

ATPDraw5.7p4 모델링 데이터를 이용한 전압억제 과전류계전기 동작특성에 관한 연구

논 문
61P-1-6

A Study of the Operating Characteristic for Voltage Restrained Overcurrent Relay using the ATPDraw5.7p4 Modeling Data

박 철 원[†] · 반 우 현^{*}
(Chul-Won Park · Yu-Hyeon Ban)

Abstract - The market of domestic Power Plant Generator Protection and Control System (GPCS) is narrow and required the high reliability, and technology. So, it is still operated as turn-key. In recent years, digital relays has evolved into IED can perform the control and monitoring functions without central monitoring based on IEC61850 international standards communications, and attention for advancement of smart grid and ECMS has been increased in South Korea. The increasing attention on multi-function IED, DGPS(digital generator protection system), for internal fault protection of large generator results in starting a national project in South Korea, the IED prototype development for next-generation power units. The voltage restrained overcurrent relay have been used as back-up overcurrent protection for generators. In this paper, voltage restrained overcurrent relay is one of the back-up protective factors in generator protection IED was presented. For evaluation performance of the voltage restrained overcurrent relay, the data of ATPDraw5.7p4 modeling was used.

Key Words : ATPDraw5.7p4, DGPS, ECMS, IED, Voltage restrained overcurrent relay, Power plant, 51V relay

1. 서 론

국내 발전소용 발전기보호제어시스템(GPCS : Generator Protection and Control System)은 시장이 협소하고, 높은 신뢰성과 기술력이 요구되기 때문에 전량 완성인도방식(turn-key)으로 도입되어 운영되고 있다. 이에 현장기술자들은 블랙박스 형태로 운전되는 GPCS 및 계전 설비에 대한 이해가 부족하여 최적 운용이 힘들었다. 특히 문제가 발생할 경우 외국에 종속된 조치로 인해 응급대처에 어려움이 있었다[1].

한편 IEEE PES에서는 1995년 발전소의 핵심인 교류 발전기 보호를 위해 종합적인 지도서(tutorial course)를 발표하였고[2], 2006년에는 AC 발전기 보호 및 지락보호에 관한 표준(standards)을 제안하였다[3,4]. 또한, 미국의 GE사는 1995년 디지털형 발전기 보호제어시스템을 최초로 개발하였고[5], 이를 개선하여 2003년 DGPS(digital generator protection system)를 개발하여 근래에 IEC61850 기반 G60을 출시하였다[6]. 독일의 SIMENS사도 2006년도에 다기능(multi-function) 발전기 보호 IED를 개발하였다[7]. 이외 Beckwith, SEL, ABB, VAMP 사에서는 Comprehensive Generator Relay나 Digital Integrated Generator Protection Relay에 대한 연구개발로 인하여 전 세계에서 좋은 호응을

얻고 있다, ABB사는 2011년 발전기 보호용 REG670 매뉴얼을 수정, 발표한 바 있다[1,8,9].

전압억제 과전류 계전기에 대한 해외의 연구 동향으로는, 1990년대에는 ANSI/IEEE 타입 전압억제와 전압제어 과전류 계전기가 도입되어 점차 그 사용이 증가하기 시작했다[11]. 2000년대 초반부터 지금까지 많은 발표는 없었으나, 신경회로망(Neural Network)를 기반으로 전압억제 또는 전압제어 과전류 계전기법이 제안되었고 다른 보호 요소와의 협조를 강조하는 경향이 추세로 여겨진다[10~14].

최근 디지털계전기는 IEC61850 국제규격 통신기반으로 별도의 중앙감시 없이 제어 및 감시기능을 수행할 수 있는 IED(Intelligent Electronic Device)로 진화하고 있다[11,15]. 근래 국내에서는 지능형 전력망(smart grid)과 전력설비 감시보호시스템(ECMS:Electrical Equipment Control & Monitoring System)의 선진화 필요성이 제기되면서 차세대 전력기기의 원천기술 개발을 위해 대형 발전기 내부사고 보호용 다기능 IED 개발과 발전기 보호용 감중보호계전기의 국산화에 대한 관심이 높아지고 있다. 한국서부발전(주)의 태안발전본부 및 평택발전본부에서는 국산 ECMS 도입을 목전에 두고 있다[16,17].

