 스케일 성분을 추출하며, 전이계수는 모 웨이브렛의 시간축으로의 이동에 관계된다. 본 논문에서는 실험적인 경험을 바탕으로 모 웨이브렛을 db4로 선정하였다.

#### 2.1.1 이산 웨이브렛 변환과 다중해상도 분석

연속 웨이브렛 변환에서 사용되어진 웨이브렛을 이분 구간으로 샘플링할 경우 직교 웨이브렛을 구성할 수 있으며, 이를 이용한 웨이브렛 변환을 이산 웨이브렛 변환이라 한다<sup>[2]</sup>. 이산 웨이브렛 변환은 신호에 대한 다중해상도 분석(Multi-resolution analysis)을 제공하며, 이는 신호처리 관점에서 보면 필터 뱅크를 기반으로 한 대역별 신호의 재구성과 아주 밀접한 관계가 있다.

다중해상도 분석은 그림 1과 같이 원신호를 저주파수 영역의 성분인 Approximation과 고주파 영역의 성분인 Detail로 분해할 수 있다. 이러한 과정은 그림 2와 같이 고역필터와 저역필터를 사용하는 2가지 필터링의 개념으로 확장될 수 있다.

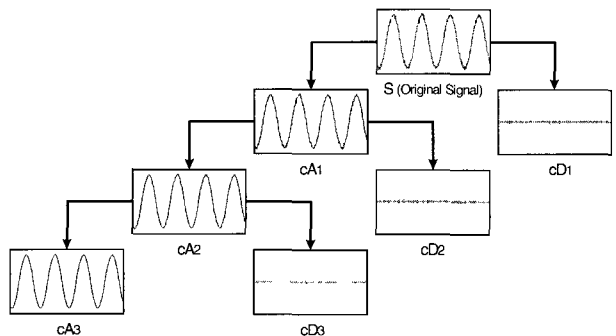


그림 1 다중해상도 분석  
Fig. 1 Multi-resolution analysis

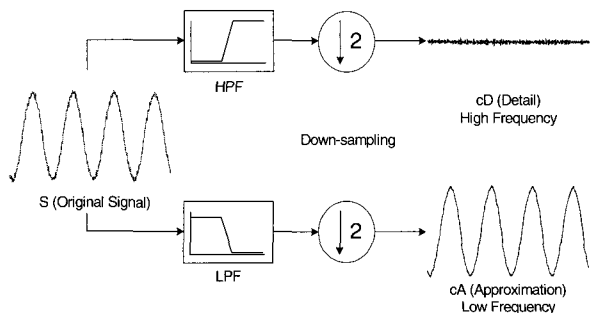


그림 2 다중해상도 분석에 의한 저주파성분과 고주파성분  
Fig. 2 Low-frequency and high-frequency components using MRA

### 2.2 동기발전기 회전자 전류

발전기 회전자의 슬롯권선에서 층간단락이 발생하게 되면 이 슬롯에서의 기자력 변화에 의해 공극에서의 주 자속이 비대칭적으로 분포하게 된다. 이 비대칭적인 자속의 분포는 고정자 권선에 부가적인 고조파 성분의 기전력을 유기시킨다. 고정자 권선에 부하가 연결되어 있을 경우, 전기자 반작용의 영향으로 인하여 공극의 자속에는 층간단락에 의한 특정 고조파 성분이 존재하게 된다. 이들 특정 고조파 성분을 포함한 전기자 반작용 자속은 회전자 권선과 쇄교하게 되어 회전자 권선에 기전력을 유기시킨다. 결국 이 기전력에 의해 회전자 권선에는 층간단락에 의한 특정 고조파 성분이 포함되어 있는 부가적인 교류 성분의 전류가 흐르게 된다. 즉, 동기발전기 회전자의 전류 신호에는 층간단락을 진단할 수 있는 요소인 단락 정보가 내재되어 있는 것이다.

