한국마린엔지니어링학회지 제33권 제8호, pp. 1232~1238, 2009. 11 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

발전기 고장보호를 위한 디지털 계전기에 관한 연구

장낙원[1] · 박정도[2] · 이성환†

(원고접수일 : 2009년 7월 29일, 원고수정일 : 2009년 9월 29일, 심사완료일 : 2009년 11월 11일)

A Study on the Digital Protective Relay for Generator Fault Protection

Nakwon Jang[1] · Jeong do Park[2] · Sunghwan Lee†

요 약 : 전력설비의 대용량, 고전압화 됨에 따라 발전기 고장 예방을 위한 고장보호시스템의 필요성이 점차 증대되고 있다. 신속하고 신뢰성 있게 운전하며 보호하는 발전기 보호제어 시스템의 개발이 시급히 요구된다. 본 논문에서는 전력 공급의 안정을 도모하고 대용량, 고전압화 되는 발전기의 고장 예방을 위한 발전기 보호기능을 갖춘 디지털 보호계전기 설계에 관한 연구를 수행하였다. 디지털 계전기의 발전기 고장보호에 사용되는 고장보호 알고리즘을 개발하였고 디지털보호계전기 H/W를 설계 제작하였다.
주제어 : 디지탈보호계전기, 발전기, 상평형전류, 고장보호시스템, 지락과전류

Abstract: As power facilities are getting higher at capacity, the monitoring and diagnosis of generators for fault detection and protection has attracted intensive interest. In case of an after-fault in high capacity rotating machines, the recovering cost is usually very expensive and additional time is necessary for returning in a normal situation. In this paper, we developed the protection program for the generator fault protection system and each module of the digital protective relay H/W for loading the protection program. The protective relay H/W was designed to have EMC characteristics for prohibiting from fault operation in bad power systems.
Key words: Digital protective relay, Generator, Phase balance current, Fault Protection system, Ground overcurrent

1. 서 론

전력설비 용량의 증가와 기술의 진보에 따라 터빈 발전기, 수차 발전기, 대형 전동기 등의 회전기가 대용량, 고전압화 됨에 따라 발전기 고장 예방을 위한 고장보호시스템의 필요성이 점차 증대되고 있다. 특히 발전기는 발전소, 대형 플랜트 및 선박 등 전 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 고장이 발생하였을 때 이를 적시에 발견하지 못한 채 방치하는 경우, 발전기 뿐 아니라 계통의 마비까지도 야기할 수 있으며, 고장에 대비하기 위한 여분의 설비를 준비해야 할 수 있다. 고정자와 회전자에서 발생하는 절연 고장은 복구하는데 장시간이 요구되므로 회전기의 예측진단에 따른 정비와 더불어 고장을 사전에 발견하고 불시정지에 따른 불가피한 경제적 손실을 예방하기 위해서는 상시 감시기능이 요구된다. 신속하고 신뢰성 있게 운전하며 보호하는 발전기 보호제어 시스템의 개발 및 국산화가 시급히 요구된다. 그리고 보다 효율적이고 신뢰성 있는 발전기 보호제어 시스템을 구현하기 위한 핵심 디바이스인 디지털 보호계전기의 국산화도

† 교신저자 (위덕대학교 에너지전기공학부, E-mail:hwaney@uu.ac.kr, Tel: 054)760-1625)
1 한국해양대학교 전기전자공학부
2 위덕대학교 에너지전기공학부

필요불가결한 실정이다[1-2]. 발전기 보호용 기능을 추가한 디지털 보호계전기에 대한 국내 대기업 및 중소기업을 중심으로 선로, 전동기 및 변압기 보호를 목적으로 한 디지털보호계전기를 개발해 왔으나, 고장 시 경제적 파급효과가 막대한 대용량 고압용 발전기 보호에 디지털보호계전기를 활용하고자 하는 연구개발은 아직 미미한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 전력 공급의 안정을 도모하고 대용량, 고전압화 되는 발전기의 고장 예방을 위한 발전기 보호기능을 갖춘 디지털 보호계전기 설계에 관한 연구를 수행하였다.

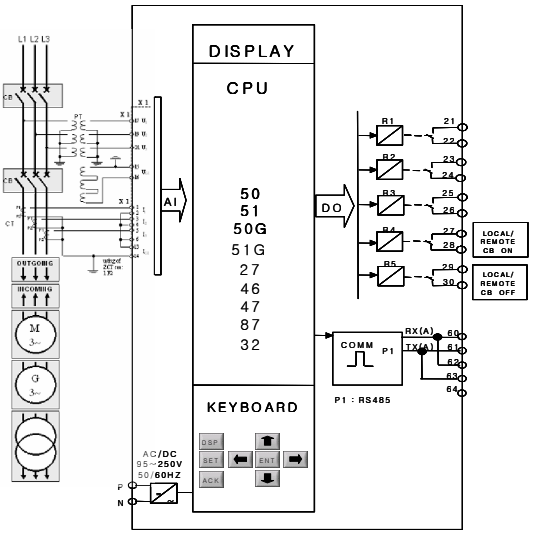


Figure 1: Operating system of digital protective relay for generator protection

2. 발전기 고장보호 알고리즘

본 논문에서 제작한 디지털 보호계전기의 발전기 고장보호에 사용되는 보호 알고리즘은 51, 51G/N, 27, 46, 47, 50G/N, 87, 32이며, 각 보호 요소별 고장보호 알고리즘을 개발하였다. 각 프로그램은 한국전기협동조합에서 제정한 KEMC 1120에 의거하여 기준값을 설정하였다. 발전 계통에 적용되는 예는 아래 Figure 1과 같다.

2.1 상 불평형 알고리즘

상 불평형 알고리즘은 삼상회로의 결상운전 또는 불평형 운전시 회로에 흐르는 역상전류를 검출하여 회로를 차단함으로써 기기를 보호하는 역상 과전류 계전기 요소이다. 이 계전기의 기능은 각 상 간의 심각한 위상 불균형, 그리고 정상순이 아니 역상순, CT 오결선등을 검출하는 기능을 함께 수행한다. 역상 과전류 계전기 요소의 구현에 대한 알고리즘과 흐름도는 Figure 2와 같다.

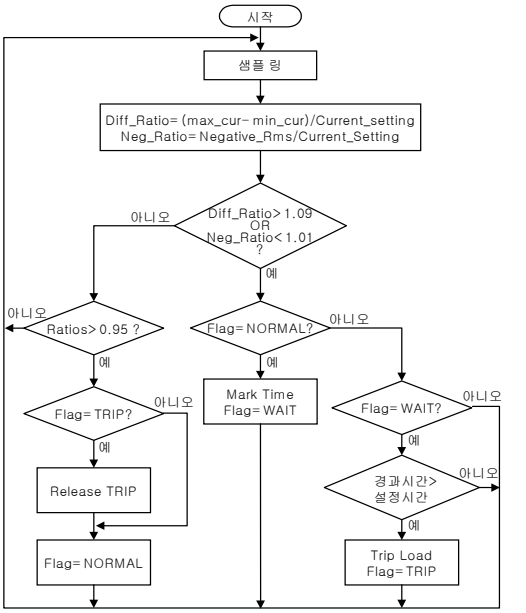


Figure 2: Algorithm of phase unbalance overcurrent relay function

그림에서 보는 바와 같이 역상전류 또는 전류입력차가 동작전류보다 큰 경우, 정한시 동작특성에 따라 일정시간을 기다린 후, 동작시간이 경과하면 부하차단 명령을 보낸다. 삼상회로의 결상운전 또는 불평형 운전을 검출하기 위한 방법으로 역상전류와 더불어 삼상 전류입력의 최대값과 최저값의 차를 이용하였다.

2.2 단락보호 알고리즘

기기의 단락 고장전류 및 과전류를 검출하여 그 해당 기기 및 선로를 보호하는 단락보호 알고리즘을 개발하였다. 과전류를 검출하기 위하여 각 상의 RMS값이 계산된다[3,4]. 각 상의 최소 값이 허용

기준치 이상일 때 단락고장으로 판정된다. 고장으로 판정되었을 경우 순시동작특성에 의해 즉시 고장신호를 발생시키게 된다.

Figure3 은 과전류 계전기 요소의 구현 알고리즘 흐름도로서 RMS값은 R, S, T 각 상의 전류 입력값 중 가장 큰 값이며, 순시고장전류는 동작치 정정을 통해 사용자가 선택하는 값으로, 고장 발생 여부를 가리기 위한 기준이 된다. 플래그는 과전류 계전모듈의 상태를 나타내는 것으로 RMS값과 순시고장전류의 비가 1.0을 넘는 경우, 고장이 발생한 것으로 순시 동작특성에 따라 즉시 부하를 차단시킬 것을 명령하고 운전상태는 고장발생으로 변경한다.

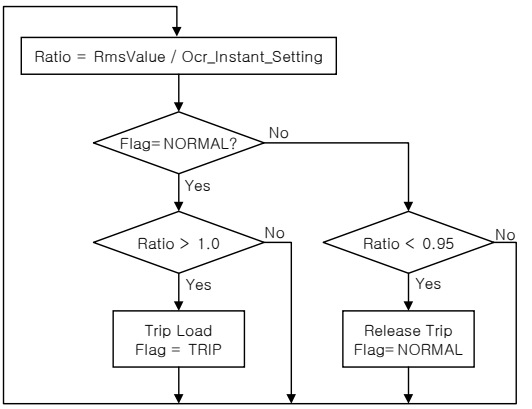


Figure 3: Algorithm of instantaneous overcurrent relay function

2.3 지락보호 알고리즘

발전기 보호 계전기의 지락보호 알고리즘은 1상, 2상 또는 3상 지락고장전류를 중성선 전류의 RMS값을 이용해 검출하여 회로의 지락고장으로부터 그 해당 기기 및 선로를 보호하는데 적용한다. 중성선 전류의 값이 기준치 이상일 때 지락으로 판정이 된다. 지락 과전류 계전기 요소를 구현하기 위한 알고리즘과 흐름도는 Figure 4와 같다. 그림에서와 같이 우선 중성선 전류입력이 순시동작 영역, 한시동작 영역 중 어디에 속하는가를 판별하는 것으로 시작한다. 동작특성상 먼저 순시동작 여부를 확인하기 위해 중성선 전류입력과 순시고장전류의 비를 구하여 그 비가 1.0보다 큰 경우 즉시 부하차단 명령을 보내고 지락과전류 계전모듈의 상태는 고장상태가 된다. 중성선 전류입력이 순시동작영역에 해당하지 않는 경우, 중성선 전류입력과 한시고장전류와의 비를 구하여 중성선 전류입력이 한시동작 영역에 해당하는가를 확인한다.

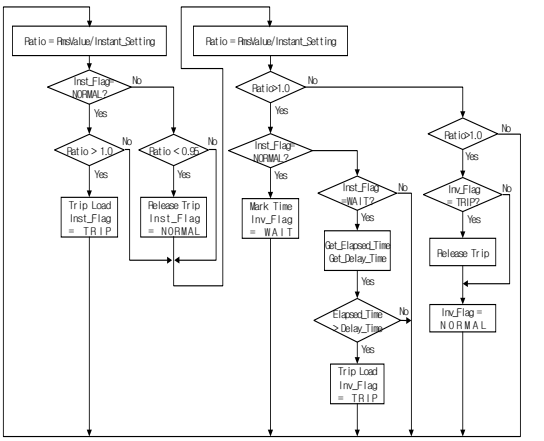


Figure 4: Algorithm of ground overcurrent relay function

2.4 역전력 보호 알고리즘

본 연구에서는 전압과 전류의 위상차 및 유효,무효 전력의 크기를 이용하여 디지털 역전력 보호 알고리즘을 개발 하였다. 전압 기준 전류의 위상이

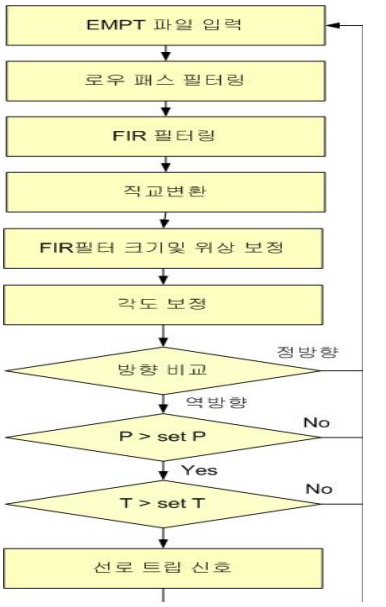


Figure 5: Flowchart of inverse power relay function

동작영역의 정정치 안에 들어오면 역방향으로 판별 동작한다. 유효,무효 전력의 크기가 정정치를 넘으면 동작한다. 역전력 알고리즘의 순서도를 도식하면 아래의 Figure 5와 같다.

3. Fault Recording 시스템

본 연구에서는 계전기가 사고를 인식하고 이에 대한 대처를 하는 과정을 분석하기 위해 사고 전후 전압과 전류 파형을 기록하는 사고파형 기록시스템을 설계하였다.

계전 및 계측을 실시간 계산하기 위하여, 고성능의 DSP CPU를 사용하고 사고파형을 저장할 수 있는 대용량의 비휘발성 메모리를 사용한다. 사고파형 및 고조파 분석을 하기 위하여 본 연구에서는 주기당 32샘플링으로 사고전후 5초내의 사고파형이 저장될 수 있게 하였다. 제어전원이 공급되지 않는 정전사고에도 저장 데이터를 온전히 유지하기 위해 flash 메모리나 NVRAM 메모리와 같은 비휘발성 메모리에 저장되어야한다.

Figure 6과 같은 구조의 A/D입력 링버퍼(ring buffer)를 구성하여 A/D 입력값을 저장하였다. 직교필터를 위해서는 주기당 샘플링수에 해당되는 크기의 버퍼를 사용하면 된다. 예를 들어 12샘플링 주파수를 가지면 각 상별로 12개의 크기의 링버퍼를 32샘플링인 경우에는 32개의 크기를 가지면 된다. 그러나 이러한 작은 크기의 버퍼를 가지고 사고파형기록 기능을 수행할 수 없다. 따라서 사고기록 저장 시간의 절반에 해당되는 양의 버퍼 크기를 사용해야 한다. 본 연구에서는 A/D입력 링버퍼 외에 직교필터의 출력인 실수 값과 허수 값을 저장할 수 있는 버퍼를 같은 크기로 사용하였다.

또한 수신된 사고 파형을 화면을 통해 보여주어 사고의 원인분석을 가능하게 하였다. 전송된 사고파형은 comtrade 파일 형태로 저장되어 다른 사고 분석장치나 계전기 테스터의 입력으로 사용할 수 있게 고려하였다. 사고에 대한 빠른 대처를 위해 시급히 사용자에게 사고내용을 알려야하므로 상위의 제어 시스템의 요청 없이도 디지털계전기로부터 unsolicited한 데이터 전송이 이루어진다. 또한 이때 대량의 사고데이터가 통신을 통해 전송하게 되므로 흐름제어(flow control)를 가진 안정된 modbus 프로토콜을 사용하였다[5].

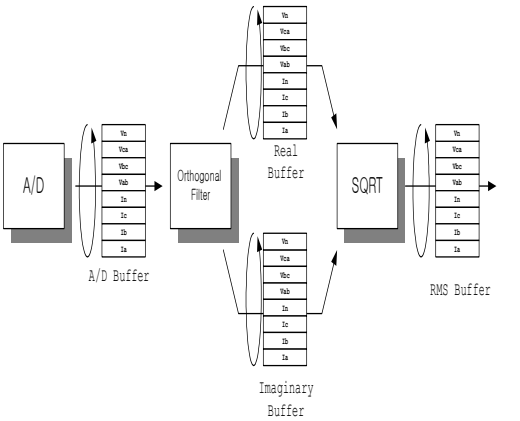


Figure 6: Buffer structure of fault recoding system

환경이 열악한 발전 계통에서 오동작을 방지하기 위하여 계전용 하드웨어는 내노이즈성 내환경성을 갖는 구조설계가 이루어 져야 하다. 또한 실시간의 계측 및 계전동작을 수행하고, 계측의 정교도를 높이기 위하여 고성능 마이크로프로세서, 변성기, 변류기의 설정 및 설계가 이루어져야 한다.

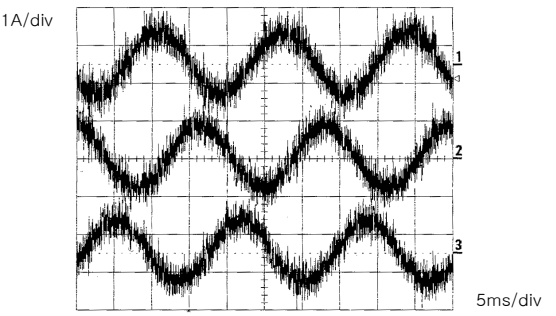
본 연구에서는 위의 요건에 맞는 디지털보호계전기 H/W를 설계 제작하였다. Figure 7은 제작한 디지털보호계전기의 H/W를 나타낸다.

Figure 7: Hardware of digital protective relay

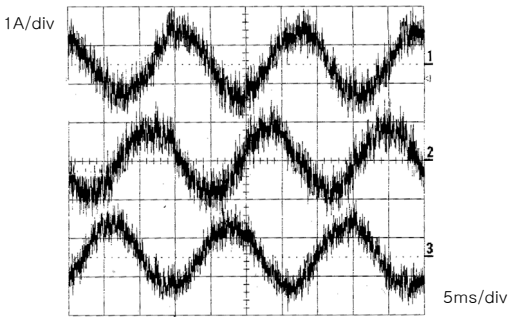
4. 실험 결과

본 논문에서는 fault recording 시스템을 이용하여 제안한 발전기 보호용 디지털 계전기의 타당성을 검증하기 위하여 한국전기협동조합에서 제정한 KEMC 1120에 의거하여 Omicron이라는 계전기 기능 시험 장비를 이용하여 다양한 실험을 하였다.

Figure 8은 3상 전류입력을 나타낸다. Figure 8(a)는 3상 전류의 회전 방향이 a-b-c가 되게 연결한 경우이고, Figure 8(b)는 a-c-b로 결선한 경우의 전류 파형이다. Figure 8(a)의 경우를 정상(positive sequence) 결선이라고도 하고 그림 Figure 8(b)의 경우를 역상(negative sequence) 결선이라고도 부른다. 디지털계전기의 전류센서 결선은 항상 정상 결선을 중심으로 이루어진다. 만약 역상 결선이 이루어진다면 역상 계전기가 동작하거나 전류와 전압 벡터의 회전방향이 반대이므로 전력 값이 오차가 크게 발생된다.



(a) positive sequence



(b) negative sequence

Figure 8: Positive and negative phase sequence

한시 과전류 계전 기능은 정한시 특성과 반한시, 강반한시, 초반한시 특성을 모두 요구한다. 인가전류에 따른 시간특성의 결과를 Figure 9에 나타내었다. 그림에서 보듯이 정격치의 200% 의 입력전류를 인가하고, 이때 동작시간의 허용오차는 공칭 동작시간의 ±5% 또는 35ms이내 범위를 만족하고 있음을 알 수 있다.

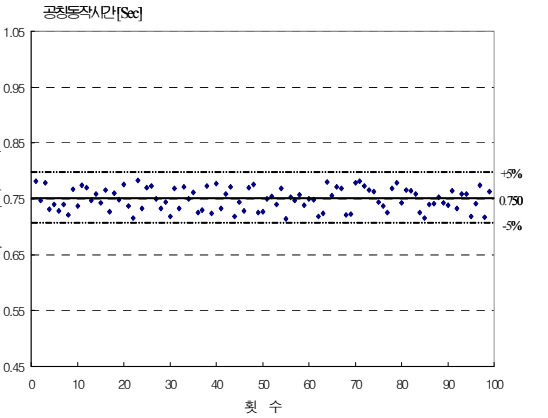


Figure 9: Operation time error of overcurrent relay function

Figure 10은 3상 중 한 상의 전류가 증가되어 과전류 보호계전기가 작동된 사고의 전압과 전류, 트립상태를 나타낸 것이다. 계전기 테스터(Omicron)를 이용하여 과전류 사고를 모의하여 약 -32[msec] (Figure 10(a)) 시점에서 사고 전류를 인가하였다.

과전류 계전기는 사고를 인식하고 설정한 과전류 계전기 세팅에 맞추어 2주기 후에(Figure10(c)) 트립 신호를 발생하였다. 사고파형 저장 기능을 수행하기 위해 먼저 사고 전후의 데이터를 비휘발성 메모리로 옮기고 사고가 발생됨을 통신과 알람(alarm)기능을 통해 사용자에게 알린다. 사용자가 확인을 원하는 경우에 사고파형 요청을 통신을 통해서 디지털계전기에 전송하고 디지털계전기는 저장된 사고파형을 상단 사용자 HMI (Human Machine Interface) 서버에 전송하게 된다.

Figure 11은 현장에서 발생한 지락사고의 전류 변화를 디지털계전기가 계측한 것이다. Figure

11 (a)의 c상의 전류가 사고로 인하여 감소되고 일정 시간 후에 지락 계전기가 동작하여 계전기 트립이 발생하였다. 계전기의 동작 시간이 사용자가 정의한대로 정확히 동작함을 확인하였다.

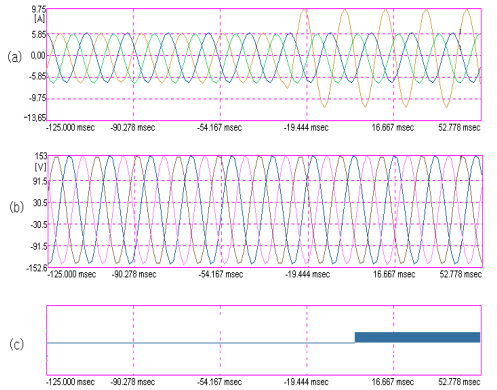


Figure 10: Overcurrent fault waveforms

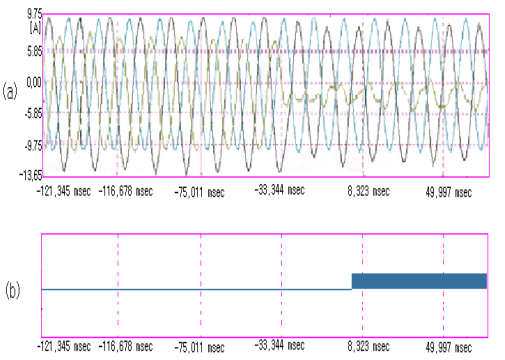


Figure 11: Ground overcurrent fault waveforms

5. 결 론

본 논문에서는 대용량, 고전압화 되는 발전기의 고장 예방을 위한 발전기 보호기능을 갖춘 디지털 보호계전기 설계에 관한 연구를 수행하였다. 디지털 계전기의 발전기 고장보호에 사용되는 고장보호 알고리즘을 개발하였다. 사고 전후 전압과 전류 파형을 기록하는 사고파형 기록시스템을 설계하였다. 또한 고성능 마이크로프로세서, 변성기, 변류기를 이용한 디지털보호계전기 H/W를 설계 제작하였다.

디지털 보호 계전 기능을 한국전기협동조합에서 제정한 KEMC 1120에 의거하여 실험을 수행한 결과 계전 동작시간이 모두 ±5% 및 35ms 이내로 동작하여 실험 기준을 만족함으로써 디지털계전기의 발전기 보호 기능을 검증할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 지원에 의하여 수행되었음. (R-2007-3-097)

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2009-C1090-0903-0007)

참고문헌

[1] R. C. Patterson, "A quantum leap into the IED age", The 39th Rural Electric Power Annual Conference, pp. (B1)-1-5, 1996.

[2] S. Ovcharov, S. Vichev, and P. Yakimov, "Investigation on Protective Relays Testing Methods", Electronics Technology: Concurrent Engineering in Electronic Packaging, 2001. 24th International Spring Seminar on, pp. 243 -247, 2001.

[3] E. Y. Hamid and Z. I. Kawasaki, "Wavelet packet transform for RMS values and power measurements", IEEE Power Engineering Review, vol. 21, Issue 9, pp. 49-51, 2001.

[4] L. G. Durnte, P. K. Ghosh, "Active power measurement in nonsinsoidal environments", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, Issue 3, pp. 1142 -1147, Aug. 2000.

[5] G. Bucci and C. Landi, "On-line digital measurement for the quality analysis of power systems under nonsinusoidal conditions", IEEE Trans. on Instrument and Measurement, vol. 48, Issue 4, pp. 853-857, August, 1999.

저 자 소 개

장낙원 (張樂元)

1967년 11월 7일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1992~1995년 삼성전자 AMLCD 사업부. 1999~2003년 삼성전자 반도체연구소. 2003년 9월~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수

박정도 (朴正道)

1969년 10월 6일생. 1992년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2001년 3월~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 조교수

이성환 (李聖煥)

1966년 8월 10일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1995~2001년 현대중공업 기전연구소. 2001년 3월~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수