

# 하이브리드 급전을 위한 다양한 가정용 교류부하의 직류특성연구

李永鎭\*, 韓棟華\*, 崔重默\*\*, 鄭炳煥\*\*\*, 金東辰§, 崔圭夏†

## DC Characteristics Analysis of Various AC loads for Hybrid Distribution

Young-Jin Lee, Dong-Ha Han, Jung-Muk Choi, Byong-Hwan Jeong,  
Dong-Jin Kim, and Gyu-Ha Choe

### 요 약

현재 디지털 제품의 사용의 증가로 제품 내부의 DC 전원의 사용이 증가하는 가운데 시스템의 구동전압을 공급하기 위해 기기내부에 장착된 AC/DC컨버터로 인한 입력전류의 역률저하 및 고조파 증가, 그리고 AC/DC 컨버터에서 발생하는 변환 손실 등의 문제가 발생한다. 하이브리드 배전시스템은 기존의 AC부하(전동기 부하 및 변압기 부하)와 DC 부하(컴퓨터, TV, LED조명)에 AC 와 DC 전원을 동시에 공급하며, 직류출력 전원(신재생에너지 및 배터리뱅크)과 상용전원에서 전력을 공급받아 사용자에게 DC 및 AC 전력을 공급해주는 시스템으로 상용전원의 효율을 향상시키고 신재생에너지의 사용 편의성을 올리며 가정에 AC와 DC를 동시에 공급하는데 주목적이 있다. 본 논문을 통해 DC 및 AC 동시 배전을 위해 기존 교류부하의 직류특성에 관한 연구를 하며, 하이브리드 배전의 적절한 DC 전압레벨을 선정한다.

### ABSTRACT

Recently, the use of DC power increased due to the increased use of digital load. Power factor of input current decrease and input current harmonics increase, and conversion loss which is occurred in the AC / DC converter is a problem to provide the proper DC voltage to the device equipped with an internal AC / DC converter. Hybrid system supplies the AC power and DC power to AC load (motor load and the transformer load) and DC loads (computers, TV, LED fluorescent light) at the same time it supplies the renewable energy and utility energy taken power from Utility to user for improving the efficiency and renewable energy improvements in ease of use. This paper studies DC characteristics of traditional AC load for Hybrid distributions.

**Key Words** : Hybrid distribution, DC power, AC power, Renewable energy

## 1. 서 론

최근 전력전자장치를 위시한 디지털화 제품들의 이용이 급속히 증가하는 가운데 배전에 있어서 직류의 도입을 위한 연구검토가 많이 진행되고 있다. 요컨대, 지금 사용하고 있는 교류전원기반 장치들은 먼저 교류를 공급받고, 기기내 부착된 AC-DC컨버터 즉 어댑터를 이용하여 필요한 전압레벨의 직류로 변환하고 있다. 통상 이러한 부하의 유형은 매우 많은데, TV, AV 기기, PC, FAX, LED램프 등 가전용 기기 등을 들 수 있다. 이러한 유형의 부하에는 전술한 어댑터와 같은

†교신저자 : 정회원, 건국대 전기공학과 교수

E-mail : ghchoe@konkuk.ac.kr

\*정회원, 건국대 전기공학과 박사과정

\*\*학생회원, 건국대 전기공학과 석사과정

\*\*\*정회원, 삼성 탈레스 전문연구원

§정회원, 선광엘티아이(주) 대표이사

접수일자 : 2010. 2. 8

1차 심사 : 2010. 3. 7

심사완료 : 2010. 4. 21

교류-직류변환기가 내장되어 있고 그 효율은 대략 80[%]의 수준이다. 즉 공급전력중 20[%] 정도가 열 등의 손실로 낭비된다는 것이다.<sup>[1-3]</sup> 예를 들어, 가정에서 사용하고 있는 컴퓨터의 입력단 AC-DC 컨버터(단상 정류기)도 80%의 효율을 갖는데, 이로 인해 국가적으로 볼 때 소모되는 전력 총량은 무려 166[MW]정도가 매우 크다고 할 수 있다. 이처럼 컴퓨터와 같이 교류-직류변환의 한 경우에서도 큰 에너지절약을 기할 수 있으며, 향후 앞서 전술한 디지털 관련 제품들의 사용이 급속히 증가하여 교류를 직류로 변환하고 또다시 직류를 적정 전압으로 변환함으로써 이중의 변환손실이 발생되어 총 손실은 더욱 증대된다고 하겠다. 따라서 최근 많이 연구되고 있는 직류전원공급방식이 향후 매우 효율적인 급전방식이 될 수 있다.

이러한 직류급전방식은 2008년부터 KT 남수원 인터넷데이터센터(IDC)에서 300~400[V]의 직류배전을 적용하여 약13.2%의 효율 향상을 실증한 바 있다.<sup>[4]</sup> 이러한 직류배전의 도입을 시작으로 현재 많이 파급되고 있으며, 태양광발전의 보급 확대와 함께 가정에서도 60[V] 이하의 직류전원이 도입될 가능성이 높을 것으로 예상된다. 더구나 최근 백열등 판매금지안을 일부 국가가 채택하는 등 향후 조명부하가 LED램프로 교체될 수 밖에 없는 상황에서 직류로 구동하는 부하의 유형들은 더욱 늘어날 것이며, 따라서 직류전원공급의 필요성은 더욱 가속될 것으로 전망된다. 특히 가정의 경우 기존 교류전원과 함께 직류전원을 동시에 갖는 급전방식으로 하이브리드 배전방식이 적극 검토되고 있다.<sup>[5]</sup>

직류전원기반 공급 방식은 다양한 기기의 교류-직류 변환 횟수를 줄여주면서 총 전력손실도 감소시킬 수 있게 해 주며, 조명이나 전자기기와의 연계시에도 매우 유리해진다. 특히 최근 신재생에너지와의 연계시 10%까지 에너지변환손실을 감소시킬 수 있고, 전동기가변속제어, 운전시전력품질, 신뢰성, 전압안정성 및 무정전성의 관점에서 우수할 뿐만 아니라 심지어 인체의 안전성까지 뛰어난 것으로 평가되고 있다. 나아가서 하이브리드 급전방식의 도입으로 지구 온난화방지를 위한 저탄소-녹색성장을 위한 하나의 방책이 될 수 있다.<sup>[6]</sup>

