발전기 고장판별을 위한 적당한 웨이브릿 선정

°박철원*, 신광철**, 신명철**
강릉대학교 전기정보통신공학부*, 성균관대학교 정보통신공학부**

Selection of a Suitable Mother Wavelet for Generator Fault Discrimination

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

Abstract - 전통적인 FT(Fourier Transform)의 대안으로 scale과 shift에 의한 WT(Wavelet Transform)이 제안되어, 전력계통의 각 분야에 적당한 Mother Wavelet 선택에 대한 연구가 시도되고 있다. 본 논문은 발전기 고정자 사고의 경우 고장판별을 위하여 적당한 마더 웨이브릿을 선정할 수 있는 알고리즘에 관한 것이다. ATP 시뮬레이션으로부터 수집한 전류데이터를 이용하여 제안된 적당한 선정기법의 유효성을 증명하였다.

1. 서론

교류 발전기는 전력시스템에서 가장 중요한 요소로 전력을 안정적으로 생산하고 부하에 공급을 해주는 핵심설비이다. 이에 따라 적절한 발전기 전용 보호계전시스템(Generator Protection System)이 필요하다[1,2]. 발전기의 유지비용과 시간을 고려할 때, 고정자 권선의 사고가 가장 심각한 것으로 알려져 있다.

울진 한국형 표준 원자력발전소의 건설로 인하여 국내 플랜트 기술수준이 상당히 발전되었으나 발전소의 핵심인 보호제어설비는 국내 기술에 의해 만들어진 것을 사용하지 못하고 전량 외산을 사용하고 있는 실정에 있다[3]. 근래 전력수요의 증대로 인해 발전소를 새로 건설할 때와 종래 발전기 보호제어시스템의 교체 시기가 다가옴에 따라 도입된 외산 보호제어시스템의 안정적인 운용측면에서 벗어나려는 움직임이 있다[4,5]. 국내 기술자립을 위해서 특이한 보호요소 기능에 대한 검토를 시작으로 디지털 발전기보호제어시스템(digital generator protection system : DGPS)용 차세대 전력기기(IED) 구현 기술을 확립함으로서 향후 ECMS(Electrical Equipment Control & Monitoring System)에 대한 국산화가 이루어져야 할 것이다.

1970년대말 발전기의 내부고장검출을 위하여 디지털 컴퓨터를 사용한 기법[6]이 발표된 이후, 해외에서는 발전기 고장판별에 관한 연구가 많이 이루어져 왔다[7]. 최근에는 인공신경회로망(ANN)을 이용하는 방법[8]과 FCNN(Fuzzy Controlled Neural Network)에 의한 기법[9], 고정자 지락사고를 위한 영상분 전압에 근거한 차동보호[10], 권선의 분산 커패시터를 고려한 자기적응보상차동보호기법[11]이 제안되었다. 그러나 아직까지 발전기 권선의 전 범위를 대상으로 완벽하게 보호할 수 있는 기법이 공인된 바는 없는 실정이다. 한편 IEEE 전력공학교육위원회(IEEE Power Engineering Education Committee)는 동기발전기의 보호에 대한 Tutorial[12]을 발표하였고, 2006년 IEEE 전력계통계전기위원회(IEEE Power System Relaying Committee)는 교류발전기 보호와 교류발전기 지락보호에 관한 표준을 제정하였다[13,14]. GE Multilin과 SEL 등 해외 회사들이 보호제어시스템을 생산, 수출하고 있다[15].

현재 고정자 권선보호를 위해서 이산푸리에변환(DFT) 기반 고정비율 및 가변비율 전류차동계전기법(Current Ratio Differential Relay : CRDR)이 가장 널리 사용된다[16]. CRDR을 비롯한 대부분의 디지털 발전기보호계전기들은 DFT(discrete Fourier transform) 기초한 기본파 및 특정주파수성분에 근거한 알고리즘을 채택하고 있다. 그런데 DFT 필터를 적용할 경우, 시간영역의 신호를 주파수로 변환하는 과정에서 시간정보가 손실될 수 있다는 결점이 지적되었고, 미해결 보호문제의 해결을 위해서 새로운 기법들에 대한 연구가 모색되고 있다. 이에 전통적인 푸리에변환(FT)의 대안으로 STFT(Short Term Fourier Transform)이 제안되었고, 마침내 스케일(scale)과 이동(shift)에 의한 WT이 제안되었다[17].

