

## Over-Excitation Protection Relaying using the 345kV Power System Modeling Data

박철원<sup>†</sup> · 반우현\*  
(Chul-Won Park · Yu-Hyeon Ban)

**Abstract** - A large AC generator is an important component of the power system. It is a need for research of AC generator protection relay for the next-generation ECMS and an efficient operation of protection control system. However, most of protection and control systems 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, over-excitation protection relaying is one of the protective factors in generator protection IED was presented. The cause and protection principles were dealt and, DFT-based gain compensation algorithm was adopted for the frequency measurement. The Republic of Korea 345kV modeling data by EMTP-RV was used for performance evaluation.

**Key Words** : DFT, ECMS, EMTP-RV, Gain Compensation, IED, Over-Excitation, 345kV Power System

### 1. 서론

최근 반도체 기술의 비약적 발전과 보호 알고리즘의 지속적인 개발로 보호계전기의 디지털화가 가속되고 있다. 더불어 디지털계전기는 IEC61850 국제규격 통신기반으로 별도의 중앙감시 없이 제어 및 감시기능을 수행할 수 있는 IED(Intelligent Electronic Device)로 진화하고 있다[1,6].

대용량 교류발전기는 전력계통의 중요한 요소이다. 국내 발전소를 위한 보호제어시스템은, 시장이 협소하고 높은 신뢰성과 기술력 등이 요구되기 때문에 전량 완성인도방식(turn-key)으로 도입되어 운영되고 있다. 이와 같은 수입 제품의 한계성으로 인해 계전 설비의 보호 기법에 대하여 자세히 파악하기 어렵고 정확한 이해 부족으로 인하여 최적 운용에 어려움이 있다[2,3].

한편 해외 IEEE PES에서는 1995년 발전소의 핵심인 교류 발전기 보호를 위해 종합적인 지도서(tutorial course)를 발표하였고[9], 2006년에는 교류 발전기 보호에 관한 표준(standards)을 제안하였다[4,8]. 또한, 미국의 GE사는 1995년 디지털형 발전기 보호제어시스템을 개발하였고[6], 이를 개선하여 2003년 DGPS(digital generator protection system)를 출시하였다[5]. 독일의 SIMENS사도 2006년도에 다기능(multi-function) 발전기 보호 IED를 개발하였다[11]. 이외 Beckwith사, SEL사, ABB사 등에서 Comprehensive Generator Relay나 Digital Integrated Generator Protection Relay 이름으로 판매 중에 있다.

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

\* 준회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 석사과정  
접수일자 : 2011년 8월 23일  
최종완료 : 2011년 9월 5일

과여자 보호에 대한 해외의 연구 동향으로는 1990년대와 2000년대 초반, 발전기 과여자 상태와 과여자 리미터(limiter)에 대한 논문이 발표되었고[13,14], 근래에 들어서는 과여자 리미터와 발전기 제어와의 협조[10], 과여자 계전기의 정정값에 대해 연구가 진행되고 있다[12].

근래 국내에서도 지능형 전력망(smart grid)과 전력설비 감시보호시스템(ECMS:Electrical Equipment Control & Monitoring System)의 선진화 필요성이 제기되었다. 이에 차세대 전력기기의 원천기술 개발을 위해 대형 발전기 내부 사고 보호용 다기능 IED 개발과 발전기 보호용 각종보호계전기의 국산화에 대한 관심이 증대되고 있다.

본 논문에서는 발전기 보호용 IED에 들어갈 보호 요소 중의 하나인 과여자 보호(over-excitation)에 대해 연구하였다.

먼저 과여자의 주요 원인과 기본적인 보호 원리를 살펴보았다. 과여자 보호를 위해서는 주파수를 측정해야 하는데 이를 위해 기존의 DFT의 단점을 보완한 이득 보상 기법을 적용하였다. 또한, 국내 발전소에 사용 중인 과여자 계전기의 반한시 특성 방정식과 정정값을 고찰하였다. 마지막으로 제안된 과여자 보호알고리즘의 특성시험을 위해 EMTP-RV로 모델링을 수행한 국내 345kV 계통 데이터를 활용하였다.

