

고장전류를 이용한 동기 발전기 보호

박철원^{}, **안준영, ***이상성, **신명철
원주대학^{}, **성균관대학교, ***기초전력연구원

Synchronous Generator Protection using Fault Currents

*Wonju National College, **SungKyunKwan University, ***KESRI

Abstract - This paper proposes a synchronous generator protection algorithm using Discrete Wavelet Transform for detection of fault currents. The proposed technique is implemented by using the C language and the Wavemenu of MATLAB Toolbox, and consists of normal state and internal fault state. The effectiveness of proposed method is demonstrated by MATLAB simulation package for synchronous generator, which collects the balanced and unbalanced fault currents through simulation.

1. 서 론

전력계통에서 발전기는 선로에 전력을 공급하는 중요한 역할을 한다. 이러한 역할 때문에 발전기(특히 대용량 발전기)는 계통의 사고나 부하의 불평형으로 인하여 주파수 저하뿐만 아니라 일시적으로 계통의 불안정을 유발하게 되면 발전기가 심하게 흔들리게 될 뿐만 아니라 탈조 상태(동기 상실)에 이를 수 있다. 이러한 관점에서 보면 발전기보호는 중요한 부분이라 할 수 있다. 특히, 발전기 내부사고나 인근 모선 사고는 발전기를 운전에 심각한 타격을 줄 수 있다. 이 상태를 계속 방치하면 발전기 자체뿐만 아니라 인근 발전기에 영향을 미쳐 결국 광역사고를 일으키게 된다. 그러므로 사고발전기는 적절한 시점에서 차단할 수 있어야 한다.

현재, 우리나라의 보호시스템은 발전방식에 따라 제각기 다르지만, 발전기 보호시스템과 발전기를 구동하는 원동기 및 부속설비 등 보호시스템으로 대별된다. 초기에 건설된 기력 발전기 보호시스템은 대부분 도시바 등의 아날로그계 전기가 설치되어있고, 최근 용량을 증대한 팜당 H/P 등에는 CEE사의 제품이, 기저부하용으로 운전되는 울진 N/P #1, #2 등에는 DIX111a/E11 등이, POSCO 광양 기력발전 #1에는 VAMP사의 계전기가 설치 운용 중에 있다. 다만 KEPRI와 KPX를 중심으로 발전소 보호계통의 최적운용 및 보호방안에 대한 관심이 증가하고 있다. 일부 외주업체에서는 발전소의 준공시험 관련 계전기들의 동작시험과 이들의 정정 등의 업무를 대행하고 있는 실정이다. 이와 같이 우리나라 발전소의 보호제어시스템 설비는 전량 해외로부터 완성인도방식으로 도입되어 운용되고 있을 뿐 발전소 보호시스템에 대한 연구개발은 전무하다. 이에 도입된 외산 보호시스템의 안정적인 운용과 차세대 발전기 보호시스템의 국산화 실현을 위하여 발전기 보호계전에 대한 연구가 시급하다[1,2].

해외현황은 영국의 CEE, GEC, 핀란드의 VAMP, 독일의 Siemens, 스웨덴의 ABB 등에서 차세대 발전기 보호시스템에 대하여 관심을 갖고 발전기 전용의 계전기가 출시되어 설치운용 중에 있으며, IED 개발을 위해서 연구가 상당히 진척되어 있다. IEEE 전력계통 계전기 위원회에서는 AC Generator Protection에 관하여 IEEE Std. C37.102-1987을 수정하여 IEEE Std. C37.102-1995를 발표하였다. 발표된 주요 논문을 살펴보면, 계자전류를 모니터링 하는 기법, 고장 시 발생된 과도전류신호의 스펙트럼 분석기법, 제3고조파

진압에 의한 기법, ANN에 의한 동기 발전기의 내부고장과 지락고장을 검출하기 기법들이 제안되었다. 발전기의 고장은 단락고장 보다는 지락고장 발생 가능성이 많다. 지락고장을 신속하게 검출함으로써 단락고장으로 진전되는 등의 고장확대 방지가 필요하다. 권선의 단락고장(층간 또는 선간)은 대부분 중단 연결부위에서 발생 가능성이 많으며 이러한 고장발생시 발전기는 계통에서 즉시 분리해야 하며 정지해서 정밀진단 및 보수를 수행해야 한다. 현재 단락사고 보호를 위하여 고속도 일정동작 비율특성을 가진 전류비율 차동계전 알고리즘이 적용되고 있다. 발전기의 접지시스템에 따라 발생된 고장전류의 크기가 적어짐에 따라 고장 검출을 위한 보완이 시급하다. 이에 따라 발전기 권선의 100% 지락고장을 완벽하게 검출할 수 알고리즘이 필요하다. 그러나 발전기 권선의 전 범위를 대상으로 하는 완벽한 보호를 제공하지 못했고, 어떠한 실질적인 검증도 공인된 바가 없다[3~9].

