

웨이브릿 변환에 의한 동기발전기의 고장검출

* 박철원⁰, ** 신명철

* 강릉대학교 전기정보통신공학부, ** 성균관대학교 정보통신공학부

Fault Detection of Synchronous Generator using Wavelet Transform

* Chul-Won Park, ** Myong-Chul Shin

* Kangnung National University, ** SungKyunKwan University

Abstract - In this paper, the discrete wavelet transform (DWT) was applied a fault detection of a synchronous generator being superior to a transient state signal analysis and being easy to real time realization. The fault signals after executing a terminal fault modeling collect using a MATLAB package, and calculate the wavelet coefficients through the process of a multi-level decomposition (MLD). The proposed algorithm of a fault detection of a generator using Daubechies WT (wavelet transform) was executed with a C language for the commend line function and for the real time realization after analyzing MATLAB's graphical interface.

1. 서 론

전력시스템은 중요한 부하의 개폐나 사고로 인하여 시시때때로 과도 외란이 발생한다. 이때 발전기 여자기, 터빈 조속기 제어시스템 등은, 새로운 정상상태조건에 적응하도록 설계 되어진다. 대규모의 외란은 단락회로 때문에 일어나는데, 사고발생동안 단자전압은 새그(sag)하고, 비 정상상태 특성을 나타내게 된다. 또 선로를 통해 전력을 공급하는 대용량 발전기의 갑작스런 개폐는, 계통 내 다른 발전소 유닛의 과부하를 일으키기도 한다. 그러므로 적절한 보호계전시스템의 신속한 동작을 인하여 사고가 제거되어 고장이 파급되지 않게 함으로서 전력공급의 연속성이 유지되어야만 한다[1].

동기 발전기는 고정자 권선, 회전자 권선과 댐퍼, 계자 권선, 자성체 코어 등 4 주요부가 있다. 이 중에서 유지비용과 시간을 고려해 볼 때, 고정자 권선의 고장이 가장 심각하다. 고장의 대부분은 절연과파괴와 관계가 있는데, 내부고장 및 지락고장으로 분류할 수 있다. 과도한 단락전류가 발생하는 내부고장은, 계통 붕괴 등 대단히 심각한 영향을 미칠 수 있다. 반면 지락고장은 발생 초기에 계통에 약간의 손상을 주게 되나 오랫동안 지속되면, 내부 단락고장으로 진전될 수 있다[1,4,16].

계통에 매우 큰 영향을 주는 발전기 내부고장은, 1차적으로 최적의 계통운영을 통해 어느 정도 보완이 가능한데, 이를 위해서는 계통운영자와 각 전기사업단간 긴밀한 협조가 요구된다. 계통과 연계된 설비는 설비소유자가 고장에방을 위해 정기적으로 설비점검을 한다 하더라도 완벽하게 고장을 예방하는 것은 불가능하다. 설비소유자는 설비고장에 대비하여 적절한 보호방안을 수립 운영해야 한다. 계통에 연계된 설비의 고장은 일선에서 보호계전기가 담당하게 되는데, 짧은 시간 내 건전계통으로부터 고장설비를 분리해야 한다. 그러나 어떤 원인으로 보호계전기가 오·부동작을 하게 되면 고장설비의 손상뿐만 아니라 최악의 경우 건전계통으로 파급되어 전계통의 붕괴를 초래할 수 있다. 이에 따라 발전소의 사고는 계통에 미치는 영향과 기기보전이라는 점에서 매우 중대하며 신뢰성이 높은 확실한 보호시스템이 필요하다[2~5].

정부의 전력 IT 사업의 일환으로 KOPEC을 중심으로 차세대 변전소자동화 등을 위한 연구개발은 한창 진행 중에 있다. 그러나 한국형 표준 원전을 탄생시킨 우리나라의 발전소의 핵심인 보호제어시스템은 완성인도(turn-key)방식으로 도입되어 운영될 뿐 이에 관한 원천기술에 대한 연구개발은 전무하다. 이에 도입된 외산 보호계전시스템의 안정적이고 최적의 제어운용을 기하고, 차세대 발전기 보호제어시스템의 국산화를 위하여 발전기 보호계전분야에 대한 연구가 매우 시급하다[1]. 국내의 발전기 보호제어시스템은 도입된 회사 및 발전방식에 따라 제각기 다르다. KEPRI와 KPX를 중심으로 발전소 보호계통의 최적운용 및 보호방안에 대한 관심이 증대되고 있는 형편이고, 일부 외주업

제에서는 발전소의 준공시험 관련 계전기들의 동작시험과 이들의 정정 등의 업무를 조사, 대행하고 있는 실정에 있다[2]. 다만, 국내에서도 2006년에 접어들면서 RTDS UDC(User Defined Component)를 이용하여 발전기 과도현상에 따른 보호계전기 동작분석[6]을 시도하였고, 친환경 청정에너지원인 신재생 에너지에 대한 관심의 일환으로 풍력발전(wind farms)단지를 송전계통에 연계할 경우, 풍력발전단지 보호를 위한 특성분석과 고장관별[7,8]이 연구되고 있으니 고무적인 일이다.

해외에서는 발전기의 보호계전시스템에 대하여 많은 관심을 가지고 있는바, 발전기의 내부고장검출을 위하여 디지털 컴퓨터를 사용한 기법이 처음 발표된 이후, 상호상관함수기법에 의하여 선전류 중성점 측 전류로 표현된 페이저의 실수부와 허수부를 정의한 후, 두개의 판정기준이 제안되었다[9]. 또 IEEE Power System Relaying Committee에서는 AC Generator Protection와 AC Generator Ground Protection에 관한 Standards를 제정하였다[1]. 이후 계자전류의 고조파를 이용하는 기법[11], 영상분전압을 이용하는 방법[12], 제3고조파 전압에 의한 기법, ANN을 이용한 고장검출 기법[13] 등이 다수의 알고리즘이 제안되었으며, 발전기 고장에 따른 과도해석 및 부하영향[14] 등이 논의 되었다.

그러나 현재까지 발전기 권선의 전 범위를 대상으로 하는 완벽한 보호를 제공하지 못했고, 어떠한 실험적인 검증도 공인된 바가 없는 실정이다. 특히 발전기 접지시스템에 따라 고장전류의 크기가 적어짐에 따라 고장검출을 위한 보완이 요구되고 있다.

한편, 발전기용 87G 보호기능의 개발이나 시험을 위해서 발전기의 접지측과 계통측 양단의 전류가 필요하다. 그런데 ATP/EMTP 나 PSCAD/EMTDC에서는 전류데이터를 생성하기 위하여 현재로서는 한계가 있다[1,4]. UDC 등을 활용한 시뮬레이션이 요구된다.

또 지금까지 보호계전이나 과도상태 신호를 분석하는 데 전통적으로 푸리에 변환(FT)이 사용되었다. 그런데 이 변환은 대상 신호를 주파수 영역으로 변환하는 과정에서 시간정보가 손실되는 결점이 있다. 이에 따라 보다 유연성 있는 신호분석법으로서 웨이브릿 변환(WT)이 제안되었다[18]. 다양한 모(mother) 함수를 사용하는 WT는 scale과 shift를 가변 할 수 있는 특성을 갖기 때문에 시간상에서의 주파수 특성을 얻을 수 있는 강점이 있다고 알려졌다. 이에 외란 식별, HIF 검출 및 T/L의 고장점 추정 등 전력계통에 적용이 확대되고 있다[16].

본 논문에서는 “발전기 시스템의 과도해석과 IED 용 개선된 알고리즘 개발” 연구과제 수행을 이루어진 내용을 다룬다. 먼저 발전기 모델링[1,3]에 대한 검토를 하고, 구현이 용이한 이산 웨이브릿 변환(DWT)[1,4]을 동기발전기의 고장검출에 응용한 부분에 대하여 논하고자 한다.