본 논문은 교류 및 직류가 공존하는 하이브리드 급전 시 그 특성을 다루었다. 하이브리드 급전을 위해 가정용 기기들을 대상으로 직류를 인가하여 그 동작특성을 조사하고 또 전압레벨을 변환시켜 동작가능하면서 효율이 높은 고효율점을 찾고자 하였다. 또한 육내

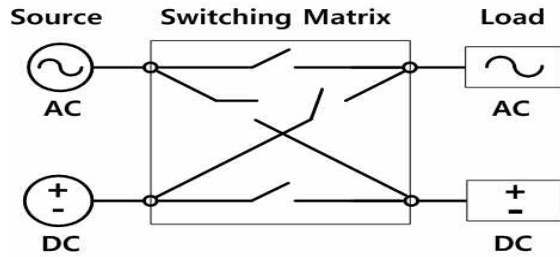


그림 1 하이브리드 급전시스템의 기본 개념.  
Fig. 1 Basic concept of hybrid supply system

배전선로상에서의 특성을 고려하였다. 그리고 정류기를 대상으로 하여 교류와 직류의 인가시 특성을 면밀히 검토함으로써 직류급전시 특성을 연구하였다. 이로써 하이브리드 급전을 위해 적합한 직류전압레벨의 선정에 대해서도 다루었다.

## 2. 하이브리드 급전시스템의 동작 원리 및 분석

### 2.1 동작원리

하이브리드 급전시스템은 기존의 교류전원에 적절한 레벨의 직류전원을 동시에 공급함으로써 기존의 교류부하를 교류전원에서 뿐만 아니라 직류전원에서도 사용할 수 있도록 하고, 또 향후 예상되는 직류전용기도 함께 연결, 사용가능하도록 구성된 복합급전시스템으로 정의한다. 그림1의 하이브리드급전시스템은 교류전원과 직류전원의 두 전원과, 교류 및 직류의 2가지 유형의 부하 즉 직류부하와 교류부하와, 이들을 상호 연계시켜주는 스위칭매트릭스로 구성될 수 있다.

이러한 하이브리드 시스템은 내부적으로 직류와 교류를 모두 공통으로 가지고 있으므로, 그림 2와 같이 직류를 공통으로 하는 직류연계(DC common)방식과 또 교류를 공통으로 하는 교류연계(AC common)방식으로 구분할 수 있는데, 본 연구에서는 전자의 직류연계를 채택하였다. 직류연계형 하이브리드급전시스템은 기존의 교류 및 직류 부하에 모두 전력을 공급하기 위해 양방향 PWM정류기, 승압컨버터 및 강압 컨버터 그리고 조건에 따라 계통의 동작모드 및 입출력특성을 제어하기위한 제어부 등으로 구성된다. 교류전원으로는 단상교류 220[V]를, 직류전원으로는 배터리 뱅크 혹은 PV, 풍력, 연료전지 등의 신재생에너지를 각각 사용할 수 있다.

여기서, PWM정류기는 직류출력전원이 에너지를 공급할 수 없을 경우 교류전원으로부터 에너지를 공급하도록 해 주고, 강압컨버터가 직류부하에 적합한 전압

레벨로 변환시켜주게 된다. 만약 교류전원이 정전이 될 경우 직류출력전원으로부터 공급된 에너지가 1차적으로 승압컨버터를 거쳐 PWM정류기로 공급하여 교류부하에 필요한 에너지를 공급하도록 하였고, 이러한 연결구조는 직류연계방식에 해당된다.

전체 시스템의 동작은 3가지로 모드로 나눌 수 있는데, 각 모드의 구분은 직류부하의 소비전력에 따라 정격부하모드(모드1), 중부하모드(모드2), 발전모드(모드3)로 나눌 수 있다. 정격부하모드는 직류출력전원의 공급전력과 직류부하의 소비전력이 같은 경우로 정의하며, 직류부하의 공급에너지가 승압형 DC/DC 컨버터를 통해 강압형 컨버터를 거쳐 전달되는 직류 출력전원의 에너지만이 전부일때이다. 중부하 모드는 직류부하의 소비전력이 직류출력전원에서 공급하는 에너지 보다 많을 경우이며 PWM정류기를 통해 상용전원으로부터 전력을 공급받아 직류부하에 전력을 공급한다. 발전모드는 직류 출력전원의 발전전력이 직류부하의 소비전력보다 많은 영역으로 직류 출력전원 발전량이 많아 직류부하에서 소모하고 남는 에너지를 PWM 정류기의 인버팅 모드를 통해 계통으로 발전을 하거나 교류부하에 전력을 공급할 수 있다. 이와 같이 직류 출력전원을 승압 혹은 강압하여 바로 사용할 수 있는 하이브리드 배전시스템은 AC/DC 또는 DC/AC 변환단계의 축소로 인한 직류출력 전원의 효율을 향상시킬 수 있다.

### 2.2 변환특성분석

교류연계형 하이브리드급전계통은 직류연계형 방식과는 달리 AC220[V]를 기준으로 하여 기존의 교류 및 직류 부하에 전력을 공급하는 방식으로 현재 상용중인 계통 연계형 분산전원시스템에 PFC정류기를 첨가한 방식으로 그 구성이 간단하나 직류출력전원을 교류로 바꿨다가 다시 직류로 변환해서 사용하기 때문에 시스템 효율이 떨어지는 단점이 있다. 시스템의 구성 그림 2 (a)와 같이 PFC정류기, 승압컨버터, PWM 인버터, 제어부 등으로 구성된다. 전체 시스템의 동작은 직류연계방식 마찬가지로 3가지로 모드로 동작되며, 정격부하일 경우로 한정하여 그림2의 직류연계시와 교류연계시의 경우를 비교분석한 결과 표 1과 같이 얻어진다.