지금까지, 과도상태 신호를 분석하는 데 전통적으로 사용되었던 푸리에 변환은, 대상 신호를 주파수 영역으로 변환하는 과정에서 시간정보가 손실되는 결점이 발생하였다. 이를 보완하기 위하여 Garbor에 의해 제안된 단축시간 푸리에 변환(STFT)은 시간과 주파수의 2차원 함수로 맵핑되는데, 윈도우 창 크기에 따라 정확도가 결정된다. 그러나 STFT는 일정한 윈도우의 크기만큼 주기적으로 가정하는 고정윈도우를 이용하기 때문에 빠른 비주기성 과도파형을 분석하는데 적절하지 못했다. 이에 보다 유연성 있는 신호 분석법으로서 웨이브릿 변환(WT)이 제안되었다[10]. 다양한 모(mother) 함수를 사용하는 웨이브릿 변환은 스케일(scale)과 이동(shift)을 가변 할 수 있는 특성을 갖기 때문에 시간상에서의 주파수 특성을 얻을 수 있는 강점이 있다. 이에 따라 외란 식별, HIF 검출 및 송전선로의 고장점 추정 등 여러 가지 고조파가 포함되는 전력계통의 과도파형 분석 등에 적용하고 있다[11~13].

본 논문에서는 과도파형 분석에 뛰어나고 FIR 필터형태로 실시간 구현이 용이한 이산 웨이브릿 변환(DWT)을 동기 발전기의 고장 관별에 적용하였다. MATLAB Package에서 모델링을 수행하여 고장사례를 수집한 후, 다우비시(Daubechies) WT를 이용하여 종래의 비율차동계전 기법과 다른 새로운 판별논리 기법을 제안하였다. 제안된 고장전류를 이용한 동기 발전기 보호 알고리즘은 C 언어와 MATLAB에서 구현하였다.

2. 웨이브릿을 이용한 동기 발전기 보호

2.1 웨이브릿 변환

분석대상 특정신호에 대하여 정확한 웨이브릿 분석을 수행하기 위해서는 모든 scale에서 웨이브릿 계수를 계산하여야만 한다. 여러 단계의 웨이브릿 변환을 수행하면 많은 양의 데이터가 산출되기 때문에 분석을 위한 연산시간이 길어지는 문제점이 발생하였다. 이에 Mallet은 2의 멱승 형태에 기초한 scale과 shift를 제안하였는데, 이를 이용한다면 더욱 효과적인 분석을 수행할 수 있게 되었다. 그러므로 특정신호에 대한 분석은 2의 멱승형태에 기초한 DWT에 의하여

웨이브릿 필터로 구현될 수 있다. 이산 웨이브릿 변환 $D_{a,b}$ 는 다음과 같이 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$D_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum S[n] \cdot \Psi \left[k - \frac{na_0^m}{a_0} \right] \quad (1)$$

여기서 scale을 나타내는 변수는 a_0^m 이고 shift를 나타내는 변수는 na_0^m 이다. $1/\sqrt{a_0^m}$ 은 모 웨이브릿과 같은 크기의 에너지를 유지시키기 위한 에너지 정규화 성분이다. 일반적으로 신호에 대한 저주파 성분은 신호의 고유한 (approximation) 특성을 나타내고 고주파 성분은 세밀한 (detail) 특성을 나타낸다. 따라서 DWT의 수행과정은 고역 필터(D)와 저역 필터(A)를 사용하는 2가지 필터링의 개념으로 확장될 수 있다.

웨이브릿의 다 해상능(multi resolution)은 신호를 여러 형태의 고역 필터 성분들로 나누기 위해서 웨이브릿 필터 बैं크를 사용한다. 즉 approximation 필터를 통해서 얻어지는 신호는 또 다른 두 개의 저역 필터와 고역 필터로 분해되고 이 저역 필터를 통과한 신호는 또 다시 두 개의 필터로 분해된다. 이 과정을 반복 수행함으로써 웨이브릿 필터 बैं크를 구성하게 된다. 이와 같은 분석 과정은 이론적으로는 무한하게 계속될 수 있으나 실제적으로는 detail 성분이 한 개의 샘플로 구성될 때까지만 계속된다. 그림 1은 여러 개의 고역 필터(D1, D2, D3, ... Dn)와 저역 필터(A1, A2, A3, ... An)로 구성된 웨이브릿 필터 बैं크를 보여준다. 원신호 S는 식 (2)와 같이 재구성 될 수 있다.