2. 발전기 모델링에 대한 비교 검토

발전기 시스템의 모델링과 과도현상 해석을 위해, MATLAB 6.0, WatATP 99 및 PSCAD/EMTDC V.4.1.1 버전을 이용하여 발전기 시스템의 모델링과 지락 및 단락사고를 모의하였다. 연구 초기 단계에서는 발전기 내부사고 효과를 나타내기 위하여 PSCAD/EMTDC에서는 발전기 내부 정수의 일부를 임피던스로 분산 배치하는 방법을 제시하였다. 얼핏 고려하면, 발전기 및 계통의 정수들을 조정한다면 실 계통과 매우 근접한 계전신호들을 얻을 수 있을 것을 생각될 수 있다. 본 연구에서 모델링과 과도해석에 사용된 도구는, MATLAB 이었는데, 그 이유는 다음과 같다. 자세한 내용은, 최종 보고서[1,3]를 참고하기 바란다.

(1) PSCAD/EMTDC는 계통 측과 다양한 접지방식에 따른 접지

측의 양단 입력전류 및 출력전류를 구조적으로 제공할 수 없다. 즉 PSCAD/EMTDC는, 87G 계전기가 필요로 하는 입력전류 및 출력전류를 수집할 수 없다.

(2) PSCAD/EMTDC에서 발전기 내부사고와 유사한 상황을 연출하기 위하여, 발전기 내부 정수의 일부를 고정자 외부에 여러 개의 임피던스로 나누어 배치하는 것은 비선형적인 특성과 모순이 된다.

(3) EMT/ATP 에서도 PSCAD/EMTDC와 유사한 단점을 가지고 있으며 더욱이 시뮬레이션을 수행할 때 파라미터의 일부를 수정하여 data deck에 입력해야하는 불편한 점이 있다.

(4) MATLAB에서도 내부사고를 모의할 수 없고, 양단의 전류를 발생시킬 수 없다. 그러나, 발전기시스템에 대한 수식적인 접근이 용이하고, dq전류 및 고장전류 등 원하는 신호들의 수집과 plot 기능에 의한 상태 파악이 용이하다.

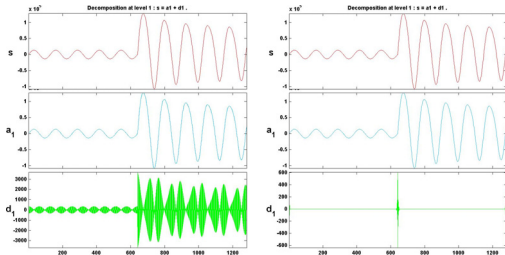
(5) MATLAB 모델링에 따른 과도신호에 대한 특성분석 이후, 수치해석기법 등 제공되고 연동되는 여러 가지 모듈이 많아서 이식이 편리하고 다른 S/W나 package program과 자료 교환이 가능하다.

(6) 명령어와 m파일을 이용하면, 제안된 보호계전 알고리즘을 프로그램 언어로 구현 이전에 손쉽게 코딩하여 평가할 수 있다.

3. 이산 웨이블릿 변환에 의한 고장검출

3.1 고장검출을 위한 MLD

수집된 전류신호를 Wavelet 모듈의 graphical interface인 Wavemenu에서 신속하게 발전기의 고장판별에 용이한 적당한 모 웨이블릿을 선정하였다. 모 웨이블릿과 level 을 가변하면서 신호를 분석하였는데, db1~db7까지의 모 웨이블릿을 가변하면서 고장 판별을 위해서 변환된 값의 경향과 임계치 등을 고려한 결과, db2의 level 1에서 d1 값이 정상상태와 지락 및 단락 고장의 검출이 명확함을 알 수 있었다. 그림 1은, 3상 단락사고(샘플링주파수 7,680Hz, 128s/c, 10주기) a상의 db1~db7까지 level 1의 웨이블릿 분석 결과 파형 중의 일부이다.



(a) db1 level 1 (b) db7 level 1
<그림 1> 단락고장시의 웨이블릿 분석 결과

db1은 고장발생 순간의 큰 변화는 없으나 db2는 고장발생 순간의 큰 변화로 판별이 가능하다. db3는 고장발생 인접부분에서의 변화는 분명하게 나타나나 이후의 변화가 적으므로 판별의 어려움이 있다. db4~db7에서는, 고장발생 직후의 변화가 임계치 1 (ϵ_1) 10 이하 이므로 판별이 불가능하다[1].

3.2 고장검출 판별논리

진동성을 지닌 변환된 d1값을 위해, 절대치의 평균값을 계산에 의한 웨이블릿 비율을 제안하였다[1,4]. 계산된 각 상의 비율을 임계치2와의 비교에 의하여 트립 신호를 결정하게 된다. 여기서 임계치2 (ϵ_2)는 잡음과 여유 등을 고려하여 3으로 결정한 이후, 신속한 판별을 위해 임계치2의 값을 2.5로 수정하였다. 모든 전류데이터에 대하여 moving window 과정을 거쳐서 각 상별로 비율을 계산하여 고장 검출을 하게 하게 된다. 발전기의 정상상태와 여러 가지 고장상태에 대한 판별은 각 이동 윈도우내에서 $I_{a-ratio}$, $I_{b-ratio}$, $I_{c-ratio}$ 의 비율 변화에 의하여 다음과 같이 표시된다[4].

```

if (  $I_{a-ratio} > \epsilon_2$  or  $I_{b-ratio} > \epsilon_2$  or  $I_{c-ratio} > \epsilon_2$  ) then
    " 발전기는 정상상태입니다. "
else
    " 발전기는 고장상태가 발생했습니다. "
endif

```

4. 결론

본 연구에서는 상태 공간에서의 machine 방정식을 정식화하여 발전기의 평형 및 불평형 고장 모델링을 수행하였고, MATLAB 기반으로 시뮬레이션 기법을 수행하여 과도현상을 해석하였다. 또 발전기 고장자 보호용 IED를 위한 다우비시 기반 개선된 알고리즘 구현하였고, 사례연구를 통하여 제안된 알고리즘의 우수성을 검증하였다. 발전기 보호계전시스템은, 원전기술의 축적과 종합적인 공조가 필요한 부분이다. 합리적인 운용과 자체 개발을 위해서는 상당한 지원이 요구된다.

[참고 문헌]

- [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, 이상성, 신명철 외 1인, "대용량 발전기보호를 위한 발전기모델링", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp. 121-122, 2006. 7.
- [4] 박철원, 신명철, "고장전류의 웨이블릿 변환을 이용한 동기 발전기 보호 알고리즘", 대한전기학회 논문지 Vol. 56, No. 5, pp. 834-840, 2007. 5.
- [5] 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.
- [6] 조윤성, 김태균 외, "실시간 전력계통 시뮬레이터를 이용한 발전기 보호계전기 모델 개발", 대한전기학회 논문지, Vol. 56, No. 2, pp. 240-247, 2007. 2.
- [7] 강상희, 권영진, 김철훈, "발전기 과도현상에 따른 발전기 보호 계전기 동작 분석", 대한전기학회 전력기술부문회 논문집 pp. 378-380 2006. 11.
- [8] 권영진, 강상희, "풍력발전단지 보호를 위한 내외부 고장 판별 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 56, No. 5, pp. 854-859, 2007. 5.
- [9] 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.
- [10] P.K. Dash, O.P. Malik and G.S. Hope, "Fast Generator Protection Against Internal Asymmetrical Faults", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No. 5, Sep./Oct. 1977, pp. 1498-1506.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Michel Misiti et al., "MATLAB Wavelet Toolbox", User's Guide Version 1, pp. 1-1~2-42, 1997.
- [16] 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. 2006. 6.

감사의 글

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