

# 발전기 계자보호를 위한 계자상실 알고리즘에 관한 연구

## A Study on Loss of Excitation Algorithm for Generator Field Protection

박 유 영\* · 박 철 원†  
(Yu-Yeong Park · Chul-Won Park)

**Abstract** - The most widely used scheme for detecting loss of excitation on generator is used to sense apparent impedance from generator terminals. This paper presents loss of excitation algorithm using DFT filter based negative offset mho elements for generator field protection. It's algorithm includes two negative mho characteristics looking in the generator. The generator control system was modeled by PSCAD/EMTDC software, and then the proposed algorithm was tested by the collecting relaying signals from selected the generator model. From simulation results, the loss of excitation algorithm can be used to field protection for generator.

**Key Words** : Apparent impedance, Abnormal operating state, DFT filter, Field protection, IED, Internal fault, Large generator, Loss of excitation, PSCAD/EMTDC

### 1. 서 론

발전기는 전력계통을 구성하는데 근본이 되는 중요한 설비로서 내부고장이나 외부고장시 피해를 최소화할 수 있도록 신속하게 보호되어야 한다. 이에 발전기 보호반의 IED는 발전기의 내부고장 뿐만아니라 비정상적인 운전상태를 검출해야한다. 발전기의 비정상적인 운전상태에는 계자상실(LOE : loss of excitation), 불평형 전류(unbalanced currents), 동기상실(loss of synchronism), 과여자(overexcitation), 역전력(motoring), 과전압, 비정상적인 주파수 상태 등이 있다[1].

발전기 제어 시스템에서 여자시스템에 의하여 공급된 직류계자는 계자권선을 자화시켜 동기발전기에서 회전자속과 내부전압을 만들어낸다. 발전기가 계자를 상실하면, 계자시상수에 따라 회전자전류가 점차적으로 감소하고 계자전압은 천천히 감쇠한다. 결국 발전기는 무효전력을 공급하는 대신에 전력계통으로부터 무효전력을 소비하기 시작한다. 발전기의 계자상실은 예상치 못한 계자차단기가 개방되고 여자 시스템의 고장으로 인해 계자권선의 단락회로에 의한 원인이 될 수 있다[2]. 통계에 따르면, 계자상실로 인한 발전기의 고장이 전체 발전기 고장의 60% 이상을 차지한다. 한편 슬립링의 섬락(flashover), 자동 전압조정기, 여자장치의 고장, 계자 차단기의 오조작, 계자권선 단선 등 여러 가지 원인에 의해 발생하는 발전기의 계자상실은 발전기 자체의 손상뿐만 아니라 전력계통에도 심각한 운전상의 문제를 야기할 수 있다.

그러므로 외부사고와 다른 시스템의 외란에는 영향을 받지 않으면서 가능한 신속하게 LOE 상태를 검출하기 위한 LOE 보호 기법이 요구된다[3, 4].

이와 관련하여 국내에서는 발전기 계자상실 현상분석 및 정정검토 기준고찰과 발전기 계자상실 보호 릴레이 적용에 관한 연구들이 발표되었다[5-8]. 참고문헌[5]에서는 현장에 설치된 계통현상 분석장치에서 기록한 실측자료와 계통해석 프로그램인 PSS/E의 계자상실 모의 결과를 비교분석하였으며 이를 토대로 계자상실 보호 계전기 정정기준의 적정성이 검토되었다. 참고문헌[6]에서는 국내 실제 화력발전기 계통의 발전기 계자상실 릴레이 동작사례를 수집하여 분석하고 GE 모(mho)형 릴레이 적용사례가 검토되었다. 참고문헌[7]에서는 국내 발전기의 계자상실 보호 계전기 동작사례가 조사되었다. 참고문헌[8]에서는 네가티브 오프셋 모(negative offset mho) 계자상실 계전알고리즘에 관한 기초연구가 수행되었다.

해외의 연구로 참고문헌[9, 10]에서는 방향성 전류 측정기법(directional current measurement method)이 제시되었다. 참고문헌[11, 12]에서는 P-Q 평면에 기초한 발전기 운전능력 곡선에 관련된 LOE 보호기법을 다루었다. 참고문헌[13]에서는 LOE 사고에 대하여 임피던스 기법과 어드미턴스 기법의 동작이 비교되었다. 참고문헌[14]에서는 퍼지추론 메커니즘(fuzzy inference mechanism)에 기초한 혁신적인 계자상실보호가 발표되었다. 참고문헌[15]에서는 발전기보호를 위한 계자상실 보호기법에 대한 분석과 비교연구가 수행되었다.

본 논문에서는 계자상실 보호 계전기의 보호방식을 알아본 후 DFT 필터와 피상 임피던스를 이용한 네가티브 오프셋 모에 의한 발전기의 계자상실 보호기법을 제안한다[17]. 제시된 기법은 PSCAD/EMTDC를 이용한 수력발전기 제어 시스템의 모델링과 시뮬레이션을 통해 수집된 전압, 전류신호에 의하여 성능을 평가하고자 한다.

† 교신저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

\* 강릉원주대학교 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2014년 11월 12일

수정일자 : 2014년 11월 18일

최종완료 : 2014년 11월 19일

## 2. 피상 임피던스에 의한 계자상실 보호

발전기의 계자전원은 계자전원 공급용 차단기의 갑작스런 트립, 계자회로의 개방사고, 슬립링의 섬락으로 인한 계자회로의 단락사고, 자동 전압조정기의 고장, 계자 제어시스템에 공급되는 전원차단 등의 원인에 의하여 전체적이나 부분적으로 공급되지 않을 수 있다. 원인에 관계없이 발전기의 계자상실은 발전기 자체뿐만 아니라 전력계통에도 심각한 운전상의 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 적절한 대응을 필요로 한다.

### 2.1 계자상실 보호계전기의 보호방식

발전기의 계자상실을 검출하는 가장 널리 사용되는 기법은 거리계전기를 사용하여 발전기 단자에서 바라본 임피던스 변화를 측정하는 것이다.

그림 1은 다양한 부하상태에서의 계자상실 특성으로서 발전기 단자에서 측정된 임피던스의 R-X 다이어그램에서 나타낸다. 그림 1에서 곡선 (a)는 정격부하 및 정격부하 부근에서 운전중에 계자상실이 발생된 경우의 임피던스 변화를 나타내며, 운전점 C에서 D로 가는 경로와 같이 된다. D 점의 임피던스는 발전기의 직축 및 횡축 과도 임피던스의 평균보다 약간 큰 값으로 접근하게 된다. 곡선 (b)는 30% 부하 및 저여자 상태로 운전 중에 계자상실이 발생되어 E-F-G의 경로를 갖는 임피던스 궤적을 보여주며, F-G 구간에서 진동한다. 무부하 상태에서 계자상실이 발생되면 임피던스는 직축 및 횡축 동기임피던스 사이에서 변화게 된다. 보통 계자상실이 발생된 시점에서의 부하조건에 관계없이 발전기 단자에서 측정된 임피던스는 점선으로 표시한 곡선인 D-L구간상의 한 점이거나 이 사이에서 변화게 된다[1, 2, 4].

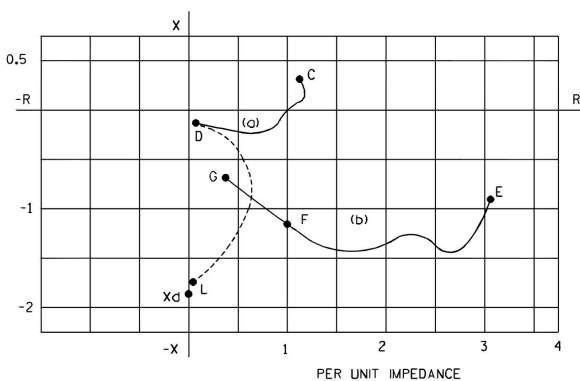


그림 1 발전기의 계자상실 특성  
Fig. 1 Loss of excitation characteristics on generator

계자상실 검출에 사용되는 거리계전기는 네가티브 오프셋 모 요소나 포지티브 오프셋 모(positive offset mho) 요소를 채택할 수 있다. 그림 2는 네가티브 오프셋 모 요소를 사용하는 방식을 나타내는데, 1개 또는 2개의 네가티브 오프셋 모 요소를 사용하여 발전기의 계자상실을 보호한다. 즉, 이 임피던스 보호기법은 입력신호로 발전기 단자측 전압 및 고정자 전류를 이용함으로써 두 개 오프셋 모 임피던스 원(two offset

mho impedance circles)에 사용한다. 그림 2의 R-X 다이어그램에서 릴레이 특성은 (-X) 종축에 걸친 최대 토크각을 지닌 오프셋 원이다. 발전기 단자에서 본 계전기는 원형특성 내부에서 종료하는 임피던스 평면에 의해 동작하게 된다. 그림 2와 같이 임피던스 평면에서 오프셋 모 계전기에 대한 정상상태 설정은 포화직축 과도 리액턴스(saturated direct axis transient reactance)  $X'_d$ 인 지름과 직축 과도 리액턴스의 절반인  $X'_d/2$ 인 네가티브 오프셋인 외부 원(40-1) Zone 2와 네가티브 오프셋  $X'_d/2$ 와 베이스 임피던스  $Z_b$ 가 1 PU의 지름을 갖는 내부 원(40-2) Zone 2의 두 개원을 갖는다[2]. Zone 1과 Zone 2는 각각 전부하 및 경부하 상태의 LOE를 검출하기 위한 것이고 Zone 1 및 Zone 2의 전형적인 시간지연은 대략 0.1[sec] 및 0.5~0.6[sec] 이다[1, 2, 8, 15]. 이러한 설정은 안정적인 전력동요(power swing) 동안의 동작에 최적 선택성을 가져오고 발전기 부하로부터 계자상실을 검출하게 된다.

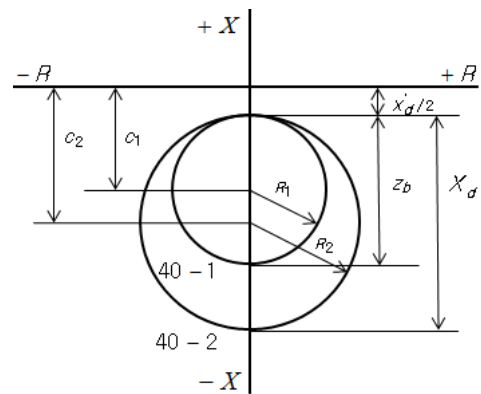


그림 2 네가티브 오프셋 모 요소가 있는 LOE 보호기법  
Fig. 2 LOE protection scheme with negative offset mho element

여기서,  $C_1 = 40 - 1$ 은 내부 원의 중심점으로  $(Z_b + X'_d)/2$  이고,  $R_1$ 은 내부 원의 반지름으로서  $Z_b/2$  이며,  $C_2 = 40 - 2$ 은 외부 원의 중심점으로  $(X_d + X'_d)/2$  이고,  $R_2$ 은 외부 원의 반지름으로서  $X_d/2$  가 된다. 단,  $Z_b$ 는 발전기의 베이스 임피던스이고,  $X'_d$ 는 발전기의 과도 리액턴스이며  $X_d$ 는 발전기의 포화 직축 과도 리액턴스(동기 리액턴스)이다.

## 2.2 네가티브 오프셋 모 알고리즘

### 2.2.1 DFT 필터

이산신호  $X(n)$ 을 주기당 일정한 간격으로 16샘플링 한 경우, 기본과 추출을 위한 DFT 필터의 출력은 식(1)의 차분방정식으로 나타낼 수 있다[2].

$$X_{r1}^{16}(k) = \frac{2}{16} [X_k - X_{k-8} + 0.9239(X_{k-1} - X_{k-7} - X_{k-9} + X_{k-15}) + 0.7071(X_{k-2} - X_{k-6} - X_{k-10} + X_{k-14}) + 0.3827(X_{k-3} - X_{k-5} - X_{k-11} + X_{k-13})] \quad (1)$$

$$X_{i1}^{16}(k) = \frac{2}{16} [X_{k-4} - X_{k-12} + 0.9239(X_{k-3} + X_{k-5} - X_{k-11} - X_{k-13}) + 0.7071(X_{k-2} + X_{k-6} - X_{k-10} - X_{k-14}) + 0.3827(X_{k-1} + X_{k-7} - X_{k-9} - X_{k-15})]$$

여기서,  $X_{r1}^{16}(k)$ ,  $X_{i1}^{16}(k)$ 는 각각 k번째 순간 기본파 추출을 위한 필터링 후 기본파 성분의 실수부와 허수부이고, 위첨자는 샘플링수이다. 기본파의 크기는 실수부의 제곱과 허수부의 제곱의 제곱근에  $1/\sqrt{2}$  배를 하면 된다.

2.2.2 피상 임피던스의 네가티브 오프셋 모 알고리즘

발전기 단자에서 측정된 임피던스는 식(2)와 DFT 필터를 거친 델타전압과 델타전류를 사용하여 계산된다[2, 8].

$$Z_{abl} = \frac{V_{a1} - V_{b1}}{I_{a1} - I_{b1}} = R_{abl} + jX_{abl} \quad (2)$$

여기서,  $V_{a1}$ 과  $V_{b1}$ 는 각각 a상과 b상의 기본파 전압이고,  $I_{a1}$ 과  $I_{b1}$ 는 각각 a상과 b상의 기본파 전류이며,  $Z_{abl}$ 는 임피던스이고  $R_{abl}$ 와  $X_{abl}$ 는 각각 저항성분과 리액턴스성분이다.

식(2)를 정리하면  $R_{abl}$ 과  $X_{abl}$ 은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{abl} = \frac{(V_{ar} - V_{br})(I_{ar} - I_{br}) + (V_{ai} - V_{bi})(I_{ai} - I_{bi})}{(I_{ar} - I_{br})^2 + (I_{ai} - I_{bi})^2} \quad (3)$$

$$X_{abl} = \frac{(V_{ai} - V_{bi})(I_{ar} - I_{br}) - (V_{ar} - V_{br})(I_{ai} - I_{bi})}{(I_{ar} - I_{br})^2 + (I_{ai} - I_{bi})^2}$$

3. 사례연구

3.1 발전기 제어시스템 모델과 계자상실 모의

발전기 제어시스템 모델은 돌극형 동기발전기, 수력터빈, 조속기 및 여자기로 구성된 후 PSCAD/EMTDC에서 구현하였다. 발전기 모델에서 여자기권선의 전원회로에서 개방을 발생시켜 여자전류 입력을 0으로 되도록 여자기 사고를 모의하였다. 선정된 모델계통은 발전기 제어시스템으로부터 Y로 연결된 승압 변압기와 PI 선로를 거쳐 무한대 모선에 연결된다. 선정된 발전기의 용량은 120[MVA]이고, 정격 유효전력은 108[MW], 선간전압은 24[kV]이다. 변압기 1차측 전압은 24[kV]이며 2차측 전압은 345[kV]이다. PSCAD/EMTDC에서 Duration of run 시간은 30[sec], Solution time step은 104.167[μs]로 하였다. 본 논문에서는 2/3부하 운전시 여자상실을 다루었다[2, 8, 16].

부하가 발전기의 정상출력을 정상부하에 공급할 수 있도록 모의한 후, 여자전압을 15[sec] 이후에 개방하여 여자전류를 0으로 하고 발전기 상태 변화를 모의하였다. 그림 3은 이때의 3상 전압과 전류이다. 그림 3으로 부터, 계자상실 사고 후에 발전기 단자전압은 서서히 강하하고 일정시간 후에 0로 근접하는 반면 전류는 일시적으로 상승한 후에 일정시간 후에 일정 값을 유지함을 알 수 있었다.

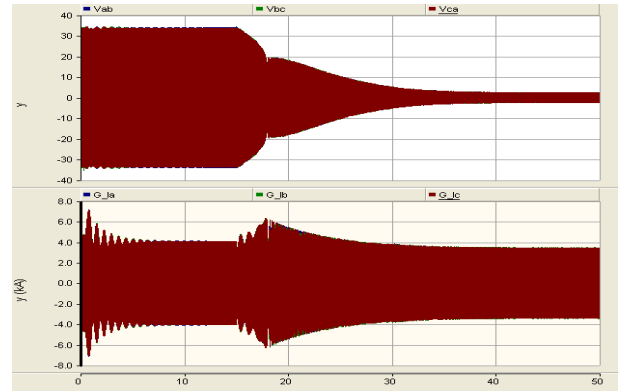
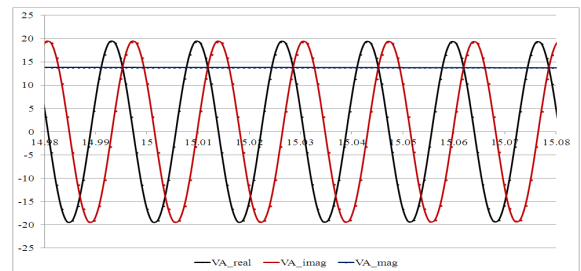


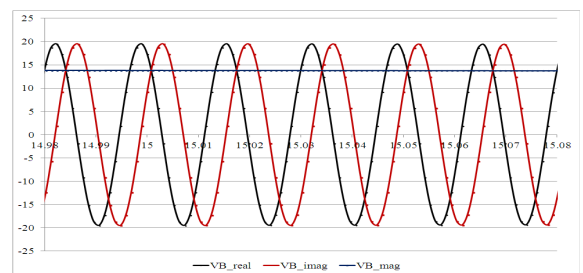
그림 3 3상 전압과 전류  
Fig. 3 Three phase voltage and current

3.2 네가티브 오프셋 모 알고리즘의 성능 평가

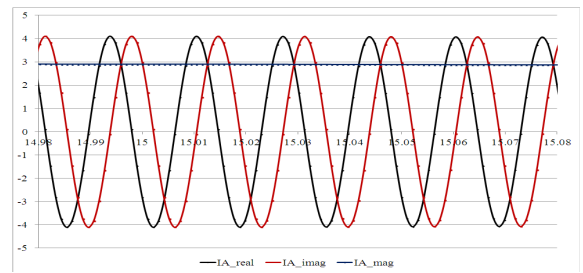
PSCAD/EMTDC에서 15[sec] 이후에 여자전압을 개방하여 여자전류를 0으로 하고 발전기 상태변화를 모의하여 수집된 A상과 B상의 순시치 전압과 전류로부터 DFT를 거쳐서 기본파를 추출한다. 그림 4는 전압과 전류신호의 기본파 페이지의 크기와 위상각을 나타낸다. 그림 4로부터, 여자상실 발생후 페이지의 크기가 미소하게 변화하여 불평형상태가 되는 것을 알 수 있다. 또한 위상각도 급격하게 변화하지 않는 것을 알 수 있다.



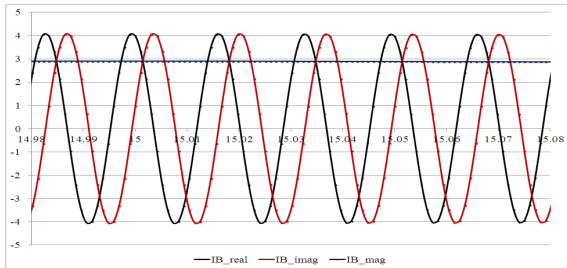
(a) A상 전압



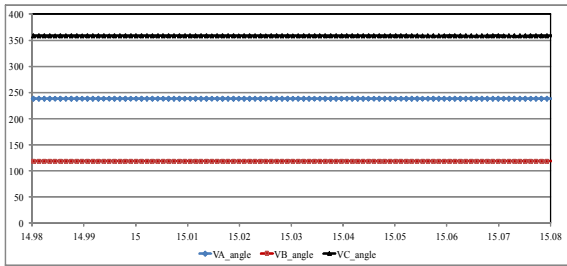
(b) B상 전압



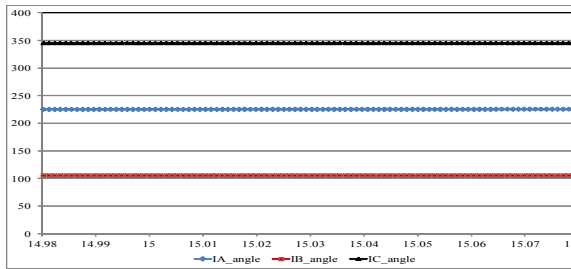
(c) A상 전류



(d) B상 전류



(e) 3상 전압의 위상각



(f) 3상 전류의 위상각

그림 4 여자상실 동안의 페이저

Fig. 4 Phasors during loss of excitation

그림 5는 추출된 전압과 전류의 페이지를 이용하여 피상 임피던스를 구한 후 임피던스 궤적을 나타낸다. 본 연구에서 채택한 네가티브 오프셋 여자상실 계전기의 오프셋은 과도 리액턴스를 2로 나눈값으로 설정하였고, 작은원 Zone1의 직경은 1.0pu, 큰원 Zone2의 직경은 동기 리액턴스로 설정하였으며, 이때 Zone2의 시간지연을 0.5~0.6[sec]를 갖도록 설정하였다.

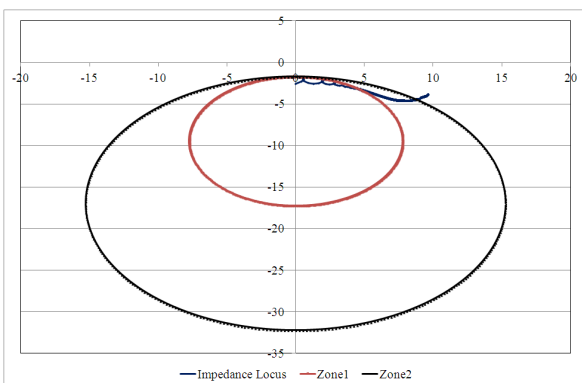


그림 5 임피던스 궤적과 고장 판별

Fig. 5 Impedance locus and fault discriminant

그림 5로부터, Zone2의 영역으로는 고장발생후 0.04901[sec] 후에 진입하였는데 이때 임피던스의 실수부값은 9.6195, 허수부값은 -3.80628 이었다. 즉, 15.04901[sec]에 Zone2의 동작이 시작되게 된다. 이후 Zone2는 설정한 지연시간 이내에 Zone1으로 이동하였음을 확인할 수 있었다. 또 Zone1의 영역으로는 고장발생후 0.31047[sec] 후에 진입하였는데 이때 임피던스의 실수부값은 9.508208, 허수부값은 -3.97911 이었다. 즉, 15.30147[sec]에 Zone1이 동작하여 차단기로 트립 지령을 발생하게 된다.

#### 4. 결 론

발전기가 계자를 상실하면 내부 기전력이 급감하고 터빈은 지속적으로 회전하여 유도발전기로 동작함으로써 무효전력을 계통으로부터 유입하며, 발전기의 계동권선에 지속적인 전류가 흐르게 되어 소손될 가능성이 있다. 이에 발전기의 계자상실 보호가 필요하다.

본 논문에서는 DFT 기법과 피상임피던스를 이용한 네가티브 오프셋 모에 의한 발전기의 계자상실 보호기법을 제안하였다. 제시된 기법은 C 언어로 구현되었고 PSCAD/EMTDC를 이용한 발전기 제어시스템의 여자상실 모의사고를 통해 수집된 전압, 전류신호에 의하여 그 성능이 평가되었다. 시뮬레이션 결과, 제시된 계자상실 알고리즘은 Zone1에서 트립 지령을 정확하게 발생하게 됨을 확인하였다. 발전기의 계자 보호에 사용될 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(2010T100100415)과 2014년도 2014년도 강릉원주대학교 교수연구년 연구 지원에 의하여 수행되었음.

#### References

- [1] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Standard AC Generator Protection", IEEE Std. C37.102-2006, pp. 1~167.
- [2] 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.
- [3] W. Wang, "Principle and Application of. Electric Power Equipment Protection", China Electric. Power Press, 2002.
- [4] ABB, "Generator protection REG670, Application manual", Vol 1.2, pp. 1~608, 2011.
- [5] Y.S. Lyu, H.R. Joo, W.J. Kim, J.H. Kim, "A Study on Setting Rule and Analysis for Loss of Generator Exciter", KIEE Summer Conference, pp. 3~4, 2008. 7.
- [6] Y.T. Oh, K.H. Seok, J.J. Yang, C.W. Park, "A

Study on th Application of the Generator Protection for the Loss Of Excitation”, KIEE Summer Conference, pp. 262~263, 2012. 7.

- [7] J.J Yang, Y.T. Oh, C.W. Park, “Generator protection relay operation case studies”, Electrical world, Planning series, Vol. 62, No. 1, pp. 45~50, 2013.
- [8] Y.Y. Park, K.H. Seok, Y.S. Kim, C.W. Park, “A Study on LOE relaying”, KIEE Industrial Electrical Committee, Autumn Conference, pp. 3~4 2013. 10.
- [9] ABB Generator Protection Application Guide, 1MRK 502 003-AEN, 1997.
- [10] ABB Directional time-overcurrent relays and protection assemblies based on single phase elements, 1MRK 509 007-BEN, 1999.
- [11] H.J. Herrmann and D. Gao, “Underexcitation Protection based on Admittance Measurement-Excellent Adaptation on Generator Capability Curves”, presented at 1st Int. Conf. Hydropower Technology & Key Equipment, Beijing, China, 2006.
- [12] Basler Generator Protection Application Guide, BE1-11g, 2001.
- [13] R. Sandoval, A. Guzman and H.J. Altuve, “Dynamic simulations help improve generator protection”, in Proc. 2007 IEEE Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, pp. 16~38.
- [14] Adriano P. de Moraes, Ghendy Cardoso, Jr., and L. Mariotto, “An Innovative Loss-of-Excitation Protection Based on the Fuzzy Inference Mechanism”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 2197~2204, Oct., 2010.
- [15] Z.P.Shi, J.P.Wang, Z.Gajic, C.Sao, M.Ghandhari, “The Comparison and Analysis for Loss of Excitation Protection Schemes in Generator Protection”, The 11th IET Conference on Developments in Power System Protection(DPSP), 23-26 April 2012, Birmingham, UK, P005.pdf.
- [16] C.W. Park, Y.T. Oh, “Fault Simulation and Analysis of Generator”, The Transactions of the KIEE, Vol. 62P, No. 3, pp. 151~158, 2013. 9.
- [17] C.W. Park, Y.Y. Park, “A Study on Protection of Loss Excitation for Generator”, KIEE PES Autumn Conference, pp. 249~251, 2014. 11.

## 저 자 소 개



### 박 유 영 (朴 裕 榮)

1989년 10월 13일생. 2013년 국립강릉원주대학교 전기공학과 졸업, 2014년~현재 국립강릉원주대학교 대학원 전기공학과 석사과정

Lab : 033-760-8796

Fax : 033-760-8781

E-mail : orange1513@naver.com



### 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, 2011년~현재 대한전기학회 전력기술부문회 이사, 2012년~현재 대한전기학회 산업전기위원회 편집위원장

Tel : 033-760-8786

Lab : 033-760-8796

Fax : 033-760-8781

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr-