

Digital Ratio Differential Relaying for Main Protection of Large Generator

박 철 원* · 반 우 현*
(Chul-Won Park · Yu-Hyeon Ban)

Abstract - An AC generator is an important component in producing an electric power and so it requires highly reliable protection relays to minimize the possibility of damage occurring under fault conditions. It is a need for research of digital generator protection system(DGPS) for the next-generation ECMS and an efficient operation of protection control system in power station. However, most of protection and control system used in power plants have been still imported as turn-key and operated in domestic. This may cause the lack of the correct understanding on the protection systems and methods, and thus have difficulties in optimal operation. In this paper, presented ratio differential relaying(RDR) is main protective element in generator protection IED. The fault detection technique, operation zone and setting value of the RDR were studied and, compared with two of the fault detection algorithm. For evaluation performance of the RDR, the data obtained from ATPDraw5.7p4 modeling was used. The proposed methods are shown to be able to rapidly identify internal fault and did not operate a miss-operation for all the external fault.

Key Words : AC generator, ATPDraw5.7p4, Digital generator protection system, ECMS, Fault detection, IED, Ratio differential relaying

1. 서 론

전력수요의 급증에 따라 새로운 전원의 개발이 요구되고 더불어 신뢰성 향상을 위해 실계통에서 발생하는 발전기 권선사고와 유사한 발전기 상세모델링과 내부권선 사고 모의에 대하여도 관심이 증대되고 있다[1,2]. 특히 도입된 외산 보호제어시스템의 효율적인 운용, 실무자의 기술향상, 향후 차세대 발전기 및 발전소 보호제어시스템과 전력설비보호감시제어시스템(ECMS:Electrical Equipment Control & Monitoring System)이 구축되어야 한다. 한편, 발전기의 여러 가지 보호계전요소 중에서 권선 전영역에서의 지락고장 검출, 연결부 종단의 사고 검출, 발전기 집지시스템에 따른 사고전류의 감소에 따른 고장판별 등에 있어서 문제점이 제기되어 이에 대한 개선이 요구되고 있다[3,4]. 발전기 내부 단락사고가 발생하는 경우, 매우 큰 과도한 단락전류가 흘러 대단히 심각한 손상으로 인해 발전기를 더 이상 운전할 수 없는 상태로 만들게 될 수 있는 바, 궁극적으로는 전 계통의 붕괴를 가져 올 수도 있다. 반면에 지락사고는 그 발생 초기단계에는 전력계통에 가벼운 손상을 주게 되나 오랫동안 방치하여 지속하게 되면 내부 단락사고로 진전될 수 있다[5,6].

IEEE PES에서는 발전소의 핵심인 교류 발전기 보호를

† 교신저자, 종신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

* 정 회 원 : 강릉원주대학교 전기공학과 석사과정
접수일자 : 2012년 2월 1일
최종완료 : 2012년 2월 19일

위해 종합적인 지도서(tutorial)를 발표하였고[7], 표준(standards)를 발표하였다[8,9]. 또한, 미국 GE사는 디지털 발전기 보호 제어시스템을 최초로 개발하였고[10], 이를 개선하여 DGPS (Digital Generator Protection System)를 개발하였다[11]. 독일 SIMENS사는 다기능 발전기 보호 IED(Intelligent Electronic Device)를 개발하였다[12]. 이외 스위스 ABB사를 비롯하여 Beckwith사, SEL사 등에서는 Comprehensive Generator Relay나 Digital Integrated Generator Protection Relay 라 명명한 발전기용 차세대 전력기기를 개발하여 세계에 수출하고 있다[13,14].