본 논문에서는 발전기 보호용 IED에 들어갈 보호 요소 중의 하나인 전압억제 과전류 계전기에 대해 연구하였다. 0사의 DGP를 대상으로 삼아 연구를 수행하였다. 전압억제 과전류 계전기의 동작특성과 그에 따른 특성방정식을 분석한 후, 제시된 기법의 동작시험을 위해 UM(Universal Machine)발전기를 ATPDraw5.7p4로 모델링을 수행하여 데이터를 수집하였다[18]. 시뮬레이션의 신뢰성 향상을 위해 동기발전기의

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

^{*} 정 회 원 : 강릉원주대학교 전기공학과 석사과정
접수일자 : 2012년 1월 30일
최종완료 : 2012년 2월 20일

정수는 실제 계통에 사용되는 값을 적용하였다.

2. 디지털 전압억제 과전류계전기법

2.1 전압억제 과전류계전기의 원리

최대 부하전류와 최소고장전류의 차가 작을 경우, 일반 과전류계전기에서는 부하전류에 의해 오동작하지 않도록 정정하면 고장 시 부동작 또는 장시간을 요하게 되어 상위 계전기와의 보호협조 면에서 불합리한 일이 생길 수 있게 된다.

그러나 전압억제 과전류계전기는 이와 같은 경우에도 선택차단이 가능한 것으로 회로전압이 정상적인 경우에는 억제력이 강하기 때문에 계전기가 동작하기 어렵지만, 고장 시에는 회로전압이 저하되기 때문에 억제력이 약해져 계전기는 동작하기 쉽게 된다. 고장점이 가까울수록 억제전압이 작아지므로 계전기는 고감도로 동작하게 된다[3,4].

2.2 전압억제 과전류계전기의 특성 방정식

전압억제 과전류 계전기의 반한시 특성 방정식은 식(1)과 같이 과전류 계전기의 특성 방정식에 전압 요소를 추가한 것으로 표현할 수 있다[2,4,5]. 이때 억제전압은 발전기 단자전압을 가지고 구할 수 있으며 방정식은 식(2)와 같다.

$$T = \frac{K}{\left(\frac{I/I_{PV}}{V/V_{nom}}\right)^{-1}} \text{seconds} \quad (1)$$

여기서, K = 시간계수, I_{PV} = 전류픽업치, V_{nom} = 공칭 전압

$$\% \text{ Voltage restraint} = \frac{V_{GT}}{V_G} \times 100 \quad (2)$$

$$V_{GT} = V_G \times \frac{10 \times \frac{\text{Generator capacity}}{\text{GSU transformer capacity}}}{\text{Fault impedance}}$$

여기서, V_{GT} = 억제 전압, V_G = 발전기 단자전압

표 1은 본 논문에서 설정한 전압억제 과전류 계전기의 정정과 비율이다. 여기서 MNEMONIC와 AMP는 각각 파라미터와 전류를 나타낸다.

표 1 전압억제 과전류 계전기의 정정과 비율

Table 1 Setting and range of voltage restrained overcurrent relay

MNEMONIC	RANGE			DEFAULT
	5AMP	1AMP	UNITS	5AMP
PICKUP	0.5 to 16.0	0.1 to 3.2	[A]	7.5
NOM VOLT	100 to 225.0/100 to 140.0		[V]	114.3
REL PWR	0.5 to 99.9	0.1 to 19.9	[W]	1.5
TIME FAC	0.10 to 99.99		[sec]	1

그림 1은 전압억제 과전류 계전기의 반한시 특성 방정식

식(1)을 MATLAB을 활용하여 나타내었다. 동작특성에서 설명하였듯이 억제전압이 작아질수록 계전기의 감도는 증가한다. 본 논문에서는 %전압억제를 30%로 가정하였다.

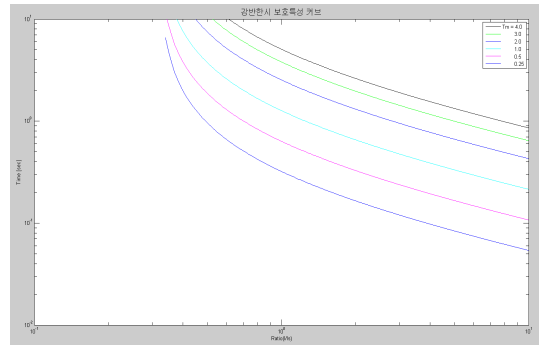


그림 1 MATLAB을 이용한 51V의 반한시 특성

Fig. 1 Inverse time characteristic of 51V using the MATLAB

3. 사례연구

3.1 ATPDraw5.7p4에 의한 모델링

제시한 전압억제 과전류계전 알고리즘의 성능 검증을 위하여, 그림 2와 같이 ATPDraw5.7p4를 이용하여 발전기 정격 전압은 13.8[kV], 정격용량은 200[MVA]인 간단한 모델 계통을 구성한 후 시뮬레이션 데이터를 수집하였다. 동기발전기 정수는 표 2와 같다. 시뮬레이션은 0.0708888[sec]에서 A상 지락고장을 발생시켰고, 고장저항은 0.0001, 1.5, 50, 100, 150 [Ω]으로 변화시켜가면서 성능을 평가하였다. 샘플링 주파수는 720[Hz]로 설정하였다.

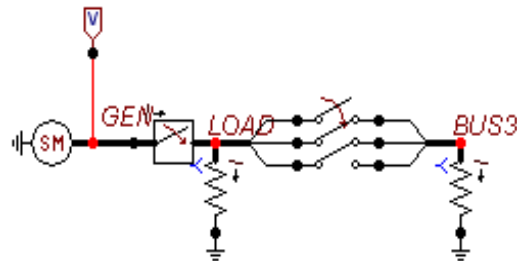


그림 2 ATPDraw5.7p4에 의한 모델 계통

Fig. 2 Power system model of ATPDraw5.7p4

표 2 동기발전기 정수

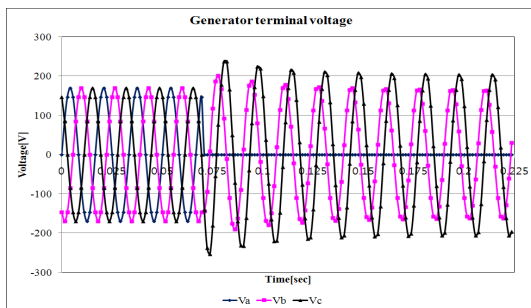
Table 2 Synchronous Generator Parameters

Parameters	Value	Parameters	Value
X'_l	0.15[pu]	X'_q	1.64[pu]
X_0	0.14[pu]	X''_q	0.185151[pu]
R_a	0.001096[pu]	X'_{do}	6.194876[sec]
X'_d	1.7[pu]	X''_{do}	0.028716[sec]
X''_d	0.238324[pu]	X'_{qo}	0.0[sec]
X''_d	0.184690[pu]	X''_{qo}	0.074960[sec]
X_q	1.64[pu]	Inertia	0.1881128 [Mlbm-ft ²]

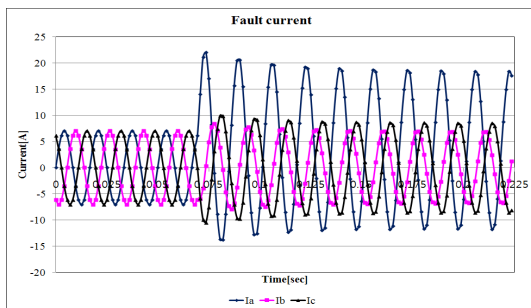
3.2 성능 평가

본 연구에서의 CT 비는 300:5[A]로 채택하였고, PT 비는 7200:120[V]으로 채택하였다. 픽업 전류 값은 정상상태 실효치 전류의 8.3%로 설정하였다.

