

교류발전기 보호를 위한 고장검출 알고리즘의 비교 분석

\*박철원<sup>0</sup>, \*\*신광철, \*\*신명철  
\*강릉대학교 전기정보통신공학부, \*\*성균관대학교 정보통신공학부

A Comparative Analysis of Fault Detection Algorithm for AC Generator Protection

\*Chul-Won Park, \*\*Kwang-Chul Shin, \*\*Myong-Chul Shin  
\*Kangnung National University, \*\*SungKyunKwan University

**Abstract** - Current percentage differential relaying has been recognized as the principal basis of main protection for stator windings of AC generator. The DWT has merit of obtaining frequency characteristics in time domain. In order to compensate for DFT's defects, we proposed fault detection algorithm using DWT. This paper describes a comparative analysis about conventional DFT-based DFR and advanced DWT-based relaying.

1. 서 론

발전소 계통의 사고빈도는 다른 계통에 비하여 매우 적다. 그러나 일단 전력계통에서 발전기 내부나 인근 모선에서 사고가 발생하면 사고 발전기뿐만 아니라 인근 발전기들에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 이때 사고를 그대로 방치하거나 신속하게 제거하지 않으면 광역정전에 이를 수 있고, 장기간의 운전정지에 의한 경제적인 손실 등의 심각한 결과가 초래하게 된다. 이에 따라 전력계통망에서 전력수급의 안정적인 운영과 평형을 이룰 수 있도록 발전기 보호는 매우 중요한 부분이라 할 수 있다[1,4].

교류발전기에 발생 가능한 사고는 절연열화에 의한 내부적인 요인과 외부요인에 의한 돌발적인 사고가 존재한다. 발전기의 사고는 상대적으로 권선에서 많이 발생하는데, 특히 고정자 권선의 상간단락, 층간단락, 지락사고 및 과열에 의한 단선사고가 일어난다. 고장을 감지한 보호계전기는 사고의 경중에 따라 비상정지, 급정지, 구부하정지, 경보 등의 조치를 취하게 된다[2]. 한편, 한국형 표준 원전을 탄생시킨 국내에서는 발전소의 핵심인 보호 제어시스템은 완성인도방식으로 전량 도입되어 운영될 뿐 그 원천기술에 대한 연구개발은 미미하다. 다만 고무적인 것은, 분산전원과 신재생에너지원의 계통연계 기술 관련해서 풍력발전의 고장시 계통에 대한 영향에 대한 연구가 시작되었다는 것이다[5,6]. 또 국내에 도입된 시스템은 회사 및 발전방식에 따라 제각기 다르기 때문에 시공 및 개발을 위해서 표준화가 필요하다. 해외에서는 발전기의 보호계전시스템에 대하여 많은 관심을 가지고 있는 바, 발전기의 내부고장검출을 위하여 디지털 컴퓨터를 사용한 기법이 처음 발표된 이후, 다양한 보호계전 알고리즘이 제안되었고 AC Generator Protection에 관한 Standards가 제정되었다[1,3].

현재까지 발표된 보호기법에서 발전기의 고정자 사고 검출위한 가장 기본적인 검출 알고리즘은, 순시치 입력 전류와 출력전류의 비교검출법이다. 현재 가장 많이 사용되는 방법으로 DFT 필터에 의한 기본파 및 고조파 추출에 의한 DFR 이다[7-9]. 이외에 계자전류의 고조파와 전압의 고조파를 이용한 방법, 영상분 전압과 제3고조파를 이용한 방법, ANN을 이용한 고장검출기법 등이 제안되었다[10-13]. 또 주파수 영역으로 변환하는 과정에

서 시간 정보가 손실되는 전통적인 Fourier 분석의 단점을 개선한 Wavelet 변환이 발표되었다. 이에 따라 DWT를 적용한 고장 검출 알고리즘들이 제안되었다[14]. 그러나 아직까지 발전기 권선의 전 범위에 대한 완전한 보호 기법으로 공인된 것이 없으며, 다양한 접지시스템에서 고정자 100% 지락사고 검출기법도 미해결 과제로 알려져 있다. 또 발전기의 상세모델링과 내부권선 고장시 물레이션에 대하여도 향후 해결해야 할 과제로 남아있다.

