

# 소수력 발전시스템을 위한 IED의 정정치에 관한 연구

## A Study on Setting of IED for Small Hydro Generation System

안 태 풍\* · 박 철 원†  
 (Tae-Pung Ahn · Chul-Won Park)

**Abstract** - In order to advance and improve the performance of domestic aged power plants, IEDs have been developed for power generation systems. For smooth installation and operation of the protection relays, a detail settings study of IED is required. This paper deals with an analysis based on PSCAD and setting investigation of IED for loss of field, reverse power protection in Small Hydro Generation System.

**Key Words** : IED, Loss of field, PSCAD, Reverse power, Setting, Small hydro generation system

### 1. 서 론

에너지자원이 절대적으로 부족하기 때문에 국내에서 필요한 에너지의 97% 이상을 수입해야하는 우리나라는 소수력 발전(Small Hydro Generation)을 개발, 운영해야 한다. 소수력 에너지는 대용량 수력발전과 원리측면에서 큰 차이가 없으나 국지적인 지역조건과 조화를 이루는 규모가 작고 기술적으로 단순한 수력에너지이다. 소수력 발전은 대체에너지개발 및 이용보급촉진법시행세칙에서 시설용량 3천kW미만으로 정의되었으나, 2003년 관련법이 개정되어 시설용량 1만kW 이하로 정의하고 있다[1, 2]. 전력계통을 운영할 때 발생하는 고장이나 비정상적인 동작 상태에 대하여 발전기를 보호하기 위해 디지털 발전기보호 제어반이 필요하다. 그러나 국내 발전소의 발전기를 위한 모든 보호장치와 IED(Intelligent Electronic Device)는 대부분 외국산 제품에 의해 설치, 운영되고 있다. 최근 외국으로부터 기술자립과 수입 대체 효과의 향상을 위해 국내 기술을 사용한 디지털 발전기 IED가 개발되어 국산제품의 보급이 현실화되고 있다[3-8].

한편, 보호를 위한 정정치에 관한 초창기 연구로서, 한전 보호계전기를 정정하는 근거인 정정치집은 1982년도에 최초로 제정된 이후 1990년도에 개정되어 적용되었다. 하지만 디지털 보호 계전기 및 신기술 전력기술이 도입되어 개정당시의 계통조건과 보호장치가 많이 달라졌다[9]. 이에 원활한 보호계전기의 설치 및 운영을 위해 자세한 계전기의 정정이 요구되고 있다[10]. 최근 국가 전력망의 신뢰도개선을 위한 발전기 보호장치 설치 및 운영기준 개발을 통해 발전기의 보호협조, 정정, 유지보수 등에 관하여 연구 중에

있다[11-13]. 또한, 발전기 보호용 IEC 61850기반 IED의 국산화가 이루어져, 정정 및 현장시험을 거쳐서 현재 000 수력발전소에서 실 계통 병렬운전을 통해 실증시험 중에 있다[14].

이에 본 논문은 국산화된 IED의 정정 및 현장시험 과정에서 이루어진 일부의 내용으로서, 전력계통해석 프로그램인 PSCAD를 사용하여 000 소수력 발전시스템 모델링을 수행하고, 계자상실 고장과 역전력 고장 시뮬레이션을 통하여 각 IED의 정정치를 기술, 산정하고자 한다.