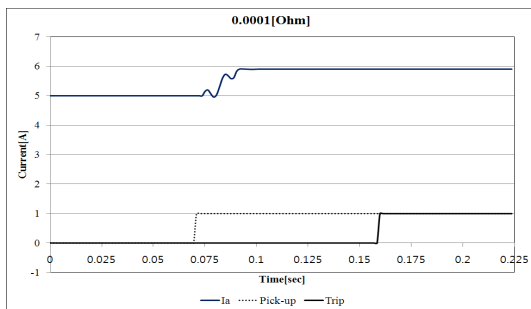
그림 3은 고장저항이 0.0001[Ω] 인 경우의 A상 지락사고 시 수집한 전압, 전류, 트립 신호를 나타낸 것이다. 그림 3(a)에서 고장발생 후 A상 전압은 0[V]으로 수렴하는 것을 알 수 있고, B상 전압은 240[V]로 상승하였다가 204[V]로 수렴하고, C상 전압은 200[V]로 상승하였다가 162[V]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)에서 고장발생 후 A상 전류는 22[A]로 상승하였다가 18[A]로 수렴하였고, B상 전류는 10[A]로 상승하였다가 8.5[A]로 수렴하고, C상 전류는 8.4[A]로 상승하였다가 6.7[A]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 3(c)는 A상 고장전류 실효치 및 트립 신호로서 픽업이 이루어진 시간 70[ms]와 계전기 트립이 발생한 시간 159.97[ms]를 나타낸다.



(a) 3상 단자전압 신호



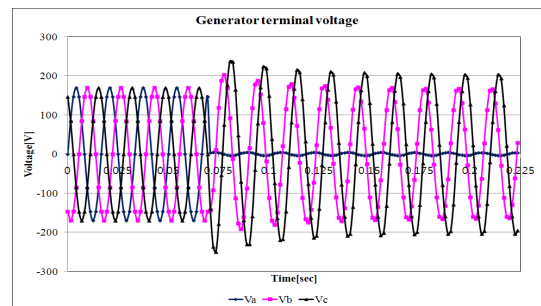
(b) 3상 고장전류 신호



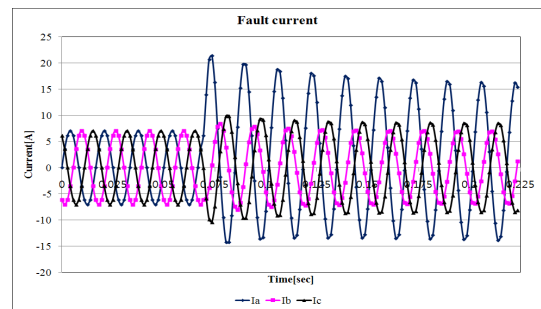
(c) A상 고장전류 실효치 및 트립 신호

그림 3 고장저항이 0.0001[Ω] 인 경우의 A상 지락사고
Fig. 3 A phase ground fault about 0.0001[Ω]

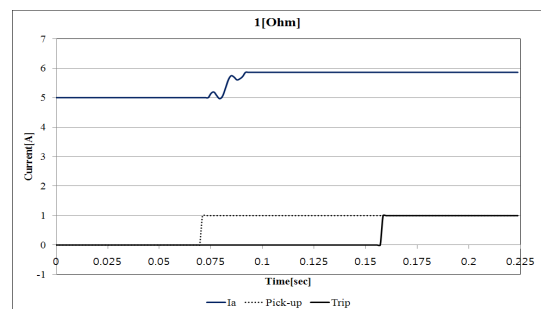
그림 4는 고장저항이 1[Ω] 인 경우의 A상 지락사고 시 수집한 전압, 전류, 트립 신호를 나타낸 것이다. 그림 4(a)에서 고장발생 후 A상 전압은 4[V]으로 수렴하는 것을 알 수 있고, B상 전압은 240[V]로 상승하였다가 204[V]로 수렴하고, C상 전압은 200[V]로 상승하였다가 162[V]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)에서 고장발생 후 A상 전류는 22[A]로 상승하였다가 16[A]로 수렴하였고, B상 전류는 10[A]로 상승하였다가 8.5[A]로 수렴하고, C상 전류는 8.4[A]로 상승하였다가 6.7[A]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 4(c)는 pickup이 이루어진 시간 70[ms]와 계전기 트립이 발생한 시간 159.75[ms]를 나타낸다.



(a) 3상 단자전압 신호



(b) 3상 고장전류 신호

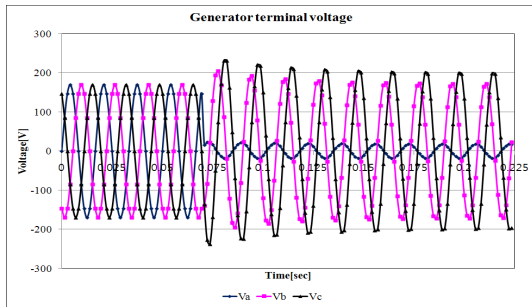


(c) A상 고장전류 실효치 및 트립 신호

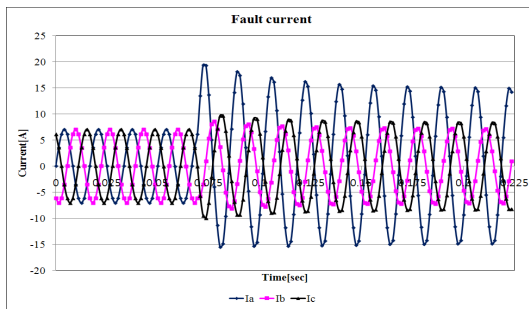
그림 4 고장저항이 1[Ω] 인 경우의 A상 지락사고
Fig. 4 A phase ground fault about 1[Ω]

그림 5는 고장저항이 5[Ω] 인 경우의 A상 지락사고 시 수집한 전압, 전류, 트립 신호를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 고장발생 후 A상 전압은 18[V]으로 수렴하는 것을 알 수

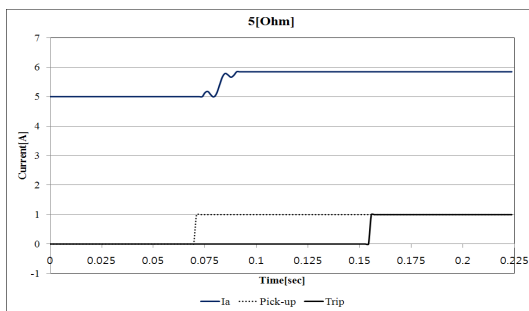
있고, B상 전압은 230[V]로 상승하였다가 200[V]로 수렴하고, C상 전압은 200[V]로 상승하였다가 172[V]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)에서 고장발생 후 A상 전류는 19[A]로 상승하였다가 15[A]로 수렴하였고, B상 전류는 9.6[A]로 상승하였다가 8.3[A]로 수렴하고, C상 전류는 8.5[A]로 상승하였다가 7[A]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 5(c)는 pickup이 이루어진 시간 70[ms]와 계전기 트립이 발생한 시간 157.84[ms]를 나타낸다.



(a) 3상 단자전압 신호



(b) 3상 고장전류 신호

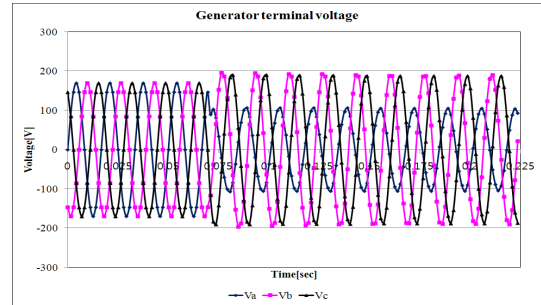


(c) A상 고장전류 실효치 및 트립 신호

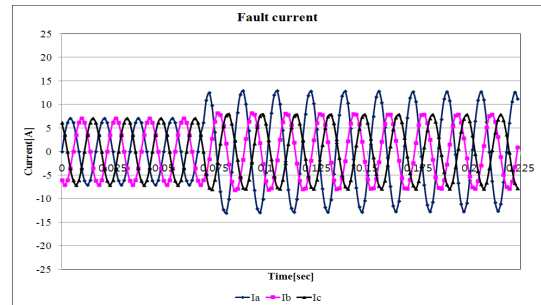
그림 5 고장저항이 5[Ω] 인 경우의 A상 지락사고
Fig. 5 A phase ground fault about 5[Ω]

그림 6은 고장저항이 50[Ω] 인 경우의 A상 지락사고 시 수집한 전압, 전류, 트립 신호를 나타낸 것이다. 그림 6(a)에서 고장발생 후 A상 전압은 106[V]으로 수렴하는 것을 알 수 있고, B상 전압은 196[V]로 상승하였다가 190[V]로 수렴하고, C상 전압은 190[V]로 상승하였다가 188[V]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)에서 고장발생 후 A상 전류

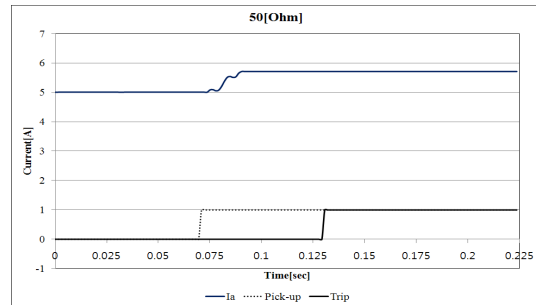
는 12.5[A]로 수렴하였고, B상 전류는 8.2[A]로 수렴하고, C상 전류는 8.1[A]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)는 pickup이 이루어진 시간 70[ms]와 계전기 트립이 발생한 시간 130.56[ms]를 나타낸다.



(a) 3상 단자전압 신호



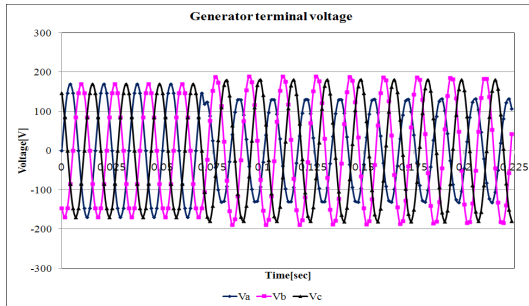
(b) 3상 고장전류 신호



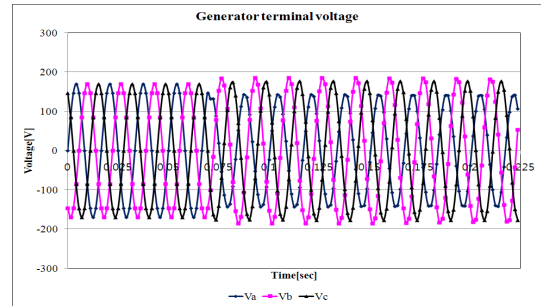
(c) A상 고장전류 실효치 및 트립 신호

그림 6 고장저항이 50[Ω] 인 경우의 A상 지락사고
Fig. 6 A phase ground fault about 50[Ω]

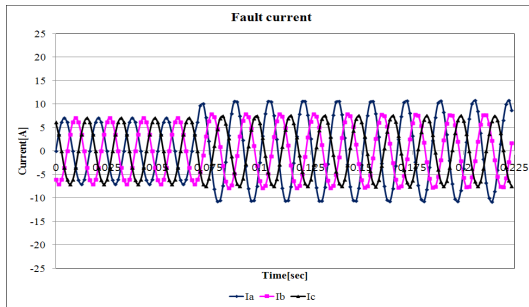
그림 7은 고장저항이 100[Ω] 인 경우의 A상 지락사고 시 수집한 전압, 전류, 트립 신호를 나타낸 것이다. 그림 7(a)에서 고장발생 후 A상 전압은 130[V]으로 수렴하는 것을 알 수 있고, B상 전압은 188[V]로 수렴하고, C상 전압은 180[V]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)에서 고장발생 후 A상 전류는 10.6[A]로 수렴하였고, B상 전류는 7.8[A]로 수렴하고, C상 전류는 7[A]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 7(c)는 pickup이 이루어진 시간 70[ms]와 계전기 트립이 발생한 시간 109.48[ms]를 나타낸다.



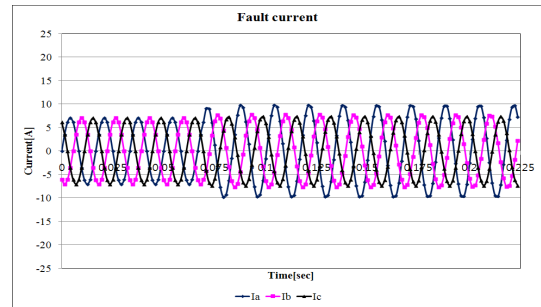
(a) 3상 단자전압 신호



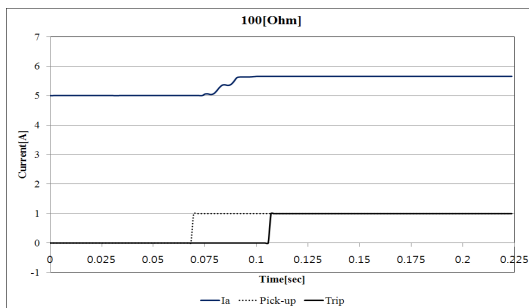
(a) 3상 단자전압 신호



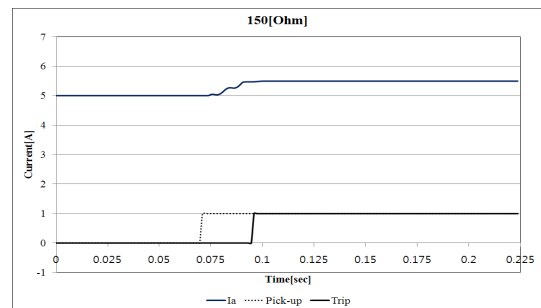
(b) 3상 고장전류 신호



(b) 3상 고장전류 신호



(c) A상 고장전류 실효치 및 트립 신호



(c) A상 고장전류 실효치 및 트립 신호

그림 7 고장저항이 100[Ω] 인 경우의 A상 지락사고
Fig. 7 A phase ground fault about 100[Ω]

그림 8은 고장저항이 150[Ω] 인 경우의 A상 지락사고 시 수집한 전압, 전류, 트립 신호를 나타낸 것이다. 그림 8(a)에서 고장발생 후 A상 전압은 143[V]로 수렴하는 것을 알 수 있고, B상 전압은 240[V]로 수렴하고, C상 전압은 177[V]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 8(b)에서 고장발생 후 A상 전류는 9.7[A]로 수렴하였고, B상 전류는 7.7[A]로 수렴하고, C상 전류는 7.4[A]로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 8(c)는 pickup이 이루어진 시간 70[ms]와 계전기 트립이 발생한 시간 96.11[ms]를 나타낸다.

그림 8 고장저항이 150[Ω] 인 경우의 A상 지락사고
Fig. 8 A phase ground fault about 150Ohm

상기 그림들에서 보여주듯이 고장저항이 증가할수록 고장 전류의 크기는 점점 감소하여 정상상태에서의 부하전류 크기와 차이가 크지 않게 된다. 반면에 발전기 단자전압은 저항 값이 매우 작을 땐 크기가 0이었다가 고장저항 값이 커짐에 따라 그 크기도 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 식 (2)에서 고장저항이 커짐에 따라 억제 전압이 작아지기 때문에 동작원리에서 설명한 것에 덧붙여서 계전기는 저저항 접지 지락일 때보다 고저항 접지 지락일 경우 더욱 민감하게 동작한다. 따라서 발전기에서는 전압 요소를 추가한 전압억제 과전류 계전기가 필수적이라고 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 발전기 내부사고 보호를 위한 다기능 IED에 들어갈 보호 요소 중 하나인 전압억제 과전류계전기에 관하여 연구하였다. 전력계통의 상고장 발생 시 후비보호기

능을 위한 과전류계전기는 발전기 고장발생 수초 후 발전기가 공급하는 단락전류의 크기는 발전기의 정격전류 정도로 감소하기 때문에 과전류 요소만으로 보호하기 어렵다. 따라서 전압이라는 요소를 추가하여 위와 같은 과전류 계전기의 문제점을 보완한 것이 전압억제 과전류 계전기의 큰 특징이다. 전압억제 과전류계전기는 전압의 감소에 따라 동작전류도 작아진다. 따라서 후비보호 과전류계전기의 설정을 잘 검토하여, 발전기의 단자전압이 감소하고 부하전류가 증가하는 것과 같은 전력계통의 예기치 못한 상태에서는 오·부동작을 하지 않도록 유의하여야 할 것이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] 박철원 외, “대형 발전기 내부사고 보호를 위한 다기능 IED 시제품 기술 개발”, 지식경제 기술혁신사업 1차년도 연차보고서, pp. 1~286, 2011. 5.

[2] 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.

[3] IEEE Power Engineering Society, “Guide for AC Generator Protection”, IEEE Std C37.102-2006 pp. 1~167, 2006. 11.

[4] IEEE Power Engineering Society, “Guide for AC Generator Ground Protection”, IEEE Std C37.101-2006 pp. 1~67, 2006. 11.

[5] General Electric Company, “GEK-100605 DGP Digital Generator Protection System”, pp. PD-1~SO-21, 1995.

[6] GE Industrial Systems, “DGP Digital Generator Protection System Instruction Manual”, pp. 1~C4, 2003.

[7] Siemens. “Siprotec Numerical Protection Relays”, Part 2, Vol. 11, pp. 1~102, 2006.

[8] ABB, “Generator protection REG670 Operator’s manual”, pp. 1~120, 2011.

[9] ABB, “Generator protection REG670 Application manual”, pp. 1~600, 2011.

[10] Yasser G. Mostafa et al., “Neural Network Based Overcurrent Voltage Controlled Protection System in Large Electrical Networks”, 2009 IEEE Bucharest pp. 1~6, 2009.

[11] David Beach et al., “Arc Flash Mitigation Through Use Of Voltage Controlled/Voltage Restrained Overcurrent Elements”, 2007. 60th Annual Conference for pp. 194~217, 2007.

[12] Del Ventruella et al., “A Second Look at Generator 51-V Relays”, IEEE Transactions on pp. 848~856, 1997.

[13] Yasser G. Mostafa et al., “Co-ordination of Overcurrent Voltage Controlled Protection in Large Electrical Networks Using Particle Swarm Optimization Technique”, 2009. ICCES 2009. International Conference on pp. 543~548, 2009.

[14] Jerry Johnson et al., “Voltage Restrained Time

Overcurrent Relay Principles, Coordination, and Dynamic Testing Considerations”, 54th Annual Conference for Protection Relay Engineers, Texas A&M University, April 3-5, 2001.

[15] 이승재 외, “보호계전기 정정수립에 관한 연구”, 최종 보고서, pp. 1~442, 2003. 6.

[16] 박철원 외, “전압 억제 과전류 계전기에 관한 연구”, 2011년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, PAP013.pdf, 2011. 7.20~22.

[17] 박철원, 반우현, “대형 발전기 보호를 위한 차세대 전력기기 개발의 개요”, 전기기기 및 에너지변환시스템부 문화 춘계학술대회 논문집, pp. 371~373, 2011.4.

[18] KEUG, “EMTP 중급자 강좌”, pp. 1~100, 2011.7.

저 자 소 개



박 철 원 (朴 哲 圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 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. 2008년~현재 전력계통보호제어연구회 학술이사, 총무이사. 대한전기학회 전력기술부문회 이사. 2012년~현재 대한전기학회 산업전기위원회 편집위원장.

Tel : 033-760-8786
 Fax : 033-760-8781
 E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr



반 우 현 (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