본 연구에서는 발전기의 여러 가지 모델링과 사고모의 데이터를 활용해서 입력전류와 출력전류의 DFT에 의한 전형적인 DFR과 DWT에 의한 고장검출알고리즘을 오프라인 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하였다.

2. 교류발전기의 보호

그림 1은 교류발전기 보호에 대한 사례이다. 발전기 시스템의 보호에는, 고정자 비율차동(87G), 고정자지락(64S), 계자상실(40), 역상전류(48), 역전력(32), 전압역제과전류(51V), 과전압/저전압(59/27), 고주파수/저주파수(81O/U) 등이 요구된다[1,7].

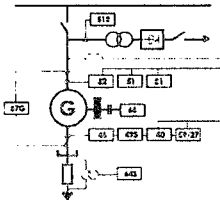


그림 1 교류 발전기 보호 사례

그림 2는 대용량 교류발전기의 주보호인 비율차동계전 방식이다[7].

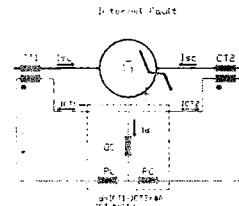


그림 2 비율차동계전방식

3. 교류발전기 모델링과 사고 모의

3.1 EMTP/ATP에 의한 모델링

EMTP/ATP의 UM 모듈을 이용하여 전기회로는 d-q-0축으로 표현하고 기계적 요소는 전기회로로 유사

화 하여 표현된다. 그림 3은 EMTP/ATP에서의 3상 및 dq 권선의 다이어그램이다[1].

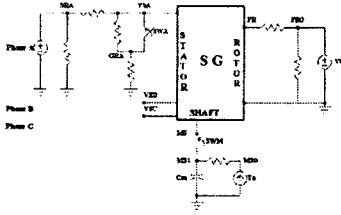


그림 3 EMTP/ATP 의 다이어그램

### 3.2 ATP에 의한 모델링

그림 4는 모델계통의 과도상태 해석을 위하여 T/L, 승압변압기, 부하 및 발전기로 구성하였다. 발전기의 과도리액턴스는 0.33[pu], 정격용량은 250[MVA], 정격전압은 13.8[kV]로 하였다.

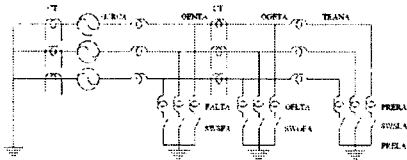


그림 4 ATP 의 모델계통도

### 3.3 PSCAD/EMTDC 에 의한 모델링

그림 5와 같이 PSCAD/EMTDC에서는, 접지측의 전류를 수집할 수 없다. PSCAD/EMTDC에서, 발전기 내부사고와 유사한 상황을 연출하기 위하여, 모의하고자하는 발전기 내부 정수의 일부를 그림 5와 같이 고정자 외부에 여러 개로 나누어 배치함으로써 단락 및 지락사고에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 모의한 계통은 발전기, 승압변압기, 강압변압기, 부하로 구성하였다. 그림 6은 지락사고 모의 계통도이다.

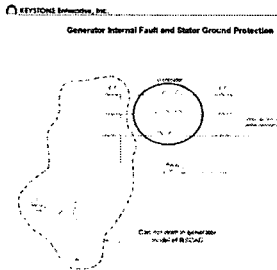


그림 5 PSCAD 메이커의 소견

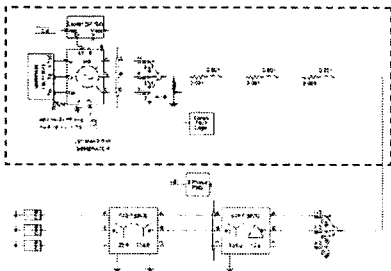


그림 6 PSCAD/EMTDC 의 지락사고 모델링

### 3.4 MATLAB 에 의한 모델링

그림 7은 MATLAB에서의 동기기 과도해석을 위한 상호 결합된 회로의 개략도이다. 고정자에 고정자권선 3개, 회전자에 계자권선이 장착되어 있고, 두 개의 가상권선인 d축 및 q축 단락권선이 회전자에 추가된다.

