

수력 발전기 제어설비의 모델링과 사고 시뮬레이션

(Modeling and Fault Simulation of Hydro Generator Control System)

박철원*

(Chul-Won Park)

Abstract

In this paper, the generator control system by using PSCAD/EMTDC was modeled and several faults simulation were performed. The generator control system is composed of generator, turbine, exciter and governor. The parameters of generator control system model were obtained from field power plant. And then, the various transient phenomena through obtained several signal of developed modeling were analyzed.

Key Words : Fault simulation, Generator control system, Modeling, PSCAD/EMTDC, Transient phenomena

1. 서 론

발전소의 대형 발전기는 매우 중요하다. 고장 및 비정상적인 동작 상태에서 대형 발전기로부터 다양한 데이터를 취득, 활용할 수 있고 신뢰성 있는 보호 및 제어를 위해 디지털 발전기 보호시스템이 필요하다. 이와 같은 디지털 발전기 보호시스템은 DGPS(Digital Generator Protection System), MMPS(Multifunction Machine Protection System), DIGPS(Digital Integrated Generator Protection System)등으로 불리어지고 있다. 그런데 국내 발전소의 대형 발전기를 위한 모든 보호 장치는 외국 제품에 의해 운영되고 있다. 이에 따라 최근 수입 대체효과의 개선과 외국 기술독

립을 위해, 국내 기술을 사용하여 국제규격인 IEC 61850기반 IED(Intelligent Electronic Device)인 발전기 보호시스템이 개발되고 있다[1].

한편 발전기 보호시스템을 개발하여 성능을 평가하려면, 발전기 제어설비의 모델링, 사고 시뮬레이션 및 발전기의 동적 특성 분석 등이 선행되어야 한다.

발전기를 포함하는 전력계통의 동특성 분석 도구로 초창기에는 EMTP가 도입되었으나 최근에는 EMTP-RV, ATP, PSCAD/EMTDC, Powersim, MATLAB/SIMULINK 등이 사용되고 있다.

국내에서 진행된 관련 연구로 1995년 운용데이터를 이용한 동기발전기 포화모델링에 관한 연구가 발표되었고, 2006년 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 이용하여 전력계통 해석용 시뮬레이터 성능 향상 및 설치시험이 이루어졌다[2-3]. 2009년 일체형 원자로 REX-10를 이용하는 지역에너지시스템 보호방안 연구가 발표되었고, 2012년 MATLAB/SIMULINK를 이용한 2기 발전기 시스템의 모델링과 시뮬레이션이

* Main author : Gangneung-Wonju National University Dept. of Electrical Engineering Professor
Tel : 033-760-8786, Fax : 033-760-8781
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr
Received : 2015. 1. 21
Accepted : 2015. 2. 11

진행되었다[4-5]. 2012년 PSS/E를 이용한 시화조력 발전소 수차발전기 제어시스템의 동적 특성 해석이 이루어졌고[6], 2013년 EMTP-RV에 의한 345kV 계통 모델링 데이터를 이용한 과여자 보호계전기법이 출판되었다[7-8]. 최근 발전기 회전자용 IED 동작특성곡선과 보호알고리즘 개발에 관한 연구가 소개되었다[9].

본 논문에서는 전력계통 해석 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 발전기, 터빈, 여자기 및 조속기로 구성된 수력 발전기 제어설비를 모델링하였다. 또 선로의 불평형 사고와 발전기의 터빈 출력 저하에 따른 발전기의 역전력 사고의 시뮬레이션을 수행하였다. 발전기 제어설비 모델의 파라미터는 PSS/E의 충주 수력발전소로부터 수집되어 적용하였다. 그리고 구축된 모델링으로부터 수집된 여러 가지 신호를 통해 각종 과도현상을 분석하였다.