발전기 권선보호기법으로는, 1973년 M.S. Sachdev 등에 의해 온라인 디지털 컴퓨터 기법과 하이브리드 컴퓨터를 이용한 발전기 차동보호가 효시라고 할 수 있고, 1977년 O.P. Malik 등과 1989년 H. K. VERMA 등에 의해 내부 비대칭 사고를 위한 고속기법과 실시간 시험이 발표되었다[15~17]. 또 1996년 J. Penman 등에 의해 여자전류 고조파 성분에 의한 회전자와 고정자 권선의 단락회로검출이 제안되었고[18], 1999년 A.I. Taalab 등에 의해 인공신경회로망에 의한 발전기 권선의 사고검출에 관한 연구가 수행되었다[19]. 2004년 N.L. Tai 등에 의해 발전기 고정자 지락사고검출을 위한 델타 영상분 전압에 의한 보호기법이 제시되었다. 2005년 M. Fulczyk 등에 의해 3고조파 전압의 발전기 고정자 권선 영향이 연구되었으며[20], 2007년 Tai. Nengling 등에 의해 발전기 고정자 지락고장을 위한 영상분 전압에 근거한 비율차동기법이 제시되었고[21], 2004년 M.A. Rahman 등과 2009년 C.W. Park 등에 의해 다우비시 Wavelet과 Wavelet 전력과 다우비시 Wavelet을 이용한 기법이 사고검

출이 제안되었다[22,23]. 근래에는 동기기의 100% 고정자 지락고장보호의 실시간 시험[24]과 소형발전기 차동보호를 위한 CT 문제가 발표되었다[25].

최근 지능형 전력망과 ECMS의 선진화 필요성이 제기되면서 차세대 전력기기의 원천기술 개발을 위해 대형 발전기 내부사고 보호용 다기능 IED개발과 발전기 보호용 감중보호계전기의 국산화에 대한 관심이 증가하는 추세를 보이고 있다[27,28].

본 논문에서는 대형 발전기 내부사고 보호용 다기능 IED에 들어갈 핵심 보호 요소인 디지털 비율차동계전기법(RDR: Ratio Differential Relaying)에 관하여 두 가지의 고장관별식의 비교 연구를 하였다. 비율차동계전방식의 검출방법, 동작영역, 정정치 등을 조사한 후 내부사고 및 외부사고의 경우 RDR의 고장관별동작 시뮬레이션을 수행하였다. 사고 데이터를 수집하기 위해서 ATPDraw 5.74p4 버전을 활용하여 UM(universal machine) 발전기를 포함한 사례연구 계통을 모델링하였다.

2. 디지털 비율차동 계전기법

기본과 성분에 기초한 계전기법은 사고시 계전신호에 포함된 DC-offset 및 고조파 성분을 제거해야 한다. 사고시 지수함수 형태로 감소하는 DC-offset 성분과 고조파 성분을 필터링하여 IED의 계전알고리즘 정확도를 향상시키고 동작시간을 단축시키게 된다.

2.1 DC-offset 제거필터

본 논문에서는 DC-offset 성분을 지수 함수 그대로 이용한 필터로서 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$b_n = a_n - (a_n + a_{n-(N/2)}) / (1 + \exp(N\Delta t / 2\tau)) \quad (1)$$

여기서, N : 주기당 샘플수, Δt : 샘플링 간격, τ : 시정수

2.2 DFT 필터

이산신호 $I(n)$ 를 주기당 동일한 간격으로 12샘플링한 경우 기본과 추출을 위한 필터의 출력은 식(2), 식(3)과 같이 차분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$I_{r1}^{12}(k) = \frac{2}{12} [I_k - I_{k-6} + 0.5 (I_{k-10} - I_{k-8} - I_{k-4} + I_{k-2}) + 0.866025404 (I_{k-11} - I_{k-7} - I_{k-5} + I_{k-1})] \quad (2)$$

$$I_{i1}^{12}(k) = \frac{2}{12} [I_k - I_{k-3} + 0.5 (I_{k-11} + I_{k-7} - I_{k-5} - I_{k-1}) + 0.866025404 (I_{k-10} + I_{k-8} - I_{k-4} - I_{k-2})] \quad (3)$$

여기서, $I_{r1}^{12}(k)$, $I_{i1}^{12}(k)$ 는 각각 k 번째 순간 기본과 성분의 실수부와 허수부이고, 위첨자는 샘플링수이다.

n 번째 데이터 윈도우에 대응되는 전류샘플의 실수부와 허수부는 식(4)와 같이 \bar{I}_n 의 페이저 형태의 신호로 표현할 수 있다.

$$\bar{I}_n = I_{rn} + jI_{in} \quad (4)$$

여기서, I_{rn} 과 I_{in} 은 n 번째 데이터 윈도우에서 기본과 전류신호의 실수부와 허수부이다.