### 2. PSCAD에 의한 시뮬레이션과 IED의 정정

#### 2.1 PSCAD에 의한 계통모델링

본 논문에서는 000 소수력 발전시스템을 대상으로 전력계

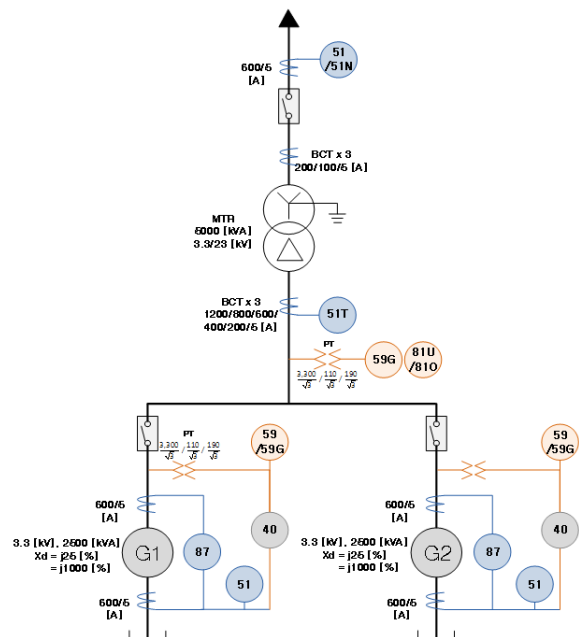


그림 1 000 수력 보호설비 계통도  
 Fig. 1 System diagram of 000 hydro protection facilities

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University, Korea

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

\* Lab. of Power & Electronic, ENTEC Electric & Electronics, Korea

접수일자 : 2017년 2월 1일

수정일자 : 2017년 2월 21일

최종완료 : 2017년 2월 23일

통해석 프로그램인 PSCAD를 사용하여 계통모델링을 수행하였다. 000 수력 보호설비 정정 검토서 및 IEEE Std C37.102를 참고하여 파라미터가 선정되었다. 그림 1은 000 수력 보호설비 계통도를 나타낸다. 이 000 수력 1호기, 2호기의 발전기 용량은 2.5[MVA], 선간전압은 3.3[kV], 전류는 0.437[kA], CT비는 600[A]/5[A], PT비는 3300[V]/110[V]이다[14].

2.1.1 발전기시스템과 계통 모델링

PSCAD를 이용하여 000 수력발전기와 인근 전력계통을 모델링하였다. 그림 2는 PSCAD를 이용한 전체 계통 모델링을 나타낸다. 이 계통은 5[MVA] Δ-Y 승압변압기를 이용하여 선간전압 3.3[kV]에서 23[kV]로 승압하고 ACSR95mm<sup>2</sup>, 18.57 km의 선로, 20[MVA] 00 변전소, 100km 장거리 선로 및 100[MVA] 무한모션으로 구성하였다[8, 14].

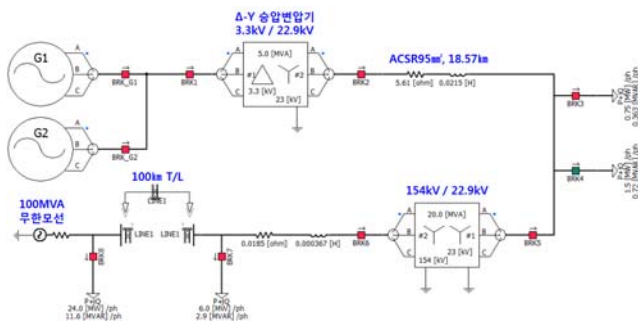


그림 2 계통 모델링  
Fig. 2 System modeling

2.2 시뮬레이션과 IED의 정정

2.2.1 정상상태

그림 3은 PSCAD를 이용한 여러 가지 신호의 시뮬레이션 결과 파형을 나타내고, 표 1은 시뮬레이션의 측정값과 결과를 나타낸다. 그림 3과 표 1로부터 000 수력 1, 2호기 가동시 정상상태의 결과, 이론값과 고장 모의 측정값이 유사한 것을 알 수 있다.

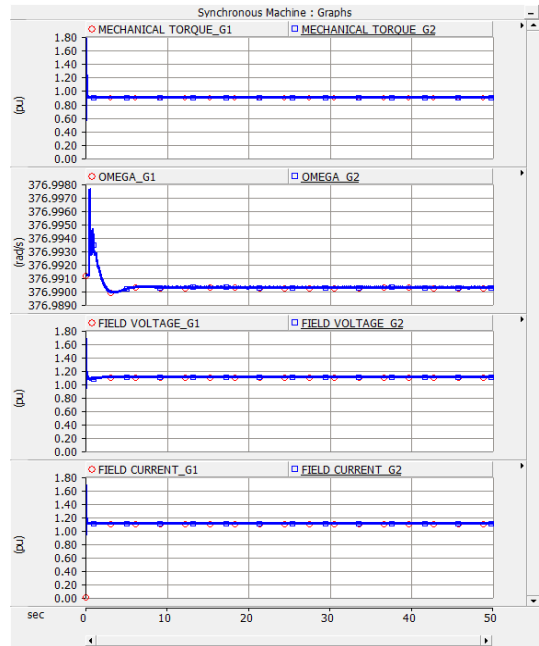
2.2.2 계자상실 고장과 정정치 계산

계자상실 모델링은 여자가 발전기에 공급하는 계자전압 (Ef)을 0이 되도록 권선의 전원 회로를 개방하여 여자 입력을 완전히 상실시켜 계자상실 고장을 모의하였다. 계자상실