2. 수력 발전기 제어설비의 모델링

2.1 PSCAD/EMTDC에 의한 모델링

수력발전기 제어설비 모델링은 수차 터빈을 통하여 기계적인 토크 입력을 받으며, 여자전압 조절을 위한

여자기와 조속기를 사용하여 발전기를 제어하도록 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다[10-12]. 선정된 동기 발전기의 용량은 120MVA, 정격 RMS 상전압은 13.856kV, 정격 RMS 상전류는 2.887kA, 기준 각속도 주파수는 376.99rad/sec이다. 모델링의 총 시뮬레이션 시간은 50sec, 연산 시간간격은 104.167μsec로 설정하였다. 동기 발전기 모델의 세부 정수는 그림 1과 같다.

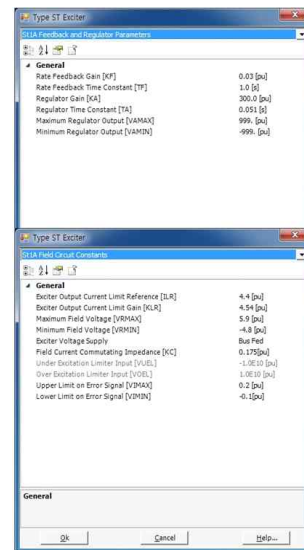


그림 2. 여자기 모델 정수
Fig. 2. Exciter model parameter

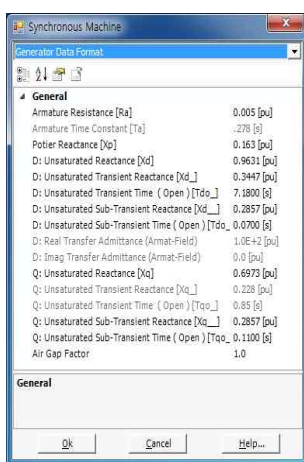


그림 1. 동기 발전기 모델 정수
Fig. 1. Synchronous generator model parameter

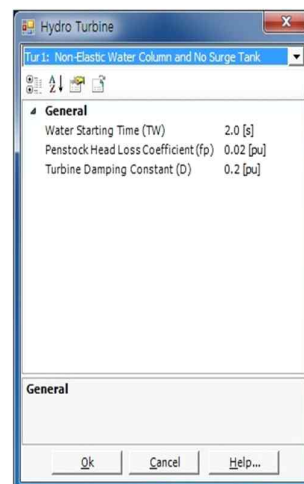


그림 3. 수차 터빈 모델 정수
Fig. 3. Water turbine model parameter

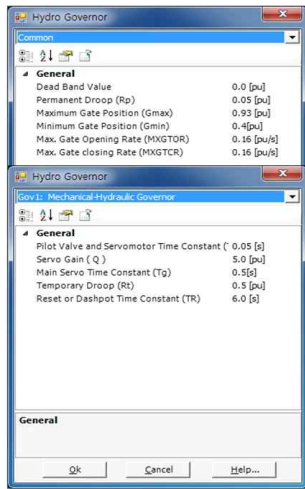


그림 4. 조속기 모델 정수
Fig. 4. Governor model parameter

3. 수력 발전기 사고 시뮬레이션

3.1 역상 전류 사고 시뮬레이션

발전기에서 불평형 3상 전류를 유발하는 가장 대표적인 원인은 송전선의 연가부족에 의한 선로정수 불평형, 불평형 부하, 불평형 고장 및 상의 개방 등이 있다.