2.3 비율차동계전 기법

비율차동방식은 발전기 중성점(또는 시스템) 측의 전류와 전력계통(또는 부하)측의 전류를 비교하여 사고를 검출한다. 디지털 차동보호에 의한 발전기의 고장관별은 식(5), 또는 식(6)을 활용하여 수행할 수 있다[10,11,26].

$$|I_{e1} - I_{e2}|^2 > K_1 (I_{e1} \cdot I_{e2}) \quad (5)$$

$$|I_{e1} - I_{e2}| \geq K_1 \frac{|I_{e1}| + |I_{e2}|}{2} \quad (6)$$

여기서, I_a : 발전기 부하 측 상전류(상 권선의 입력 전류)
 I_b : 발전기 시스템 측 상전류(상 권선의 출력 전류)
 K_1 : 비율 정정치

그림 1과 같은 변곡점을 지닌 발전기 고정자 보호용 비율차동 계전기 특성곡선에서, I_m 은 최소 동작치이고, I_N 은 계전기 경계전류이다. 소전류 영역 동작 특성은 식(7)과 같고 대전류 영역 동작 특성은 식(8)과 같다.

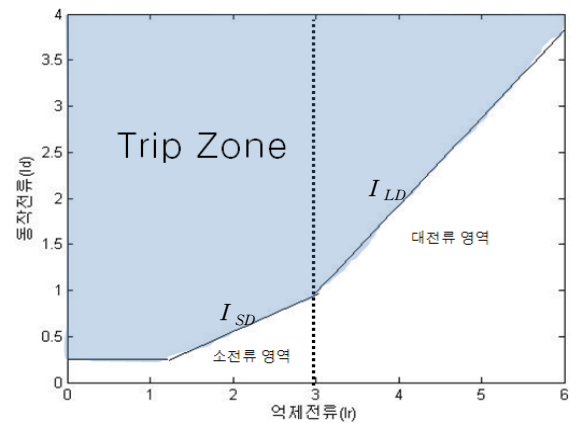


그림 1 고정자 차동 보호계전기의 특성 곡선

Fig. 1 The characteristic curve of the stator differential protection relay

$$I_{SD} = I_m + (I_R - 0.5I_N) \times K_1 \quad (7)$$

$$I_{LD} = I_m + 2.5 \times I_N \times K_1 + (I_R - 3I_N) \times 1.5 \quad (8)$$

표 1은 각 제작사별로 비교한 87G의 정정치 이다. 본 논문에서는 D사와 E사의 알고리즘과 정정치를 활용하였다.

표 1 87G의 정정값

Table 1 The setting value of 87G

보호계전기	정정값	비고
87G	최소동작치 : $0.05 I_N \sim 0.1 I_N$ 비율특성곡선 : 5%, 10%	A사
	최소동작치 : 0.14A 비율특성곡선 : 5%, 50%	C사
	최소동작치 : 0.3A 비율특성곡선 : 10%	D사
	최소동작치 : 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 I_N 비율특성곡선 : 10%, 15%, 20%, 25%	E사

비율차동 보호알고리즘은 먼저 계전신호인 입·출력전류로부터 차전류를 계산하고 순시고장여부를 확인한다. 다음 DC-offset 제거필터링과 DFT 필터링을 거쳐서 차전류 및 억제전류를 계산한 후, 식(5) 또는 식(6)에 의해 고장을 판별한다. 즉, 비율차동을 계산한 후, 특성곡선 상에서 고장영역에 들어가는지의 여부를 판단하고 다시 시작하던지 또는 종료하게 된다.

3. 사례연구

3.1 ATPDraw에 의한 모델 전력계통

제시된 알고리즘의 성능평가와 과도상태 해석을 위하여 ATPDraw5.7p4를 이용하여 그림 2와 같이 송전선로, 승압변압기, 부하 및 발전기로 구성된 간단한 사례연구 모델 계통을 설계하였다. 여기서 발전기의 과도리액턴스는 0.33[pu], 정격전압은 13.8[kV], 정격 PF는 0.8[lag], 3상 정격용량은 250[MVA], 그리고 송전선로의 임피던스는 $0.8+j0.6$ [pu]이다 [3,5,17,23].