표 1 직류연계 및 교류연계의 비교분석

Table 1 Comparative analysis of DC common & AC common

	교류연계	직류연계
효율	86%	91%
제어성	복잡	용이
안전성	우수	미흡
능동소자수	16개	12개
신재생에너지와 연계성	나쁨	좋음

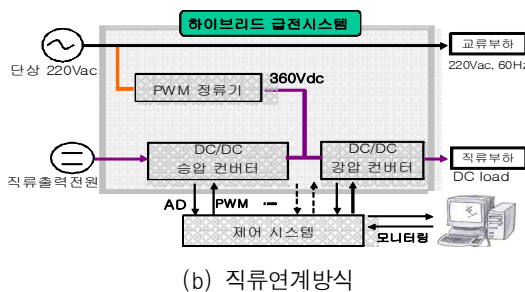
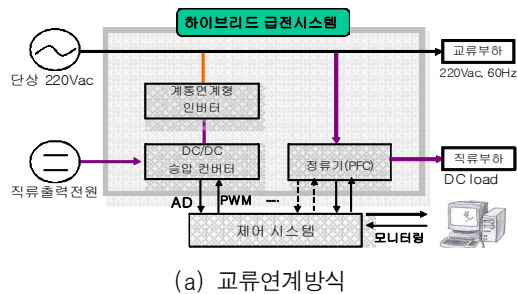


그림 2 하이브리드 급전계통의 구성  
Fig. 2 Configuration of hybrid supply system

### 3. 하이브리드 급전에 의한 부하특성

현재 일반가정에서 흔히 사용중인 컴퓨터, TV, 오디오, VCR 등의 대표적인 가전제품들은 교류전원에 의해 작동되고 있다. 향후 직류로 급전될 경우 이들의 특성이 어떻게 달라지는지를 조사하고자 하였다.

#### 3.1 내장 정류회로 해석

그림 3은 제품 내부의 정류회로를 교류전원 및 직류전원에 각각 연결한 경우를 나타내고 있다. 지금 이 두 경우를 비교하기 위해 내장 정류기 다이오드의 전압강하  $V_f$  및 내부 저항  $r_d$ , 커패시터의 내부 직렬 저항  $r_c$ , 부하저항  $R$ 등을 정의한다. 각 경우의 회로순실은 다이오드 필터 커패시터의 흐르는 전류에 의해 좌우된다.

우선, 교류전원(정격실효값  $E_{ac}$ )이 연결된 경우 정류회로의 모든 다이오드가 모두 작동되며, 커패시터로 전류가 흐르게 된다.

이때 회로내에 흐르는 각 부의 주요파형은 그림3(b)와 같고 회로의 발생되는 손실을 구해보면 식(1)과 같다.

$$P_{loss\_d} = 2r_d I_{ac}^2 + V_f I_{ac(mean)}, P_{loss\_c} = r_c I_c^2 \quad (1)$$

$P_{loss\_d}$ : 다이오드 손실  $r_d$ : 다이오드저항  $I_{ac}$ : 입력 전류 실효치  
 $P_{loss\_c}$ : 커패시터 손실  $r_c$ : 커패시터 저항  $I_c$ : 커패시터 전류 실효치  
 $V_f$ : 다이오드 전압강하  $I_{ac(mean)}$ : 입력전류평균치

그림3 에서 부하 R의 소비전력은 식(2)와 같다.

$$P_{out1} = (\sqrt{I_{ac}^2 - I_c^2})^2 \times R \quad (2)$$

$I_{ac}$ : 입력 전류 실효치  $I_c$ : 커패시터 전류 실효치  
 $P_{out1}$ : 정류기 출력  $R$ : 정류기 출력저항

그림 4(a)에서 직류전원(평균전압  $E_{dc}$ )을 내장 정류 회로에 공급할 경우 두 개의 다이오드만이 동작하고, 커패시터전압이 전원전압과 같아지면 더 이상 전류가 흐르지 않게 되어, 그림4(b)와 같이 회로내 파형이 나타난다.

직류전압 인가시 회로의 손실은 다이오드의 손실만 나타나므로 식(3)으로 표현된다.

$$P_{dc\_loss} = 2r_d I_{dc}^2 + V_f I_{dc} \quad (3)$$

$P_{dc\_loss}$ : 정류기 손실  $r_d$ : 다이오드내부저항  $V_f$ : 다이오드전압강하

직류전원 연결시 부하 R의 소비 전력은 식(4)과 같다.

$$P_{out2} = I_{dc}^2 \times R \quad (4)$$

$I_{dc}$ : 입력 전류  $P_{out2}$ : 정류기 출력전력  $R$ : 정류기 출력저항

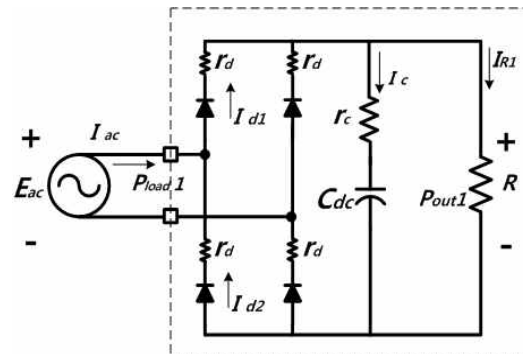
전원의 유형에 무관하게 그림3(a) 및 그림4(a)에서 부하저항의 소비전력  $P_{out1}$  과  $P_{out2}$  는 동일해야 하므로 교류 및 직류에 대한 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{ac}^2 = I_{dc}^2 + I_c^2 \quad (5)$$

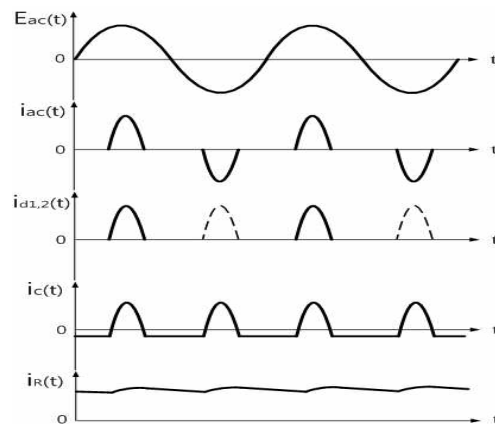
위 식에 의하면 직류전원 인가시 전류의 크기  $I_{dc}$ 가

교류전원 인가시 전류  $I_{ac}$ 보다 작음을 알 수 있다. 즉, 직류급전시 내장 정류회로에서 발생하는 손실이 적음을 알 수 있다. 특히 직류의 경우 필터 커패시터는 개방되므로 손실이 발생하지 않는데, 이 값은 실제 정류 회로에서 발생하는 총 손실의 70[%]를 차지하고 있다. 또한 수식으로는 표현하지 않았으나 동일 출력의 경우 교류가 직류에 비해 파형을이나 파고율이 나쁘므로 실제 정류소자에서의 손실도 다소간 증가될 것이므로, 교류보다는 직류급전이 내장 정류회로를 갖는 제품에서 보다 효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

궁극적으로 직류급전을 하게 되고 또 전압레벨을 적절히 한다면 정류소자 자체도 불필요하게될 뿐만 아니라 정류소자의 손실까지도 없앨 수 있게 된다. 뿐만 아니라 교류사용시 정류회로의 입력단에 고조파 전류가 발생되고 또 역률도 저하되는 문제점이 직류급전의 경우 해소할 수 있게 된다.