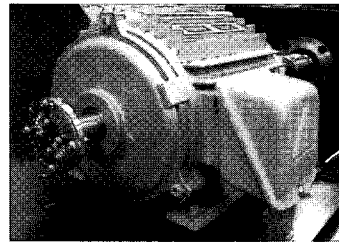


그림 3 2극의 원통형 동기발전기  
Fig. 3 Synchronous generator with a two-pole cylindrical rotor

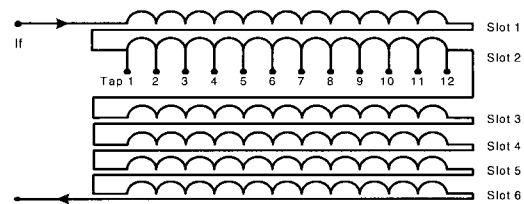


그림 4 회전자 권선의 탭 위치  
Fig. 4 Location of the tapings for rotor windings

### 2.3 층간단락 진단

회전자 권선의 층간단락을 진단하기 위한 회전자 전류의 샘플링 데이터 수는 고정자 전류를 기준으로 주기당 256개이며, 샘플링 주기는 100주기이다. 웨이브렛 변환은 분석하고자 하는 원신호를 시간-스케일 공간으로 변환하여 나타내는 것이므로, 신호의 비교 분석을 위해서는 위상 동조가 필요하다. 따라서 회전자 전류의 위상을 동조시킨 후, 신호의 데이터에 포함되어 있는 랜덤 노이즈를 제거하기 위하여 1주기(고정자 전류 기준)로 평균하였다. 평균된 회전자 전류를 이산 웨이브렛 변환의 다중해상도 분석을 이용하여 7단계로 분할한 후, 고주파 성분에 해당하는 Detail 영역에서의 신호의 에너지 값을 비교 분석함으로써 회전자 권선의 층간단락을 진단하였다.

실험에서는 슬롯2에 제작되어진 12개의 탭을 이용하여 발전기 외부에서 특정 탭을 단락시켜 회전자 권선의 층간단락 비율을 조절하였으며, 실험에 사용되어진 슬롯2의 단락 비율은 25%, 42%, 67%, 83%, 99%이다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 시스템 구성 및 실험

#### 3.1.1 회전자 권선의 층간단락

본 논문에서는 동기발전기 회전자 권선의 층간단락 실험을 위하여 그림 3과 같이 발전기 외부에서 회전자 슬롯권선의 단락 비율을 조절할 수 있는 2극의 소용량 원통형 동기발전기를 설계 제작하였다. 그림 4는 슬롯 권선의 단락비율을 조절하기 위해 특별히 제작되어진 탭의 위치를 나타낸다.

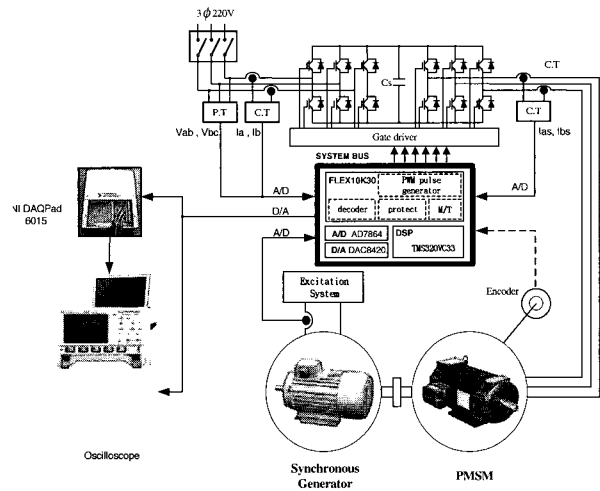


그림 5 전체 시스템의 구성  
Fig. 5 Configuration of the system

#### 3.1.2 시스템 구성

실험을 위해 그림 5와 같이 전체 시스템을 구성하였다. 기본 구성은 TI사의 TMS320VC33을 이용한 주 제어기, IPM(Intelligent Power Module)을 이용한 3상 PWM 컨버터-인버터 시스템, 영구자석 동기전동기-원통형 동기발전기 세트, 그리고 회전자 전류 신호의 데

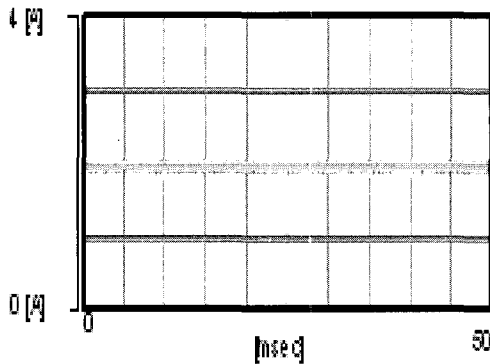
이더 취득을 위한 NI사의 Data Acquisition Device인 DAQPad-6015로 구성되어 있다.

**3.2 실험결과 및 분석**

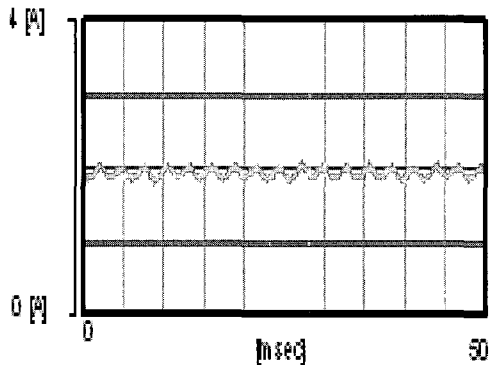
그림 6은 정상적인 조건에서 고정자 권선에 부하를 연결하지 않았을 경우와 연결하였을 경우의 회전자 전류를 나타낸 것으로, 부하가 연결된 경우 전기자 반작용의 영향으로 인하여 회전자 전류에 추가적인 교류 성분이 존재하게 된다. 이런 전기자 반작용의 영향은 부하의 역율, 발전기 권선의 분포 등에 따라 다르게 나타난다.

그림 7은 그림 6의 회전자 전류를 이산 푸리에 변환을 통해 주파수 성분으로 분석한 것이다. 실험에 사용된 동기발전기의 경우, 전기자 반작용의 영향으로 인하여 회전자속도의 6배 성분이 크게 나타난다.

그림 8은 정상적인 조건일 때, 이산 웨이브렛 변환의 다중해상도 분석을 이용하여 1주기로 평균한 회전자 전류 신호를 7단계로 분할한 것이다.

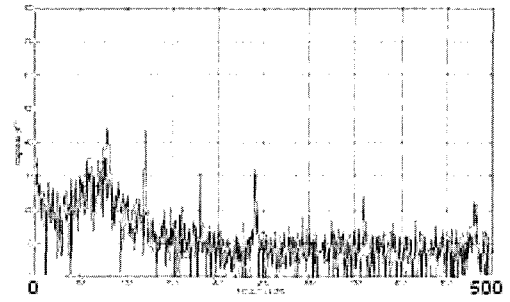


(a) 무부하

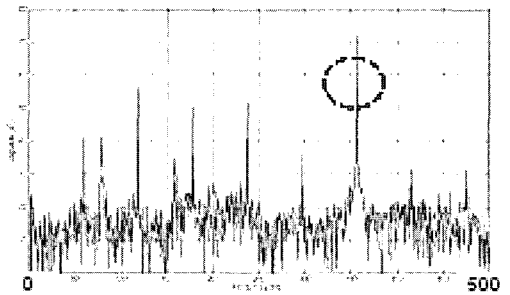


(b) 부하 연결

그림 6 회전자 전류  
Fig. 6 Rotor currents



(a) 무부하



(b) 부하 연결

그림 7 회전자 전류의 주파수 분석

Fig. 7 Frequency spectrum of rotor currents

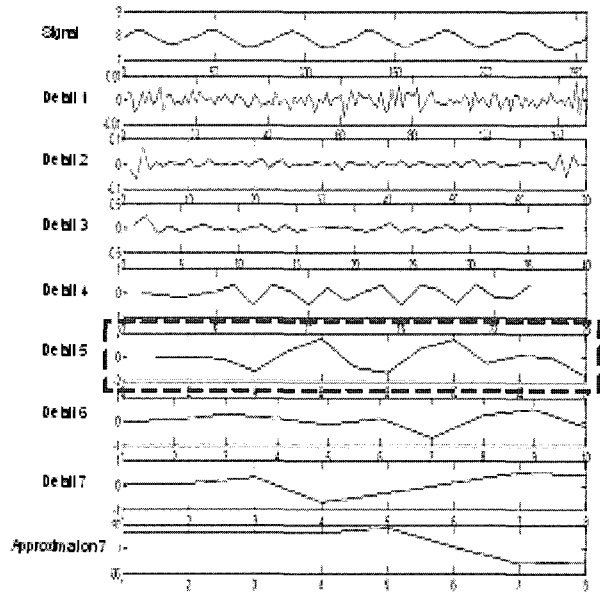


그림 8 정상조건일 때의 회전자 전류 신호의 다중해상도 분석  
Fig. 8 Multi-resolution analysis of the rotor current for healthy

**3.2.1 발전기의 출력이 일정할 경우**

그림 9는 발전기의 출력이 일정하도록 회전자 전류의 크기를 조절한 것으로, 회전자 슬롯권선의 증간단

락 비율이 높을수록 더 큰 회전자 전류가 필요함을 알 수 있다.

그림 10은 7단계로 분할되어진 회전자 전류 신호들 중에서 고주파 성분에 해당하는 Detail 영역에서의 신호의 에너지 값을 층간단락 비율별로 나타낸 것이다. 특히 Detail 5영역에서의 에너지 값이 회전자 권선의 층간단락 비율에 반비례하여 나타남을 알 수 있다.

그림 11은 분석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 이러한 과정을 20번 반복한 후, Detail 5영역에서의 에너지 값을 회전자 권선의 층간단락 비율별로 나타낸 것이다. 그림에서 신호의 에너지 값은 층간단락별로 비교적 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

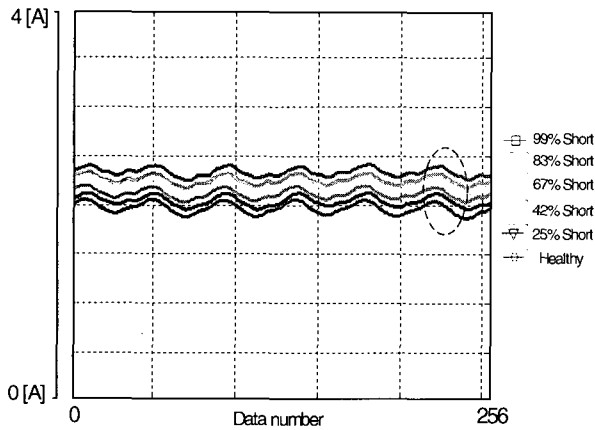


그림 9 층간단락 비율별 회전자 전류 (출력 일정)  
Fig. 9 Rotor currents in healthy and faulty rotor windings

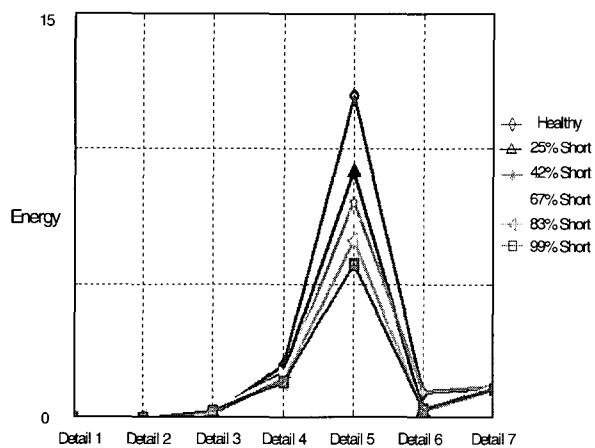


그림 10 층간단락 비율별 각 스케일에서의 에너지 비교 (출력 일정)  
Fig. 10 Energy stored in each scale in healthy and faulty rotor windings

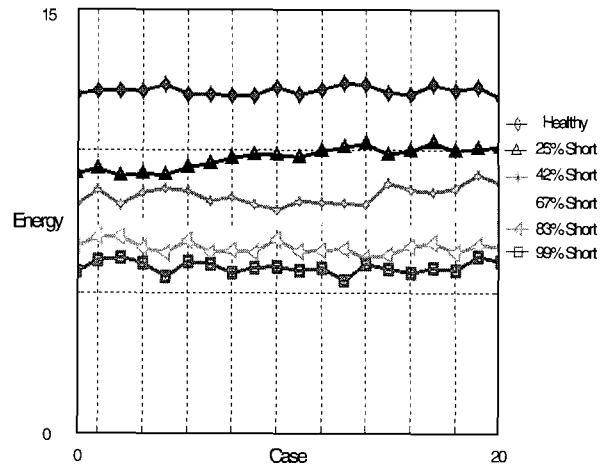


그림 11 층간단락 비율별 스케일 5에서의 에너지 비교 (출력 일정)  
Fig. 11 Energy stored in scale 5 in healthy and faulty rotor windings

