

이산 웨이브렛 변환을 이용한 동기발전기 회전자 층간단락 진단에 관한 연구

김영준, 김장목
부산대학교

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

Y.J. Kim, J.M. Kim
Pusan National University

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. 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 show the effectiveness of the proposed method for shorted-turn detection in the cylindrical synchronous generator rotor windings.

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.^[1] 기존의 서치코일(search coil)을 이용한 운전중 진단기법은 회전자 권선의 건전성 및 층간단락 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 회전자 전류를 분석하여 회전자 권선의 층간단락을 감지할 수 있는 진단기법에 관한 연구를 수행하였

다. 발전기 회전자 전류에는 전기자 반작용의 영향으로 인하여 회전자 층간단락에 의해 발생하는 부가적인 고조파 성분이 포함되어 있으므로, 이 회전자 전류신호를 분석하여 회전자 권선의 층간단락을 진단할 수 있다. 회전자의 전류 신호는 시간 영역과 주파수 영역의 정보를 균형적으로 확대·축소할 수 있는 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)을 이용하여 분석하였다.

2. 이산 웨이브렛 변환을 이용한 회전자 권선의 층간단락 진단

2.1 웨이브렛 이론

2.1.1 웨이브렛 변환

웨이브렛 변환은 크기를 가변할 수 있는 웨이브렛을 이용하여 신호의 부분적인 스케일 성분을 추출하는 방법으로, 식 (1)과 같이 정의되어진다.

$$W_f(b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{b,a}^*(t) dt \tag{1}$$
$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

함수 ψ 는 모 웨이브렛(mother wavelet)로서, 압축계수 a 에 의해서 확장·수축이, 전이계수 b 에 의해서 이동이 가능하다. 본 논문에서는 실험적인 경험을 바탕으로 모 웨이브렛을 db4로 선정하였다.

2.1.2 이산 웨이브렛 변환과 다중해상도 분석

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 저주파 성분인 Approximation과 고주파 성분인 Detail로 분할할 수 있는데, 이러한 과정은 고역필터와 저역필터를 사용하는 2가지 필터링의 개념으로 확장될 수 있다.

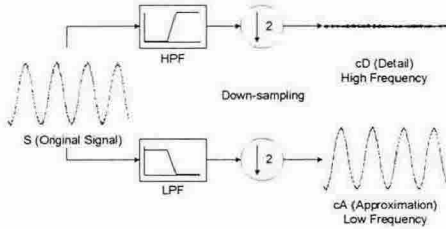


그림 1 다중해상도 분석
Fig. 1 Multi-resolution analysis

2.2 층간단락 진단

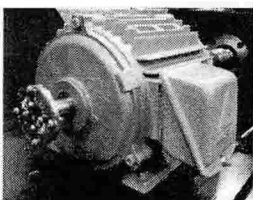
발전기 회전자 권선에 층간단락이 발생하면 공극의 자속이 비대칭적으로 분포하게 되어, 고정자 권선에는 부가적인 고조파 성분의 기전력이 유기된다. 고정자 권선에 부하가 연결되어 있을 경우, 전기자 반작용의 영향으로 인하여 회전자 전류에는 층간단락에 의한 특정 고조파 성분이 포함된다.

회전자 전류 데이터는 층간단락별로 취득되었으며, 이때 발전기의 출력은 동일하다. 샘플링 데이터 수는 고정자 전류를 기준으로 주기당 256개이며, 샘플링 주기는 100주기이다. 이산 웨이브렛 변환의 다중해상도 분석을 이용하여 회전자 전류를 7단계로 분할한 후, 고주파 성분에 해당하는 Detail 영역에서의 신호의 에너지 값을 비교 분석함으로써 회전자 권선의 층간단락을 진단하였다.

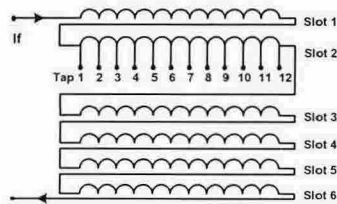
3. 실험 및 결과

3.1 시스템 구성 및 실험

본 논문에서는 회전자 권선의 층간단락 실험을 위하여 그림 2와 같이 발전기 외부에서 회전자 슬롯권선을 단락할 수 있는 2극의 소용량 원통형 동기발전기를 설계 제작하였다.



(a) 동기발전기



(b) 회전자 권선

그림 2 2극의 원통형 동기발전기 및 회전자 권선
Fig. 2 Synchronous generator with a two-pole cylindrical rotor and rotor windings

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.

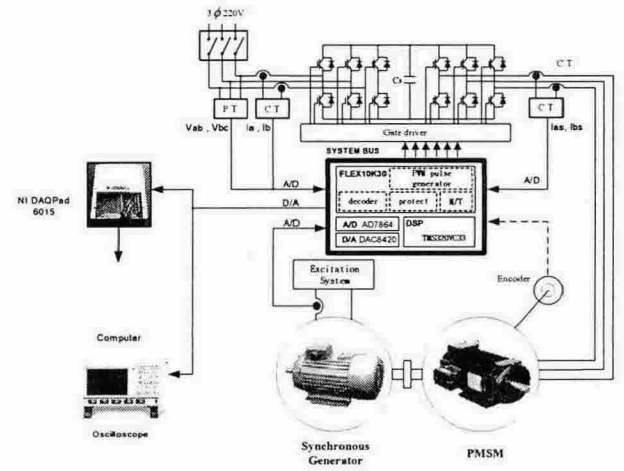
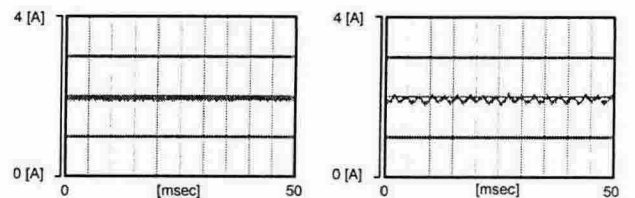


그림 3 전체 시스템의 구성
Fig. 3 Configuration of the system

실험을 위한 전체 시스템은 그림 3과 같이 TI사의 TMS320VC33을 이용한 제어기, 전력변환장치, M-G 세트, 그리고 회전자 전류 신호의 데이터 취득을 위한 Data Acquisition Device로 구성되어 있다.

3.2 실험결과 및 분석

그림 4는 정상적인 조건에서 고정자 권선에 부하를 연결하지 않았을 경우와 연결하였을 경우의 회전자 전류를 나타낸 것으로, 부하가 연결된 경우 전기자 반작용의 영향으로 인하여 회전자 전류에 부가적인 교류 성분이 존재하게 된다. 이런 전기자 반작용의 영향은 부하의 역률, 발전기 권선의 분포 등에 따라 다르게 나타난다.



(a) 무부하

(b) 부하 연결

그림 4 회전자 전류
Fig. 4 Rotor currents

그림 5는 정상적인 조건일 때, 이산 웨이브렛 변환의 다중해상도 분석을 이용하여 회전자 전류 신호를 7단계로 분할한 것이다.

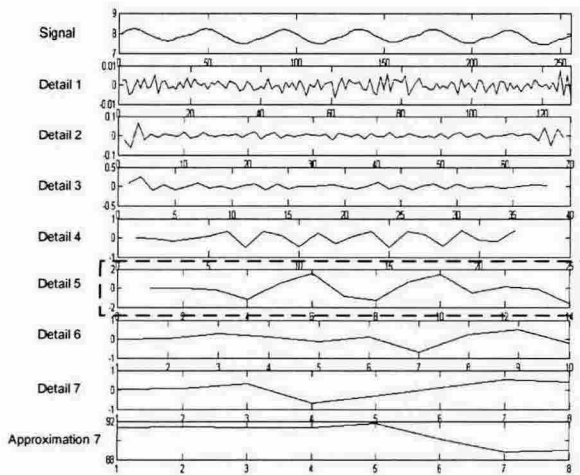


그림 5 정상조건일 때의 회전자 전류 신호의 다중해상도 분석

Fig. 5 Multi-resolution analysis of the rotor current for healthy

그림 6은 7단계로 분할되어진 회전자 전류 신호들 중에서 고주파 성분에 해당하는 Detail 영역에서의 신호의 에너지 값을 층간단락 비율별로 나타낸 것이다. Detail 5영역에서의 에너지 값이 회전자 권선의 층간단락 비율에 반비례하여 나타남을 알 수 있다.

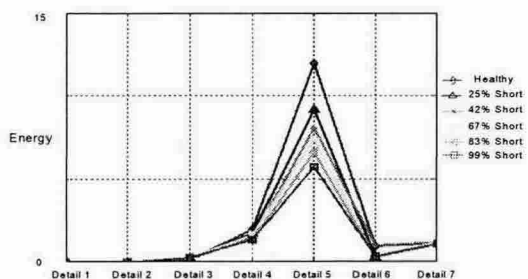


그림 6 층간단락 비율별 각 스케일에서의 에너지 비교
Fig. 6 Energy stored in each scale in healthy and faulty rotor windings

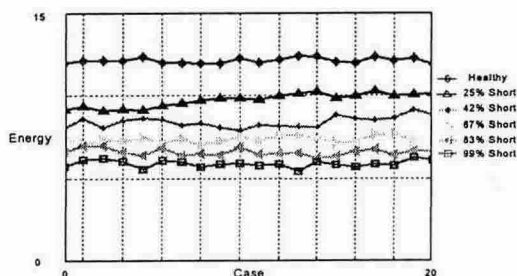


그림 7 층간단락 비율별 스케일 5에서의 에너지 비교
Fig. 7 Energy stored in scale 5 in healthy and faulty rotor windings

그림 7은 분석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 이러한 과정을 20번 반복한 후, Detail 5영역에서의 에너지 값을 회전자 권선의 층간단락 비율별로 나타낸 것이다. 그림에서 신호의 에너지 값이 층간단락 비율별로 비교적 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

따라서 이러한 분석 결과를 통하여 회전자 권선의 층간단락의 여부 및 단락 비율을 진단할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 이산 웨이블릿 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 분석 및 데이터 베이스 구축을 위한 연구가 요망된다.

참고 문헌

- [1] 한국전력공사 전력연구원 "발전기 회전자 On-Line 단락 감시시스템 개발", 1999년. 3월.
- [2] 한국전기연구소, "발전설비 진단 및 정비기술 개발, 발전기 On-Line 진단시스템 개발", 2000년 7월.
- [3] 이승훈, 윤동한, "알기쉬운 웨이블릿 변환", 제2판, 진한도서.
- [4] Stephane Mallat, "A Wavelet tour of signal processing", Academic Press, 1998.
- [5] "The need for shorted-turn detection system", Generator Tech Inc., Internet Website, <http://www.generatortech.com>.
- [6] 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, 18-20th March 1996, Conference Publication No.419, 1996.
- [7] 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.
- [8] 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.