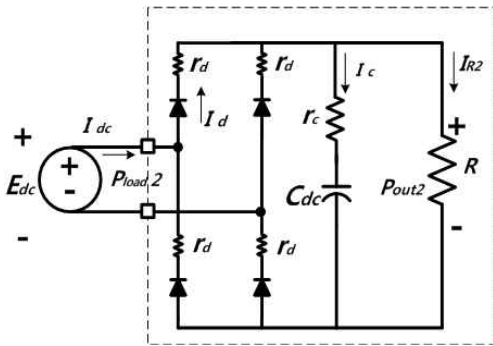


(a) AC 공급



(b) 각부 파형

그림 3 교류전원을 갖는 내장 정류회로  
 Fig. 3 Internal rectifier with AC source



(a) DC 공급



(b) 각부 파형

그림 4 직류전원을 갖는 내장 정류회로  
Fig. 4 Internal rectifier with DC source

### 3.2 급전선의 손실 감소

이번에는 옥내의 배선로에서 발생하는 손실을 생각해 보자. 교류전원의 인가시 내장 정류회로의 입력측 역률은 0.5 ~ 0.6 으로 크게 저하된다. 이처럼 저역률로 인해 입력전류가 커지게 될 것이고 따라서 배전선 손실과 전압강하도 증가함을 예측할 수 있다.

하이브리드 배전의 특성을 살펴보기 위해 그림 5와 같이 간단한 배선로 회로를 대상으로 해석하였다. 20m 이상의 옥내배선선에 존재하는 저항 값을 r (교류 배전선 20m 배선로의 리액턴스는 선로저항보다 매우 작으므로 계산의 편의를 위해 선로의 리액턴스 성분은 무시), 부하는 Z, 공급전원은  $E_s$ , 부하 입력단은  $E_r$ 로 표기하며 교류급전시  $E_r = E_{ac}$ , 직류급전시  $E_r = E_{dc}$ 를 나타낸다. 회로해석을 위해 직류전원은 교류정격전압(실효값 220[V])의 k배로 정의한다.

$$E_{dc} = kE_{ac} \quad (6)$$

부하소비전력을  $P_{load}$ , 부하전류를  $I_{dc}$ , 배선로 저항

을  $2r$ , 역률을  $\cos\phi$ , 선로손실을  $\Delta P_{ac}$ 라 할 경우 교류에 의한 배선로에서 발생하는 손실은 다음과 같다.

$$I_{ac} = \frac{P_{load}}{E_{ac} \times \cos\phi}, \quad \Delta P_{ac} = 2rI_{ac}^2 = 2 \frac{r}{\cos^2\phi} \frac{P_{load}^2}{E_{ac}^2} \quad (7)$$

이번에는 직류배전전압을  $kE_{ac}$ , 부하소비전력을  $P_{load}$ , 부하전류를  $I_{dc}$ , 배선로 저항을  $2r$ , 선로손실을  $\Delta P_{dc}$ 라 할 경우 직류인가시 배선로의 발생 손실은 식(8)과 같다.

$$I_{dc} = \frac{P_{load}}{E_{dc}}, \quad E_{dc} = kE_{ac}, \quad \Delta P_{dc} = 2r \frac{P_{load}^2}{E_{dc}^2} \quad (8)$$

서로 다른 두 급전방식에서 전류 크기와 선로 손실의 관계식을 구하면 식(9)와 같다.

$$\frac{I_{dc}}{I_{ac}} = \frac{E_{ac}}{E_{dc}} \cos\phi = \frac{\cos\phi}{k}, \quad \frac{\Delta P_{dc}}{\Delta P_{ac}} = \frac{I_{dc}^2}{I_{ac}^2} = \left(\frac{\cos\phi}{k}\right)^2 \quad (9)$$

식(9)에서 보는 바와 같이  $k=1$  즉 직류전압의 크기를 교류의 실효값이상으로 설정하게 되면, 부하의 역률이 낮아수록 배선로에 흐르는 교류전류의 크기가 더 커져 전선의 손실이 증가된다. 동일한 부하전력 전송시 DC전압이  $kE_{ac}$  일 때 DC배전 전류의 크기와 배전선에서 발생하는 손실은 식(8)과 같이 구할 수 있으며, 직류급전시 역률 1로 유지가능하기 때문에 교류전압의 피크값과 동일한 직류전압( $k = \sqrt{2}$ )을 인가하게 되면 동일 전력공급시 그림 6에서 보는 바와 같이 교류보다 전류 크기가  $\frac{\cos\phi}{k}$ 로 작아져 배전선에 발생하는 손실을 저감 할 수 있을 뿐만 아니라 기존 배선로의 이용률을 높일 수 있게 된다.<sup>[7][8]</sup>

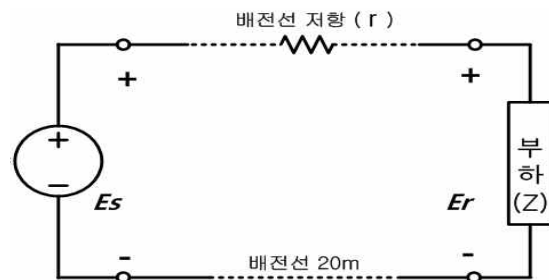


그림 5 배선로의 실험적 구성  
Fig. 5 Experimental configuration of power lines

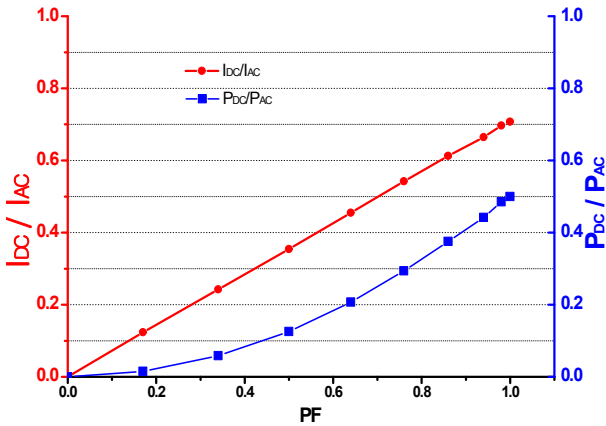


그림 6 부하의 역률에 따른 배선선 손실 및 전류크기 비율  
Fig. 6 Ratio of line losses, and current magnitude due to the power factor

<사례 연구>

실제 가전용 부하유형이 너무 다양하므로 유형별로 모두 직류 및 교류급전의 경우를 검토할 수 없어 사례 연구를 통하여 입증하고자 하였다. 지금 직류배전의 도입 타당성을 검토하고자 하므로 교류에서 직류로 변환하는 대표적 사례로서 60[W]급 LED램프를 고려하였다. 램프의 입력측 정류 다이오드의 전압강하 및 저항과 커패시터의 내부저항 및 급전선의 전선저항에서 발생하는 손실을 비교하였다. 다음의 사양으로 하되, 해석을 위해 PSIM 6.0 시뮬레이션 툴을 사용하였고, 실부품으로 급전선은 1.5mm<sup>2</sup>, 20m ( $r=0.7\Omega$ ), 다이오드는 KBP 206G ( $V_f=1V$ ,  $r_d=5m\Omega$ ), 커패시터는 68 [ $\mu F$ ], 400[V] ( $r_c=1.9[\Omega]$ )로 하였다.

그림 7은 시뮬레이션 결과 교류 및 직류급전시 각 부분에서 발생하는 전력손실을 나타내고 있다. 교류공급시 정류회로에 흐르는 전류의 실효값은 540[mA]로 손실발생량은 908[mW]로 얻어졌고, 직류311[V] 공급시 정류회로에서만 약 0.32[W]의 전력절감이 가능하였다.

또한 배선로의 손실은 26[mW]정도로 미약하게 발생되었다. 종합적으로 검토해 보면, 직류급전을 시행할 경우 한 개의 60[W] LED조명등에서만 약 502[mW]의 전력 절감이 이루어 짐을 확인하였다. 역률은 항상 1로 유지되고, 입력전류의 크기는 191[mA]로 약 35%정도로 크게 저하되고, 특히 배선로의 손실은 약 12.6%로 대폭 줄어들어, 전체손실은 45%미만의 수준으로 저하되었다. 이외에도 입력전류의 파고율, 저역률 등을 감안하면 직류급전의 예상보다 특징이 매우 많음을 알 수 있었다.

표 2 60W LED조명등의 분석결과

Table 2 Analysis result of the 60W LED lamp

	교류	직류
입력전류	540 mA	191 mA
출력전류파형률	1.43	1
입력전류파고율	3.7	1
역률	55%	100%
배선로 손실	206 mW	26 mW
다이오드 손실	197 mW	380 mW
커패시터 손실	505 mW	0
손실(정격대비 %)	908(1.51%)	406(0.67%)

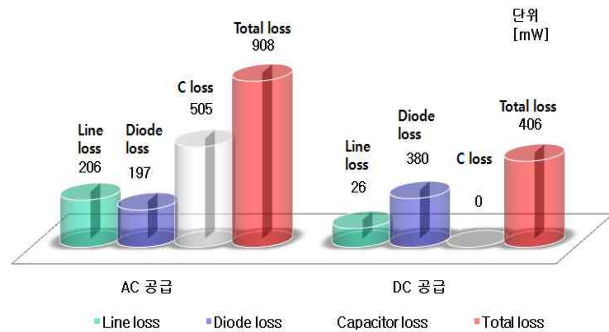


그림 7 내장 정류회로 시뮬레이션 결과

Fig. 7 Simulation result of the Internal rectifier

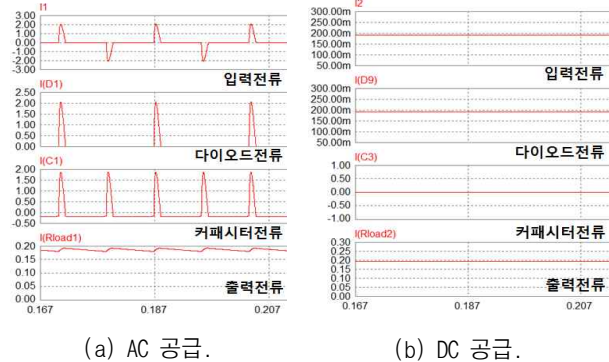


그림 8 내장 정류회로 시뮬레이션 파형

Fig. 8 Simulation waveforms of the Internal rectifier

4. 하이브리드 배전의 실험 및 검토

4.1 가정용 교류부하의 직류급전시 특성

가정용 하이브리드 급전시스템의 타당성을 검토하기 위해서 AC 220[Vac]에서 사용하던 다양한 부하 입력 전류를 분석하여 전열부하, 디지털부하, 조명부하, 유도성 부하의 4가지 유형으로 구분하고 각 경우 직류급

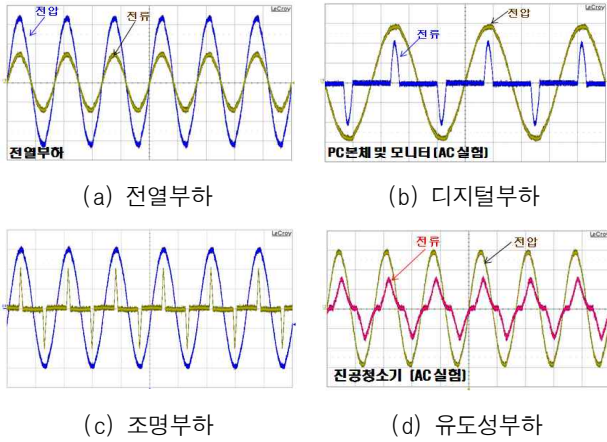


그림 9 가정용 교류부하의 입력특성

Fig. 9 Input characteristics of the AC household load

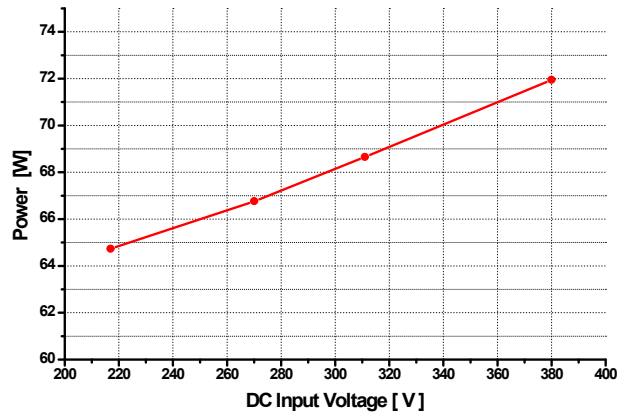


그림 10 배전전압에 따른 PC의 소비전력

Fig. 10 Power of PC due to the distribution voltage

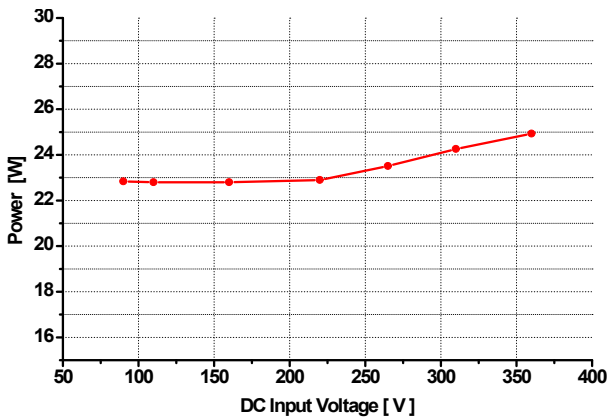


그림 11 배전전압에 따른 LED 조명의 소비전력

Fig. 11 Power of LED due to the distribution voltage

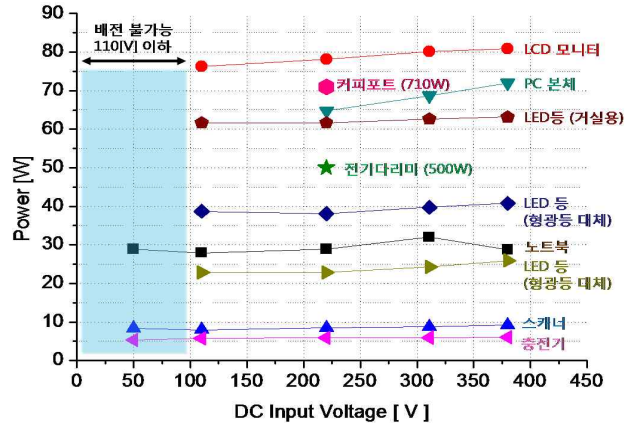


그림 12 배전전압에 따른 가정용 기기의 소비전력

Fig. 12 Power consumption due to the distribution voltage

전 가능여부와 가장 적합한 직류급전전압레벨을 찾고자 하였다.

(1) 전열부하

전열부하는 가정에서 사용되는 다리미, 전기히터, 커피포트 등 역률 1을 갖는 순수 저항성 부하를 말하며, 교류실험시 그림 9(a)와 같이 입력전압과 전류가 동상이 되는 순저항 특성을 갖는다. 현재 사용중인 전열부하는 대부분 기기 내부 전류제어를 바이메탈로 된 온도센서를 이용하기 때문에 직류공급시 AC 220[Vac]와 동일한 실효값 DC 220[Vdc]를 인가해야만 동작이 가능하였다. 그림 12와 같이 직류 220[V]를 공급시 전기다리미는 933[W], 커피포트는 481[W]의 전력을 각각 소비하고 있었으며 이는 교류 220[V]인가때 와 동일하

였다. 220[V]이상의 직류전압을 인가할 경우에는 과전류로 인해 전열체가 소손되었다. 또한 DC 220[Vdc]이하의 전압을 인가할 경우 부족 전류로 인하여 오동작을 일으킨다. 결론적으로 전열부하의 경우 센서 때문에 다양한 실험을 수행하기 힘들었으며, 현재로는 교류220[V]에 가장 적합하도록 설계되어 있어 직류의 경우 평균값 220[V]로 인가함이 좋을 것으로 판단된다. 향후 온도 센서류를 전압레벨에 맞추어 다시금 개발해야 할 것으로 생각된다.

(2) 디지털 부하

디지털 부하는 PC본체, LCD 모니터, LCD TV, 오디오, 스캐너, 프린터 등을 뜻한다. 이들 디지털 부하들은 입력부에 AC-DC 컨버터가 내장, 정류후 직류전

압을 강압시켜 시스템에 필요한 전압을 얻기 때문에 그림 9(b)와 같이 입력측의 전류가 전압피크점 부근에서 최대가 되는 펄스형으로 나타나므로 고조파가 다량 함유되는 경우를 말한다. 그림 10은 DC입력 전압의 변동에 따른 PC 본체의 소비전력을 나타내는데, 작동이 가능하면서도 입력전압이 작아질수록 소비전력이 작아지는 경향을 보였고, 직류220[Vdc]에서 최소 소비전력을 가짐을 알 수 있었다. 이 경우 소비전력은 3.9[W]만큼 감소하여, 직류급전시 220[V]로 설정함이 좋겠다고 판단하고 있다.

그 외 디지털부하의 경우 또한 그림 11과 같이 입력 DC전압이 낮을수록 소비전력 또한 감소하며, 일정레벨 이하의 전압에서는 구동을 하지 않았다. 예컨대, PC본체의 경우는 180[V], LCD모니터의 경우는 110[V]로 직류로도 구동 가능한 최저전압을 얻을 수 있었다.

향후 직류급전으로 변경되면 디지털부하의 입력단의 정류기까지 제거되어 시스템의 구조가 간단해질 것이며 따라서 가격이나 부피면에서 유리해질 뿐만 아니라 소비전력도 감소하며, 계통으로 발생하는 고조파 및 역률 저하 등의 악영향을 줄일 수 있는 장점이 있게 된다.

(3) 조명부하

조명부하로 삼파장 형광등과 LED 램프의 부하특성을 조사하였다. 교류를 인가할 경우 입력단의 AC-DC 컨버터에 의해 그림 9 (c)와 같이 디지털 부하와 유사한 입력전류특성을 보이며 입력전류의 역률은 0.5 ~ 0.8로 낮았고, 또, 전류 THD가 30[%]이상으로 계통에 좋지 못한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

조명부하에 직류를 인가 할 경우 그림 11과 같이 직류110[V]~360[V] 전압구간에서 정상 동작하며 입력전압이 낮아질수록 소비전력 또한 작아졌는데 직류 220[V]에서 최소 소비전력을 갖는 것으로 얻어졌다. 일정 직류전압레벨 (100[Vdc])이하에서는 구동을 하지 않았으며, 직류110[V]~360[V] 전압구간에서 LED램프의 광도가 일정함을 확인 할 수 있다.

(4) 유도성 부하

현재 상용화되고 있는 에어컨 및 냉장고는 컴프레서에서 전동기 구동을 위해 교류전원을 바로 사용하기 때문에 그림 9(d)의 입력전류가 흐르는데, 보통 역률 0.84의 유도성으로 분석되었다. 전자레인지의 경우 교

표 3 배전전압에 따른 손실 및 전압강하  
Table 3 Power loss and voltage drop due to the distribution voltage

	배전선 손실		배전선 전압강하	
	해석	실험	해석	실험
110[V] (k=0.5)	59.5[W]	61.5[W]	6.54[V]	7.11[V]
220[V] (k=1)	14.87[W]	16.1[W]	3.27[V]	3.9[V]
311[V] (k=1.4)	7.4[W]	10.1[W]	2.32[V]	2.65[V]
380[V] (k=1.7)	5.6[W]	6.8[W]	2.00[V]	1.94[V]

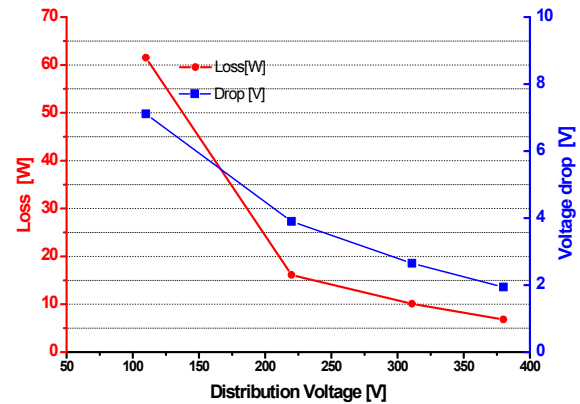


그림 13 배전전압에 따른 배전선 손실 및 전압강하  
Fig. 13 Power loss and voltage drop due to the DC voltage

류전원을 변압기로 승압하여 고전압을 얻는데, 이 경우 전류에 고조파(전류THD 15[%])가 발생하며 역률은 0.92로 얻어졌다.

전동기 부하 및 입력 단에 변압기를 포함하고 있는 부하는 DC전원을 인가할 수 없으며, 현재 교류 배전을 통해 시스템을 구동해야 한다.

4.2 하이브리드 배전방식의 직류급전전압

가정용 디지털제품, 조명부하 그리고 전열부하를 구동하기 위한 직류급전 전압 선정은 앞서 실험한 급전 전압에 따른 제품의 소비전력과 동시에 기존의 교류배전선의 규격과 전선에서 발생하는 손실 및 전압강하(내선규정에 의해 배전전선에서 발생하는 전압강하가 배전전압의 2[%]이내로 발생해야 한다)를 고려해야 한다.



표 3에서 옥내 배전선(교류배전선 1.5mm<sup>2</sup>, 20m)을 따라 부하 1[kW]에 전력을 공급할 때 직류공급 전압에 따라 급전선에서 발생하는 손실과 전압강하를 손실 관련 식(7)과 전압강하 관련 식(8)을 통해 해석한 값과 실험을 통해 얻은 값을 비교하였다. 직류110[V](k=0.5) 배전시 배전선에서 발생하는 손실은 실험과 해석에 의해 각각 61.5[W]와 59.5[W]로 6[W]의 오차가 발생하였으며, 전압강하는 7.11[V]와 6.54[V]로 0.57[V]의 오차가 발생하였다. 오차의 원인은 배전선의 온도상승으로 인한 저항의 증가로 볼 수 있다. 직류 110[V] 배전이 직류 380[V](k=1.72)로 배전할 때 보다 손실이 54.7[W] 더 발생하여 배전효율이 떨어지며, 전선에서 발생하는 전압강하는 7.11[V]로 기준치 2.2[V](110[V]\*2%)를 초과하므로 배전 전압으로는 적절하지 않다. 직류380[V]의 경우 배전선에서 발생하는 손실이 가장 작아 효율 면에서 유리하지만 배전전압의 상승으로 인해 기존 배전선의 교체 및 제품의 입력단 정류부에 전압 스트레스가 증가하는 단점이 발생한다. 그림 13은 표 3의 실험값을 나타낸 그래프로 전체적으로 높은 전압으로 배전할 때 배전 전류의 크기가 줄어들어 배전선에서 발생하는 손실과 전압강하가 작아져 저전압 배전 때 보다 유리함을 그래프를 통해 확인 할 수 있다.

### 5. 결과 및 검토

기존의 가정용 교류부하를 직류전원에서 운전 실험 결과 입력측에 변압기가 있는 부하와 전동기부하의 경우 직류전원에서 구동되지 않았으며, 그 외 부하의 경우 정상동작을 하였다. 배전전압에 따른 가정용 부하의 소비전력의 추이는 앞 절의 실험을 바탕으로 그림 14와 같이 표현할 수 있고, 여기서 k는 교류전압에 대한 직류배전 전압의 비율( $E_{dc}/E_{ac}$ )이다. 그림 14는 입력 직류전압 변동시 각 기기의 소비 전력의 변화 추이에 따라 표 4와 같이 3가지 유형으로 구분하였으며, 현재 상용화되고 있는 제품의 입력 측 AC/DC 컨버터의 정격전압 레벨로 인해 직류 80[V](k=0.4) 이하 전압에서는 대부분의 제품이 구동되지 않는다. 또한 커피포트, 전기다리미 등의 전열부하의 경우는 교류 220[V]와 동일한 실험값을 갖는 직류 220[V](k= 1.0)에서만 정상동작을 한다. 전압에 따른 각제품의 소비전력은 k가 0.6~1.2 사이에서 최소 소비전력으로 동작을 하며, 현재 전열부하의 동작 전압과 배전선에서 발생하는 손실 및 전압강하를 고려하면 직류220[V](k=1)~311[V](k=1.414) 배전이 옥내 배전의 효율 및 제품의 적용면에서 유리

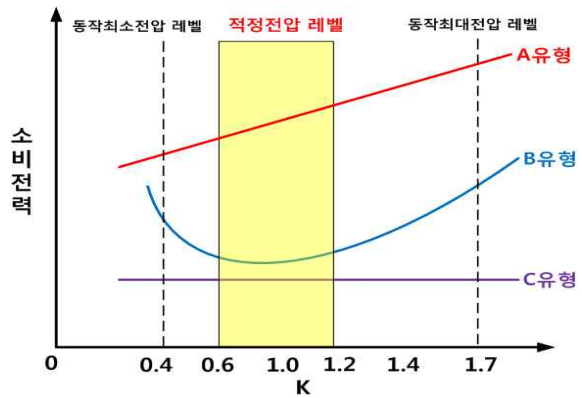


그림 14 k의 변화에 따른 부하유형별 소비전력 추이  
Fig. 14 Power consumption trends due to the k

표 4 유형별 부하의 종류

Table 4 Kind of load by load type

A 유형	B 유형	C 유형
LCD모니터	스캐너	LED형광등
스탠드	CRT모니터	LED면광원1
PC본체	-	LED면광원2
충전기	-	LED백열등

하다.

급전전압 직류220[V]를 바탕으로 교류 및 직류 배전의 효율을 해석한 결과 제품1개(60[W]LED램프)의 배전선 및 입력측 정류기에서 발생하는 손실이 약 0.5[W]감소하였다. 이는 우리나라 총 가구수 1667만 3000가구로 환산하면 LED램프 한 개당 총 8.34[MW]의 에너지 절감을 의미한다. 또한 이와 더불어 향후 디지털 부하 및 조명부하 입력단의 정류기를 제거하였을 경우의 전체 소비전력 저감은 대단히 클 것으로 기대된다.

### 6. 결론

다가오는 디지털 부하시대에 하이브리드배전은 시스템의 에너지 효율 향상 및 계통의 품질향상을 위해 도입되어야 할 과제이다. 본 논문에서는 직류 및 교류 하이브리드 배전을 위해 현재 상용화되고 있는 가정용 부하의 직류 및 교류 전원에서의 부하특성을 전열부하, 조명부하, 디지털 부하, 유도성 부하특성을 확인하였으며, 현재 유도성 부하를 제외하고는 직류배전이 가능함을 확인하였다. 유도성 부하는 하이브리드 배전시스

템의 교류배전을 통해 구동이 가능하다.

하이브리드 배전시 직류급전 전압은 입력전압에 따른 제품의 소비전력과 동시에 기존의 교류배전선에서 발생하는 손실 및 전압강하를 고려하여 직류 220~311[V]에서 최적임을 실험을 통해 밝혔다.

직류 및 교류 하이브리드 배전방식은 향후 가정용 부하의 효율상승 및 입력측 고조파 전류로 인한 계통 측으로 악영향 감소, 배전선의 이용률 및 손실 감소 등의 장점을 예상할 수 있으나, 현재 DC 배전에 관한 신뢰할만한 규정이 미흡하므로, 시스템의 접지, 보호, 그리고 과부하 방지 기술의 개발 및 검토가 향후 필요하다.

본 연구는 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(2009T100100100)으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Intel Development Forum, "Powering Compute Platforms in High Efficiency Data Centers", Intel Developer Forum, Fall 2006.
- [2] William Tschudi Lawrence, Berkeley National Laboratory, "DC Power for Improved Data Center Efficiency", 2007, January.
- [3] Koji kariatumari, "데이터센터에서 가정까지 DC전원", NEAKorea, 2009.
- [4] 손성용, "교류배전시스템과 직류배전시스템이 적용된 IDC 전력효율 비교연구", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 22, No. 8, pp. 38~44, 2008.
- [5] 장성원, "고효율 친환경으로 각광받는 LED 조명", 삼성경제연구소, 2008. 8.
- [6] 이경호, "직류(DC)배전 동향 및 안전대책", *전력전자학회지*, 제14권, 제2호, pp. 21~26, 2009. 4.
- [7] D.Nilsson and A. Sannino, "Load modelling for steady-state and transient analysis of low-voltage dc systems", in Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting, Seattle, WA, Oct.3-8, 2004.
- [8] D.Nilsson, "Efficiency analysis of low- and medium voltage DC distribution systems", *IEEE and Ambra Sannino*, Member, IEEE.
- [9] A. Sannino, G. Postiglione, and M. Bollen, "Feasibility of a dc network for commercial facilities", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Sep./Oct. 2003.

- [10] K.Mizuguchi, S. Muroyama, "A new decentralized DC power system for telecommunications systems", in Proc. IEEE International Telecommunication Conf INTELEC.
- [11] G. Asplund, K. Eriksson, and K. Svensson, "DC transmission based on voltage source converters", in CIGRE Conf., no. 14-302, Paris, France, 1998.
- [12] M. Baran and N. Mahajan, "DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2003, Nov./Dec.
- [13] Daniel Salomonsson, Student Member, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, July.

### 저 자 소 개



#### 이영진(李永鎭)

1983년 2월 26일생 2008년 건국대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



#### 한동화(韓棟華)

1982년 11월 17일생 2008년 건국대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



#### 최중묵(崔重默)

1983년 1월 1일생. 2008년 건국대 전기공학과 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전력전자 및 전기기계 전공(석사).



#### 정병환(鄭炳煥)

1978년 11월 1일생 2001년 경성대 전기공학과 졸업 2003년 건국대 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 삼성탈레스 과장.



### 김동진(金東辰)

1966년 9월 10일생 2007년 단국대학교 전기공학과 졸업(석사) 현재 동 대학원 박사과정. 건축전기설비 기술사, 선광엘티아이(주) 대표이사.



### 최규하(崔圭夏)

1955년 7월 24일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1988년 미국 오레곤 주립대 전기공학과 Psot-Doc. 1998년~1999년 버지니아주립대 교환방문교수. 1997년~1998년 건국대 연구처 처장. 1996년~현재 건국대 산업기술연구원 인버터제어기술연구센터 소장. 1999년~현재 건국대 부설 전력전자신기술연구센터 소장. 2002년~2004년 건국대 교무처 처장. 1996년~현재 전기안전공사 전기안전기술 자문위원. 현재 건국대 전기공학과 교수. 2007년~2008년 당 학회 회장 역임.