$$S = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n + A_n \quad (2)$$

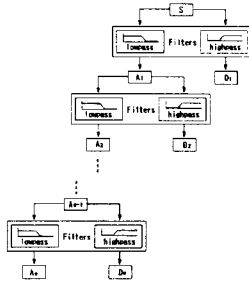


그림 1. 다레벨 웨이브릿 필터 बैं크
Fig. 1 Multi-level Wavelet filter bank

이때 필터에서 얻어지는 데이터의 양을 줄여서 계산을 신속하게 수행하기 위하여 downsampling 기법을 사용한다. downsampling은 고역 필터와 저역 필터에 입력될 데이터를 매 2번째 샘플마다 통과시키는 원리이다. 따라서 웨이브릿 필터 बैं크를 사용하는 DWT의 중요한 특징은 downsampling을 통해서 연산량이 감소하게 된다. 입력된 신호의 한 주기를 샘플링 했을 경우에 DFT는 N^2 번의 연산을 수행하고 FFT는 $N \log_2 N$ 번의 연산을 수행하는데 반해 DWT는 $N \times$ (모 웨이브릿 길이)만큼의 연산을 수행한다. 첫 번째 필터뱅크의 연산량을 입력 샘플당 C_0 라고 하면 두 번째 단계에서는 downsampling이 되므로 $C_0/2$ 의 연산량이 필요하고 그 다음 단계에서는 $C_0/4$ 의 연산량이 필요하게 된다. 따라서 전체 연산량은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있는데 이는 웨이브릿 변환의 효율성을 표시한다.

$$C_{total} = C_0 + \frac{C_0}{3} + \frac{C_0}{4} + \dots < 2C_0 \quad (3)$$

모 웨이브릿의 종류에는 하알(Haar), 다우비시, 코이플렛(Coiflets) 웨이브릿 등이 있다. 본 연구에서는 과도 파형의 정확한 특징추출을 위하여 DB1~DB6, Coiflet1~Coiflet5를

적용한 결과, DB5의 Detail 1이 가장 좋은 결과를 나타내었다. 그림 2는 다우비시 5 모 웨이브릿을 나타낸 것이다. 이 다우비시 모 웨이브릿은 이산 웨이브릿 분석을 실용화할 수 있도록 만든 적고 웨이브릿으로서 현재 전력계통분야에서 가장 많이 활용되고 있다.

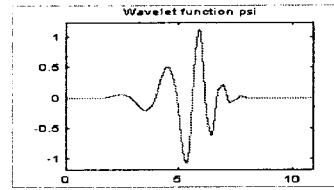


그림 2. 다우비시 5 모 웨이브릿
Fig. 2 Daubechies 5 mother Wavelet

2.2 고장전류의 웨이브릿 변환에 의한 보호 알고리즘

그림 3은 제안된 DWT에 의한 동기 발전기의 고장판별의 흐름도이다. 고장전류는 각 상별로 DB5 웨이브릿 변환을 통하여 동기 발전기의 내부고장과 정상상태를 판별하였다.

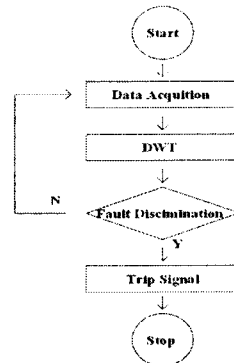


그림 3. 이산 웨이브릿 변환에 의한 고장판별
Fig. 3 Fault discrimination by DWT

3. 사례연구

사례연구에 사용된 발전기는 3상 500[MVA], 30[kV], 60[Hz]의 정격이다[2]. 시뮬레이션 조건은 400[V] 여자전압으로 무부하 운전 중에 권선의 단자에서 평형 및 불평형고장이 발생한 경우로 국한 하였다. 주기당 샘플링수는 128[s/c]이고 샘플링주파수는 7.68[kHz]이다. 고장발생시점은 5주기인 83.333[ms]이다.

3.1 평형 3상 단락 고장

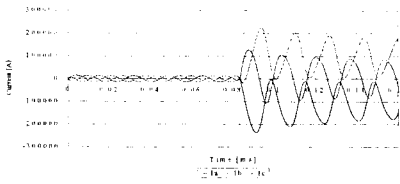
그림 4(a)는 3상 단락고장시의 전류신호이다. 정상상태에서는 9.62[kA]의 전류가 흐르나 고장직후에는 각 상별로 전압위상각에 따라 직류 옴셋이 함유된 고장전류가 흐르게 된다. 그림 4(b)는 a상전류에 대한 db5 Level 3의 결과이다.

3.2 2선 단락 고장

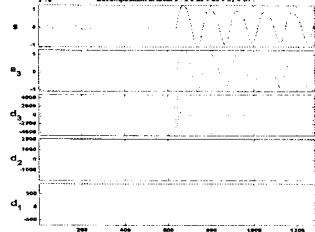
그림 5(a)는 83.333[ms]에서 b상과 c상에서 단락고장이 발생한 경우이다. 이때 b상 전류는 c상 전류의 부호가 반대이며 동일한 값이 흐르게 된다. 그림 5(b)는 b상전류에 대한 DB5 Level 2의 결과이다.

3.3 1선 지락 고장

그림 6(a)는 83.333[ms]에서 전기자 단자에서 a상 지락고장이 발생한 경우이다. 3상 단락고장 및 선간 단락고장을 비교한 결과 고장전류가 가장 적은 것을 알 수 있다. 그림 6(b)는 a상전류에 대한 DB5 Level 8의 결과이다.

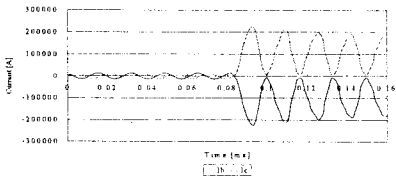


(a)

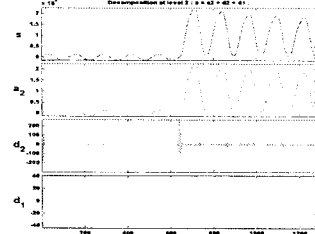


(b)

그림 4. a상전류의 DB5 Level 3
Fig. 4 DB5 Level 3 for Ia

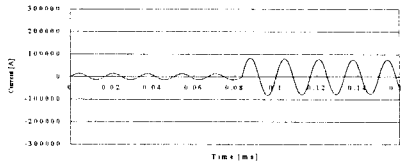


(a)



(b)

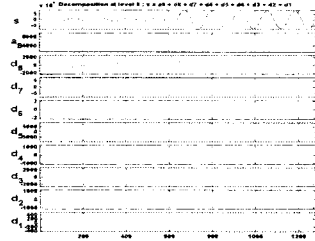
그림 5. b상전류의 DB5 Level 2
Fig. 5 DB5 Level 2 for Ib



(a)

4. 결 론

본 논문에서는 고장전류를 추출한 다음 동기 발전기의 보호를 위하여 DWT 기법을 이용한 알고리즘을 제안하였다. 고장전류 추출은 MATLAB Package를 이용하였으며 발전기 모델링으로부터 평형 및 불평형 고장전류를 수집하였다. 수집된 데이터로부터 다우버시 WT 기법을 적용하였다. 고장전류의 불연속성을 이용하여 제안된 새로운 고장판별 기법은 C언어와 MATLAB Toolbox의 Wavemenu와 m 명령어를 이용하여 구현하였다. 제안된 기법은 단락 및 시작고장에 대하여 정확하게 판별함을 보여 주었다.



(b)

그림 6. a상전류의 DB5 Level 8
Fig. 6 DB5 Level 8 for Ia

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "원자력발전소 표준화실계를 위한 조사용역", pp. 83-269, 1999.
- [2] 박철원 외, "대용량 발전기 보호를 위한 발전기 모델링", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(A) pp. 128-131 July 2006 .
- [3] J. Penman and H. Jiang, "The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous machines by analyzing excitation current harmonics", Proc. IEE int. Conf. Opportunities and Advances in International Power Generation, no. 419, 1996, pp. 137-142.
- [4] M. Fulczyk and R. L. Schlake, " Influence of the generator load conditions on third harmonic voltages in generator stator windings", IEEE Trans. on Energy Convers., vol. 20, no. 1, pp. 158-165, Mar. 2005.
- [5] 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.
- [6] Working Group 16 Report of Rotating Machinery Protection, Power System Relaying Committee, "Performance of generator protection during major system disturbances", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, pp. 1650-1662, Oct. 2004.
- [7] Wang Xiangheng, Wang Weijuan, Wang Shanming, "Research on internal faults of generators and their protection schemes in Three Gorges Hydro Power Station" Power Engineering Society Winter Meeting, 2000 IEEE Volume 3, pp. 1883-1887, 23-27 Jan. 2000.
- [8] 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.
- [9] O. Ozgonenel, E. Arisoy, M.A.S.K Khan, M.A. Rahman, " A Wavelet Power Based Algorithm For Synchronous Generator Protection", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting July 2006, pp. 128-134.
- [10] Andrew Laine, "Wavelet theory and application", University of Florida, 1993.
- [11] Michel Misiti et al., "MATLAB Wavelet Toolbox", User's Guide Version 1, pp. 1-1 ~ pp. 2-42, 1997.
- [12] L L Lai, "Wavelet Transform for High Impedance Fault Identification", Energy systems Group, pp. 188~191, 1998.
- [13] 박철원 외, "도버시 웨이브릿 변환을 이용한 변압기의 여자돌입 과 내부 권선고장 판별논리 기법", 대한전기학회 논문지, 50A, Vol. 5, No. 1, pp. 211~217, 2001.

감사의 글

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