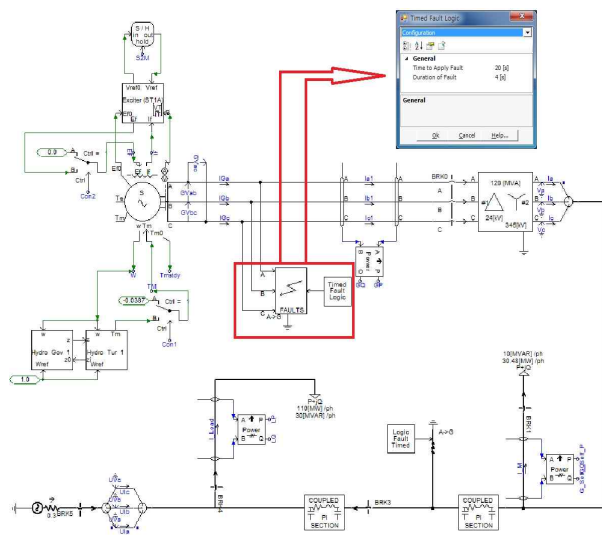


그림 5. 역상 사고 시뮬레이션
Fig. 5. Fault simulation of negative sequence current

발전기 역상 전류 사고 시뮬레이션은 그림 5와 같다. 본 연구에서는 발전기 역상 전류를 유발하는 불평형 고장을 A상 지락, B상 지락, C상 지락, A상-B상 단락, B상-C상 단락, C상-A상 단락으로 분류하여 시뮬레이션을 수행하였다. 여기에서는 발전기 단자 A상 지락 사고만을 논하였다.

시뮬레이션은 발전기 단자에서 A상 지락사고가 20sec에서 발생하여 4sec 동안 지속되었다고 가정하였다. 이때 3상 고장전류는 그림 6과 같다. 그림 6과 같이 정상상태에서는 정격 RMS 상전류 2.887kA의 $\sqrt{2}$ 배인 최대치가 4.080kA인 순시치 3상 평형전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 그림 6으로부터 20sec에서 A상 전류가 상승하여 3상 불평형이 되는 것을 알 수 있다.

대칭좌표법에 의해 계산된 역상분 전류는 그림 7과 같다. 그림 7 (a)와 같이 A상 지락사고의 경우, CT 2차측 역상분 전류는 고장발생시각 20sec에서부터 서서히 증가하고 있으며, 그림 7 (b)와 같이 AB 단락사고의 경우, CT 2차측 역상분 전류는 고장발생시각 20sec에서부터 급격하게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 계통의 불평형은 역상 전류를 유발하고 이 역상 전류는 발전기 회전자 표면과 슬롯의 웨지 및 여자권선에 정격주파수의 2배가 되는 전류를 흐르게 함으로서 회전자를 급격하게 과열시켜 회전자의 손상을 가져올 수 있다.

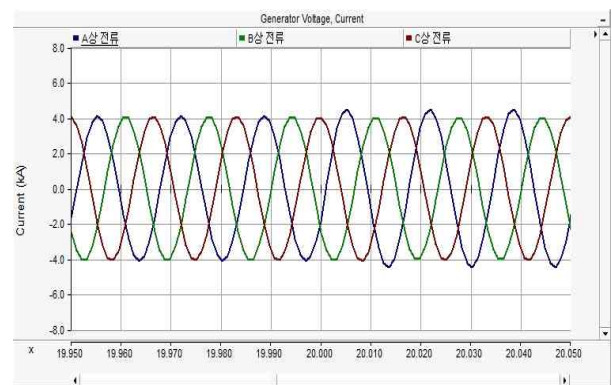
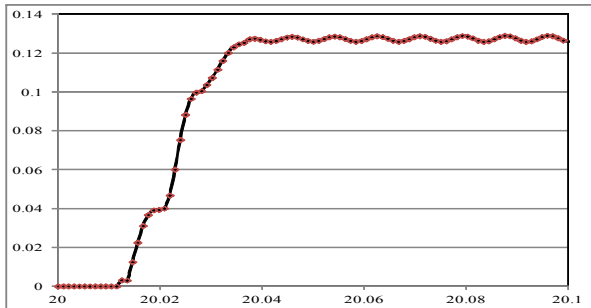
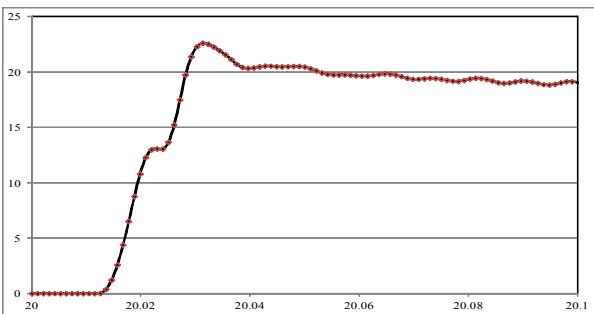