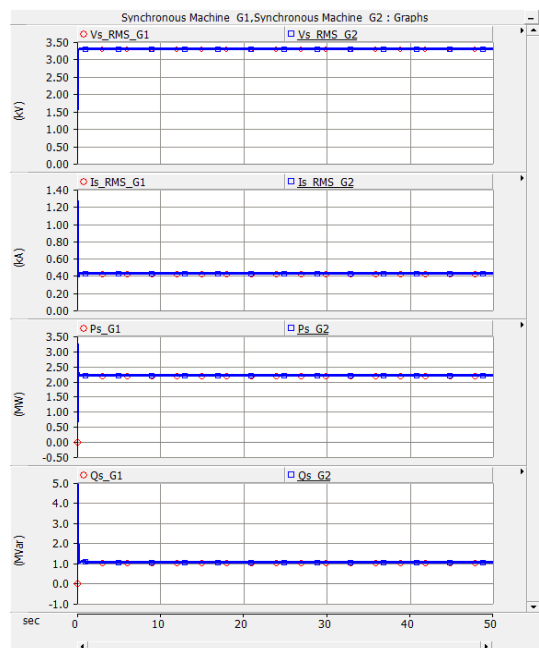
표 1 측정값과 결과

Table 1 Result of measuring values

구분	기준	측정값	결과
기계적인 토크[pu]	역률 0.9	0.90	양호
각속도 [rad/s]	60 Hz 기준 2πf	376.99	양호
계자전압 [pu]	-	1.106	-
계자전류 [pu]	-	1.106	-
선간전압 [kV]	정격 3.3 kV	3.296	양호
전류 [kA]	정격 0.437 kA	0.427	양호
유효전력 [MW]	역률 0.9 기준 2.25 MW	2.20	양호
무효전력 [MVar]	역률 0.9 기준 1.089 Mvar	1.05	양호



(a) 토크, 각속도, 계자전압, 계자전류



(b) 선간전압, 전류, 유효전력, 무효전력

그림 3 시뮬레이션 결과 파형

Fig. 3 Simulation result signals

고장은 그림 4와 같이 Con2에 사고시각을 입력하면 회로를 통해 계자전압에 0이 입력되어 계자가 상실되는 현상을 발생시켰다.

그림 5는 000 수력 1, 2호기 가동시 1호기의 계자상실 고장 시뮬레이션의 결과를 나타낸다. 본 논문에서는 10초에 계자를 상실하도록 모의하였다. 시뮬레이션 결과, 기계적인 토크는 1, 2호기 모두 정상상태와 같은 상태로 유지되었으며, 각속도는 사고 직후 1호기는 약간 상승하였다가 정상상태를