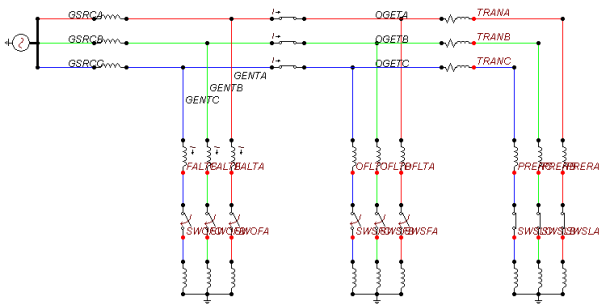
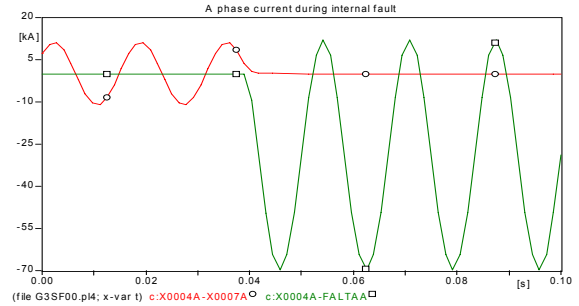


그림 2 모델 전력계통

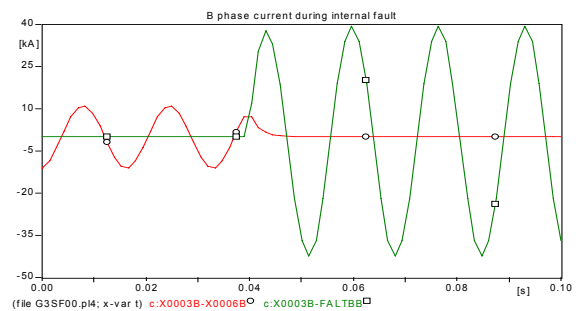
Fig. 2 Schematic diagram of model system

그림 3과 그림 4는 고장발생시점이 0.037503[sec]인 사고 각 0° 인 경우 사고모의 결과를 WPCplot을 이용하여 그린 3상 단락 내부사고와 3상단락 외부사고시의 3상 부하전류 및 고장전류의 순시치이다. 범례에서 마름모로 표시된 선이 부하전류를 나타내고 네모로 표시된 선이 고장전류를 의미한다. 그림 3으로부터 내부사고가 발생하자, 부하전류는 감소하여 0이 되었고 사고 직후, 내부고장전류는 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 4로부터 외부사고가 발생하자, 부하전

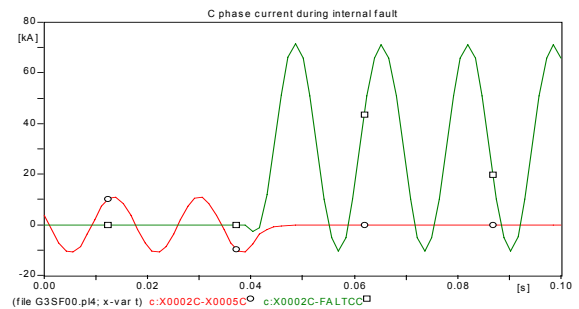
류는 약간 증가되는 반면에 고장전류는 매우 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) A phase