### 3.2.2 회전자 전류가 일정할 경우

그림 12는 회전자 전류의 크기가 일정하게 유지될 때의 회전자 전류를 층간단락 비율별로 나타낸 것이며, 그림 13과 그림 14는 발전기 출력이 일정한 경우와 같은 분석과정을 반복하여 나타낸 것이다. 앞선 결과와 같이 Detail 5영역에서의 에너지 값이 회전자 권선의 층간단락 비율에 반비례하여 나타남을 알 수 있다. 따라서 이러한 정보를 이용하여 회전자 권선의 층간단락의 여부 및 단락 비율을 진단할 수 있다.

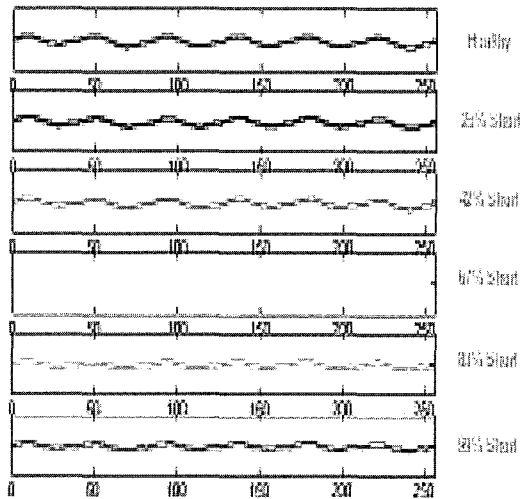


그림 12 층간단락 비율별 회전자 전류 (회전자 전류 일정)  
Fig. 12 Rotor currents in healthy and faulty rotor windings

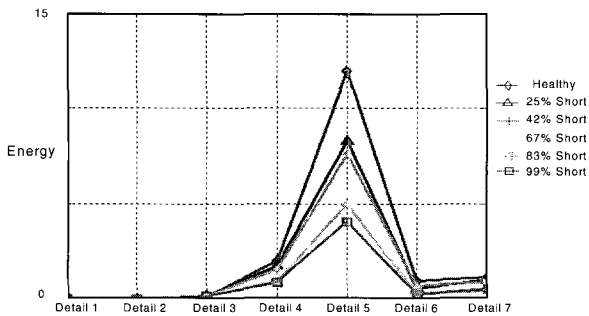


그림 13 층간단락 비율별 각 스케일에서의 에너지 비교  
Fig. 13 Energy stored in each scale in healthy and faulty rotor windings

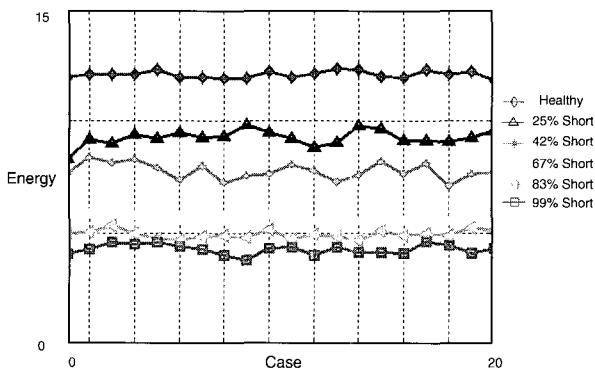


그림 14 층간단락 비율별 스케일 5에서의 에너지 비교  
Fig. 14 Energy stored in scale 5 in healthy and faulty rotor windings

#### 4. 결 론

본 논문에서는 이산 웨이브렛 변환을 이용하여 동기발전기 회전자 권선의 층간단락을 감지할 수 있는 진단기법에 관한 연구를 수행하였다. 회전자 전류를 여러 스케일 영역으로 분할한 후, 각 스케일 영역에서의 신호의 에너지 값을 비교 분석함으로써 회전자 권선의 층간단락을 진단할 수 있었으며, 실험 및 분석을 통하여 그 가능성을 검증하였다. 향후 보다 정확한 동기발전기 회전자 권선의 층간단락 진단을 위하여 다양한 발전기에 대한 연구 수행 및 데이터 베이스 구축을 위한 연구가 요망된다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호:R2005-B-109)주관으로 수행된 과제임.

#### 참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사 전력연구원 “발전기 회전자 On-Line 단락 감시시스템 개발”, 1999년. 3월.
- [2] 이승훈, 윤동환, “알기쉬운 웨이브렛 변환”, 제2판, 진한도서.
- [3] 한국전기연구소, “발전설비 진단 및 정비기술 개발, 발전기 On-Line 진단시스템 개발”, 2000년 7월.
- [4] 박용환, “동기발전기 여자시스템의 신뢰도 향상을 위한 시험·진단장치 구현에 관한 연구”, 연세대학교 전기공학과 석사학위논문, 2003년 6월.
- [5] “The need for shorted-turn detection system”, GeneratorTech Inc., Internet Website, <http://www.generatortech.com>.
- [6] D. R. Albright, “Interturn short-circuit detector for turbine-generator rotor windings”, Institute of electrical and electronics engineers summer power meeting and EHV conference, 1970.
- [7] E. Woschnagg, “Turbogenerator field winding shorted turn detection by AC flux measurement”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9 No. 2, June 1994.
- [8] J. Penman, H. Jiang, “The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous generators by analysing excitation current harmonics”, Opportunities and Advances in International Power Generation, 18-20. th March 1996, Conference Publication No.419, 1996.
- [9] Wan Shuting, Li Heming, Li Yonggang, Wang Yi, “The diagnosis method of generator rotor winding inter-turn short circuit fault based on excitation current harmonics”, Power Electronics and Drive Systems 2003. The Fifth Vol. 2 pp. 1669-1673, Nov. 2003.
- [10] Stephane Mallat, “A Wavelet tour of signal processing”, Academic Press, 1998.
- [11] Translated by R. Ryan, “Fourier analysis and applications”, Springer, 1998.
- [12] 조정균, “웨이브렛을 이용한 결함 규명 문제의 다중분해능 해석”, 서울대학교 전기공학과 석사학위논문, 1999년 2월.111.
- [13] Paresh. C. SEN, “Principles of electric machines and power electronics”, Second edition, Wiley, 1997.
- [14] Arthur R. Bergen, Vijay Vittal, “Power Systems Analysis”, Second edition, Prentice Hall, 2000.
- [15] Robert Stein, William T. Hunt, Jr., “Electric power system components”, Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- [16] William D. Stevenson, Jr, “Elements of power system analysis”, Fourth edition, McGraw-Hill, INC., 1982.
- [17] Li Yonggang, Li Heming, Zhao Hua, Wan Shuting, “Fault identification method of rotor inter turn

short-circuit using stator winding detection”, Electrical Machines and Systems 2003, Sixth International Conference on Vol. 2 pp. 856-860, Nov. 2003.

- [18] K. Abbaszadeh, J. Milimonfared, M. Haji, H. A. Toliyat, "Broken bar detection in induction motor via Wavelet transformation", The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001.
- [19] 김철환, 고영훈, "웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag 검출", 전기학회 논문지 제9호, 2000년 9월.
- [20] 최태욱, "웨이브렛과 신경망 알고리즘을 이용한 회전기기 이상진단", 부산대학교 조선해양공학과 석사학위논문, 2001년 2월.
- [21] 이진목, 김홍균, 최재호, 이상훈, "이산웨이브릿을 이용한 전력외란 측정 시스템", 전력전자학회 논문지, 2003년 12월.
- [22] 김선자, 전용석, 이승학, 최규하, "발전기 회전자의 층간 단락에 대한 특성 해석", 전력전자 학술대회 논문집, 2003.



**김홍근(金興根)**

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수.



**정태욱(鄭泰旭)**

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~2005년 LG 전자(주) 책임연구원. 2006년~현재 한국생산기술연구원 관주연구센터 선임연구원.

저 자 소 개



**김장목(金長睦)**

1961년 8월 9일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년~2001년 한국전력 전력연구원 선임연구원. 2001년 5월~현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신연구소 기획부장. 2001년 3월~ 현재 부산대 전자전기공학부 부교수. 당 학회 학술위원.



**김영준(金詠俊)**

1978년 12월 1일생. 2003년 부경대 전기공학과 졸업. 2005년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 현대자동차 기술연구소 근무.



**안진우(安珍雨)**

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수.