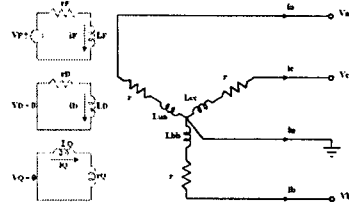


그림 7 MATLAB 의 과도해석 모델링

## 4. 교류발전기의 고장검출 알고리즘

### 4.1 DFT 필터에 의한 비유차동계전기법

DFR(87G)은 차전류와 합성전류에 구한 후, 동작특성 곡선에 따라 발전기의 내부고장을 검출한다. 차전류  $I_d$ 는 발전기 양단 접지측과 계통측 사이의 전류차가 된다. 억제전류  $I_r$ 은 식(1)로 정의된다. 여기서,  $I_p$ 와  $I_s$ 는 각각 접지측과 계통측의 전류이다. 그리고 식(2)와 같이 차전류와 억제전류의 비를 이용해서 설정비율을 초과할 때 발전기의 내부고장이 판단된다.  $Slope_1, Slope_2$  값에 따라 고장검출 감도가 결정된다. 전류 페이지의 실수부와 허수부는 두개의 상관을 사용하여 디지털 컴퓨터에 의하여 결정된다.

$$I_r = \frac{I_p + I_s}{2} \quad (1)$$

$$I_d \geq Slope_1 \cdot I_r \text{ AND } I_d \geq Slope_2 \cdot I_r \quad (2)$$

### 4.2 DWT에 의한 고장검출 기법

DWT에 의한 발전기의 고장검출 판별기법에 대한 간략한 설명이다[3].

- step 1 : MLD 과정을 통하여 발전기의 고장판별에 용이한 적당한 모 웨이브릿을 선정한다.
- step 2 : 모 웨이브릿의 레벨을 가변하면서 선정된 모 웨이브릿의 적당한 레벨을 선정한다.
- step 3 : Detail 1 값에 대한 임계치1 여부를 판단한다.
- step 4 : 특정 웨이브릿 성분의 비를 값을 계산한다.
- step 5 : 임계치2의 여부를 판단하여 트립여부 및 반복 여부를 판단한다.

식(3)은 진동성을 지닌 변환된 d1값의 고장판별 특징을 위한 특정웨이브릿 성분의 비율이다.

$$I_{\text{phase-ratio}} = \frac{I_{\text{phase-avg}}^k - \text{lmvl}}{I_{\text{phase-avg}} \cdot |d1|} \quad (3)$$

## 5. 시뮬레이션의 결과

본 연구에서의 샘플링주파수는 720[Hz]로 주기당 샘플링수는 12S/C에서 7,680[Hz]인 128S/C 등으로 다양하게 선택하였다. 고장발생시점은 2주기 시점인 0.03333[ms]에서 0.0375[ms]로 전압의 위상각  $0^\circ - 90^\circ$  따라 가변하였다. 모의한 고장의 종류는 1선지락, 2선단락, 3상단락고장 등이다. 여러 가지 모델링 중에서 그림 8은, ATP를 이용한 모델을 내부 단락고장 시뮬레이션한

후, WPCplot로 그린 3상 입력 및 출력전류와 A상의 입력 및 출력전류이다. 고장발생시점은, 12S/C에서 24번째 sample point인 0.03333[ms]이다. 그림 9는 이 경우 3상 외부단락고장 시물레이션시 A상의 입력 및 출력전류이다.

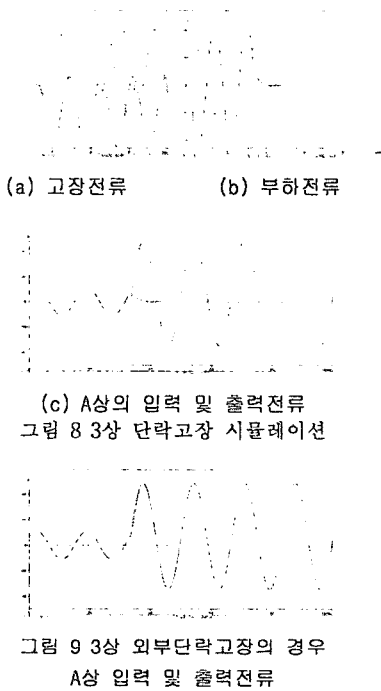


그림 10은 MATLAB을 이용하여 수행한 A상전류에 대하여 다우비시 모함수 db2 레벨 5의 분해결과이다.

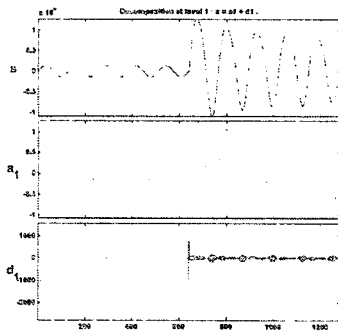


표 1은 DFT 기반 비유차동보호계전기법과 DWT 기반 고장검출알고리즘에 대한 비교분석이다.

표 1. 계전기법의 비교

	DFT 기반 DFR	DWT 기반 알고리즘
계전신호	입력 및 출력전류	고장전류 또는 차전류
특성곡선	사용 가능	사용 하지 않음
이동윈도우길이	가변용이	가변불편
디지털 필터	DFT	DWT
고장판별시간	신속	신속
계통 이상현상에 대한 적용성	없음	높음

## 6. 결 론

본 연구에서는 ATP/EMTP, PSCAD/EMTDC, ATP, MATLAB Tools에 의한 발전기의 여러 가지 모델링과 사고모의에 대하여 검토하였다. 이들의 발전기 고정자 내부 고장 모의 데이터를 활용하여 종래의 DFT에 의한 비유차동계전기법(DFR)과 개선된 DWT에 의한 고장검출 알고리즘을 오프라인 시물레이션을 통하여 비교 분석하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 박철원, "발전기 시스템의 과도해석과 IED 용 개선된 알고리즘 개발", 최종보고서 pp. 1-120 2006. 12.
- [2] 전력연구원, "울진 N/P #4 Unit 발전기 준공시험 보고서, 1998. 4.
- [3] 박철원, 신명철, "고장전류의 웨이브릿 변환을 이용한 동기발전기 보호 알고리즘", 대한전기학회 논문지 Vol. 56, No. 5, pp. 834-840, 2007. 5.
- [4] Y.S. Lyu, B.S. Cho, J.J. Yang, H.J. Oh, B.C. Ahn, "A Study on the Optimal Protection of a In-Generator Earth Fault", The Asian Conf. on Power System Protection, pp. 212-217, Oct. 2003.
- [5] 조운성, 김태균 외, "실시간 전력계통 시물레이터를 이용한 발전기 보호계전기 모델 개발", 대한전기학회 논문지, Vol. 56, No. 2, pp. 240-247, 2007. 2.
- [6] 권영진, 강상희, "동기발전단지 보호를 위한 내외부 고장판별 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 56, No. 5, pp. 854-859, 2007. 5.
- [7] 박철원, 신명철, "동기발전기의 디지털 차동보호 알고리즘에 관한 연구", 성균관대학교 논문집, Vol. 45, No. 2, pp. 19-32, 1994. 12.
- [8] G.S. Hope, P.K. Dash and O.P. Malik, "Digital Differential Protection of a Generator Unit : Scheme and Real-Time Test Results", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No. 2, March/April pp. 502-512 1977.
- [9] Gabriel Benmouyal Serge Barceloux, Rolland Pellitier, "Field Experience with a Digital Relay for Synchronous Generators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, Oct. pp. 1984-1992 1992.
- [10] J. Penman, H. Jiang, "The detection of stator and rotor winding short circuit in synchronous machines by analyzing excitation current harmonic", Proc. IEE Int. Conf. Opportunities and Advances in International Power Generation, No. 419, pp. 137-142 1996.
- [11] N.L. Tai and O. Ai, "Protection technique based on delta-zero sequence voltages for generator stator ground fault", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 5, pp. 651-657. Sep. 2004.
- [12] A. I. Taalab, H. A. Darwish, T. A. Kawady, "Ann-based Novel Fault Detection for Generator Windings Protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 824-830 1999.
- [13] D. Bi, X. Wang, W. Wang, Z. O. Zhu, and Howe, "Improved transient simulation of salient-pole synchronous generators with internal and ground faults in stator winding", IEEE Trans. Energy Conversion vol. 20, no. 1, pp. 128-134, Mar. 2005.
- [14] O. Ozgonenel E. Arisoy, M.A.S.K Khan M.A. Rahman, "A Wavelet Power Based Algorithm For Synchronous Generator Protection", IEEE PES Summer Meeting pp. 128-134. June 2006.

### 감사의 글

본 연구는 2006년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.