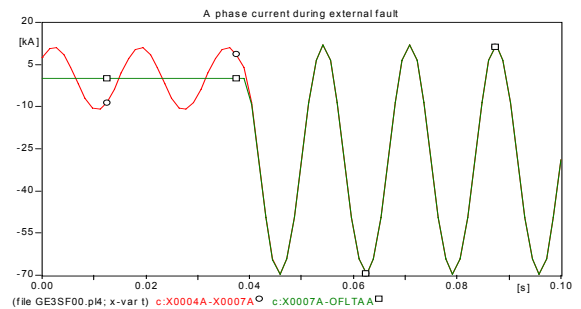
(b) B phase



(c) C phase

그림 3 내부사고시 3상 부하·고장전류

Fig. 3 Three phase load current and fault current during internal fault



(a) A phase

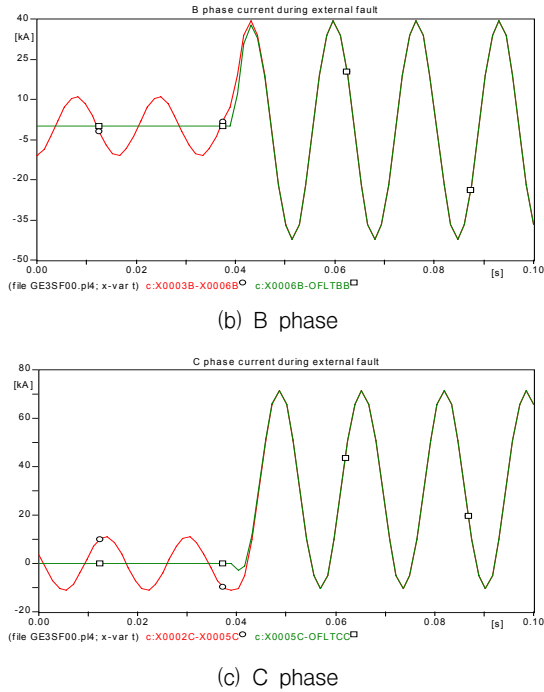


그림 4 외부사고시 3상 부하·고장전류
 Fig. 4 Three phase load current and fault current during external fault

3.2 시뮬레이션

그림 5는 DC-offset 제거필터와 DFT 필터를 통과한 3상 사고전류와 부하전류의 실효치이다. 그림 5(a)로부터 내부사고

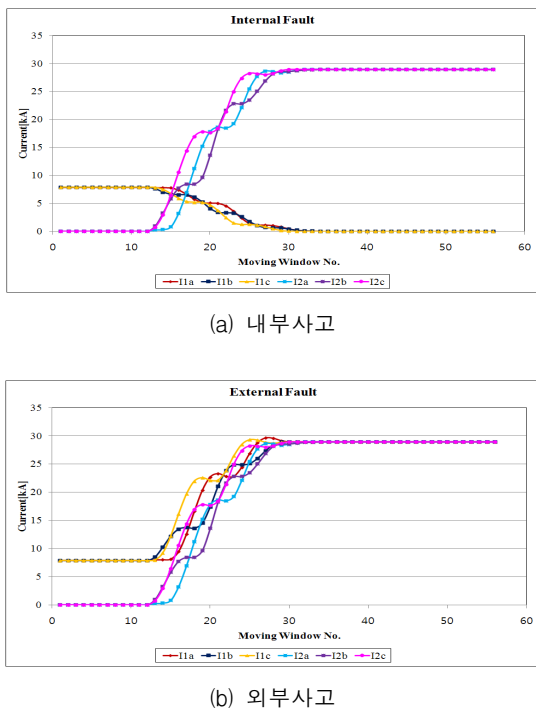


그림 5 내부·외부사고시 3상 부하·고장전류 실효치
 Fig. 5 RMS of three phase load current and fault current during internal fault and external fault

발생 직후 그 전류의 차이가 많이 발생하게 되고 그림 5(b)로부터 외부사고 발생 직후 그 전류의 차이가 거의 나지 않게 됨을 알 수 있다. 여기서 I_1 의 값들은 부하전류이고 I_2 의 값들은 고장전류를 의미한다.

그림 6은 사고발생시각 0.037503[sec]인 사고각 0° 에서 3상단락 내부사고가 발생된 경우, 제안된 DFT 기반 RDR 기법에 따른 고장판별 궤적이다. 본 논문에서 식(1)에 의한 고장판별을 RDR1이라고 식(2)에 의한 고장판별을 RDR2라고 정의하였다. ROC(Relay Operation Curve)는 계전기 동작 특성곡선이고 x축은 억제전류이고, y축은 차전류이다. 고장이 발생하게 되면, 부하전류와 고장전류들이 과도상태가 되기 때문에 억제전류와 차전류도 진동하게 된다.