전력계통의 각 분야에 적당한 마더 웨이브렛(Mother Wavelet) 선택이 시도되었다[18]. db4와 Morlet이 전력품질평가에[19], db4가 고장점표정[20]에, Morlet이 송전선로에서의 고속보호기법과 과도 위치보호[21]에, db5가 전력동요 동안의 고장 식별[22]에, db4, sym5가 HIF(high impedance fault)[23]에, Meyer, db4, db1가 직렬보상선로를 위한 보호에, sym5, sym8, db4가 과도분석[24]에 타당한 것으로 발표되었다. 또 MODWT(Maximal overlap Discrete Wavelet Transform)가 거리계전[25]에, db2가 전력용변압기의 차동보호에 적용하여 우수한 성능을 나타내었다[26]. 발전기보호분야에는 WT된 전력에 의한 발전기 보호 기법[27]과 발전기 방정식으로 유도된 고장모델링으로 수집한 편단 고장전류의 웨이브릿 변환(WT)에 의한 발전기 고장판별기법이 제안되었다[28].

본 연구에서는 발전기 고정자 사고의 경우 과도상태 분석과 사고검출을 위하여 적당한 마더 웨이브릿을 선정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 최적의 선정을 위하여 db2, db4, db5, sym4, sym8, coif4 마더 웨이브릿에 의한 상세계수의 에너지의 합을 비교하였다. 제안된 기법은 ATP

(Alternative Transient Program) 시뮬레이션으로부터 수집한 전류데이터를 이용하여 유효성을 검토하였다.

2. 상세계수에 대한 에너지의 합

본 연구에서는 발전기의 사고검출을 위한 적당한 마더 웨이브릿을 선정하기 위하여 식(1)과 같은 상세계수(Detail Coefficient)의 에너지성분 합을 이용하였다.

$$E_d = \sum_{i=1}^{N} d(i)^2 \quad (1)$$

여기서, E_d : 이산신호 상세계수의 에너지성분의 합, $d(i)$: 이산신호의 상세계수, N : 신호의 샘플 수이다.

제안된 웨이브릿 선정은 먼저 수집된 전류신호로부터 차전류를 계산한 후, DWT(Discrete Wavelet Transform)를 이용하여 다양한 마더 웨이브릿의 분해를 수행한다. 다음 IDWT(Inverse Discrete Wavelet Transform)를 이용하여 여러 가지 마더 웨이브릿의 복원을 수행한 후, RMS(root mean square) 오차를 계산하여 평가한다. 최종 식(1)의 에너지성분 합을 이용한 상세계수에 대한 분석을 수행함으로서 이루어진다.

3. 사례연구

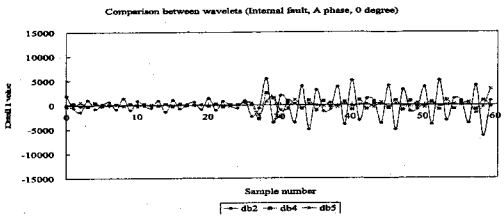
3.1 ATP 에 의한 사고모델링

제안된 기법의 유효성 입증을 위한 사고모의 데이터 수집을 위해서 ATP를 이용한 사고모델링을 수행하였다 [29,30]. 사례연구에서 3상 내부단락고장 및 외부단락고장에 대한 직류옵셋 영향을 검토하기 위하여 A상 전류의 사고각을 기준으로 0°, 90°를 고려하였다. 샘플링주파수는 720[Hz]이다. 고장발생시점은 37.503[ms]와 41.6703[ms]로 정상적인 가압이후 각각 27번째와 30번째로 하였다.

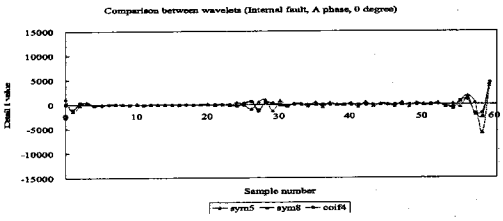
3.2 시뮬레이션 결과

구현의 용이성을 감안하여 차수(order)는 2, 레벨(level)은 1로 국한하여 시뮬레이션을 수행하였다. MLD(multi level decomposition) 과정을 통해 차전류에 대한 db2, db4, sym5, sym8, db5, coif4 상세계수의 궤적을 분석하였다. 샘플링 주파수가 720Hz이기 때문에 차전류를 DWT에 의해 level 1 단계의 마더 웨이브릿으로 분해하면, 근사계수1(A1)의 주파수대역은 180Hz~DC가 되고 중심주파수는 90Hz, 상세계수1(D1)의 주파수 대역은 360~180Hz가 되고, 중심주파수는 270Hz가 된다.

그림 1은 사고발생각 0° 에서 3상 내부단락고장이 발생한 경우 A상의 차전류에 대한 여러 가지 마더 웨이브릿 상세계수1(Detail 1:D1) 값의 비교를 나타낸다. 사고발생각 90°인 경우가 0°인 경우보다 고장발생직후 과도상태로 인하여 상세계수의 진동이 심한 것을 알 수 있다.



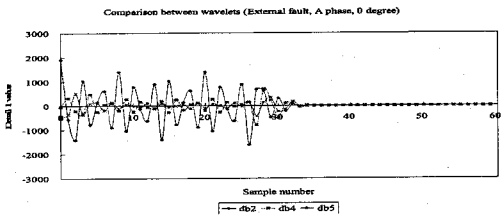
(a) db2, db4, db5



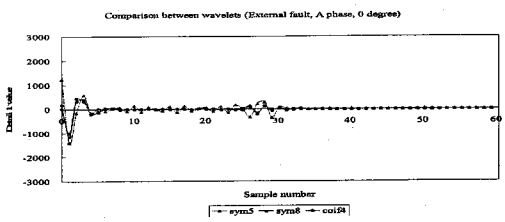
(b) sym5, sym8, coif4

그림 1 상세계수에 대한 마더 웨이릿의 비교 (내부고장)

그림 2는 사고발생각 0° 에서 3상 외부단락고장이 발생한 경우 A상 차전류의 여러 가지 마더 웨이브릿 상세계수 값에 대한 비교이다. 외부고장의 경우 상세계수들은 고장발생 직후에 진동성이 적어지면서 0으로 수렴하는 것을 알 수 있다.



(a) db2, db4, db5



(b) sym5, sym8, coif4

그림 2 상세계수에 대한 마더 웨이브릿의 비교 (외부고장)

상세계수의 궤적은 마더 웨이브릿에 종류에 관계없이 대부분 내부고장의 경우 정상상태와 고장상태를 판별할 수 있는 큰 값을 나타내었고, 외부고장시 정상상태보다 다소 작아지는 경향이 있었다. 내부고장의 경우 sym5, sym8, coif4 상세계수의 궤적은 정상상태와 고장상태를 판별할 수 있는 값으로 충분하다고 판단된다. 그러나 내부고장과 외부고장 발생직후 진동하던 상세계수는 시간이 흘러도 수렴하지 않고 계속 진동하는 결과를 나타냈다. 내부고장 및 외부고장의 경우 db2 상세계수의 궤적

이 정상상태와 고장상태를 판별할 수 있도록 분명하게 차이가 많이 나타났다. 또 내부고장의 경우 일정한 값으로 수렴하는 경향이 있었고, 외부고장의 경우 매우 적은 값으로 수렴하는 경향을 나타냈다. db4와 db5의 상세계수의 궤적도 db2의 상세계수 궤적과 유사한 경향을 나타내었으나, db2의 경우가 더욱 확실하게 내부고장과 외부고장을 판별할 수 있는 상세계수의 궤적을 나타냈다.

4. 결론

웨이브릿 변환은 전력계통의 고장이나 과도상태를 분석할 수 있는 좋은 도구이다. 본 논문에서는 발전기의 고정자 사고검출에 적당한 마더 웨이브릿을 선정하는 알고리즘을 제시하였다. Detail Coefficient의 에너지 성분 궤적에 대한 분석을 통하여 Daubechies 2(db2) Mother Wavelet 의 상세계수1(D1)이 발전기의 고장판별에 가장 적절하다고 판단되었다.

[참 고 문 헌]

[1] 박철원, 신광철, 신명철, "국내 발전기 보호계전시스템 현황", 대한전기학회 하계학술대회 논문초록집, p. 564, 2008, 7.

[2] 조범섭, 이승재 외, "보호계전기 정정 기본 수립에 관한 연구", pp. 1-453, 2003, 6.

[3] 최정림, 우준기 외, "보호계전기해설(제2집)", 남서울전력관리처 공무부 pp. 24-75, 1988, 12.

[4] 조성진, 강상희 외, "발전기보호 기본 알고리즘을 적용한 보호계전연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 326-328, 2003. 7.

[5] 권영진, 강상희, "풍력발전단지 보호를 위한 내외부 고장 판별 알고리즘", 대한전기학회 논문지 Vol. 56, No. 5, pp. 854-859, 2007, 5.

[6] M.S. Sachdev, D.W. Wind, "An On-Line Digital Computer Approach for Generator Differential protection", Transactions of the Engineering and Operating Division, Canadian Electrical Association, Paper No. 73-SP-149, Vol. 12, No. 3, pp. 1-6, 1973.

[7] P.K. Dash, O.P. Malik, G.S. Hope, "Fast Generator Protection Against Internal Asymmetrical Faults", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No. 5, Sep./Oct. pp. 1498-1506, 1977.

[8] Hongzhong Ma, Yuanyuan Ding, P. Ju, Limin Zhang, "The Application of ANN in Fault Diagnosis for Generator Rotor Winding Turn-to-turn Faults", IEEE PES 2008 General Meeting, 20-24, July 2008 PESGM2008-000920, pp. 1-4, 2008.

[9] Z. Q. Bo, G S Wang, P Y Wang, G Weller, "Non-Differential Protection of Generator Using Fuzzy Neural Network", IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 1072-1076, 1998.

[10]Tai Nengling, Juergen Stenzel, "Differential Protection Based on Zero-Sequence Voltages for Generator Stator Ground Fault", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 116-121, 2007.

[11]Qing Tian, Xiangning Lin, Pei Liu, "A Novel Self-Adaptive Compensated Differential Protection Dwsign Suitable for the Generator With Considerable Winding Distributed Capacitance", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 836-842, 2007.

[12]IEEE Power Engineering Education Committee, "IEEE Tutorial on The Protection of Synchronous Generators", Power System Relaying Committee, 95 TP 102, pp. 1-78, 1995.

[13]IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Guide for AC Generator Protection", IEEE Std. C37.102-2006.

[14]IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Guide for AC Generator Ground Protection", IEEE Std. C37.101-2006.

[15]GE, "GEK-100605 Digital Generator Protection System(DGP)", GE Protection and Control, pp. 1-225.

[16]전력연구원, "원자력발전소 표준화설계를 위한 조사용역", pp. 83-269, 1999.

[17]이승훈, 윤동한, "알기쉬운 웨이브렛 변환", 진한도서, pp. 1-294, 2003.

[18]A.I. Megahed, A. Monem Moussa, H.B. Elrefaie, Y.M. Marghany, "Selection of a Suitable Mother Wavelet for Analyzing Power System Fault Transients" IEEE PES 2008 General Meeting, 20-24, July 2008 PESGM2008-000756, pp. 1-7, 2008.

[19]G.T. Heydt, and A. W. Galli, "Transient power quality problems analyzed using wavelets", IEEE Trans. Power Del., Vol. 12, no. 2, pp. 908-915, Apr. 1997.

[20]F. H. Magnago and A. Abur, "Fault location using wavelets", IEEE Trans. Power Del., Vol. 13, No.4, pp. 1475-1480, Oct. 1998.

[21]D. J. Zhang, Q. H. Wu, and Z.Q. Bo, "Transient positional protection of transmission lines using complex wavelets analysis", IEEE Trans. Power Del., Vol. 18, No. 3, pp. 705-710, July 2003.

[22]X. Lin, P. Liu, and S. Cheng, "Effective transmission line fault detection during power swing with wavelet transform," in Proc, IEEE Power Energy Society Winder Meeting , Vol. 3, pp. 1950-1955, Jan. 23-27, 2002.

[23]L L Lai, "Wavelet Transform For High Impedance Fault Identification", Energy Systems Group, pp. 188-191, 1998.

[24]A. I. Megahed, A. M. Moussa, and A. E. Bayoumy, "Usage of wavelet transform in the protection of series compensated transmission lines," IEEE Trans. Power Del., Vol. 21, no. 3, pp. 1213-1221, July 2006.

[25]K. Silva, W. Neves, B. Souza, "Distance Protection Using a Novel Phasor Estimation Algorithm Based on Wavelet Transform", IEEE PES 2008 General Meeting, 20-24, July 2008 PESGM2008-001413, pp. 1-8, 2008.

[26]A. Megahed, A. Ramadan, W. Elmady, "Power Transform Differential Relay Using Wavelet Transform Energies", IEEE PES 2008 General Meeting, 20-24, July 2008 PESGM2008-000118, pp. 1-6, 2008.

[27]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.

[28]박철원, 신명철, "고장전류의 웨이브릿 변환을 이용한 동기 발전기 보호 알고리즘", 대한전기학회 논문지 Vol. 56, No. 3. pp. 834-839, 2007, 5.

[29]박철원, 신광철, 신명철, "교류발전기의 고장검출 알고리즘에 관한 비교 연구", 대한전기학회 논문지 Vol. 57P, No. 2, pp. 102-109, 2008, 6.

[30]C.W. Park, K.C. Shin, M.C. Shin et al., "Generator Fault Detection Technique using Detailed Coefficients Ratio by Daubechies Wavelet Transform", IEEE Trans. on Power Delivery (2008, 8, Proposed)