그림 6. A상 지락 고장 전류
Fig. 6. Current signal of A phase ground fault



(a) A상 지락 고장
(a) A phase ground fault



(b) AB상 단락 고장
(a) AB phase short fault

그림 7. 역상분 전류
Fig. 7. Negative sequence current

3.2 역전력 사고 시뮬레이션

발전기가 동기 전동기로 운전될 때 원동기의 손상을 보호해야 한다. 발전기 역전력 사고 시뮬레이션은 그림 8과 같다. 역전력 사고 시뮬레이션은 20sec에서 터빈 입력토크를 정상 출력시 1P.U에서 -0.05P.U로 변동 시켜서 수행하였다.

발전기의 여러 가지 신호는 그림 9와 같다. 그림 9로부터 20sec에서, 기계적인 입력 토크는 정상상태 1P.U에서 -0.05P.U로 변경되었음을 알 수 있고, 각속도는 377rad/sec의 정상속도에서 현저하게 감소되고 결국 0이 되고 있음을 알 수 있다. 고장발생후 정상상태이던 계자전압은 상승하여 최고 4.4P.U까지 상승하다가 감소하게 되었고, 계자전류는 진동하면서 상승하고 있음을 알 수 있다. 또 정상상태에서 정격 RMS 상전압 13.856kV의 $\sqrt{3}$ 배인 24kV인 발전기 단자의 선간전압은 고장발생후 급격하게 감소하고 발전기 전류도 감

소함에 따라 출력들이 현저하게 감소됨을 알 수 있다. 특히, 발전기 유효출력은 정격으로부터 감소하기 시작하여 -5MW 정도의 역전력이 발생함을 확인할 수 있다. 이 모터링은 바람직하지 않은 상태로서 전력계통으로부터 분리하여 원동기에 입력이 차단되지 않으면 기기를 파손할 수 있는 높은 속도가 될 수 있음이 알 수 있다.

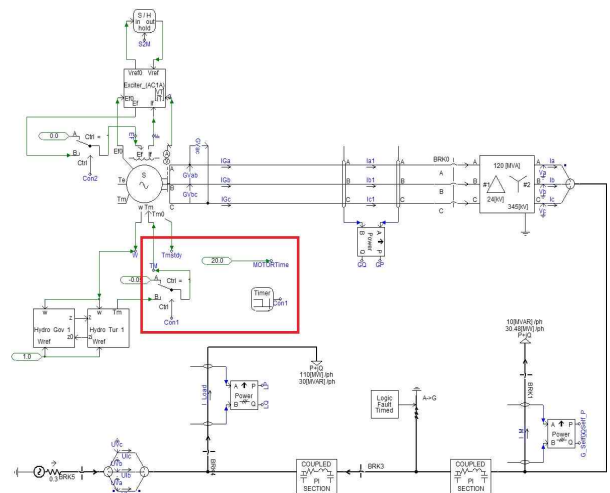
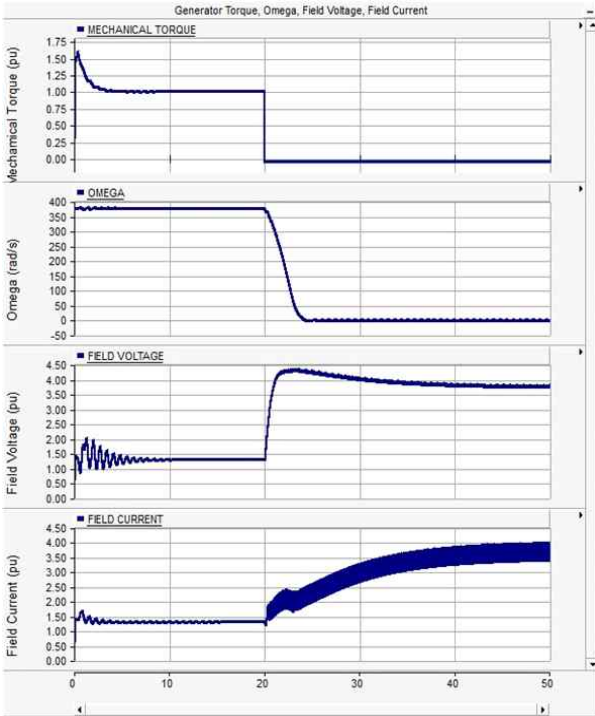


