

# 발전기 보호용 계자상실 계전기의 적용 분석

## Application Analysis for Loss of Excitation Relay of Generator Protection

오 용 택\* · 박 철 원†  
(Yong-Taek Oh · Chul-Won Park)

**Abstract** - Recently, the LOE(loss of excitation) incidents are occurred in domestic synchronous generator frequently, the synchronous generator protection system has been much attention for the LOE protection of the incidents that threatens synchronous generators and power systems. This paper was showed the characteristics and practices of distance relay that widely used LOE protection relaying in generator. Firstly, the operating characteristics and the impedance locus for LOE of the generator protection were introduced. Even if the conventional simulation program is used for modeling, but it is difficult to implement a LOE modeling and simulation of synchronous generator. So, the LOE relay operation data collected from thermal power plant and nuclear power plant in real fields were analyzed. By reviewing the applications of GE Mho relays, the reliability of LOE for synchronous generator protection in domestic were improved.

**Key Words** : Distance relay, Generator protection, Impedance locus, Loss of excitation, Mho relay, Stability

### 1. 서 론

발전기는 전력계통을 구성하는 중요한 기본 설비로서 내부 고장시 신속하고 정확하게 보호하여 피해를 최소화 하여야 한다. 근래 대용량 발전기 보호에 관한 관심이 증대되고 있다[1, 2]. 2006년 4월19일 당진T/P #5호기, 2009년 6월3일 인천C/C #3 G/T, 영광N/P #1호기, 2009년 12월30일 서인천 C/C #2G/T 등의 동기발전기에서 다수 발생하고 있는 계자상실 현상에 적절한 보호대책에 대한 인식이 확대되고 있는 바, 이는 전력계통의 안정도와 직접적으로 연계된 것으로 여겨진다[3, 4].

계자상실의 대표적인 원인은 여자전원 공급용 차단기의 갑작스런 트립, 여자회로의 개방사고, 슬립링의 섬락으로 인한 여자회로의 단락사고, AVR의 고장, 여자제어 시스템에 공급되는 전원차단 등이 있다. 그런데 원인에 관계없이 발전기의 계자상실은 발전기 자체뿐만 아니라 전력계통에도 심각한 운전상의 문제를 야기할 수 있기 때문에 적절한 대응을 필요로 한다. 발전기가 계자를 상실하게 될 경우, 내부 기전력이 급감하고 터빈은 지속적으로 회전하여 유도발전기로 동작함으로써 무효전력을 전력계통으로부터 유입하며, 발전기의 제동권선에 지속적인 전류가 흐르게 되어 소손될 가능성이 높아지게 된다[5-7].

국내에서 관련 분야의 연구가 많이 이루어지지 않았다. 발전기 계자상실 현상 분석 및 정정검토 기준 고찰과 발전기 계자상실 보호 릴레이 적용 연구가 발표되었다[3, 4]. 또

단상 동기 발전기의 고속 LOE 검출을 위해 단상 오프셋 모 (Off-set Mho) 계전기법이 소개되었다[8-10]. 지금까지 LOE(Loss of Excitation) 검출을 위한 다양한 기법들이 개발되었는데, 제시된 대부분의 계자상실기법은 피상 임피던스 궤적(apparent impedance trajectory)에 기초하고 있다[11-13].

본 논문에서는 수년 동안 발전기 계자상실 보호계전기로 폭넓게 이용되고 있는 거리계전기 특성 및 적용 사례를 중심으로 연구를 진행하였다[1, 3, 4]. 주요내용으로는 먼저, 오프셋 모 임피던스에 의한 계자상실 기법을 소개하였다. 또 발전기 계자상실시 출력특성을 분석하였다. 특히 동기발전기 계자상실 모델링의 어려움으로 인하여 시뮬레이션 데이터를 활용하지 못하는 대신에 실계통의 발전기 계자상실 계전기의 실제 동작사례를 수집하여 분석하고 GE Multilin사 모(Mho) 계전기(40) 적용사례를 검토함으로써 국내의 동기발전기 계자상실에 관한 보호방식을 검토하고 신뢰성 및 특성을 확인하고자 하였다.

### 2. 계자상실 계전기

#### 2.1 계자상실 계전기의 특성과 정정

계자상실 보호를 위한 오프셋 모 계전기는 발전기 내부 리액턴스를 고려하여 정정하고 발전기 단에 설치되는 단상 단요소 거리계전기라고 할 수 있다[8-10].

그림 1은 초창기 오프셋 단원의 동작 특성을 나타낸다. 그림 1로부터 계전기 특성은 원점에서  $-X$  만큼 거리에서 최대 토오크의 각을 갖는 오프셋 원이다. 발전기 단으로부터 계산되어지는 임피던스와 마찬가지로 계전기는 원의 특성 내부에서 종결되는 임피던스 패이저 형태로 운전할 수 있다. 이 계전기가 처음 도입되었을 때, 오프셋은 직축 과도 리액턴스의 절반 ( $X'_d/2$ ) 과 같게 설정되고 원의 지름은 직축 동기 리액턴스 ( $X'_d$ ) 와 같게 설정 되도록 권장되었다.

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

\* 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수 · 공박  
접수일자 : 2014년 11월 12일  
수정일자 : 2014년 11월 17일  
최종완료 : 2014년 11월 19일

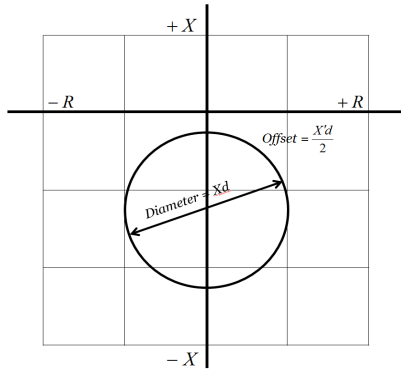


그림 1 초창기 계자상실 계전기의 동작 특성  
Fig. 1 Operating characteristic of LOE relay in beginning

그림 2는 전형적인 오프셋 모 요소에 의한 계자상실 계전기의 동작 특성을 나타낸다. 오프셋 모 계전기는 Zone1(내부원), Zone2(외부원)의 두개의 영역을 갖는다. 기본적인 설정은 그림 2와 같이 오프셋은 과도리액턴스의 절반( $X'_d/2$ )으로 하고, Zone2 동작영역의 직경은 동기리액턴스( $X_d$ )로 설정하며 정한시 0.5~1[sec] 범위로 설정한다. Zone1은 1p.u. 직경으로 순시동작의 특성을 가진다. 각각 전부하 및 경부하 상태를 검출하기 위하여 사용된다[11, 13].

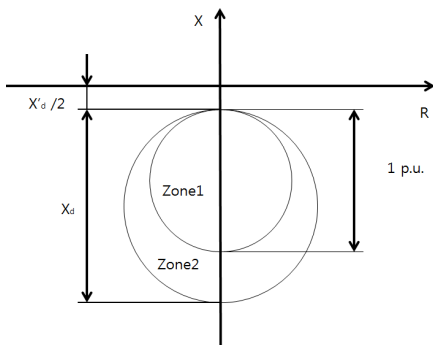
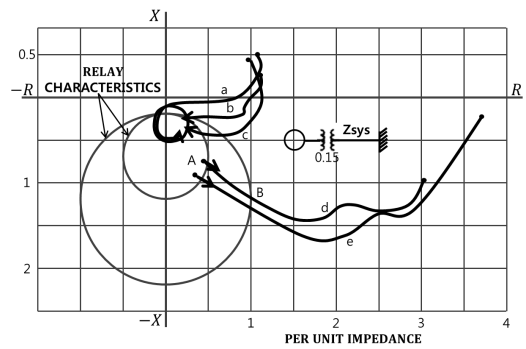


그림 2 계자상실 계전기의 동작 특성  
Fig. 2 Typical operating characteristic of LOE relay

2.2 발전기 계자상실 특성

그림 3은 발전기 기준으로 0.15p.u. 임피던스를 가지는 승압변압기를 통해 시스템에 연결된 전형적인 직렬 연결형 발전기의 계자상실 특성을 나타낸다[8-10].

그림 3의 특성과 같이, 곡선 (a), (b)와 (c)는 전부하에 가깝거나 발전기 동작 초기로 시스템 임피던스의 함수와 같은 임피던스 궤적을 나타낸다. 곡선 (d)와 (e)는 발전기 초기부하가 30[%]일 때, 각각 시스템 임피던스 궤적(impedance locus)을 나타낸다. 전부하시 최종 임피던스는 항상 오프셋 설정 ( $X'_d/2$ ) 보다 커야한다. 따라서 항상 계전기 특성 외부에서 시작하게 된다. 계자상실시 계통 임피던스가 0과 0.2p.u. 시스템 임피던스의 경우, 0.4p.u. 시스템에 대한 임피던스 궤적이 곡선 (a)에 표시된 지역에 나선형으로 들어오는 동안 임피던스 궤적 (b, c)는 이 영역에 곧바로 진입하게 된다. 임피던스 궤적의 계전기 특성에서 초기 부하지점에서



CURVE	INITIAL LOADING (per unit)	SYSTEM IMPEDANCE
a	0.93 MVA 0.92 PF Lagging	0.4 p.u.
b	0.98 MVA 0.98 PF Lagging	0.2 p.u.
c	0.92 MVA 0.90 PF Lagging	0
d	0.31 MVA 0.95 PF Lagging	0.4 p.u.
e	0.30 MVA 1.00 PF	0.2 p.u.

그림 3 직렬 연결형 발전기 계자상실 특성  
Fig. 3 LOE characteristics of tandem compound generator

이송 시간(traverse time)은 2~7[sec] 사이가 될 것이다. 0.4p.u. 시스템 궤적 이송은 2[sec]정도이다.

발전기 초기부하가 30[%]일 때, 임피던스 동요(impedance swing)는 역방향이 되기 전에 1.0p.u. 원 내부 포인트 (A)까지 갈 것이다. 스윙은 포인트 (A)와 (B)사이 영역에서 동요할 것이다. 초기점과 점 B 사이의 이송 시간은 약 7~9[sec] 인 반면에 거리 B-A를 통과하는 시간은 약 10~15[sec] 이상까지 도달할 수 있다. 0.3과 1.0p.u. 사이의 발전기 초기부하 동안, 임피던스 궤적은 A 영역 내인 1.0p.u. 원 내부에서 종료될 것이다. 0.3p.u. 이하 부하에서 궤적은 큰 원형 (지름 =  $X_d$ )내에 나타날 것이고 점 A 아래에서 종료할 것이다.

2.3 기기 부하 및 단자전압 특성

그림 4는 직렬 연결형 발전기 계자상실 영향으로 인한 0.1p.u. 시스템 임피던스 및 중부하시 발전기 운전 초기 동안의 단자 전압, 전력 출력 및 무효전력을 나타낸다. 여기서 세로축은 전압, 전력 및 무효전력을 나타내고 가로축은 시간 [sec]를 의미한다[8-10].

그림 4로부터 계자가 상실하면, 전압은 감소하면서 약 0.5p.u.에서 급변하였고 출력전력은 감소하면서 약 0.3p.u.에서 매우 흔들림을 알 수 있다. 또한, 무효전력은 역상이 되고 약 -0.93p.u.에서 동요하는 것을 알 수 있다.

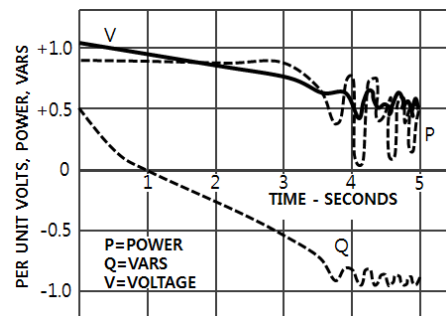


그림 4 계자상실동안의 여러 가지 신호 변화  
Fig. 4 Variation of several signals during LOE

2.4 네가티브 오프셋 모 알고리즘

오프셋 모 임피던스 연산은 식(1)과 같이 DFT의 실수부와 허수부를 이용하여 구할 수 있다. a상 피상 임피던스의 저항성분은 식(2)와 같고 a상 피상 임피던스의 리액턴스 성분은 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$Z_a = \frac{V_a}{I_a} = \frac{(V_{ar} + jV_{ai})}{(I_{ar} + jI_{ai})} \quad (1)$$

$$= \frac{(V_{ar} + jV_{ai})(I_{ar} - jI_{ai})}{(I_{ar} + jI_{ai})(I_{ar} - jI_{ai})}$$

$$= \frac{V_{ar}I_{ar} + V_{ai}I_{ai} + j(V_{ai}I_{ar} - V_{ar}I_{ai})}{I_{ar}^2 + I_{ai}^2}$$

$$R_a = \frac{V_{ar}I_{ar} + V_{ai}I_{ai}}{I_{ar}^2 + I_{ai}^2} \quad (2)$$

$$X_a = \frac{V_{ai}I_{ar} - V_{ar}I_{ai}}{I_{ar}^2 + I_{ai}^2} \quad (3)$$

3. 사례연구

3.1 화력 발전기 계자상실 사례

국내 A 화력발전기 계자상실 계전기의 Zone2에서 동작한 사례를 검토하였다. 동작하기전 1[ms]에서부터 고장후 10[ms]까지의 순시치 전압과 전류를 이용하여 발전기 유효 전력, 무효전력, 발전기 측 상전압 Va의 크기와 위상, 상전압 Vb의 크기와 위상, 상전압 Vc의 크기와 위상 데이터, 상전류 Ia의 크기와 위상, 상전류 Ib의 크기와 위상, 상전류 Ic의 크기와 위상 데이터를 계산하여 연구를 진행하였다[3, 4, 13].

상기 자료를 기본으로 계자상실 보호계전기의 동작을 확인하기 위해서 초기에는 Mathcad 수식편집기를 활용하였으나 결국은 C 언어를 이용하여 임피던스 값을 계산하고 해당 보호계전기의 동작선도를 확인하였다. 표 1은 A 화력발전소 계자상실 보호계전기의 정정치를 나타낸다.

표 1 LOE 계전기의 정정치

Table 1 Setting value of LOE relay

정정치			
	중심	반경	delay
Zone1	9.74 [ohm]	7.91 [ohm]	0.1 [sec]
Zone2	17.49 [ohm]	15.66 [ohm]	0.5 [sec]

그림 5는 해당 자료를 이용하여 계산된 유효전력, 무효전력의 변화 및 a상 전압, b상 전압의 변화를 나타낸다. 이는 그림 4와 유사한 특성을 나타낼 수 있다.

그림 6은 전압신호의 크기와 위상각을 나타낸다. 그림 7은 전류신호의 크기와 위상각을 나타낸다.

취득한 자료를 활용하여 임피던스를 구하고 모 계전기 영역을 작성하기 위해서 발전기 사양데이터를 참조하여 작성하였다. 우선 베이스 임피던스를 구하고, 과도 리액턴스 및 동기 리액턴스 값을 구한 후에 원의 중심점을 찾고 반경을

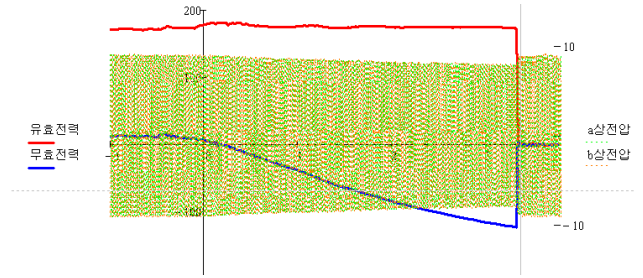
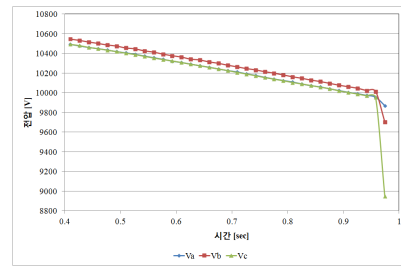
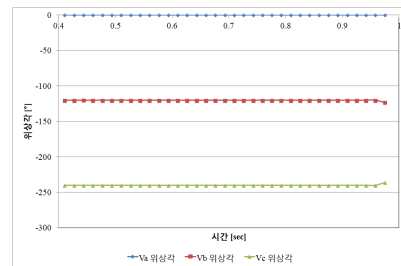


그림 5 유효전력, 무효전력, 상전압의 변화  
Fig. 5 Transition of active power, reactive power and phase voltage



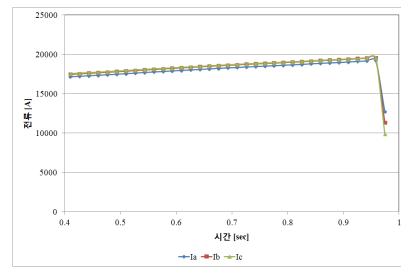
(a) 전압의 크기



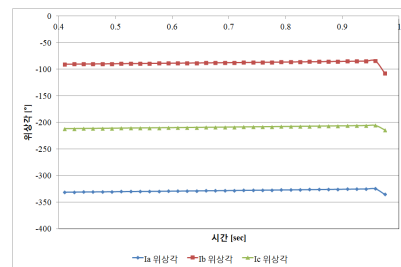
(b) 전압의 위상각

그림 6 3상 전압 페이저

Fig. 6 Phasor of three phase voltage



(a) 전류의 크기



(b) 전류의 위상각

그림 7 3상 전류 페이저

Fig. 7 Phasor of three phase current

갖는 Zone1과 Zone2의 모 계전기의 선도를 작성하였다. 작성한 모 계전기의 선도에 계산한 임피던스를 함께 도시하면 그림 8과 같다.

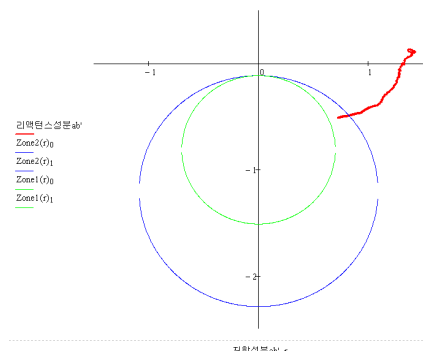


그림 8 화력 발전기의 모 계전기 동작선도  
Fig. 8 Operation trajectory of LOE relay on T/P

그림 8에서 내부원은 Zone1 영역이고 외부원은 Zone2 영역이며 빨간색 선은 계자상실에 의해 접근하는 임피던스 선도를 나타낸다. 그림 8과 같은 동작선도를 직접 작성하여 실험하면서, 임피던스 선도는 Zone2 영역으로 접근하고 있으며 Zone2 영역에서 시간지연이 0.66[sec]로 GE 모 계전기의 정정치 0.5[sec] 이상으로 신뢰성 있게 동작됨을 확인할 수 있었다.

### 3.2 원자력 발전기 계자상실 사례

국내의 B 원자력 발전기에서 계자상실 계전기가 Zone2에서 동작한 사례를 분석하고자 취득한 자료를 통해 연구를 진행하였다. 3.1절과 유사하게 순시치 전압과 전류를 이용하여 발전기 유효전력, 무효전력, 발전기 축 3상 전압과 3상전류의 크기와 위상을 계산하여 연구를 진행하였다.

원자력 발전소의 동기 발전기 계자상실 계전기의 동작을 확인하기 위해서 처음에는 Mathcad 수식편집기를 활용하였으나 결국은 C 언어를 이용하여 임피던스 값을 계산하고 해당 보호계전기의 동작선도를 확인하였다. 그림 9는 원자력 발전기의 모 계전기 동작선도를 나타낸다.

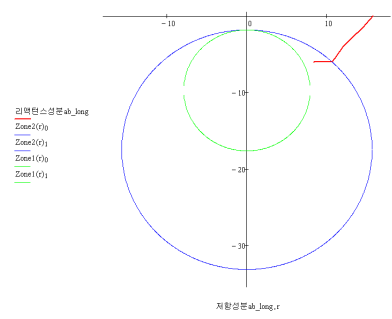


그림 9 원자력 발전기의 모 계전기 동작선도  
Fig. 9 Operation trajectory of LOE relay on N/P

상기 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 Zone2 영역에서 지연되는 시간이 0.51[sec] 이상 지연됨으로서 계자상실 계

전기 Zone2 영역 보호 계전기가 동작함으로서 신뢰성 있게 동작됨을 확인할 수 있었다. 참고로 GE 모 계자상실 계전기의 Zone1 영역은 0.06[sec]이고 Zone2 영역은 0.5[sec]가 되도록 설정되어 있었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 수년 동안 발전기 계자상실 보호 계전기로 폭넓게 이용되고 있는 거리계전기 특성 및 적용 사례를 중심으로 연구를 진행하였다. 발전기 계자상실시 원리와 특성 곡선상의 특성을 확인하였다. 특히 동기발전기 계자상실 모델링과 시뮬레이션의 어려움으로 인해 A 화력발전소와 B 원자력발전소 계통의 발전기 계자상실 계전기의 동작사례를 수집하여 Mathcad 수식편집기와 C 언어로 오프셋 모 임피던스 계전 알고리즘을 구현하였다. 이에 따라 GE사 오프셋 모 계전기의 적용사례를 재현, 검토함으로써 발전기 계자상실 특성 및 동작 특성이 확인되었다.

## 감사의 글

본 연구는 2014년도 강릉원주대학교 교수연구년 연구지원에 의하여 수행되었음.

## References

- [1] 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.
- [2] IEEE Std C37.102, "IEEE Guide for AC Generator Protection", pp. 1~167, 2006.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Y.J. Kwon, S.H. Kang, C.H. Kim, "An Analysis of Protection Relay Operation During Transient State of Generator, KIEE PES Autumn Conference, pp. 378~380, 2006. 11.
- [6] Taekyun Kim, et al., "High-precision Power Equipment Modeling and Education/Training Systems Development", MOTIE Power Industry Research & Development, 2nd year report, pp. 1~199, 2007.
- [7] KEPCO KEPRI, "Protection Relays Training Course Development", MOTIE Final Report, pp. 1~247, 2007.
- [8] Crossman, G. C., Lindemuth, H. F., and Webb, R. L., "Loss-of-Field Protection for Generators", AIEE Transactions, Vol. 61, pp. 261~266, 1942.

[9] Darron, H. G. et al., "The Influence of Generator Loss of Excitation on Bulk Power System Reliability", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No. 5, pp. 1473~1478, September/October 1975.

[10] Berdy, J., "Loss of Excitation Protection for Modern Synchronous Generators", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No. 5, pp. 1457~1463, September/October 1975.

[11] Z.P. Shi et al., "The Comparison and Analysis for Loss of Excitation Protection Schemes in Generator Protection", Development of Power System Protection(DPSP) 2012 Conference, P005.pdf, pp. 1~6, April 2012.

[12] S. R. Tambay and Y. G. Paithankar, "A new adaptive loss of excitation relay augmented by rate of change of reactance," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Vol. 2, pp. 1831~1835, 2005.

[13] C.W. Park, Y.Y. Park, "A Study on Protection of Loss Excitation for Generator", KIEE PES Autumn Conference, pp. 249~251, 2014. 11.



**박철원 (朴哲圓)**

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1990년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공석), 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, 2011년~현재 대한전기학회 전력기술위원회 이사, 2012년~현재 대한전기학회 산업전기위원회 편집위원장  
 Tel : 033-760-8786  
 Lab : 033-760-8796  
 Fax : 033-760-8781  
 E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

저 자 소 개



**오용택 (吳龍澤)**

1958년 6월 17일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1982년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공석). 1987년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1979년~1987년 한국전력공사 송배전원, 전산원. 1987년~1991년 한국전력공사 정보처리처 과장근무. 1991년~1999년 한국기술교육대학교 정보기술공학부 조교수, 부교수. 1999년~현재 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기전공 정교수. 2011년~현재 대한전기학회 전력기술위원회 이사. 2007년 호주 퀸즈랜드 대학교 방문 교수  
 Tel : 041-560-1161  
 Fax : 041-564-3261  
 E-mail : ytoh@kut.ac.kr