그림 6으로부터 내부사고 직후, 두 기법에 의한 모든 억제전류와 차전류는 동요하다가 점차로 트립 동작 영역 내로 수렴함으로써 내부고장을 정확하게 검출하는 것을 알 수 있다.

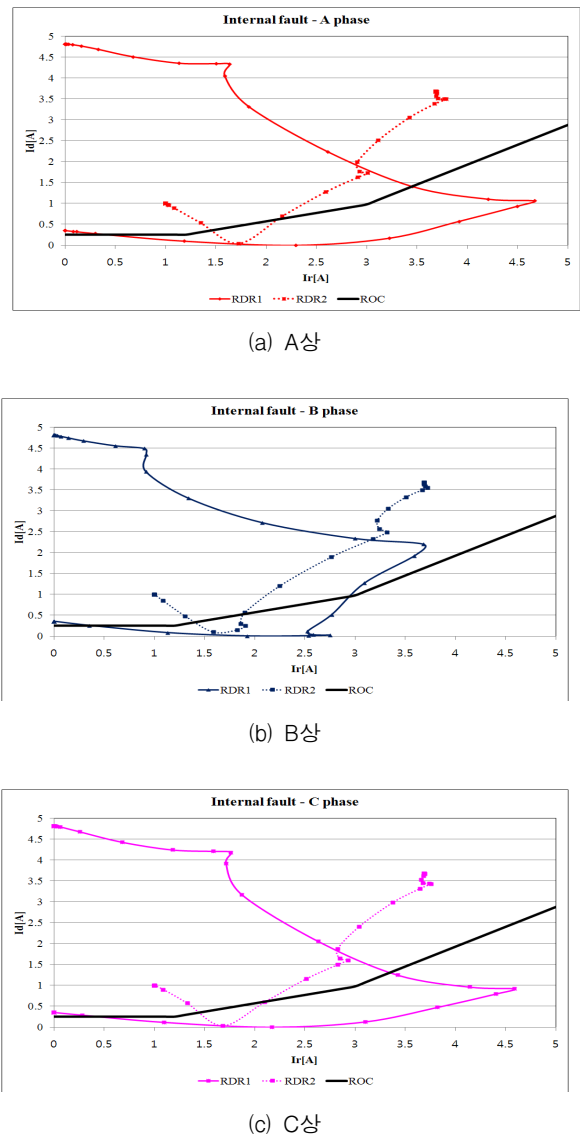
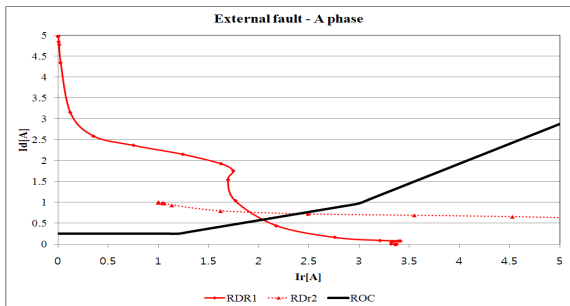


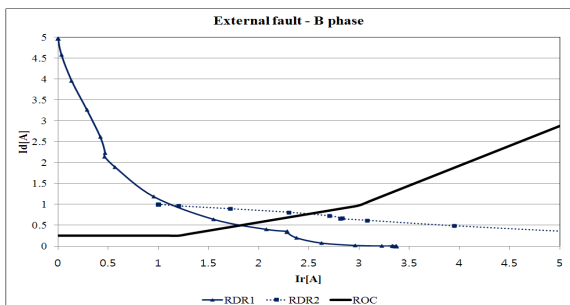
그림 6 3상단락 내부사고시 고장판별 궤적
 Fig. 6 Fault discrimination locus during internal three phase short fault

A상의 경우, RDR2 기법에 의한 내부고장검출시간은 고장발생 후 17샘플 짜인 약 22[ms]가 되고, RDR1 기법에 의한 내부고장검출시간은 고장발생 후 24샘플 짜인 약 32[ms]가 된다. B상의 경우, RDR2 기법에 의한 내부고장검출시간은 고장발생 후 19샘플 짜인 약 24[ms]가 되고, RDR1 기법에 의한 내부고장검출시간은 고장발생 후 20샘플 짜인 약 27[ms]가 된다. C상의 경우, RDR2 기법에 의한 내부고장검출시간은 고장발생 후 17샘플 짜인 약 22[ms]가 되고, RDR1 기법에 의한 내부고장검출시간은 고장발생 후 21샘플 짜인 약 28[ms]가 된다.

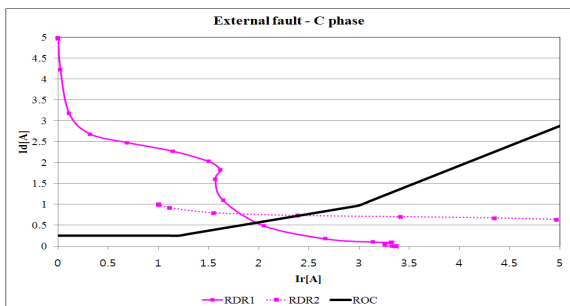
그림 7은 동일한 조건에서 3상단락 외부사고가 발생한 경우, 제안된 DFT 기반 RDR1, RDR2 기법에 따른 고장판별 궤적이다. 그림 7로부터 두 가지 기법 모두 외부사고 시 역제전류와 차전류가 트립 동작 영역 밖으로 수렴하면서 동작영역내로 들어가지 않기 때문에 트립 오동작을 하지 않는 것을 알 수 있다.



(a) A상



(b) B상



(c) C상

그림 7 3상단락 외부사고시 고장판별 궤적
Fig. 7 Fault discrimination locus during external three phase short fault

A상의 경우, RDR2 기법에 의한 외부고장판별시간은 고장발생 후 17샘플 짜인 약 22[ms]가 되고, RDR1 기법에 의한 외부고장판별시간은 고장발생 후 24샘플 짜인 약 32[ms]가 된다. B상의 경우, RDR2 기법에 의한 외부고장판별시간은 고장발생 후 16샘플 짜인 약 21[ms]가 되고, RDR1 기법에 의한 외부고장판별시간은 고장발생 후 22샘플 짜인 약 29[ms]가 된다. C상의 경우, RDR2 기법에 의한 외부고장판별시간은 고장발생 후 16샘플 짜인 약 21[ms]가 되고, RDR1 기법에 의한 외부고장판별시간은 고장발생 후 22샘플 짜인 약 29[ms]가 된다. 내부고장검출과 외부고장판별 모두에서 RDR2 기법이 RDR1 기법보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 교류발전기 보호를 위한 다기능 IED의 보호방식 중 주보호방식인 디지털 비율차동계전방식에 대하여 연구하였다. 고장검출원리 및 방법에 대하여 알아보았고 국내 표준원전에 사용 중인 고정자 차동보호계전기의 정정치를 비교하였다. 해외 D사 및 E사의 디지털 RDR 기법을 technical computing 언어인 MATLAB을 활용하여 작성하였고, ATPDraw5.7p4를 활용하여 설계한 교류발전기시스템을 대상으로 내부사고와 외부사고 시뮬레이션을 수행하였다. 수집된 계전 데이터를 활용하여 제시된 87G의 동작특성을 구현하였는데, 시뮬레이션 결과 두 가지기법 모두 내부사고시 정동작이 확인되었고 외부사고시 오동작하지 않았다. 특히 RDR1 기법보다 RDR2 기법이 보다 신속하게 고장을 검출하였고 강한 동작 특성을 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (2010T100100145)

참 고 문 헌

- [1] 박철원 외, “대용량 발전기보호를 위한 발전기 모델링”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 121~122, 2006. 7.
- [2] 박철원, 이상성, 오용택, 김윤상, “발전기 사고 모의를 위한 Matlab/Simulink 모델링 및 분석”, 2011년 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 97~99, 2011.10.
- [3] 박철원, 신명철, “동기발전기의 디지털 차동보호 알고리즘에 관한 연구”, 성균관대학교 논문집 과학기술편 Vol. 56, No. 2, pp. 19~32, 1994.
- [4] 박철원, 반우현, “대형 발전기 보호를 위한 차세대 전력기기 개발의 개요”, 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 371~373, 2011.4.
- [5] 박철원, “발전기 시스템의 과도해석과 IED 용 개선된 알고리즘 개발”, 최종보고서 pp. 1~10, 2006.12.
- [6] 최정립 외, “보호계전기해설(제2집)”, 남서울전력관리처 공무부 pp. 24~75, 1988.12.
- [7] C.J. Mozina et al., “IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators”, IEEE Power Engineering

- Society, IEEE 95 TP 102, pp. 1~78, 1995.
- [8] IEEE Power Engineering Society, "Guide for AC Generator Protection", IEEE Std. C37.102-2006 pp. 1~167, 2006.11.
- [9] IEEE Power Engineering Society, "Guide for AC Generator Ground Protection", IEEE Std. C37.101-2006 pp. 1~67, 2006.11.
- [10] General Electric Company, "GEK-100605 DGP Digital Generator Protection System", pp. PD-1~SO-21, 1995.
- [11] GE Industrial Systems, "DGP Digital Generator Protection System Instruction Manual", pp. 1~C4, 2003.
- [12] Siemens. "Siprotec Numerical Protection Relays", Part 2, Vol. 11, pp. 1~102, 2006.
- [13] ABB, "Generator protection REG670, Application manual", Vol 1.2, pp. 1~608, 2011.
- [14] ABB, "Generator protection REG670, Operation manual", Vol 1.2, pp. 1~125. 2011.
- [15] 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. pp. 1498~1506, 1977.
- [16] K. SOUNDARARAJAN and H. K. VERMA, "Digital Differential Relaying for Generator Protection: Development of Algorithm and Off-line Evaluation", Electric Power systems Research, pp. 109~117, 1989.
- [17] K. SOUNDARARAJAN and H. K. VERMA, "Microcomputer Based Digital Differential Relaying for Generator Protection: Real Time Test Results", Electric Power systems Research, pp. 237~243, 1991.
- [18] 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, pp. 137~142, 1996.
- [19] 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.
- [20] M. Fulczyk and R. L. Schlake, "Influence of the generator load conditions on third harmonic voltages in generator stator windings", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, pp. 158~165, Mar. 2005.
- [21] Tai. Nengling and 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.
- [22] O. Ozgonerel, 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.
- [23] Chul-Won Park, Kwang-Chul Shin, et al, "Generator fault detection technique using detailed coefficients ratio by daubechies wavelet transform", IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1~7, 2009.
- [24] Dehkordi, A.B. Ouellette, D.S. Forsyth, P.A, "Protection testing of a 100% stator ground fault using a phase domain synchronous machine model in real time", DPSP, 10th IET International Conference, pp. 1~5, 2010.
- [25] Hunt, R. Patel, S. "Dimensioning CTs for small generator differential protection", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), pp. 1~8, 2011.
- [26] 전력연구원, "울진 N/P #4 Unit 발전기 준공시험 보고서", 1998.4.
- [27] 박철원, 오용택, 김윤상, 이상성, 석광호, "발전소의 사고방지를 위한 발전기 보호계전기법에 관한 연구", 2011년 전력기술부문화 추계학술대회 논문집, pp. 311~312, 2011.10.
- [28] 박철원 외, "대형 발전기 내부사고 보호를 위한 다기능 IED 시제품 기술 개발", 지식경제 기술혁신사업 1차년도 연차보고서, pp. 1~286, 2011.5.

저 자 소 개



박철원 (朴哲圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1989년~1993년 금성산전연구소 주임연구원. 1993년~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원. 1993년~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사. 1997년~2007년 국립강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수. 2007년~현재 국립강릉원주대학교 전기공학과 정교수. 2010년 12월 대한전기학회 학술상 수상.
Tel : 033-760-8786
Fax : 033-760-8781
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr



반우현 (潘禹顯)

1988년 9월 22일생. 2011년 국립강릉원주대학교 전기공학과 졸업. 2011년~현재 국립강릉원주대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 033-760-8796
Fax : 033-760-8781
E-mail : b1w2h3@naver.com