그림 8. 역전력 사고 시뮬레이션
Fig. 8. Fault simulation of reverse power

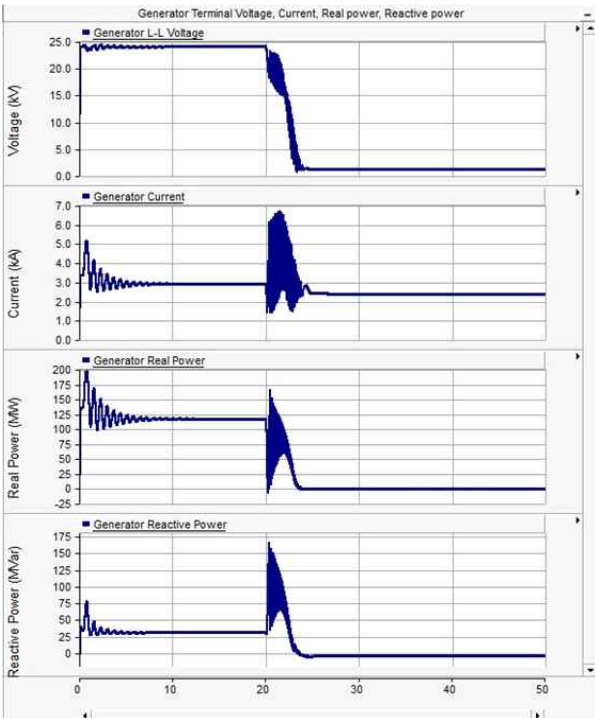
4. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수력 발전기 제어설비를 모델링하였다. 발전기는 동기 발전기, 여자기는 ST1A, 수차 터빈은 TUR1, 조속기는 GOV1으로 모델링하였다. 또 발전기 단자의 불평형 사고 시뮬레이션을 통해 불평형사고가 발생할 경우, 역상분 전류가 증가하고 회전자를 과열시켜 손상을 가져올 수 있음을 알 수 있었다. 끝으로 발전기의 역전력 사고 시뮬레이션을 통해 바람직하지 않는 모터링 현상을 확인할 수 있었다.

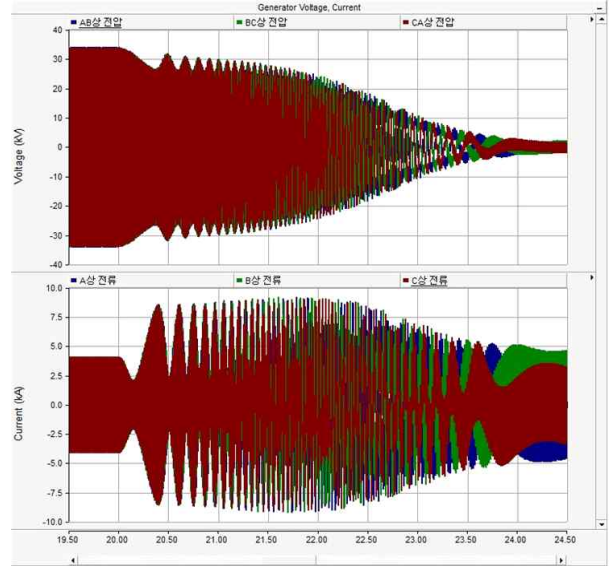
향후 본 사고 시뮬레이션 자료들은 데이터를 보호 계전기 시험기준인 COMTRADE(IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange)로 변환하여 수력 발전기용 감중보호계전기의 개발 시험에 사용될 예정이다.



(a) 기계적 토크, 각속도, 계자전압, 계자전류
(a) Mechanical torque, omega, field voltage, and field current



(b) 전압, 전류, 유효전력, 무효전력
(b) Voltage, current, real power, and reactive power



(c) 선간 전압, 상 전류, 유효전력, 무효전력
(c) Voltage, current, real power, and reactive power

그림 9. 여러 가지 신호
Fig. 9. Several signals

감사의 글

본 연구는 2014년도 강릉원주대학교 교수연구년 연구 지원과 2014년도 한국수력원자력(주)의 협력연구개발 사업 연구비를 지원받아 수행한 연구 과제입니다.

References

- [1] Chul-Won Park, Tae-Pung An et al., "A Development of IEC61850 based for Generator Protection Relay System of Small Hydro Generator in Bosung River", KHNP Research Proposal, pp. 1~39, 2014. 7.
- [2] Kyung-Yul Kim, Ill-Do Yoo, Jang-Cheol Seo, Seung-Il Moon, "A Study on Saturation Modeling of Synchronous Generator using Operating Data", KIEE PES Annual Conference, pp. 106~109, 1995. 11.
- [3] Y.S. Cho, S.W. Park, C.K. Lee, U.H. Lee, T.K. Kim, J.H. Shin, S.T. C, J.H. Choi, "An Implementation of Generator Protective Relay for Real Time Digital Simulator", Trans. KIEE, Vol. 56, No. 2, pp. 240~247, 2007. 2.
- [4] Jong-Chan Jeong, Kwang-Ho Kim, Goon-Cherl Park, "A Study on Protection Method for Community Energy System(CES) using REX-10", KIEE Summer Conference, pp. 466~467, 2009. 7.
- [5] Sang-Ji An, Min-Seok Kim, Dong-Wook Kim, Chul-Won Park, "Modeling and Fault Simulation of Two Generator System", KIEE Industrial Electrical Annual Conference, pp.

- 36~38, 2012. 10.
- [6] Sang-Ji An, Yu-Hyeon Ban, Chul-Won Park, "Dynamic Characteristic Analysis of Water-Turbine Generator Control System", Trans. KIEE, Vol. 61P, No. 4, pp. 180~185, 2012. 12.
- [7] Yoon Sang Kim, Chul-Hwan Kim, Woo-Hyeon Ban, Chul-Won Park, "A Comparative Study on Frequency Estimation Methods", Trans. JEET, Vol. 8, No. 1, pp. 70~79, 2013. 1.
- [8] C.W. Park, W.H. Ban, Y.S. Kim, "The study of over-excitation protection algorithm and time overcurrent with voltage restraint algorithm using 345kV power system modeling data of South Korea", 2012 DPSP Conference, 2012. 4.
- [9] C.W. Park, Y.Y. Park, Y.M. Lee, "A Study on Protection Algorithm and Characteristic Curve of IED For Generator Rotor", The 4th International Symposium on the Fusion science and Technologies(ISFT) 2015, RUS, Thailand, EE22.pdf, 2015. 1.
- [10] Chul-Won Park et al., "Development of Prototype Multifunction IED for Internal Fault Protection of Large Generator", Ministry of Knowledge Economy, Technology Innovation Project, Final Report, pp. 1~217, 2013. 5.
- [11] C.W. Park, Y.T. Oh, "Fault Simulation and Analysis of Generator", Trans. KIEE, Vol. 63P, No. 3, pp. 151~158, 2013. 9.
- [12] Manitoba HVDC Research Centre Inc., "EMTDC Transient Analysis For PSCAD Power System Simulation", pp. 97~113, 2004.

◇ 저자소개 ◇



박철원 (朴哲圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989~1993년 금성산전연구소 주임연구원. 1993~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원. 1993~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사. 1997~2007년 강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수. 2007년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 2011년~현재 대한전기학회 전력기술부문회 이사. 2012~2014년 대한전기학회 논문지 P권 편집위원장. 현재 대한전기학회 평의원. 2010년 대한전기학회 학술상 수상. 2013년 전력계통보호제어연구회 R&D 대상 수상.