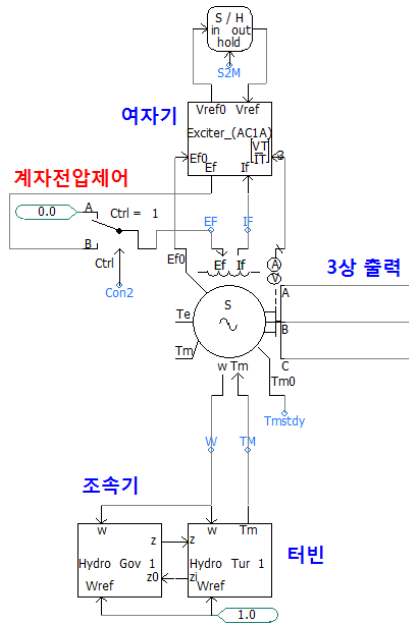
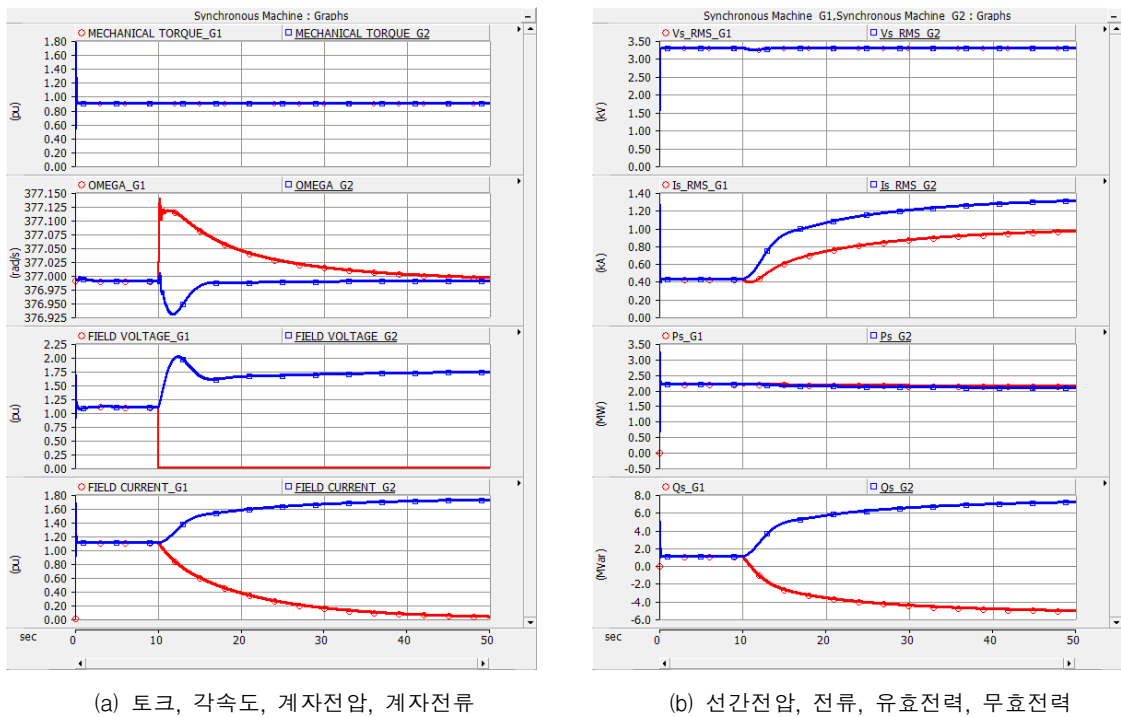


그림 4 계자상실 모델링  
Fig. 4 Modeling of loss of field



(a) 토크, 각속도, 계자전압, 계자전류

(b) 선간전압, 전류, 유효전력, 무효전력

그림 5 계자상실 시뮬레이션 결과 파형  
Fig. 5 Simulation result signals of loss of field

유지하려는 형태를 보여주고 있으며, 2호기는 미세하게 감소하였다가 5초 이내에 정상상태를 되찾았다. 1호기는 계자를 완전히 상실하여 계자전압이 0이 되었으며, 2호기는 약 60% 상승하였다. 1호기의 계자전류는 점차 감소하면서 0으로 수렴하고 있으며, 2호기의 계자전류는 60% 초과하여 계속 상승하였다. 선간전압은 1, 2호기 모두 미세하게 감소하였다가 정상상태를 유지하였다. 1호기의 전류는 0.96[kA]를 초과하여

계속 상승하였고, 2호기의 전류는 1.3[kA]를 초과하였다. 유효전력은 1, 2호기 모두 정상상태보다 약간 감소하였으며, 1호기의 무효전력이 계자상실 순간부터 감소하여 2호기 및 전력계통으로부터 무효전력을 흡수하는 형태의 신호 변화를 보여주고 있음 이는 동기발전기(1호기)가 유도발전기 형태로 운전되는 문제점을 보여주고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 계자상실(LOF : Loss of field) IED의 동작 특성

을 나타낸다. 그림 6으로부터 ① 정상상태(사고 전 상태)에서 머무르던 R-X 궤적이 계자를 상실하자 ② ~ ③을 거쳐 계자상실 보호영역 Zone에 진입하는 것을 확인할 수 있다.

000 수력 1호기 계자상실 IED의 정정값 계산은 아래와 같이 IEEE Std C37.102-2006에 근거하여 Negative Offset Mho 방법을 사용하였다[12].

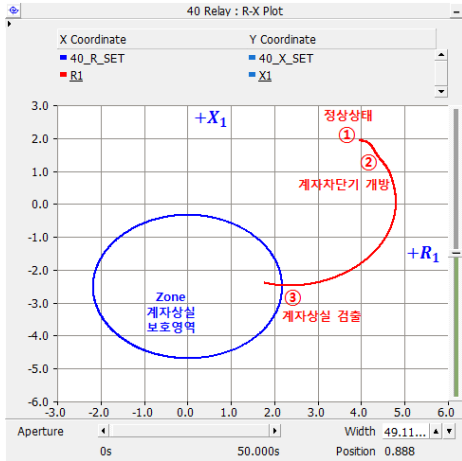


그림 6 계자상실 IED의 R-X 특성  
Fig. 6 R-X characteristic of LOF IED

$$Z_{b(sec)} = \frac{base\ kV^2}{base\ MVA} = \frac{3.3^2}{2.5} = 4.356\ \Omega$$

$$X'_{d(sec)} = X'_d \times Z_{b(sec)} = 0.15 \times 4.356 = 0.6534\ \Omega$$

$$X_{d(sec)} = X_d \times Z_{b(sec)} = 0.25 \times 4.356 = 1.089\ \Omega$$

$$Offset = \frac{X'_{d(sec)}}{2} = \frac{0.6534}{2} = 0.3267$$

$$Center1 = \frac{Z_{b(sec)} + X'_{d(sec)}}{2} = \frac{4.356 + 0.6534}{2} = 2.5047\ \Omega$$

$$Radius1 = \frac{Z_{b(sec)}}{2} = \frac{4.356}{2} = 2.178\ \Omega$$

$$Center2 = \frac{X_{d(sec)} + X'_{d(sec)}}{2} = \frac{1.089 + 0.6534}{2} = 0.8712\ \Omega$$

$$Radius2 = \frac{X_{d(sec)}}{2} = \frac{1.089}{2} = 0.5445\ \Omega$$

따라서 정정값은  $Center1 = 2.5047[\Omega]$ ,  $Radius1 = 2.178[\Omega]$  으로 보호영역 Zone을 설정하였다.

2.2.3 역전력 고장과 정정치 계산

역전력(reverse power) 고장 모델링은 터빈이 발전기에 공급하는 토크(Tm)를 0이 되도록 기계적인 에너지 입력을 완전히 상실시켜 모의하였다. 역전력 고장은 그림 7과 같이 Con1에 사고시각을 입력하면 회로를 통해 토크에 0이 입력되어 기계적인 입력이 상실되는 현상을 발생시켰다.

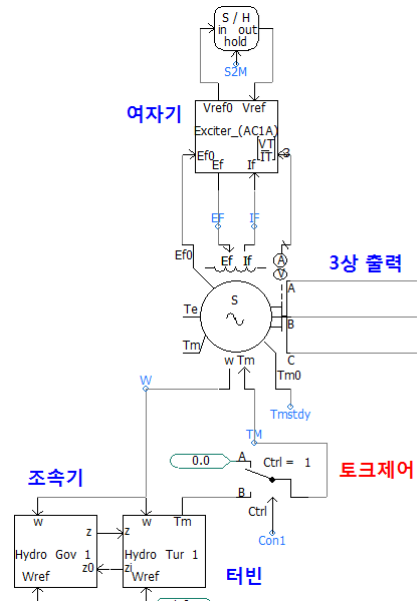


그림 7 역전력 모델링  
Fig. 7 Modeling of reverse power

그림 8은 000 수력 1, 2호기 가동시 1호기의 역전력 고장 시뮬레이션의 결과를 나타낸다. 본 논문에서는 10초에 기계적인 입력을 상실하도록 모의하였다. 시뮬레이션 결과, 1호기의 경우 토크 입력을 완전히 상실하여 0이 되었으며 2호기는 정상상태를 유지하였다. 1호기의 각속도는 사고 직후 떨림이 있었으나 2호기와 마찬가지로 곧바로 정상상태를 유지하였다. 계자전압은 1호기는 약 7%, 2호기는 약 2% 상승하였고, 계자전류도 약 7%, 2%씩 각각 상승하였다. 선간전압은 1, 2호기 모두 미세하게 감소하였다가 정상상태를 유지하였다. 1호기의 전류는 약 26% 감소하였고, 2호기의 전류는 약 3% 증가하였다. 1호기의 유효전력은 약 -0.05[MW]로 역전력이 발생하였음을 확인하였고, 무효전력은 1호기의 경우 약 68%, 2호기의 경우 약 15% 증가하였다.

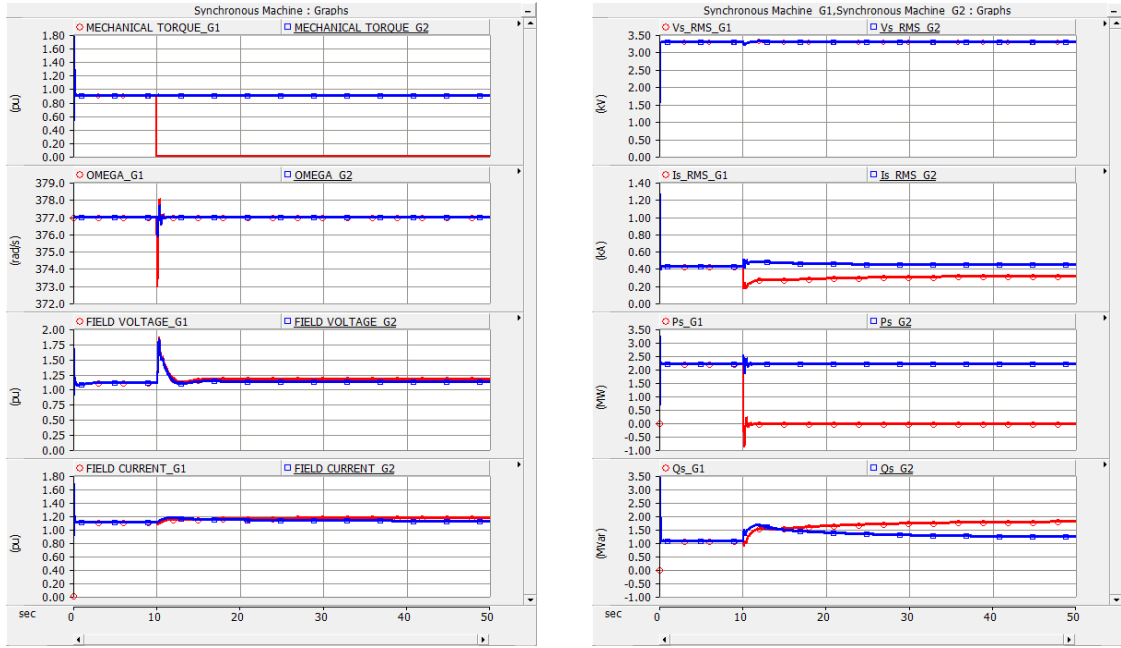
그림 9는 역전력 IED의 동작 특성을 나타낸다. 그림 9로부터 ① 정상상태(사고 전 상태)에서 머무르던 P-Q 궤적이 기계적인 입력을 상실하자 ② ~ ⑦을 거쳐 TRIP 구간에 해당하는 좌측에 머무르는 것을 확인할 수 있다.

000 수력 1호기 역전력 계전기의 정정값 계산은 IEEE Std C37.102-2006에 근거하여 명판에 명기된 정격 유효전력 값의 0.5% 값으로 하였다[12].

$$P = 2.5\ MVA \times 0.9\ p.f = 2.25\ MW$$

$$2.25\ MW \times 0.5\ \% = 0.01125\ MW$$

따라서 정정값은 0.01125[MW]로 설정하였다. 본 논문에서 제시한 정정기법은 국산화 시킨 발전소용 IED에 적용하여, 2016년도 12월 현재, 한수원 000 발전소 보호반에 병렬로 설치하여 운전 중에 있다[14].



(a) 토크, 각속도, 계자전압, 계자전류

(b) 선간전압, 전류, 유효전력, 무효전력

그림 8 역전력 시뮬레이션 결과 파형

Fig. 8 Simulation result signals of reverse power

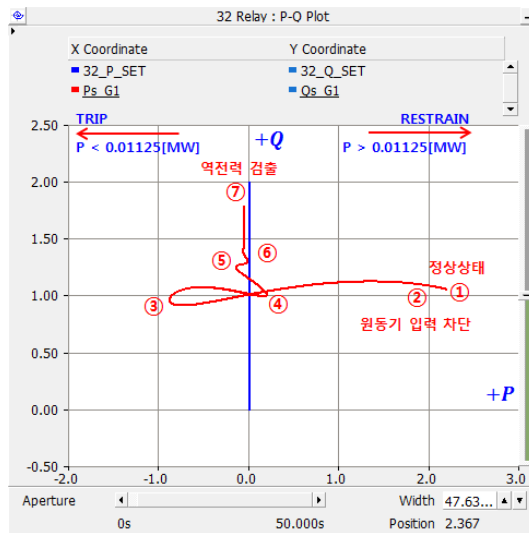


그림 9 역전력 IED의 P-Q 특성

Fig. 9 P-Q characteristic of reverse power IED

### 3. 결론

최근 노후된 발전소의 선진화와 성능 개선을 위하여 소수력 발전시스템을 위한 IED이 국산화되었다. 이 개발된 IED를 설치하여 잘 운영하기 위해서는 모델링과 시뮬레이션을 통한 정정치의 연산이 필요하다.

본 논문에서는 000 소수력 발전소 계통을 PSCAD를 이용하여 모델링하고 고장 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 발전기용 보호로 주요한 계자상실 IED, 역전력 IED의 정정치를

시뮬레이션을 통하여 산정, 검증함으로써 국내 발전소 IED보호계전기의 원활한 운용을 기하였다. 본 논문의 정정기법은 000 발전소용 IED에 적용하여, 병렬 운전 중에 있다.

### Acknowledgement

This work was supported by KIEE(2015), which is funded by ENTEC Co., Ltd.).

References

[1] G.B. Lee, Y.G. Kim, D.H. Paik, E.W. Lee, "Overview and Trend of Small Hydropower Development in Korea", *KIEE Summer Conference*, pp. 762~764, 2003. 7.

[2] H.G. Kim, Y.K. Kim, Y.J. Hong, S.M. Jang, "A case study of Small Hydropower facility design in overseas", *KIEE Summer Conference*, pp. 11~12, 2006. 7.

[3] IEEE Std C37.101-2006, "IEEE Guide for AC Generator Ground Protection", pp. 1~79, 2006.

[4] G.C. Park et al., "Study on Small-Scale Reactor based Multi-purpose Regional Energy System", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2 Year Report, pp. 1~21, 2007. 2.

[5] GE Industrial Systems, "G60 Generator Protection System", UR series Instruction Manual, GE Multlin, pp. 1~684, 2010.

[6] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE tutorial on the protection of synchronous generators", pp. 1~78, 2011.

[7] Chul-Won Park, et al., "Development of Multi-function IED for Internal Fault Protection of Large Generator", Knowledge Economy, Technological Innovation Projects, Final Report, pp. 1~217, 2013. 5.

[8] C.W. Park, K.M. Lee, S.C. Choi, B.J. Min, T.P. Ahn, et. al., "A Study on Development of Generator Protection IED", *KIEE Hydro & Pumped Storage Research Group Spring Conference*, pp. 65~67, 2016. 5. 27.

[9] S.J. Lee, et al., "A Study on Protection Relay Setting criteria established", Final Report, pp. 1~453, 2003. 6.

[10] KEPCO, "Protection Relay Procedure and Standard", pp. 1~272, 2004. 3.

[11] 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.

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

[13] GE Digital Energy, "G60 Generator Protection System", Introduction Manual, GE Multlin, pp. 1~616, 2015.

[14] T.P. Ahn, C.W. Park et. al, "Localization of A class protection relay for hydro power generator based on IEC 61850", Final Report, pp. 1~169, 2016. 12.

저 자 소 개



안 태 풍 (安 泰 豊)

1964년 9월 19일생. 1992년 성균관대학교 전자공학과 졸업, 1992~1996년 일진전기공업(주) 기술연구소, 1996년~현재 인택전기전자(주) 전력전자연구소장 및 전무, 2009년 스마트그리드로드맵 위원, 스마트그리드 전력기자재 EMC 국제표준전문위원회 위원, 2010년~현재 사단법인 전력계통보호제어연구회 이사, 2010년~현재 스마트 배전시스템 개발 자문위원, 2010년~현재 직류 표준화 연구회 위원, 2012년~IEC61850 배전계통 표준 위원회 위원, 2012년 대한전기학회 차세대 전력기술인상 수상, 현재 대한전기학회 전력기술부문회 이사.

Lab : 031-290-8400  
 Fax : 031-290-8401~2  
 E-mail : tpan@entecene.co.kr



박 철 원 (朴 哲 圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박), 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~현재 사단법인 전력계통보호제어연구회 이사, 2011년~현재 대한전기학회 전력기술부문회 이사, 2012년~2014년 대한전기학회 논문지 P권 편집위원장, 2015년~현재 대한전기학회 평의원, 현재 한국조명전기설비학회 논문지 편집위원, 전력기술부문회 학술위원장, 전력계통 보호 및 자동화 연구회 위원장.

Lab : 033-760-8786, 8796  
 Fax : 033-760-8781  
 E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr