

## Predictions of Short-Circuit Characteristics of Rotor Windings in a Generator using Electromagnetic Analysis

金東勳<sup>†</sup> · 宋命坤<sup>\*</sup> · 朴重信<sup>\*\*</sup> · 李東映<sup>\*\*\*</sup>

(Dong-Hun Kim · Myung Kon Song · Jung-Shin Park · Dong-Young Lee)

**Abstract** - As the increasing of capacity and technology of power facilities, rotating machines such as turbine generators and water turbines are getting higher at capacity but smaller in size. Thus the monitoring and diagnosis of generators for fault detection and protection has attracted intensive interest. Most of electrical faults of rotating machines appear in their windings. 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, the magnetic flux patterns in air-gap of a generator under various fault states as well as a normal state are simulated by a conventional FEM tool. These results are successfully applied to detection and diagnosis of the short-circuit condition in rotor windings of a high capacity generator.

**Key Words** : Rotating Machine, Short Circuit, Electric Fault, Rotor Winding, Finite Element Analysis

### 1. 서 론

전력설비 용량의 증가와 기술의 진보에 따라 터빈 발전기, 수차발전기, 대형 전동기 등의 회전기가 대용량화, 고전압화 됨에 따라 발전기 고장 예방을 위한 진단기술이 중요시되고 있다. 이들 회전기 고장의 대부분은 권선의 소손에서 발생하며 전기 절연부 중에서 가장 중요한 부분은 고정자의 전기자 권선과 회전자의 계자 권선이다. 고정자와 회전자의 절연 고장은 복구하는데 장시간이 요구되므로, 회전기의 예측진단에 따른 정비와 더불어 고장을 미연에 감지하여 불시정지에 따른 경제적인 손실을 막기 위해서는 상시감시 시스템이 요구된다.

발전기의 고장 진단 방법의 일례로는 운전 중인 대용량 회전기에 커플러(Couplers)를 설치하여 권선 사이에서 발생하는 부분방전을 감시함으로써 고정자 권선의 고장진단을 수행하는 방법이 사용되고 있다. 이러한 절연열화 상태를 진단하는 연구는 1980년대 후반부터 본격적으로 시작되었으며, 초기에는 부분방전분석기(Partial Discharge Analyzer: 이하 PDA)를 이용하여 수력 발전기의 고정자 권선의 고장진단을 수행하였으나, 1990년대 초부터는 터빈발전기 분석기(Turbine Generator Analyzer: 이하 TGA)가 개발되어 화력 발전기에 확대 적용되고 있다[1-3].

여자 권선의 경우에는 보다 쉬운 방법으로 공극에서의 자속밀도를 홀 센서나 픽업 코일(Pick-up Coil)로 측정된 후 이를 분석하여 고장을 예측하는 방법이 사용되고 있다. 동기 발전기의 공극에서 검출되는 자장패턴을 이용하여 발전기 권선의 고장유무를 진단하기 위해서는 고장의 종류에 따른 자장패턴을 미리 파악하는 것이 필수적이고, 또한 운전 중인 발전기를 이용하여 고장패턴을 알아낸다는 것은 불가능한 상황이므로 정밀 전자장해석을 이용한 여자 권선의 고장 시뮬레이션이 유일한 해결책으로 대두 되고 있다.

기존 발전기 고장 진단 방법은 실제적인 고장 발생 후에 그 결과를 측정하여 진단하는 방법이거나 상시 감시시스템의 경우에도 정상상태와 고장상태를 구분할 뿐, 고장의 종류 및 그 심각성을 알기는 어렵다. 이에 본 논문에서는 발전기의 고장에 대한 자속패턴을 수치적으로 계산하여 실험으로 얻기가 불가능한 실제 고장 시 발생하는 여러 가지 종류의 자속형태를 데이터베이스화 하고, 이를 기준으로 발전기 고장 시 신속한 감시 및 진단이 가능한 방법을 제안하고자 한다. 우선 발전기의 고장진단을 위해 고장 시 발생하는 자속패턴을 상용 전자장해석도구인 OPERA를 이용하여 수치적으로 계산하여 도출하는 방법을 사용하였다[4,5]. 발전기의 무부하 운전 상태에서 측정된 공극 자속파형과 이에 대한 전자장 해석결과를 비교하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성을 검증 하였다. 이를 바탕으로 한 개의 회전자 슬롯 내에서 발생할 수 있는 다양한 유형의 회전자 단락사고에 대한 2차원 전자장 해석을 수행하여 사고 시 발생하는 다양한 자속패턴을 도출하여 비교분석하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 고장의 종류를 파악하는데 걸리는 노력 및 시간을 대폭 절감할 수 있기 때문에 향후 일반화 될 것으로 사료된다.

† 교신저자, 正 會 員 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수  
E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr

\* 正 會 員 : 벡터필드코리아(주) 책임연구원

\*\* 正 會 員 : 위덕대 전기공학부 조교수

\*\*\* 正 會 員 : 위덕대 전기공학부 부교수

接受日字 : 2006年 9月 5日

最終完了 : 2006年 10月 14日

## 2. 대용량 동기발전기의 유한요소 모델링

### 2.1 대용량 동기발전기 사양

대용량 동기발전기에 대한 2차원 정밀 전자장해석을 수행하기 위하여 먼저 대용량 동기발전기의 기계적 치수 및 전기적 파라미터들을 표1에서와 같이 조사하였다. 이를 기반으로 발전기 해석 모델 구축을 위한 2차원 도면을 작성한 후, 이 도면을 바탕으로 상용 전자장 해석도구를 이용하여 유한요소(finite element) 모델을 구축하였다[4,5]. 발전기 정상상태 운전 및 회전자권선의 다양한 위치에서 발생하는 단락사고 유형을 고려하여 각각의 조건에 따라 유한요소해석을 수행하여 공극의 자속패턴의 변화를 모사하였다.

그림 1은 전자장 해석에 사용된 비둘극형 2극 회전자를 가지고 있는 245 kVA 동기발전기에 대한 2차원 도면을 제시하고 있다. 그림 2는 전기자 및 회전자 권선의 슬롯 배치 형태를 나타내고 있으며, 전기자 권선은 2층권 형태를 취하고 있음을 볼 수 있다.

### 2.2 유한요소 해석모델

2.1에 주어진 발전기 파라미터 및 2차원 도면을 참고하여 그림 3과 같이 정밀 전자장해석을 수행하기 위한 유한요소 모델을 구축하였다. 해석에 사용된 대용량 동기발전기는 총 32개의 슬롯과 2극으로 구성된 회전자를 가지고 있으며 따라서 한 자극이 차지하는 회전자 슬롯 수는 16이다. 또한 회전자 각 슬롯에는 8개의 권선이 한 묶음으로 1 turn을 구성하고 있으며 이러한 11개의 계자 권선이 절연층을 사이로 적층되어 있다.

각 계자권선에 공급되는 여자전류는 1594 A이며, 각 슬롯에 위치하고 있는 11개의 계자권선은 직렬로 연결되어 있다. 한편 전기자는 총 60개로 구성된 전기자 슬롯을 가지고 있으며 3상 2극에 해당하는 전기자 권선 배치를 하고 있다. 해석에 고려된 동기 발전기의 대칭성을 고려하여 2차원 유한요소해석은 그림 3과 같이 전체 모델의 반을 취하여 수행하였다. 해석 시 회전자 및 고정자 철심의 투자율은 사용재료의 B-H 곡선을 입력하여 철심재료의 비선형성을 고려하였다

표 1 유한요소해석에 사용된 동기발전기 사양  
Table 1 Specification of a synchronous generator considered for finite element analysis

사양	정격용량	245 kVA	정격전압	18 kV
	회전속도	3,600 rpm	공극	57 mm
	고정자내경	1072 mm	회전자외경	958 mm
고정자	전기자 슬롯수	60	전기자 층수	2 층권
	슬롯당 권선수	2 turns	극수	2 극
회전자	여자전류	1594 A	여자전압	355 V
	권선 수	11 turns, 8 group	축 길이	957.5 mm

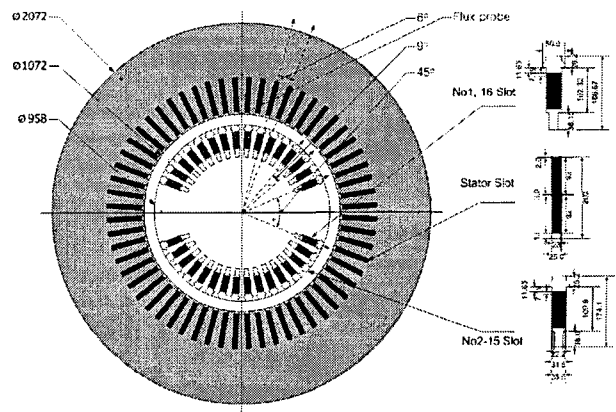


그림 1 대용량 발전기 2차원 도면  
Fig. 1 2-D drawing of a high capacity generator

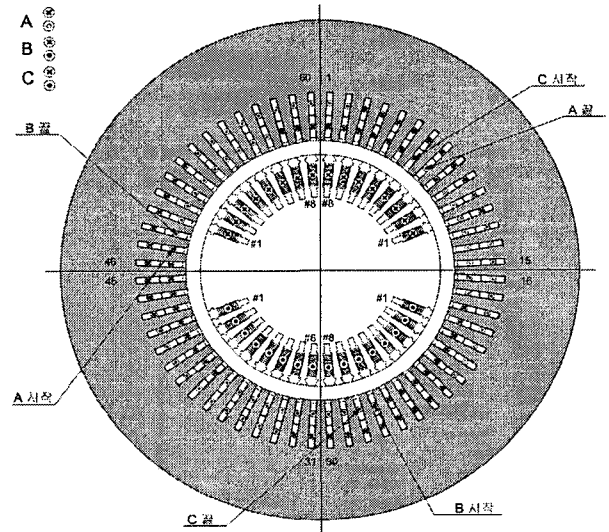


그림 2 전기자 및 회전자 권선도  
Fig. 2 Electrical connections of stator and rotor windings

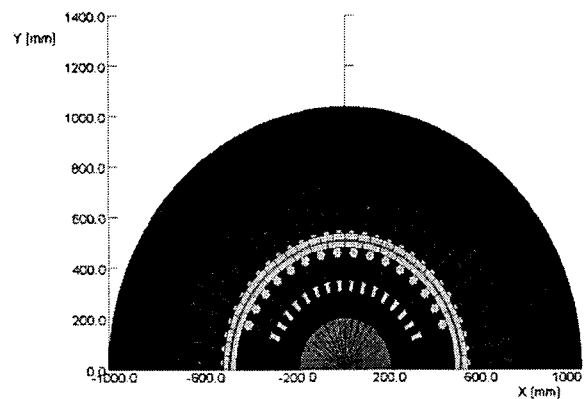
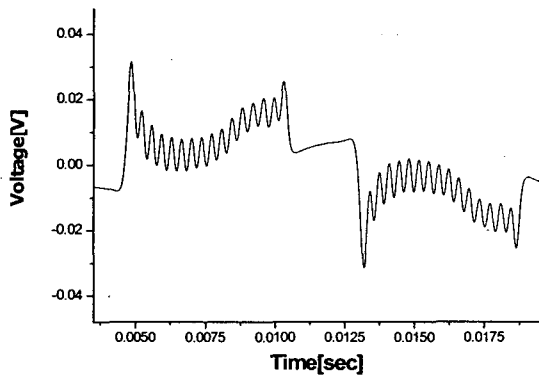


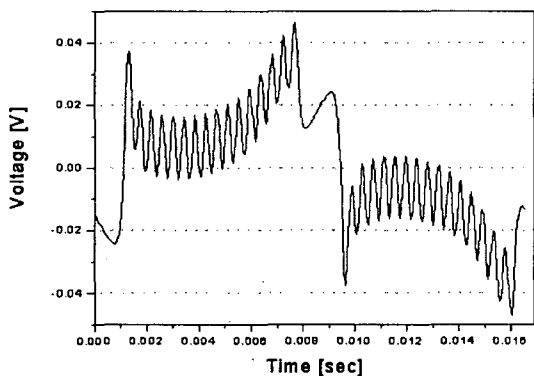
그림 3 1/2 유한요소 해석모델  
Fig. 3 1/2 finite element analysis model

3. 단락특성 해석결과

우선 사용한 상용 전자장 해석도구의 신뢰성을 검증하기 위하여 무부하 정상상태 운전에서 전자장 수치해석을 수행하여 발전기의 공극에서 발생하는 자속밀도분포를 구하였다. 계산된 자속밀도분포는 실제 Flux Probe의 위치에서 검출되는 유도전압으로 환산하여 실제 시험을 통해 측정된 전압파형과 비교하였다. 그림 4에서는 실제 대용량 발전기의 공극 자속을 Flux probe를 통하여 측정한 측정치와 동일한 발전기 운전조건 하에서 전자장 수치해석에 의해 도출한 공극에서의 자속밀도의 파형을 보여준다. 그림 4에서 보는 바와 같이 측정파형과 해석결과 파형은 측정된 전압의 최대치에서는 차이를 보이나, 서로 매우 유사한 파형 형태를 가짐을 알 수 있다. 본 논문에서는 정상상태와 단락사고 시의 공극에서의 자속파형의 상대 비교를 통하여 회전자권선의 단락사고를 감지하는 데 목적이 있으므로, 측정파형과 해석파형사이의 전압의 절대치 비교 보다는 두 파형의 상호형태 비교에 의미를 부여하고 있다.



(a) 측정파형



(b) 해석파형

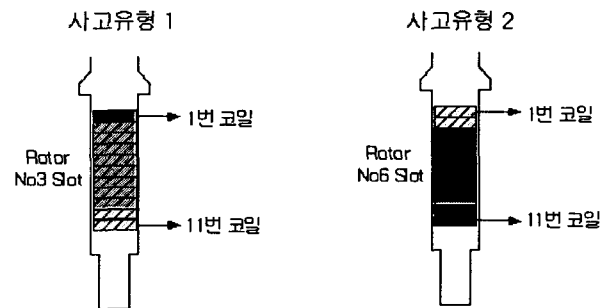
그림 4 공극 자속 파형의 비교  
Fig. 4 Comparison of flux patterns in air-gap

위의 공극자속의 비교검증을 통하여 구축된 전자장 해석 모델의 신뢰성을 확보한 후, 회전자 권선의 단락사고를 모사한 전자장 수치해석을 수행 하였다. 회전자권선의 단락사고 유형은 일반적으로 수많은 경우의 수를 가지고 있으나 본

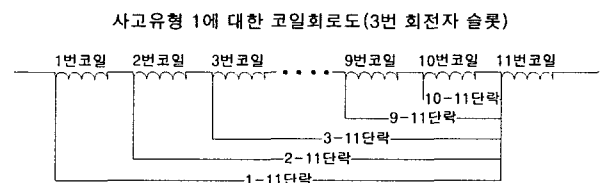
논문에서는 이러한 단락사고 유형을 데이터베이스화하기 위한 선행연구로서 우선 한 개의 슬롯 내에서 발생할 수 있는 다양한 단락사고에 대한 해석을 수행하였다. 그림 5는 한 개의 회전자 슬롯 내에서 발생할 수 있는 2가지 대표적인 사고유형을 보여준다. 사고유형 1에서는 3번 회전자 슬롯 내에서의 11번 코일을 기준으로 나머지 10개의 코일 사이에 순차적으로 단락되는 코일의 수를 증가하면서 발생하는 단락사고들을 모사하였으며, 사고유형 2에서는 회전자 6번 슬롯 내에서 서로 이웃하는 두 코일사이에 발생하는 11가지 단락사고의 경우를 고려하였다.

그림 6은 정격속도인 3600 rpm으로 회전하는 발전기 내부에서 발생하는 자속의 경로를 나타내고 있다. 발전기 내부에서 자기장분포가 회전자의 회전방향(반시계방향)의 반대쪽으로 밀려서 따라 도는 형태를 볼 수 있는데, 이는 전기자 및 회전자를 구성하고 있는 철의 전기 전도도에 의해 발생하는 속도기전력에 의한 와전류에 의해 회전자계에 반하는 방향으로 발생하는 자기장에 기인한 것으로 사료된다. 이러한 현상은 회전자 및 전기자의 철심 적층을 해석상 고려하지 않아 실제보다 크게 나타나는 것으로 판단된다.

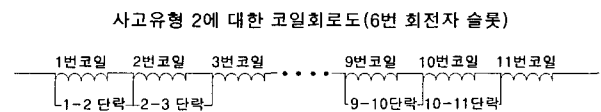
그림 7에서는 사고유형 1의 각각의 경우에 발생하는 공극에서의 자속패턴들을 무부하 운전 시 발생하는 자속패턴과 비교하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 단락권선의 개수가 순차적으로 증가함에 따라 공극 자속의 전압이 감소됨을 볼 수 있다. 그러나 단락 권선의 개수가 작은 경우(그림 7(a)), 전압 감소치가 정상상태의 전압에 비해 큰 차이 없는 것을 볼 수 있다.



(a) 슬롯 별 단락사고 유형



사고유형 1에 대한 코일회로도(3번 회전자 슬롯)



사고유형 2에 대한 코일회로도(6번 회전자 슬롯)

(b) 단락사고 코일 회로도

그림 5 회전자 권선의 2가지 사고 유형  
Fig. 5 Two fault patterns of rotor winding

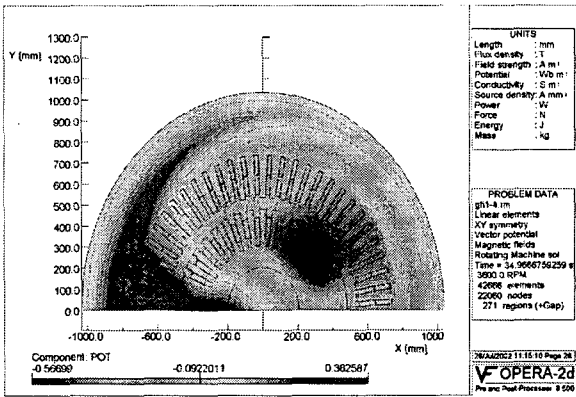
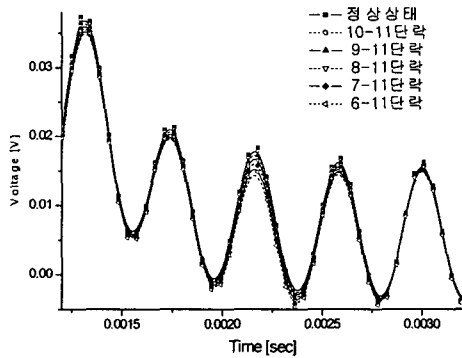
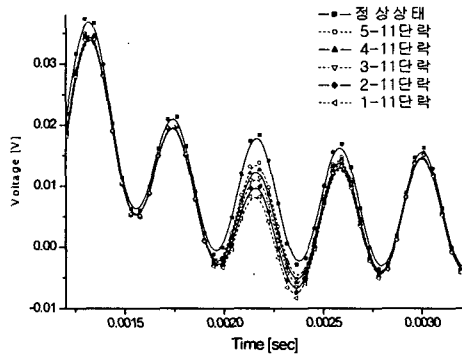


그림 6 발전기 내부의 자기장 분포  
Fig. 6 Magnetic field distribution in generator



(a) 10번에서 6번 코일과 11번 코일사이의 단락

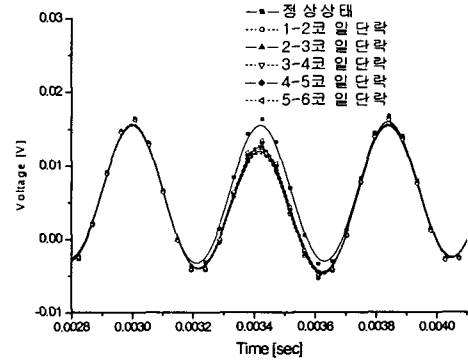


(b) 5번에서 1번 코일과 11번 코일사이의 단락

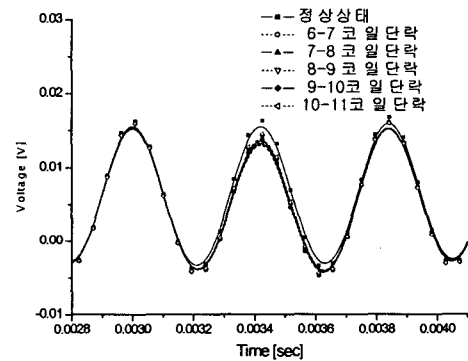
그림 7 사고유형 1에 해당하는 공극 자속 파형 비교  
Fig. 7 Comparison of flux patterns in air-gap corresponding to the fault case 1

그림 8은 사고유형 2에 대한 공극에서의 자속파형을 정상상태와 비교하고 있다. 사고유형 2는 회전자 슬롯 6번 내에서 2개의 이웃하는 회전자권선들을 단락시키는 형태로서, 단락 위치를 11번 코일에서 2번 코일까지 변화 시킨 것이다. 이처럼 동일 개수의 회전자권선 단락사고가 발생하는 경우, 그 단락 위치가 공극에서 가까운 경우 일수록 공극 자속의 전압 감소 영향이 공극에서 먼 경우에 비해 크게 나타날 수 있다.

그림 7과 그림 8에서와 같이 정상상태의 공극자속 파형에 비해 회전자 슬롯 내의 특정 코일들 사이의 단락사고 발생 시 감지되는 공극자속 파형이 작아지는 이유는, 일부 계자권선의 단락으로 인해 전체 계자권선의 기자력(magnetic motive force)의 감소를 초래하고 이는 결과적으로 공극에서 만들어지는 전체 계자자속의 값을 작게 하기 때문이다.



(a) 이웃하는 1번에서 6번 코일 사이의 단락



(b) 이웃하는 6번에서 11번 코일 사이의 단락

그림 8 사고유형 2에 해당하는 공극 자속 파형 비교  
Fig. 8 Comparison of flux patterns in air-gap corresponding to the fault case 2

#### 4. 결 론

본 논문에서는 발전기의 고장진단을 위해 회전자 단락사고에 대한 2가지 사고유형을 모사하여, 다양한 회전자 단락사고에 대한 2차원 전자장 과도해석을 수행하였다. 무부하 운전 시 회전자 권선 단락사고에 대한 해석결과 각 슬롯에서 발생하는 단락사고 형태에 따라 공극에 발생하는 자속패턴이 서로 다른 형태를 가짐을 알 수 있었다.

본 연구를 기초로 하여 발전기 운전 중 실제 발생하는 회전자 권선 단락사고에 대한 고장 판단에 활용하기 위해서는 무부하조건 및 부하조건에서 발생 가능한 다양한 단락사고에 대한 공극자속 파형의 데이터베이스화가 선행되어야 하며 이를 위한 향후 지속적인 연구가 요구된다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-068)주관으로 수행된 과제임.

**참고 문헌**

- [1] J.P. Sturgess, et al., "Finite-element simulation of a generator on load during and after a three-phase fault," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 7, pp. 787-793, Dec. 1992.
- [2] R. Wamkeue, et al., "Line-to-line short-circuit-based finite-element performance and parameter predictions of large hydrogenerator," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 18, pp. 370-378, Sept. 2003.
- [3] M. Touma-Holmberg and K. Srivastava, "Double winding high-voltage cable wound generator: steady-state and fault analysis," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 19, pp. 245-250, June 2004.
- [4] Markus Zahn, Electromagnetic Field Theory, John Wiley & Sons, pp.331, 1979
- [5] Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual". Vectorfields, v9.0, 2003

**저 자 소 개**



**김 동 훈 (金 東 勳)**

1968년 2월 26일생. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1998.3~2001.2 LG전자 디지털어플라이언스 연구소 선임연구원, 2001.3~2002.2 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부 연구교수, 2002.3~2002.8 기초전력원 특별연구원, 2002.9~2004.2 영국 Southampton대학 ECS Research Fellow, 2004.3~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수  
 Tel : 053-950-5603  
 Fax : 053-940-8603  
 E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr



**송 명 곤 (宋 命 坤)**

1970년 04월 09일생, 1993년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 백터필드코리아(주) 책임연구원  
 Tel : 054-223-2431  
 Fax : 054-223-2430  
 E-mail : koni@vfk.co.kr



**박 중 신 (朴 重 信)**

1956년 3월 3일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2005년~현재 위덕대 전기공학부 조교수  
 Tel : 054-760-1665  
 Fax : 054-760-1669  
 E-mail : parkjs@uu.ac.kr



**이 동 영 (李 東 映)**

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1990년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년~1986년 삼성반도체통신(주) 사원, 1995년~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원, 1996년~1997년 한전 전력연구원 선임연구원, 1997년~현재 위덕대학교 전기공학과 부교수  
 Tel : 054-760-1300  
 Fax : 053-760-1075  
 E-mail : dyyi@uu.ac.kr