### 2. 과여자 보호계전기법

#### 2.1 과여자의 개요

자기회로 내에서 자속은 전압과 비례하고 주파수에 반비례한다. 따라서 자속을 Volts/Hertz로 표시할 수 있다. 전압이 증가하거나 주파수가 감소하면 과여자 상태로 된다. 이로 인해 과도한 자속이 철심을 포화시키고 주변으로 누설되어 철심과 주변의 도체에 심한 와류손을 일으킨다.

과여자의 주요 원인은 다음과 같다.

- 발전기 기동, 정지 시 전압이 주파수와 비례하여 감소하지 않는 경우
- 자동전압조정기의 고장
- 변성기로부터 입력상실
- 계통조건에 의한 부하의 갑작스런 차단
- 무부하 장거리송전선의 선로충전전류

**2.2 과여자의 보호이론**

발전기 내부의 자속밀도( $B_m$ )에 의한 유도 전압은 식(1), (2)로 표현할 수 있다[2,6].

$$\Psi = \frac{E}{4.44fn} [V/Hz] \tag{1}$$

$$E = 4.44fANB_m 10^{-8} \tag{2}$$

- 여기서,  $E$  = 유도전압의 실효값[V]
- $f$  = 주파수
- $A$  = 자속이 경유하는 코일의 반경[Inch]
- $N$  = 권선의 턴 수[턴]
- $B_m$  = 자속밀도
- $\Psi$  = 자속

식(1), (2)에서 유도 전압( $E$ )와 주파수( $f$ )를 제외한 요소들은 상수이다. 따라서 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$B_m \propto \frac{E}{f} \tag{3}$$

히스테리시스 손실과 와전류 손실은 자속밀도에 비례한다. 그러므로 과여자나 무부하 상태의 과열의 정도를 판단 근거로 활용할 수 있다. 이 과열은 주파수와 전압으로 측정하게 된다.

**2.3 주파수 추정 기법**

크기가  $A$ 이고 위상이  $\theta$ 인 이산 전압신호  $V(n)$ 에서, 정현파 전압신호는 식(4)와 같이 표현할 수 있다[13,14,15].

$$V(n) = A \cos(2\pi n \frac{f}{f_s} + \theta) \tag{4}$$

식(4)에서 오차 보정식을 적용하여 실수부와 허수부를 구하면,

$$V_c(n) = A_c \cos(2\pi n \frac{f}{f_s} + \hat{\theta}) \tag{5}$$

$$V_s(n) = A_s \sin(2\pi n \frac{f}{f_s} + \hat{\theta}) \tag{6}$$

여기서,  $A_c = A|H_c(f)|$ ,  $A_s = A|H_s(f)|$ ,  $\hat{\theta} = \theta - \pi \frac{f(N-1)}{f_s}$

이에 따라 크기의 비는 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{A_c}{A_s} = \frac{|H_c(f)|}{|H_s(f)|} = \frac{\tan(\frac{\pi f}{f_s})}{\tan(\frac{\pi f_0}{f_s})} \tag{7}$$

식(7)로부터 주파수  $f$  는 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$f = \frac{f_s}{\pi} \tan^{-1}(\tan(\frac{\pi f_0}{f_s}) \frac{A_c}{A_s}) \tag{8}$$

식(8)을 구하기 위해서는 크기의 비를 구해야 하는데, 이는 식(5)와 식(6)을 조합하여 타원의 방정식으로 표현하면 식(9)이 된다.

$$\left(\frac{v_c(n)}{A_c}\right)^2 + \left(\frac{v_s(n)}{A_s}\right)^2 = 1 \tag{9}$$

$V(n)$ 과  $V(n-1)$ 에 대한 코사인 필터와 사인 필터의 출력을 이용하면 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_c^2(n) & v_c^2(n-1) \\ -v_s^2(n) & v_s^2(n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{A_c^2} \\ \frac{1}{A_s^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

식(10)을 정리하면 식(11)이 되고

$$\frac{A_c}{A_s} = \sqrt{\frac{v_c^2(n) - v_c^2(n-1)}{-v_s^2(n) + v_s^2(n-1)}} \tag{11}$$

식(11)을 식(8)에 대입함으로써 추정 주파수는 식(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$f = \frac{f_s}{\pi} \tan^{-1}(\tan(\frac{\pi f_0}{f_s}) \sqrt{\frac{v_c^2(n) - v_c^2(n-1)}{-v_s^2(n) + v_s^2(n-1)}}) \tag{12}$$

**2.4 과여자 보호계전기법**

과여자 계전기는 시지연 특성을 가진 순시 기능과 반한시 기능으로 구성된다. 본고에서는 반한시 기능만을 다루었다. 과여자 계전기의 반한시 특성 방정식은 식(13)과 같이 표현할 수 있다[2,4,5].

$$T = \frac{K}{\left(\frac{V/F}{PU \times (V_{nom}/F_s)}\right)^2 - 1} \text{ seconds} \tag{13}$$

- 여기서,  $K$  = Time factor
- $V_{nom}$  = 공칭 전압
- $F_s$  = 시스템 주파수
- $PU = V / \text{Hz pick up}$

표 1은 국내 도입된 발전기용 IED의 과여자 계전기의 정정과 비율이다.

**표 1** 과여자 계전기의 정정과 비율

**Table 1** Setting and Range of over-excitation relay

MNEMONIC	RANGE		DEFAULT	
	5AMP	1AMP	UNITS	5AMP   1AMP
CURVE #	1 to 4		N/A	1
NOM VOLT	100 to 225.0/100 to 140.0		N/A	114.3
INV PU	1.00 to 1.99		per unit	1.1
TIME FAC	0.10 to 99.99		sec.	2

그림 1은 과여자 계전기의 반한시 특성 방정식 식(13)을 MATLAB을 활용하여 나타내었다.

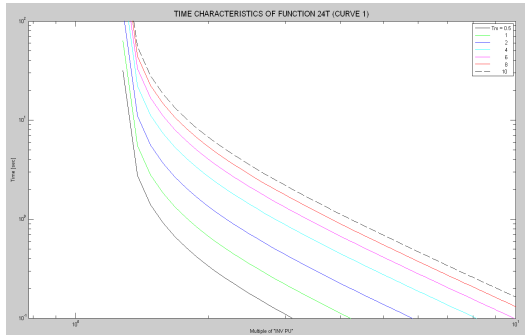


그림 1 MATLAB을 이용한 24T의 반한시 특성  
Fig. 1 Inverse time characteristic of 24T using the MATLAB

### 3. 사례연구

#### 3.1 EMTP-RV에 의한 345kV 모델링

제시한 과여자 계전 알고리즘의 성능 검증을 위하여, 그림 2와 같이 PSS/E 프로그램의 데이터를 기반으로 EMTP-RV에 의하여 국내 345kV 전력계통 선정하였다[10,17,18]. 345kV 모델계통은 총 154개의 발전기로 구성되어있으며, 총 발전량은 57654.76 MVA이다. 발전기 탈락, 부하 탈락 등의 다양한 외란을 모의하고 그에 따른 계통 신호를 수집하기 위하여 그림 2와 같이 서울, 대전, 광주, 대구, 부산 등 총 5 지역에 PMU가 설치 되어있다는 가정 하에 시뮬레이션을 수행하였다. 주기당 샘플링수는 12s/c로 하였다.

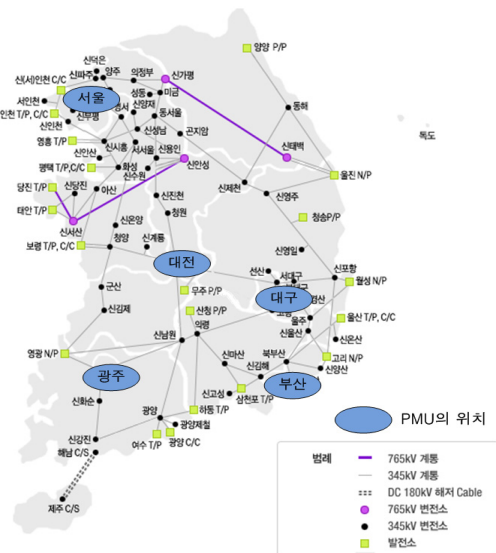


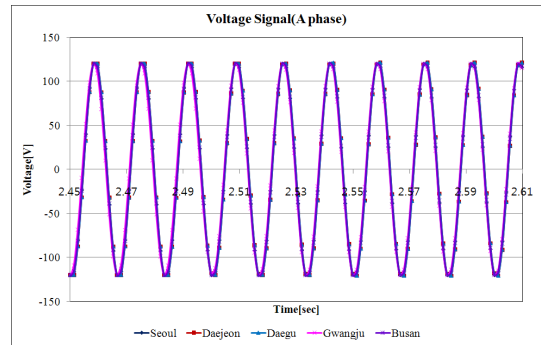
그림 2 EMTP-RV에 의한 전력계통 모델  
Fig. 2 Power system model of EMTP-RV

#### 3.2 모델링 데이터에 의한 계전기 성능 평가

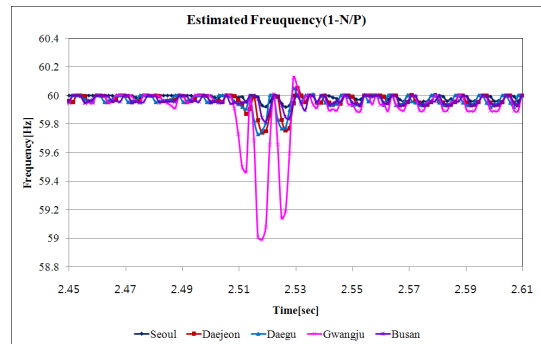
##### 3.2.1 발전기 탈락

그림 3(a)는 영광 N/P 발전기 1기가 탈락한 경우, A상 전압이고, 그림 3(b)는 제시된 기법에 의한 A상 전압의 추정

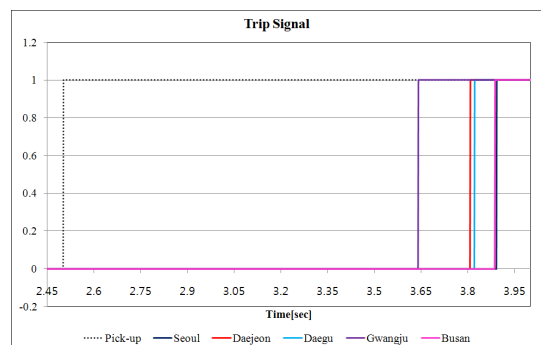
된 주파수이다. 그림 3(b)로부터 2.5[sec]에서 발전기 탈락이 발생한 후, 약 2주기 동안 광주에서는 -1[Hz]정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 알 수 있다. 대전과 광주는 -0.3[Hz], 부산 -0.2[Hz], 서울 -0.05[Hz] 정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 볼 수 있다. 그림 3(c)는 제안된 과여자 보호 계전기법의 각각의 지역별 트립 발생시간이다. 모든 지역에서는 픽업은 2.5[sec]에 이루어졌고, 트립은 광주가 3.64[sec]로 가장 빠르고 서울과 부산이 가장 느리게 이루어진 것을 알 수 있다.



(a) 5개 지역의 A상 전압 신호



(b) 5개 지역의 추정된 주파수



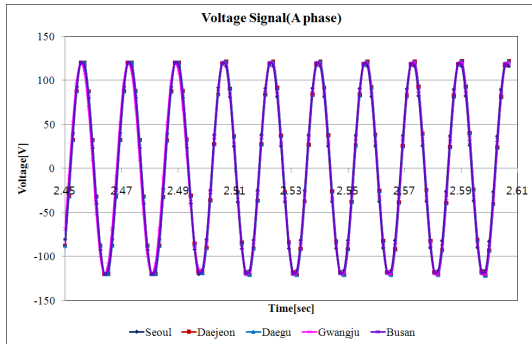
(c) 5개 지역의 트립 신호

그림 3 발전기 탈락의 경우(영광 N/P 1기)

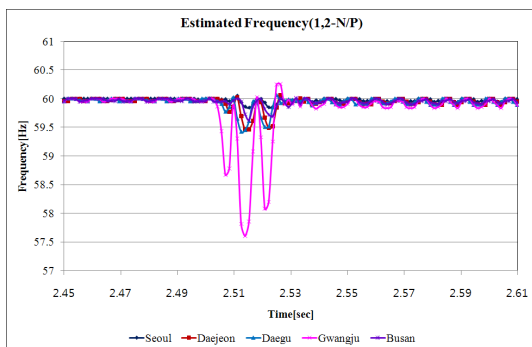
Fig. 3 Generator rejection about Yeonggwang 1 N/P

그림 4(a)는 영광 N/P 발전기 1,2기가 탈락한 경우, 각 지역에서의 A상 전압이고, 그림 4(b)는 제시된 기법에 의한 A상 전압의 추정된 주파수이다. 그림 4(b)로부터 2.5[sec]에서 발전기 탈락이 발생한 후 약 2주기 동안 광주에서는

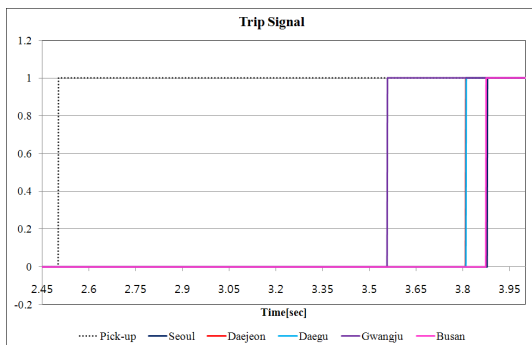
-2.5[Hz]정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 알 수 있다. 대전과 광주는 -0.5[Hz], 부산 -0.35[Hz], 서울 -0.1[Hz] 정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 볼 수 있다. 그림 4(c)는 과여자 보호계전기법에 관한 각 지역의 트립 발생시각의 비교를 표시하였다. 모든 지역에서는 픽업은 2.5[sec]에 이루어졌고, 트립은 광주가 3.59[sec]로 가장 빠르고 대전>대구>부산>서울 순으로 트립이 이루어진 것을 알 수 있다.



(a) 5개 지역의 A상 전압 신호



(b) 5개 지역의 추정된 주파수



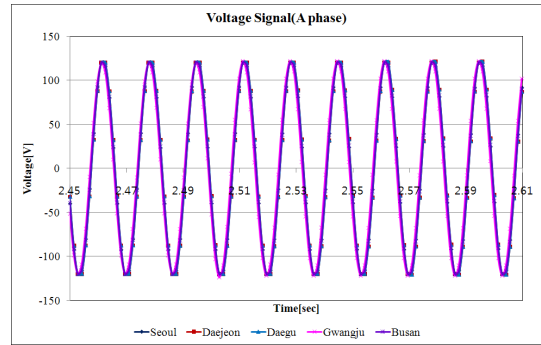
(c) 5개 지역의 트립 신호

그림 4 발전기 탈락의 경우(영광 N/P 1,2기)  
Fig. 4 Generator rejection about Yeonggwang 1-2 N/P

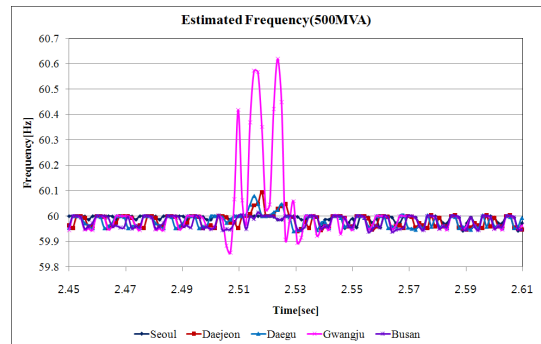
3.2.2 부하 탈락

그림 5(a)는 신광주 부하 500MVA가 탈락한 경우, A상 전압이고, 그림 5(b)는 제시된 기법에 의한 A상 전압의 추정된 주파수이다. 그림 5(b)로부터 2.5[sec]에서 발전기 탈락이 발생한 후 약 2주기 동안 광주에서는 +0.6[Hz]정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 알 수 있다. 대전과 광주는 +0.25[Hz], 부산 +0.1[Hz], 서울 +0.05[Hz] 정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 볼 수

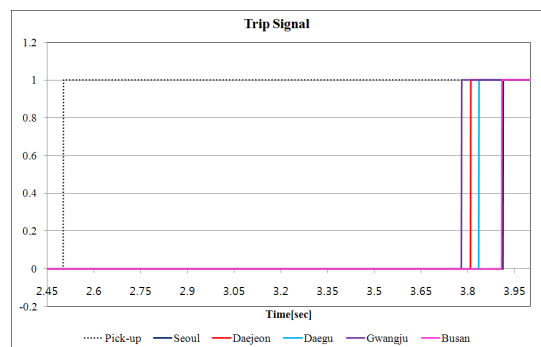
광주 +0.08[Hz], 부산과 서울은 +0.01[Hz] 정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 볼 수 있다. 그림 5(c)는 제안된 과여자 보호 계전기법의 각각의 지역별 트립 발생시간이다. 모든 지역에서는 픽업은 2.5[sec]에 이루어졌고, 트립은 광주가 3.78[sec]로 가장 빠르고 서울과 부산이 3.93[sec]로 가장 느리게 이루어진 것을 알 수 있다.



(a) 5개 지역의 A상 전압 신호



(b) 5개 지역의 추정된 주파수

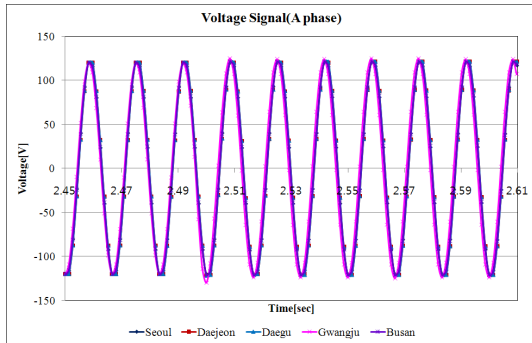


(c) 5개 지역의 트립 신호

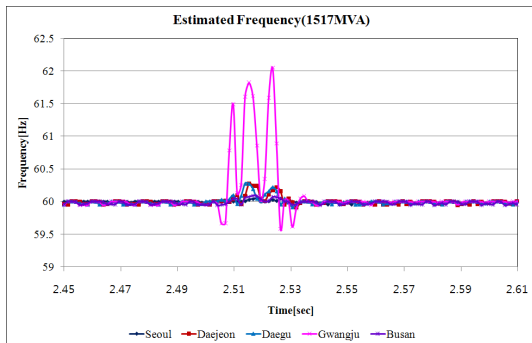
그림 5 부하 탈락의 경우(500MVA)  
Fig. 5 Load shedding about 500MVA

그림 6(a)는 신광주 부하 전체(1517MVA)가 탈락한 경우, 각 지역에서의 A상 전압이고, 그림 5(b)는 제시된 기법에 의한 A상 전압의 추정된 주파수이다. 그림 5(b)로부터 2.5[sec]에서 발전기 탈락이 발생한 후 약 2주기 동안 광주에서는 +2[Hz]정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 알 수 있다. 대전과 광주는 +0.25[Hz], 부산 +0.1[Hz], 서울 +0.05[Hz] 정도 흔들리다가 점차 안정화되는 모습을 볼 수

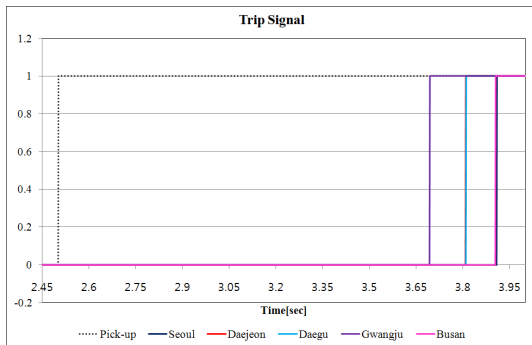
있다. 그림 6(c)는 과여자 보호계전기법에 관한 각 지역의 트립 발생시각의 비교를 표시하였다. 모든 지역에서는 픽업은 2.5[sec]에 이루어졌고, 트립은 광주가 3.67[sec]로 가장 빠르고 대전>대구>부산>서울 순으로 트립이 이루어진 것을 알 수 있다.



(a) 5개 지역의 A상 전압 신호



(b) 5개 지역의 추정된 주파수



(c) 5개 지역의 트립 신호

그림 6 부하 탈락의 경우(1517MVA)  
Fig. 6 Load shedding about 1517MVA

#### 4. 결 론

본 논문에서는 발전기 내부사고 보호를 위한 다기능 IED에 들어갈 핵심 보호 요소 중 하나인 과여자 보호계전에 관하여 연구하였다. 주파수 측정을 위해 기존의 DFT보다 성능이 우수한 이득 보상 알고리즘을 적용하였다. EMTP-RV로 모델링 한 국내 345kV계통 데이터를 활용하여 제안된 기법의 성능 평가를 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 발전기 탈락과

부하탈락 모두에서 정상적인 트립이 이루어졌다. 사고의 근원지로부터 가까운 도시일수록 먼 도시보다 주파수 변동이 심각한 것을 알 수 있었고 이로 인해 트립이 빨리 이루어진 것을 알 수 있었다. 마찬가지로 발전기 탈락과 부하탈락 모두에서 두 조건 중 더 심각한 사고일 때 주파수 변동이 심하고 트립 발생이 빨리 이루어진 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (2008T100100131)

#### 참 고 문 헌

- [1] You Sang Bong et al, "Skill to practice of protection relay systems", pp. 1~166, 2007.12.
- [2] Chul Won Park et al, "Multifunctional IED Prototypes Development for Large Generator Internal Fault Protection", Knowledge economy, innovation business the first year's annual report, pp. 1~286, 2011.5.
- [3] 박철원, 반우현, "대형 발전기 보호를 위한 차세대 전력 기기 개발의 개요", 대한전기학회 EMECS부문회 춘계 학술 논문집, pp. 371~373, 2011.4.
- [4] IEEE Power Engineering Society, "Guide for AC Generator Protection", IEEE Std. C37.102-2006 pp. 1~167, 2006. 11.
- [5] GE Industrial Systems, "DGP Digital Generator Protection System Instruction Manual", pp. 1~C4, 2003.
- [6] General Electric Company, "GEK-100605 DGP Digital Generator Protection System", pp. PD-1~SO-21, 1995.
- [7] Lee Seung Jae et al, "A study on establish the setting for protection relays", final report, pp. 1~442, 2003.6.
- [8] IEEE Std. C37.106-2003. "IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection of Power Generating Plants", pp. 1~34, 2004.
- [9] 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.
- [10] Eli Pajuelo et al, "Coordination of Overexcitation Limiter, Field Overcurrent Protection and Generator Control", Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1~7, 2010.
- [11] Siemens. "Siprotec Numerical Protection Relays", Part 2, Vol. 11, pp. 1~102, 2006.
- [12] Alves, E.F et al, "Analysis of overexcitation relaying set up in synchronous generators for hydro power plants", IEEE/PES T&D-LA, pp. 298~303, 2010.
- [13] G. K. Girgis and H. D. Vu, "Recommended Models for Overexcitation Limiting Devices", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, 1995.12.

- [14] Murdoch, A. et al, "Generator Over Excitation Capability and Excitation System Limiters", Panel Session Summary for the JEEE/PES WPM, Vol.1, pp. 215~220, 2001.
- [15] Chul Won Park, Yoon Sang Kim, "A Monitoring System Development for a New-type of Korean FNET", International Symposium MEPS'10, P44.pdf, 2010. 9.
- [16] Chul Won Park et al., "Advanced Frequency Estimation Technique using Gain Compensation", International Symposium MEPS'10 Session 15, 15.1.pdf, 2010. 9.
- [17] 박철원, 반우현, "Fault disturbance Recorders를 위한 주파수 추정 알고리즘", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술 논문집, pp. 39~41, 2010.11.
- [18] Chul-Won Park , Chul-Hwan Kim et al., "Study on Advanced Frequency Estimation Techniques using Gain Compensation", Journal of Electrical Engineering & Technology, pp. 439~446, Vol. 6, No. 4, 2011. 7.

## 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.  
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