

2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 동기발전기 여자제어시스템

(A Study on Excitation System for Synchronous Generator Using Two State Three Phase PWM AC/DC Converter)

이상훈* · 이동희 · 안진우

(Sang-Hun Lee · Dong-Hee Lee · Jin-Woo Ahn)

요 약

동기발전기의 출력전압은 여자 시스템의 계자 전류 제어에 의해 일정하게 유지된다. 현재 대부분의 발전기 여자의 여자전류제어를 위해 사용되는 AVR 시스템의 AC/DC 컨버터 부는 출력전압 제어가 가능한 위상제어 컨버터나 출력전압을 제어할 수 없는 다이오드 정류기와 DC/DC 컨버터를 결합하여 사용하고 있다. AC/DC 전력 변환장치로서 위상제어 컨버터나 출력전압을 제어할 수 없는 다이오드 정류기의 경우, AVR 시스템의 전력을 공급하는 모선의 역률저하 및 저차 고조파 발생의 문제점을 야기 시키게 된다. 본 논문에서는 동기발전기의 여자 전류 제어를 위해 사용되는 AVR 시스템 설계에 있어 단위역률 동작이 가능한 Boost형 AC/DC 컨버터와 모선의 부하변동에 속응성 있게 동작할 수 있는 전류 제어형 Buck 컨버터를 결합한 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터에 대해 연구하였다. 제안된 AC/DC 컨버터를 시뮬레이션 한 결과 Boost 컨버터의 경우 단위 역률 동작 및 출력 DC 전압의 Boost 동작이 원활히 이루어졌으며, Buck 컨버터의 경우 다른 위상제어 컨버터에 비해 응답시간이 개선 되었음을 알 수 있었다.

Abstract

The terminal voltage of a synchronous generator is maintained by the field current control of excitation system. Generally AC/DC converter which is component of AVR(Automatic Voltage Regulator) system for excitation current control is connected to diode rectifier and DC/DC converter system. In the case of diode rectifier system of phase controlled converter as AC/DC converter have low power factor and harmonics of lower order in the line current. In this paper, two stage three phase PWM AC/DC converter is studied to solve these problems. The characteristics of a proposed converter reduces the harmonics and reactive power of the distribution line and has fast dynamic response in transient period using boost converter and current control mode buck converter.

The proposed method is verified by the computer simulation and experimental results in prototype generation system.

Key Words : Synchronous Generator, AVR(Automatic Voltage Regulator), Two state three phase PWM converter, Power factor, Harmonics

* 주저자 : 경성대학교 공학기술연구소 연구원

Tel : 051-626-4773, Fax : 051-624-5980, E-mail : purme417@empal.com

접수일자 : 2007년 1월 12일, 1차심사 : 2007년 1월 16일, 심사완료 : 2007년 1월 30일

1. 서 론

최근 전기에너지의 효율성과 안전성에 따라, 선박 및 항공기뿐만 아니라 수 백[Kw]급 건물의 비상용 전원, 군사용 전원 및 낙도용 전원으로 사용되는 비상용 발전기 시스템은 대형 발전기의 건설이 어려운 오지의 발전 시스템에 이르기까지 그 사용이 크게 확대되고 있다. 이러한 발전 시스템의 안정적인 전력 공급은 엔진이나 동기 발전기의 제어장치 성능에 크게 의존한다. 선진 외국의 경우 전력수용의 증가로 피크부하에서 병렬 운전 간 부하 부담, 부하 추종성, 고품질의 전력공급에 따른 속응성 그리고 신뢰성 있는 제어시스템의 필요성에 따라 디지털 방식으로 전환되어 있는 추세이다. 전력산업의 발달과 더불어 전력장비의 신뢰성에 대한 요구가 점점 높아지고 있다. 현재 발전기의 여자기를 제어하기 위한 발전기용 AVR(Automatic Voltage Regulator)은 실제 여자기에 여자전원을 공급하기 위한 전력변환 회로로서 TCR(Thyristor Control Rectifier)방식을 사용하고 있다.

TCR 방식의 경우, 적용성과 신뢰성에 있어 다른 AVR 시스템에 비해 장점을 가지는 반면에 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

첫째, 최근의 산업발달에 따라 건물자동화, 사무자동화, 정보통신용전원 등 전력변환소자 사용의 급증으로 배전계통에 연결된 비선형 부하에 의하여 파형의 일그러짐이 발생하여 다른 부하에 영향을 미치게 된다. 비선형 부하, 특히 전력변환 부하장치에서 발생하는 고조파 전류는 전원계통의 전압왜곡을 일으키며 이로 인하여 다이리스터의 제어각을 정확하게 설정할 수 없어 오동작의 원인이 되기도 하고 정밀한 출력 전압 제어를 할 수 없다. 또한 TCR 자체가 AC 전원 단에서 저차 고조파의 발생 및 역률 저하 등의 문제점을 가진다. 따라서 이를 개선하기 위해 교류입력 측과 직류출력 측에 큰 용량의 필터를 필요로 하게 되어 전력변환장치의 부피를 크게 할 뿐만 아니라 경제성을 떨어뜨린다[1].

80년대 초 Schlecht가 전류와 전압의 귀환루프를 통한 다이내믹한 고역률 AC/DC 컨버터 제어기를 제안한 이후[2], 최근에는 단위 역률을 구현하는 3상

PWM AC/DC 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되어 산업계에서 직접 적용하고 있다. 이와 같이 단위 역률을 구현하는 PWM 컨버터는 위상제어 컨버터나 다이오드 정류기에 비해 보다 복잡한 제어기와 고속으로 스위칭할 수 있는 반도체 소자가 필요하다는 단점이 있지만, 최근 고속 성장하고 있는 마이크로컨트롤러(Micro controller)의 출현과 반도체 기술의 성장으로 이와 같은 단점이 거의 극복되어졌다.

둘째, 발전기 출력 전압을 빠르게 제어하려면 AVR의 속응성이 좋아야 한다. 그러나 일반적인 정지형 TCR 제어방식의 전원으로 발전기 출력을 사용하기 때문에 입력전원이 3상일 경우 최대 180[Hz]의 제어주기를 가질 수 있어 TCR 전력변환기의 빠른 응답 특성을 얻기가 어렵다[1,3].

이와 같이 TCR을 이용한 AVR 시스템의 단점을 극복하기 위하여 다이오드 정류기와 IGBT를 이용하여 AC/DC 컨버터를 구성한 DAVR(Digital Automatic Voltage Regulator)에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나 이와 같은 DAVR의 경우 AC/DC를 변환을 위해 출력전압을 제어할 수 없는 다이오드 정류기를 주로 사용하므로 AC 전원 단에서 저차 고조파의 발생 및 역률 저하 등의 문제점을 가진다.

본 논문에서는 TCR을 이용한 AVR 시스템의 저차 고조파 발생 및 역률저하와 출력전압의 속응성을 개선하기 위하여 기존의 다이오드 정류기에서 단위 역률제어와 Boost 기능을 알 수 있도록 1단 컨버터를 설계하고, 1단 컨버터에서 출력된 전압을 조절할 수 있는 Buck 컨버터를 2단으로 설계하였다. 기존의 3상 PWM AC/DC Boost 컨버터의 경우, 주어진 입력전압에 대해 직류 출력전압의 승압 또는 강압에 따라 크게 Boost형 컨버터와 Buck형 컨버터의 두 가지 형태로 나눌 수 있다[4-6]. 제안된 3상 Boost형 컨버터는 DC-Link 단에 Boost 컨버터를, 컨버터 교류 측에 필터 커패시터와 부스트 인덕터를 추가시킨 구조로 되어 있다. 제안된 컨버터의 입력전류는 다이오드 브릿지 회로와 부가적으로 연결한 스위치를 통해 흐르게 된다. 이는 기존의 제어가 없는 다이오드 브릿지형 정류기와 비교하여 큰 용량의 필터 설계 없이 단위 역률 제어가 가능하며, AVR 시스템의 속응성을 개선하기 위하여 Boost 컨버터의 동작특

2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 동기발전기 여자제어시스템

성을 이용하여 초기 높은 여자 전압 인가를 가능하게 한다. 3상 AC/DC 컨버터에 의해 출력된 DC전압은 부하변동에 의한 발전기 출력전압의 속응성 있는 제어와 계자전류 제어를 위해 전류 제어형 Buck 컨버터를 적용하고자 제안하였다.

이와 같은 제안된 발전기 여자 시스템 제어를 위한 AVR 시스템에 대한 타당성과 응답성을 검증하기 위하여 회로 해석 프로그램인 PSIM을 이용해 시뮬레이션하였고, 소형 발전기 시스템에 적용된 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

2. 동기 발전기 여자 시스템

2.1 동기발전기 여자 시스템의 종류

동기발전기 여자시스템의 제어 기능에는 전압 제어, 무효전력 제어, 계통 안정도 향상 등을 포함하고 있다. 또한 보호 기능에서는 동기발전기와 여자시스템, 타 설비들이 정격용량의 한계를 벗어나지 않도록 보호하는 기능을 포함하고 있다.

그림 1은 동기발전기 제어시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다. 동기 발전기 제어시스템은 크게 모션의 전압, 전류 및 주파수를 측정하는 센서부와 측정된 데이터를 이용하여 실제 제어하는 제어부 그리고 실제 여자를 구동하는 전력변환부로 구성되어 있다. 구성도에서 AVR은 다양한 제어기능과 보호 기능을 포함하고 있다.

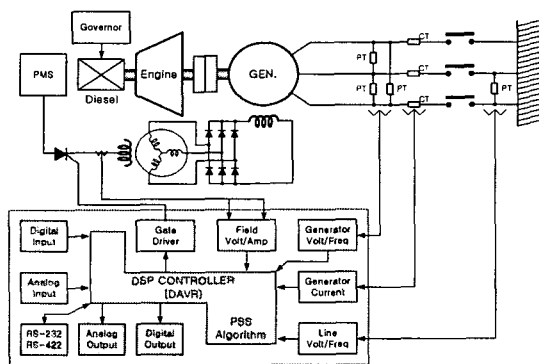


그림 1. 일반적인 동기 발전기 시스템
Fig. 1. A typical synchronous generator system

발전기의 여자시스템은 크게 정지형 여자시스템과 교류 여자시스템으로 구분될 수 있다. 정지형 여자시스템은 발전기의 출력 전압을 이용하여 여자전원으로 공급하는 방식으로 다이리스터 정류기의 점호각을 제어함으로써 계자권선에 직류전류를 인가하는 방식이다. 그림 2는 정지형 여자시스템의 한 형태를 나타내고 있다.

이 방식은 구성이 간단하다는 점과 여자가 없어도 지연을 제거할 수 있는 장점이 있지만 발전기의 출력 전압을 여자기 전원으로 공급하기 때문에 출력단의 다양한 사고에 직접적인 영향을 받는다는 단점이 있다. 교류 여자시스템은 여자기 출력 제어방법, 여자기 전원 공급 방법 그리고 정류기의 배치 위치에 따라 여러 가지 형태로 분류될 수 있다. 그림 3은 교류 여자 시스템의 한 형태인 브러쉬리스형 교류여자 방식을 나타내고 있다.

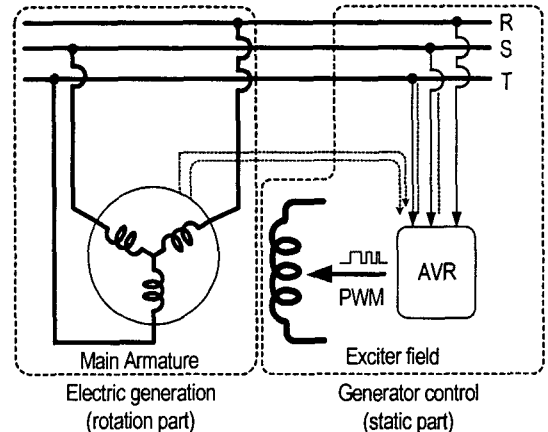


그림 2. 정지형 발전기 여자 시스템
Fig. 2. Static exciter type for AC generator

회전 전기자형 교류발전기를 주발전기 회전축에 직결하고 교류발전기의 출력을 동일한 회전축에 부착된 정류기를 통해 주발전기의 계자권선에 직류전류를 공급하는 방식이다. 이 방식은 고장 시 보수에 대한 어려움이 있고 동일한 축 상에 직결되어 있기 때문에 축이 길어지는 단점이 있다. 그러나 정지형 여자시스템과 달리 독립된 전원 확보로 안정된 여자전원을 공급할 수 있는 장점이 있어 비상용 동기발전기 여자시스템에 널리 적용되고 있다[7-9].

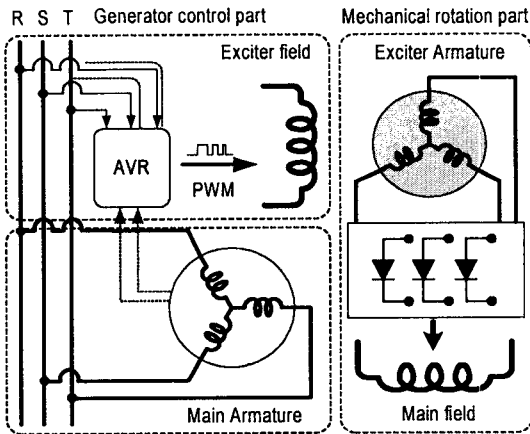


그림 3. 교류형 발전기 여자 시스템
Fig. 3. AC exciter type for AC generator

2.2 여자기 제어 위한 AVR 시스템

제안된 3상 AC/DC 컨버터의 효율성을 위해 기존

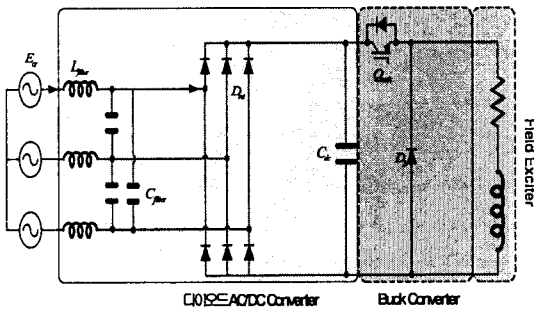


그림 4. 일반적인 다이오드 형 AVR 시스템
Fig. 4. Diode bridge type AVR system

의 다이오드 정류방식의 AVR 시스템과 단위역률 제어가 가능한 제안된 AVR 시스템에 대한 구성도를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 4는 기존의 다이오드 정류 방식의 AVR 시스템을 나타내고 있다. 기존의 AVR 시스템의 경우 AC/DC 변환을 위해 제어기가 없는 다이오드 정류기를 사용하였고, 출력된 DC전압 제어를 위해 강압형 전력변환기인 Buck 컨버터를 사용하였다. 그림 5는 제안된 2단 형태의 AVR 시스템에 대한 기본 회로도이다. 그림에서 알 수 있듯이 컨버터는 2개의 전력변환부로 이루어져 있다. 즉 입력필터 L_{filter} , C , 부스트 인덕터 L_{boost} , 다이오드 정류기 그리고 Q_{boost} 를 이용하여 단위역률과 전원전압을 부스트할 수 있는 1단 Boost 컨버터를 구성하였으며, 출력된 DC전압 크기를 조절할 수 있도록 2단 Buck 컨버터를 구성하였다.

그림 6과 그림 7은 AC/DC 변환에 대한 두 회로의 입력 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 그림 6은 일반

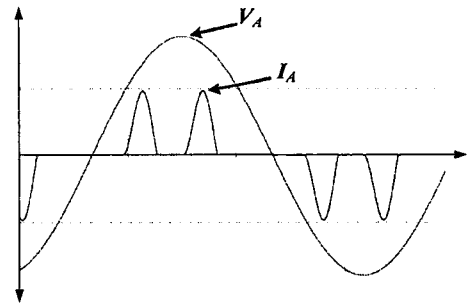


그림 6. 일반적인 AVR 시스템의 입력 전압 전류
Fig. 6. Input voltage and current of conventional AVR system

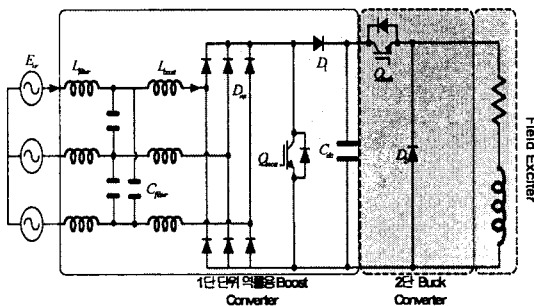


그림 5. 제안된 단위역률 형 AVR 시스템
Fig. 5. Proposed PFC type AVR system

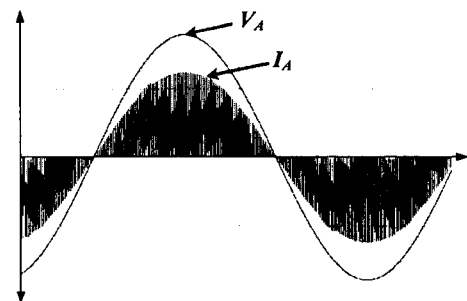


그림 7. 제안된 AVR 시스템의 입력 전압 전류
Fig. 7. Input voltage and current of proposed AVR system

적인 다이오드 브릿지 정류기의 해석에 의해 큰 불연속 전류가 출력 측 커패시터로 입력됨을 알 수 있다. 그림 7은 입력 측에 필터를 연결하지 않은 상태에서 Q_{boost} 동작에 따른 입력 전압, 전류를 나타낸다. 입력 전압의 기본파 성분과 Q_{boost} 동작에 의해 발생하는 불연속 전류의 파형이 일치함을 알 수 있으며, 입력 측 필터 설계를 통해 입력 전압과 동일한 연속 전류를 출력측 콘덴서로 공급함으로써 역류 개선이 가능해진다.

2.3 제안된 AVR 시스템의 동작원리

제안된 컨버터의 동작 원리를 설명하기 위해 부스트 스위치의 동작에 따른 회로의 동작을 나타낸 것이 그림 8에 있다. 이때 해석을 간단히 하기 위해 L_{filter} 와 C_{filter} 로 이루어진 필터부는 설명에서 제외하였다.

- Mode 1 : 그림 8의 (a)는 부스트 스위치 Q_{boost} 가 ON된 상태일 때의 모드 1인 경우를 나타낸다. 이때 컨버터 교류측의 각 상은 3개의 인덕터 L_{boost} 와 다이오드 정류기 및 Q_{boost} 을 통하여 단락되게 된다. 그리고 각 상의 교류전류 i_{ar1} , i_{br1} , i_{cr1} 은 각 상전압의 순시치에 비례하여 동시에 증가하기 시작한다. 이때 ON구간 동안에 도달하게 되는 전류의 최대치는 이 구간동안의 상전압의 크기에 비례한다.
- Mode 2 : 그림 8의 (b)는 Q_{boost} 가 OFF상태일 때의 모드 2의 경우를 나타낸다. Q_{boost} 가 OFF되면 그림과 같이 정류다이오드 D_{ret} , 다이오드 D_1 , 평활용 콘덴서 C_{dc} 을 통해 동작하게 된다. 이 경우 부스트 인덕터는 ON 구간동안에 축적된 에너지를 평활용 콘덴서 C_{dc} 와 벡 컨버터로 방출한다. 이 때 평활용 콘덴서 전압 C_{dc} 는 증가하기 시작하고 각 상의 부스트 인덕터를 통해 흐르는 전류는 감소하여 영에 도달하게 된다. 이때 전류가 감소하는 비율은 평활용 콘덴서에 축적된 전압에 의해 결정된다. 그리고 평활용

콘덴서 전압은 제어용 전원인 벡 컨버터의 출력 전압과 같다. 컨버터 교류 측 전류의 파형은 승압초퍼의 3개의 요소인 부스트 인덕터 L_{boost} , 평활용 콘덴서 C_{dc} , 그리고 부스트 스위치 Q_{boost} 를 제어하는 시비율 D_f 을 사용하여 능동적으로 제어될 수 있으며 Q_{boost} 은 일정한 주파수로 동작한다. Q_{boost} 의 듀티비는 모선의 전압과 벡 컨버터의 전류에 따라 속응성 있게 제어된다.

- Mode 3 : 그림 8의 (c)는 Q_{buck} 가 ON상태일 때의 모드 3의 경우를 나타낸다. Q_{buck} 이 ON되면 그림과 같이 정류다이오드 D_{ret} , 다이오드 D_1 , 평활용 콘덴서 C_{dc} 을 통해 충전된 전압을 이용하여 발전기의 여자코일에 DC전압을 인가하게 된다. 발전기의 여자코일의 경우, 코일의 저항 R 과 코일의 인덕턴스 성분인 L 로 등가가 가능하며, 인덕턴스 L 은 자속을 발생시키는 여자코일의 경우 전기자 코일에 비해 크다. 따라서 Buck 컨버터 출력단의 필터를 제거하여도 무방하다.
- Mode 4 : 그림 8의 (d)는 Q_{buck} 가 OFF상태일 때의 모드 4의 경우를 나타낸다. Q_{buck} 가 OFF되면 그림과 같이 여자코일 L 에 축적된 에너지를 환류용 다이오드 D_2 을 통해 환류하게 된다. 이때 여자코일에 축적된 에너지는 벡 컨버터용 스위치 Q_{buck} 의 시비율에 의해 결정되며 Q_{buck} 스위치의 시비율은 여자코일에 흐르는 전류에 의해 결정하게 된다. 실제 계자코일의 자속은 코일에 흐르는 전류에 의해 결정되므로 전류제어를 통해 동기 발전기 여자시스템에 대한 응답 특성을 개선시킬 수 있다.

2.4 적용된 Boost 컨버터의 단위역률 제어 위한 교류 해석

그림 9는 Boost스위치의 ON-OFF 동작시 필터를 생략한 컨버터 교류 측의 단상등가회로를 나타낸다.

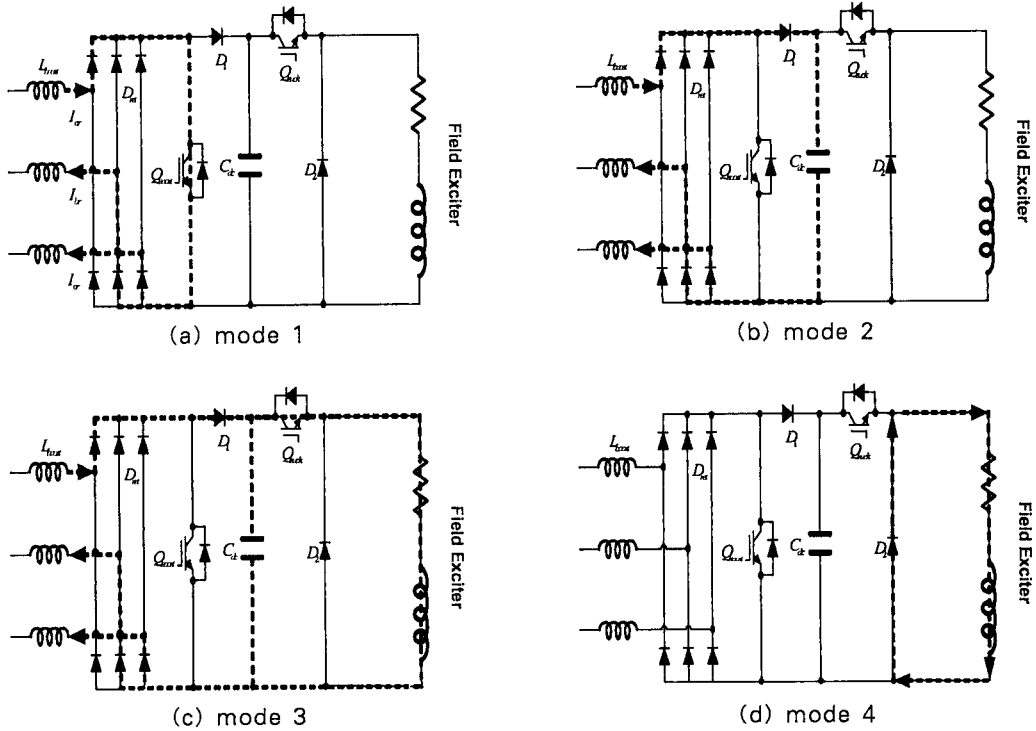
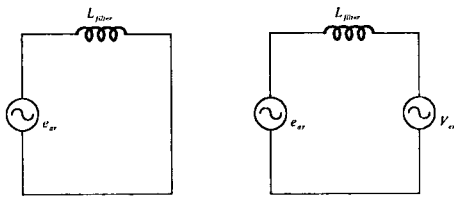


그림 8. 스위칭 상태에 따른 등가회로도
 Fig. 8. Equivalent circuit according to switching state



(a) Boost switch ON (b) Boost switch OFF

그림 9. Boost 컨버터의 교류측 상당 등가회로
 Fig. 9. Phase equivalent circuit according to AC side of Boost converter

그림 9에서 스위치가 ON되는 구간동안 ($t_0 \leq t \leq t_1$ 이하)에 Boost 인덕터 전류 i_{ar1} 은 모션의 전압 e_{ar} 과 Boost 인덕터 L_{boost} 에 의해서 정해진 비율로 증가한다. 이 구간동안에 i_{ar1} 은 다음과 같이 주어진다.

$$e_{ar} = E_{mr} \sin(\omega, t) = L_{boost} \frac{di_{ar}}{dt} \quad (1)$$

여기서 E_{mr} 은 회전자 유기전압의 최대치이고 ω 은 전원 주파수이다. 식 (1)에서 $t=t_0$ 일 때 초기 조건 $i_{ar}(\omega, t_0)=0$ 를 대입하여 풀면 식 (2)와 같다.

$$i_{ar} = \frac{E_{mr}}{\omega L_{boost}} [\cos(\omega, t_0) - \cos(\omega, t)] \quad (2)$$

이때 t_0 는 Boost 스위치가 ON 되기 시작하는 시간이고 t_1 은 ON 구간이 끝나는 시간이다. 그 이후 Boost 스위치가 OFF되는 구간 동안 $t_1 \leq t \leq t_2$ 에 인덕터를 흐르는 전류는 감소하며, 그 비율은 e_{ar} 과 v_d 및 L_{boost} 의 크기에 의해 결정된다. Boost 컨버터 이론에 따르면 Boost 스위치가 OFF되었을 때 등가적인 컨버터의 교류측상 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$v_{er} = \frac{1}{1-D_F} e_{ar} \quad (3)$$

2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 동기발전기 여자제어시스템

여기서 D_f 는 Boost 스위치의 듀티비(Duty ratio), v_{er} 은 다이오드 정류기 교류측의 단자전압을 나타낸다. 이 구간 동안에 회로의 전압방정식은 다음과 같다.

$$E_{mr} \sin(\omega_r t) = L_{boost} \frac{di_{ar}}{dt} + v_{er} \quad (4)$$

$t=t_1$ 일 때의 초기조건 $i_{ar1}(\omega_r t) = i_{ar1}(\omega_r t_1)$ 을 대입하여 위식을 풀면 인덕터를 흐르는 전류 i_{ar1} 은 다음과 같이 된다.

$$i_{ar} = \frac{E_{mr}}{\omega_r L_{boost}} [\cos(\omega_r t_1) - \cos(\omega_r t)] - \frac{v_{er}}{L_{boost}} (t - t_1) \quad (5)$$

설계 시 가장 중요하게 고려하여야 할 동작조건은 모션 전압의 최대치 E_{mr} 에서 Boost 스위치가 ON되는 경우이다. 이때 인덕터를 흐르는 전류 i_{ar1} 은 최대비율로 증가하여 $t=t_1$ 에서 최대값이 되며, 이 값에서 다시 0으로 감소하는데 걸리는 시간 또한 최대가 되어 Boost 스위치의 주파수는 e_{ar} 과 v_d 의 함수가 된다. 따라서 식 (2)에 $\omega_r t_0 = \frac{\pi}{2}$ 와 $\omega_r t$ 대신에 $(\omega_r t + \frac{\pi}{2})$ 를 대입하면 다음과 같이 된다.

$$i_{ar} = \frac{E_{mr}}{\omega_r L_{boost}} \sin(\omega_r t_1) \quad (6)$$

실제로 부스트 스위치의 스위칭 주파수 f_b 는 수 [kHz] 이상이므로 입력전압의 시간주기에 비해 부스트 스위치의 ON 구간은 매우 작다. $\omega_r t$ 가 아주 작은 경우 $\sin(\omega_r t)$ 는 거의 $\omega_r t$ 와 같기 때문에 식 (6)은 다음과 같이 된다.

$$i_{ar}(\omega_r t) = \frac{E_{mr}}{L_{boost}} t, \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (7)$$

$t=t_1$ 에서 i_{ar1} 은 최대값이 되며 Boost 스위치는

OFF된다. 마찬가지로 식 ()에 $\omega_r t_0 = \frac{\pi}{2}$ 와 $\omega_r t$ 대신에 $(\omega_r t + \frac{\pi}{2})$ 를 대입하면 식 (8)과 같이 되며,

$$i_{ar1}(\omega_r t) = \frac{E_{mr}}{\omega_r L_{boost}} \sin(\omega_r t_1) - \frac{v_{er}}{L_{boost}} (t - t_1) \quad (8)$$

$\sin(\omega_r t)$ 대신에 $\omega_r t$ 를 대입하면 다음 관계식이 성립된다.

$$i_{ar1}(\omega_r t) = \frac{E_{mr}}{L_{boost}} t - \frac{v_{er}}{L_{boost}} (t - t_1), \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (9)$$

여기서 스위치가 OFF되었을 때, Boost 컨버터의 출력전압 v_b 는 거의 변화하지 않으므로 v_{er} 의 크기도 변화하지 않는다. 따라서 식 ()에 $t=t_2$ 에서의 값 $i_{ar1}(\omega_r t_2) = 0$ 를 대입하고 v_{er} 을 일정한 크기를 나타내는 값 v_{er} 로 나타내어 정리하면

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{v_{er}}{v_{er} - E_{mr}} \quad (10)$$

의 식이 얻어진다. 한편 스위치 OFF시 정류기의 교류 입력전압 및 직류 출력전압 사이에는 다음과 같은 관계가 성립해야 한다.

$$V_d \geq \sqrt{3} V_{er}$$

여기서

V_{er} : 정류기 교류측 상전압의 실효치

V_d : 정류기 교류측 단자전압의 평균치

이다. 만약 V_d 와 V_{er} 사이에 위와 같은 관계식이 성립되지 않으면 인덕터 전류 i_{ar1} 의 감소비율이 작아지게 되어 Boost 컨버터는 불연속모드로 동작하지 않게 된다. 따라서 이러한 경우에는 Boost 스위치 Q_{boost} 가 다시 ON 되기 전에 i_{ar1} 이 영으로 될 수 있

도록 Q_{boost} 의 스위칭 주파수를 감소시켜야 한다. 그러나 스위칭 주파수를 일정하게 하는 경우에는 Boost 스위치의 듀티비를 감소시켜야 한다. 따라서 Boost 스위치 Q_{boost} 의 스위칭 주파수 f_b 는 컨버터 직류 측 전압 V_d 의 함수가 된다. 그리고 인덕터 전류 i_{ar1} 의 피크값은 인덕터의 크기 L_{boost} , 스위칭 주파수 f_b , 듀티비 D_f 등의 함수가 된다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터에 대한 타당성을 검증하기 위해 Psim을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 본 논문의 시뮬레이션 및 실험에 사용된 컨버터의 입력전압은 3상 Y결선, 60[Hz]의 실효치 220[V]이다. 스위칭 주파수는 시뮬레이션 수행 시 수행 시간을 고려하여 1[kHz]로 고정하였다.

그림 10은 기존의 Buck 컨버터를 이용한 전류 제어형 DC/DC 컨버터와 3상 브릿지 정류기를 이용한 3상 AC/DC 컨버터의 브릿지 정류기 입력측 전류 및 전압과 Buck 컨버터의 입력전압 및 출력 전류를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 다이오드 정류기에서의 입력 상 전류와 전압파형은 전류 파형이 연속된 펄스 형태로 됨에 따라 5차, 7차와 같은 저차 고조파 성분을 가지고 있음을 알 수 있다. Buck 컨버터의 입력 전압인 V_{dc} 의 변동은 없으며, 출력 전류의 경우 기존에 전류제어형 벡 컨버터와 같이 100[ms]에서 정상상태로 도달됨을 알 수 있다.

그림 11은 제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 발전기 여자 시스템에서 3상 AC/DC 컨버터의 브릿지 정류기 입력 측 전류 및 전압과 Buck 컨버터의 입력전압 및 출력 전류를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 다이오드 정류기에서의 입력 상전류와 전압파형은 정현파에 가까우면서 저차 고조파는 찾아보기 어려우며 스위칭 주파수에 해당하는 부분에서만 확인이 가능하다. 또한 Buck 컨버터의 입력 전압인 V_{dc} 의 경우 Boost 컨버터의 시비를 제외한 출력 전류 지령치 만큼 보상하여 제어함으로써 초기 전류 정착 시 높은 전압을 인가함으로써 전류응답특성을 개선하였다. 출력 전류의 경우

60[ms]에서 정상상태로 도달됨으로써 기존에 전류 제어형 벡 컨버터에 비해 전류응답성을 40[%] 개선시켰다.

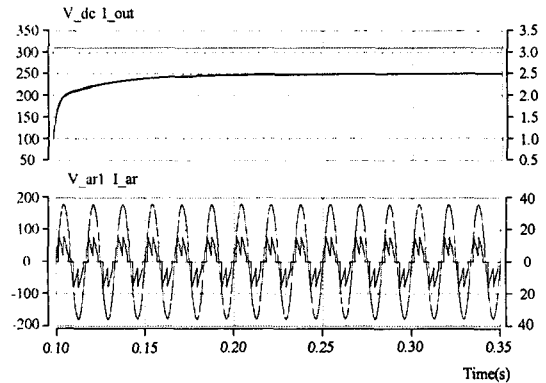


그림 10. 기존의 Buck 컨버터를 이용한 전류 제어형 발전기 여자 시스템
Fig. 10. The Exciter system of current control mode buck converter

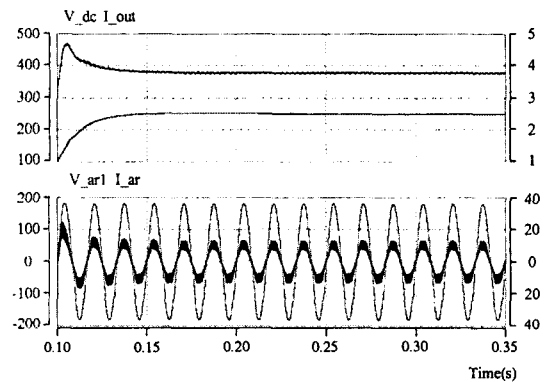


그림 11. 제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 발전기 여자 시스템
Fig. 11. The proposed exciter system using 2 stage 3 phase AC/DC converter

그림 12는 기존의 발전기 여자 시스템과 제안된 발전기 여자 시스템의 입력전류에 대한 고조파 분석을 나타내고 있다. 기존의 발전기 여자 시스템의 경우 저차 고조파 성분이 많이 나타나며 제안된 인버터의 경우 3차 고조파 성분과 Boost 컨버터의 스위칭 주파수인 10[kHz]이외에는 기본파 성분만이 존재함을 알 수 있다.

2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 동기발전기 여자제어시스템

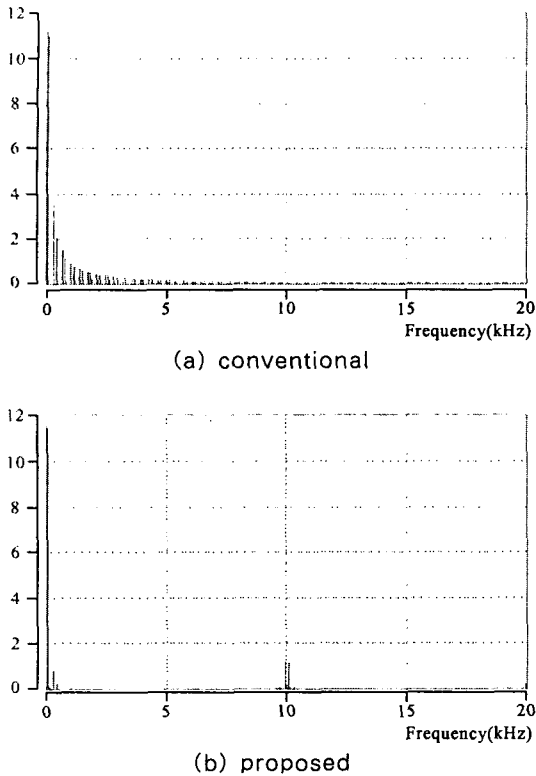


그림 12. 고조파 분석
Fig. 12. Comparison of harmonics

그림 13과 그림 14는 기존의 발전기 여자 시스템과 제안된 발전기 여자시스템의 입력 전압 및 출력 전압에 대한 파형이다. 시뮬레이션 결과를 토대로 그림 14에서 알 수 있듯이 제안된 발전기 여자 시스템의 Boost 스위치인 Q_{boost} 를 통해 입력 전압 및 전류는 입력 전류의 고조파 성분을 줄이기 위해 사용된 입력 필터에 의해 약간의 위상차가 발생하나 동 위상에 가까운 단위역률이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

그림 15는 기존의 발전기 여자시스템의 사용된 전류 제어 형 Buck 컨버터와 본 논문에서 제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터의 전류 응답 특성을 나타낸다. 그림 15(a)에서 초기 기동 시 기존의 전류제어 형 Buck 컨버터의 경우 정상 상태 응답시간이 100[ms] 정도임을 확인할 수 있다. 그림 15(b)의 제안된 컨버터의 경우 초기 기동 시 정상 상태 응답시간은 60[ms] 정도가 된다. 이는 별도의 속응성이 우

수한 제어가 없이 1단 Boost 컨버터의 전압 제어를 통해 초기 기동 시 기존의 전류제어형 Buck 컨버터에 비해 응답 시간을 40[%]정도 개선시킬 수 있음을 알 수 있다. 그림 16은 기존의 Buck 컨버터와 제안된 2단 컨버터의 전류 지령치를 1[A]에서 2.5[A]로 변화를 주었을 때의 두 인버터의 응답 특성을 나타낸다. 그림 16에서 알 수 있듯이 부하변동에 의해 전류 지령치 변화에 따른 속응성에 대해 기존의 전류 제어형 Buck 컨버터와 제안된 2단 컨버터 방식과 비교했을 때 기존의 전류제어 형 Buck 컨버터에 비해 제안된 2단 컨버터가 속응성이 우수한 응답특성을 보여주고 있다.

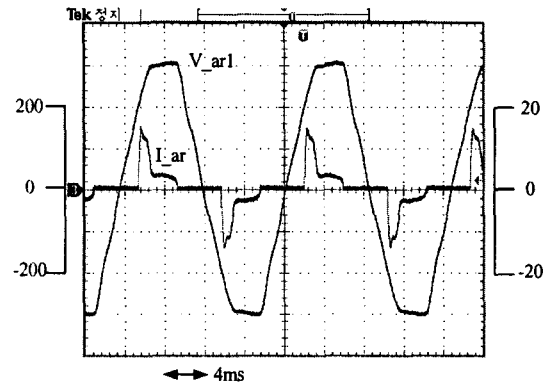


그림 13. 기존 발전기 여자 시스템의 입력 전압, 전류
Fig. 13. The Input voltage and current of conventional exciter system

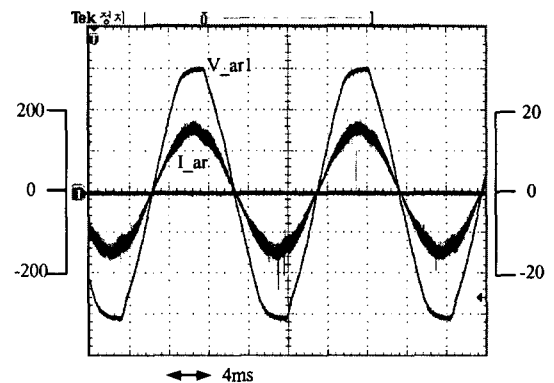


그림 14. 제안된 발전기 여자 시스템의 입력 전압, 전류
Fig. 14. The Input voltage and current of proposed exciter system

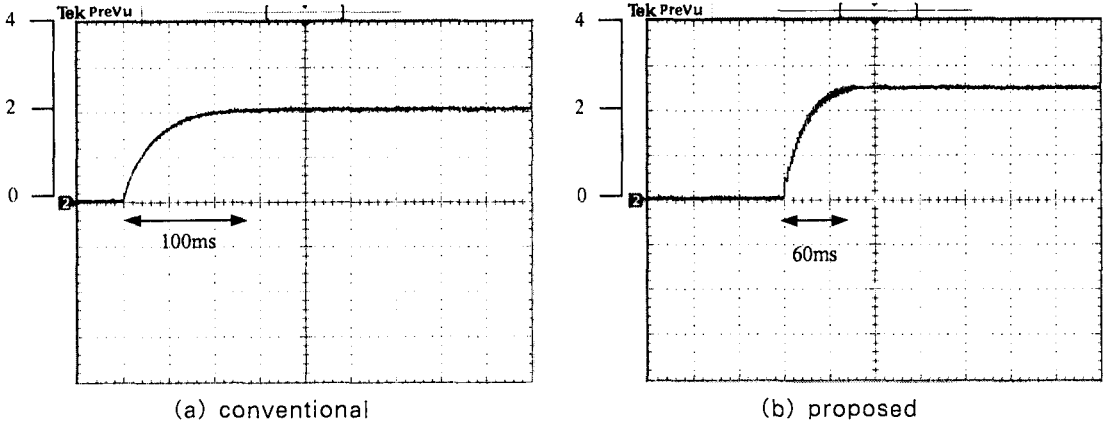


그림 15. 초기 기동 시 두 컨버터의 전류 응답 특성
 Fig. 15. Current response of each converter(starting mode)

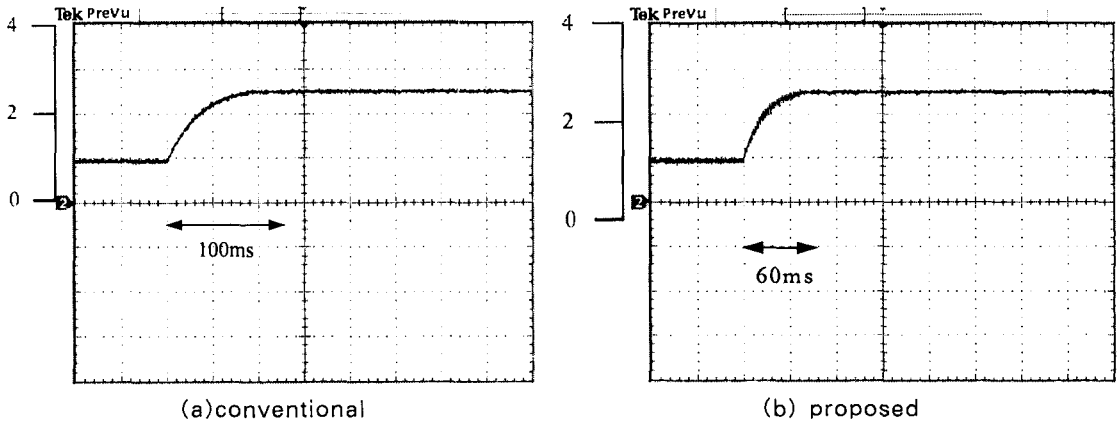


그림 16. 부하 변동 시 두 컨버터의 전류 응답 특성(1[A] →2.5[A])
 Fig. 16. Current response of each converters(Load changed)(1[A] →2.5[A])

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 동기 발전기의 출력 전압 제어를 위한 AVR 시스템 적용에 있어, 고주파 PWM 방식 DC/DC 컨버터인 Buck 컨버터에 대해 DC/DC 컨버터의 입력이 단위 역률로 동작하며, 단위 역률을 위해 사용한 스위치 소자와 인덕터를 이용하여 DC_Link단의 전압을 가변할 수 있는 Boost 컨버터의 기능을 할 수 있도록 시스템을 설계하였다. 제안된 컨버터 시스템의 경우 모션의 역률개선 및 고조파 감소와 속응성 있는 발전기 여자 전류제어가

가능하다. 제안된 인버터의 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 입력단의 필터의 회로정수인 캐패시터와 인덕터의 용량을 산정하여 실제 단위역률이 가능함을 검증 하였으며, 제안된 컨버터의 전류 응답특성 개선을 위해 실제 전류와 지령전류의 차를 Boost 컨버터 스위치의 시비율에 보상함으로써 부하 변동 시 별도의 속응성 있는 제어기 없이 DC_Link 전압으로 전류응답 특성을 개선하였다. 제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터에 대한 타당성을 위해 인버터 시작기를 제작하여 실험하였으며, 실험결과 기존의 컨버터에 비해 단위 역률이 이루어

2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 동기발전기 여자제어시스템

짐을 알 수 있었다. 또한 전류 응답특성의 경우 기존에 비해 40[%] 정도 개선됨을 알 수 있었다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구 결과로 수행되었음.

References

- [1] Chung-Yuen Won, Jung-ho Ahn, "A trend of excitation system for synchronous generator and digital voltage control", The proceedings of the Korean institute of illumination and electrical installation engineers, 00.51-57, 2002.
- [2] D.D.Shipp, "Harmonic Analysis and suppression for Electrical Systems Supplying Power Converters and Other Nonlinear Loads", IEEE, IA-15, No. 5, pp.1~6, 1979.
- [3] Chang-yong, Jung, "Digital avr of chopper type", Korea electrotechnology research institute, 1999.
- [4] W. Tang, F. C. Lee and R. B. Ridley, "Small signal modeling of average current mod control", Applied Power Electronics Conf. Proc, pp. 747-755, 1992.
- [5] R. W. U, S. B. Dewan, and G. R. Slemon, "Analysis of an AC-DC voltage source converter using PWM with phase and amplitude control", IEEE, IA-27, NO. 2, pp 355-364, 1991.
- [6] L. Malessani, L. Rossetto, P. Tenti, and P. Tomasin, "AC/DC PWM converter with reduced energy storage in the DC Link", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 31 NO. 2 pp 287-292, 1995.
- [7] Hong-Woo Lyu, "A boost-buck chopper type static excitation system for synchronous generator", Seoul National University, Ph.D Thesis, 1996.
- [8] Ahmad Darabi, Colin Tindall, "Finite-Element time-step coupled Generator, Load, AVR, and Brushless Exciter Modeling" IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 19, NO. 2, pp 258-264, 2004.
- [9] 장수진, 류동균, 서민성, 김준호, 원충연, 이진국, "전류 제어형 PWM컨버터를 이용한 동기발전기용 여자 시스템에 관한 연구", 조명 전기설비학회논문지 제17권 제3호, PP 32~39, 2003.

- [10] Electric Power Research Institute, AP-3351 Photovoltaic Power System Research Evaluation, "A Report of the EPRI ad hoc Photovoltaic Advisory committee Unlimited EPRI", Poro Alto, CA,1983.
- [11] 천창근, 김철우, "전류센서리스 단위 역률 3상 PWM AC/DC Boost 컨버터", 조명 전기설비학회논문지 제17권, 제6호, PP. 105-111, 2003년 11월.
- [12] 정영석, "전력변환회로의 디지털 전류모드제어기 설계", 전력전자학회 논문지 제10권, 제2호, PP162-168, 2005년 4월.

◇ 저자소개 ◇

이상훈 (李相勳)

1974년 8월 11일생. 2000년 경성대 전기공학과 졸업. 2002년 경성대학교 전기전자공학과 졸업(석사). 2002년~2004년 9월 KT전기 기술연구소 주임연구원. 2006년 부산대학교 메카트로닉스협동과정 졸업(박사). 2006년 3월~현재 전남대학교 공학기술연구소 연구원. 경성대 공학기술연구소 연구원.

이동희 (李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002~2005년 OTIS-LG 서보 R&D 선임연구원. 2005년~현재 경성대 전기·전자·메카트로닉스 공학부 전임강사.

안진우 (安珍雨)

1958년 5월 26일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수. 대한전기학회 B 부문 편집이사.

Tel : (051)620-4773

Fax : (051)624-5980

E-mail : jwahn@ks.ac.kr