

LLC 공진형 컨버터를 적용한 전기자동차 고압배터리 충전기 개발

김경만[†], 유종욱¹, 김태권¹, 강찬호¹, 전태원²

Development of Battery Charger for Electric Vehicle using the LLC Resonant Converter

Gyoung-Man Kim[†], Jong-Uk Yoo¹, Tae-Kwon Kim¹, Chan-Ho Kang¹, and Tae-won Chun²

Abstract - This paper deals with LLC resonant converter of on-board charger for electric vehicle charging. Generally, the on-board charger must have a very widely charging voltage, higher efficiency, higher power factor, lower volume and lower weight. For reducing the switching losses, voltage and current stress of the device, the on-board charger is apply the half-bridge LLC resonant converter topology. To have a wide voltage range, it is design the hardware parameters and determine the switching frequency range of the LLC resonant converter. The experimental results show a wide charge voltage.

Keywords: OBC(ON-Board Charger), EV(Electric Vehicle), LLC resonant converter, half-bridge DC/DC converter

1. 서 론

최근 세계 각국은 화석에너지 사용으로 인한 탄소배출문제와 고유가로 인한 고연비 자동차에 대한 요구를 충족하기 위하여 친환경자동차 개발에 역량을 집중하고 있다. 배터리 저장기술의 발달과 모터제어 기술의 발달로 인하여 전기자동차에 대한 관심이 높아지고 있으며, 그 중에서 전기자동차(Electric Vehicle, EV) 및 플러그인 하이브리드 전기자동차(Plug-In Hybrid Electric Vehicle, PHEV)는 고압배터리(high voltage battery)에 의해 모터를 구동하는 자동차로 상용화에 대한 관심이 대단히 높다. EV 및 PHEV의 주동력원이 고압배터리이기 때문에 고밀도의 2차 전지에 대한 기술개발과 함께 고성능 충전장치에 대한 기술개발도 함께 진행되고 있다^{[1][2]}.

현재 개발 중인 탑재형 충전기는 광범위한 출력전압

을 낼 수 있는 고성능을 비롯하여, 고역율, 고효율 등의 충전특성과 차량 주행시 전기적 동작을 하지 않으므로 소형화, 경량화, 저가격의 비충전 특성이 동시에 요구된다. 따라서 고성능, 고효율, 고전력밀도의 탑재형 충전기의 특성을 달성하기 위해 고주파스위칭과 고주파 스위칭에 의한 손실을 저감하기 위한 공진형 컨버터(resonant DC-DC converter) 토폴로지를 이용한 영전압 스위칭 기법(Zero Voltage Switching)이 요구된다^{[3][4]}.

단상 교류 전원으로 전기자동차용 고압배터리를 충전할 수 있는 3.3kW급 탑재형 충전기 개발을 위하여 LLC 공진형 컨버터(LLC resonant converter)를 적용하였다. 직렬공진 컨버터(series resonant converter)가 무부하 운전시 출력전압 제어가 힘들고 출력단 커패시터에 매우 높은 리플전류가 흐르는 점과, 병렬공진 컨버터(parallel resonant converter)가 경부하시 손실이 크게 줄지 않고 출력전압의 변동폭이 적은 단점을 가진다. LLC 공진형 컨버터는 동일 출력을 내기 위해 스위칭 주파수 변동범위가 다소 넓고, 부하 변화에 따라 공진주파수(resonant frequency)가 변화되지만, 직렬공진 및 병렬공진의 장점만을 조합하여 무부하시 출력제어가 가능하고 출력전압의 제어범위가 큰 장점을 가진다^{[5][6]}.

본 논문에서는 단상 교류 전원으로 동작하는 3.3kW급 탑재형 충전기가 250 ~ 450V의 광범위한 전압을 출력

Paper number: TKPE-2013-18-5-5 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: gmkim@egtronics.co.kr, R&D Center EGTRONICS

Tel: +82-31-8002-3201 Fax: +82-31-8002-3207

¹ R&D Center EGTRONICS

² Dept. of Electrical Eng., University of Ulsan

Manuscript received Sep. 19, 2011; accepted Jun. 5, 2013

— 본 논문은 2011년 전력전자학술대회 우수추천논문임

시킬 수 있는 LLC 공진형 컨버터 제어와 실차 장착에 유리한 저부피, 저중량 특징을 가지는데 초점을 맞추어 개발을 하였다.

2. 탑재형 충전기 구성과 설계

2.1 시스템 구성

그림 1은 본 논문에서 개발된 탑재형 충전기의 전체 시스템 구성도를 나타내고 있으며, 크게 AC/DC 변환부와 DC/DC 변환부로 구성되어 있다. AC/DC 변환부는 필터를 거친 단상 교류전원이 역률보상회로 (Power Factor Correction, PFC)를 통하여 거의 일정한 직류전원으로 변환되며, 이는 다시 DC/DC 변환부를 통하여 배터리를 충전시킬 수 있는 입력과 절연된 직류전원으로 변환된다.

PFC 회로는 전류연속모드(Continuous Current Mode, CCM)의 2상 위상천이(Two-phase interleaved) PFC Boost를 적용하였다. Boost 방식은 PFC 전력단에 사용함에 무리가 없으며 그림 1의 DC/DC 변환부에 유기적으로 응용하기가 쉽다. 일반적인 PFC Boost와는 다르게 2개의 리액터가 부하량을 분담하며 180도 위상차를 가지고 동작하여 출력리플을 줄이고 이에 따라 노이즈도 저감할 수 있어 입력단 필터의 용량을 줄일 수 있다^[7]. 2상 위상천이 PFC Boost는 단일단 PFC Boost에 비해 2배의 스위칭 주파수를 인가한 것과 동일한 효과를 얻을 수 있으므로 수동소자의 부피를 1/2로 줄인 것과 동일하다.

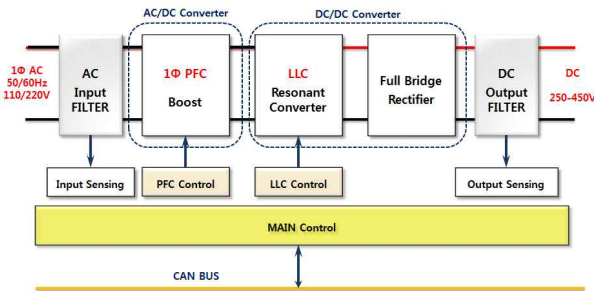


Fig. 1 Block Diagram of OBC

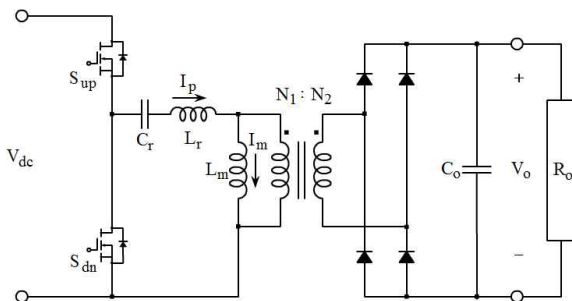


Fig. 2 LLC resonant converter

그림 2는 본 논문에서 적용한 하프브리지(Half Bridge) LLC 공진형 컨버터를 이용한 DC/DC 컨버터를 나타내고 있다. 하프브리지 DC/DC 컨버터는 풀브리지(Full Bridge) DC/DC 컨버터에 비해 부품이 작아 도통 손실이 적고, 저비용, 저부피, 스위칭 스트레스 저감, 간단한 제어 등의 이점을 가져 EV 및 PHEV 탑재형 충전기의 비충전특성에 대해 최적의 토폴로지이다.

수동소자의 크기를 줄이기 위해 높은 스위칭 주파수가 요구되고, 이로 인한 손실을 저감하기 위해 영전압스위칭(Zero Voltage Switching, ZVS)가 가능한 LLC 공진형 컨버터 토폴로지가 선택하였다.

2.2 LLC 공진형 컨버터 설계

하프브리지 LLC 공진형 컨버터는 L_r 과 C_r 이 직렬공진하여 L_m 을 통하여 2차측으로 전력을 전달하는 회로방식이다. LLC 공진형 컨버터의 복잡한 모델에 대해 정확한 해석은 쉽지 않지만, 1고조파 근사해석법(first harmonics approximation)을 사용하여 교류 등가회로를 나타내면 그림 3과 같다^[5].

변압기의 권선비 $n = N_1/N_2$ 과 2차측 부하저항 R_o 라 할 때 그림 3의 등가회로에서 2차측 부하저항을 1차로 환산한 등가저항 R_{ac} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[5].

$$R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o \tag{1}$$

그림 3의 LLC 공진형 컨버터의 교류등가회로의 교류 등가회로의 입력력 전달함수는 다음 식과 같다. 단, 권선비 $n=1$ 이라 가정한다.

$$\frac{V_o}{V_I} = \frac{j\omega \left(\frac{L_m}{L_r} \right)}{j\omega \left(1 + \frac{L_m}{L_r} - \frac{1}{\omega^2 L_r C_r} \right) + \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{1}{C_r} - \omega^2 L_r \right) \frac{1}{R_{ac}}} \tag{2}$$

이상의 전압이득을 가질 때, $R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o$ 로 선택도 Q 값을 해석할 수 있다.

$$Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} = \frac{\pi^2}{8\pi^2} \cdot \frac{1}{R_o} \cdot Z_o = \frac{\pi^2 Z_o P_o}{8\pi^2 V_o^2} \tag{3}$$

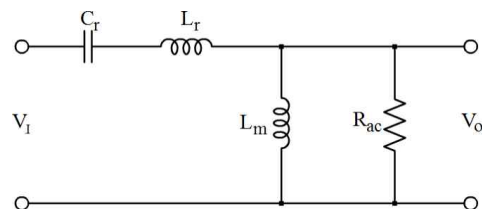


Fig. 3 AC equivalent circuit of LLC resonant converter

주어진 파라메타를 가지고 LLC 공진형 컨버터에서 공진 주파수(resonant frequency) $f_{r1} = 1/(2\pi\sqrt{L_r C_r})$, $f_{r2} = 1/(2\pi\sqrt{(L_m + L_r) C_r})$ 영역과 특성임피던스(characteristic impedance) $Z_o = \sqrt{L_r/C_r}$ 일 때 전압이득과 출력부하간에 상관관계는 다음과 같이 표기된다.

그림 4는 LLC 공진형 컨버터의 선택도 Q 에 따른 정규화주파수 변화에 따른 DC 특성곡선을 나타내고 있다. 임의의 선택도에서 이득을 크게 하기 위해서는 정규화주파수를 낮추어야 하고, 이득을 작게 하기 위해서는 정규화주파수를 크게 해야 한다. 따라서 제어할 출력전압의 크기에 따라 스위칭 주파수를 가변시켜 제어한다.

실제 파라메타들에 설정과 동작주파수에 따라 형성되는 전부하 곡선으로 입력전압 기준으로 출력전압 운전영역과 그에 따르는 전압 이득율과 연동하여 보여준다. 이를 가지고 출력전력의 효율 및 안정성을 조율하며 선택도 Q 변화에 따른 결과를 얻을 수 있다. 이는 사용하고자 하는 스위칭 주파수의 최소값으로부터 용량성성분과 유도성성분의 사이에서 얻을 수 있는 최대 전압이득에 대한 선택도 Q 값을 확인할 수 있다. Q 가 클수록 전부하 분포곡선의 스위칭 주파수와 공진주파수가 같은 지점을 기점으로 좁은 형태를 취하고, Q 가 작을수록 넓은 형태를 취한다. 이는 물리적으로 가능한 범위 내에서 설계치의 반영에 따른 구현범위를 미리 볼 수 있게 하여 소자를 선정하고 자성체 설계시의 특성 파라메타의 타협점을 산출할 수 있는 근거가 된다.

3. 탑재형 충전기 제작과 시험

표 1은 하프브리지 LLC 공진형 컨버터의 설계 파라메타를 나타내고 있다. 먼저 LLC 공진형 컨버터에서 공진주파수는 50kHz와 100kHz로 선정하였으나, 50kHz 이하의 대역은 구현이 불가하기 때문에 100kHz 대역에서 스위칭 주파수를 가변시켜 사용한다. 100여개 이상의 셀을 가진 리튬-이온 배터리를 충전할 수 있도록 250~450V의 출력전압 범위를 설정하고, 이를 제어하기 위해 스위칭 주파수는 공진특성을 기반으로 하여 65~200kHz로 선정하였다. 단상 교류 110V 입력에 대해 충전기

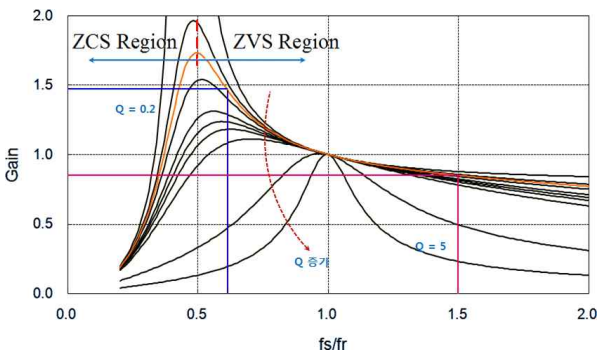


Fig. 4 DC characteristic of LLC resonant converter

Table 1 Design parameter for half bridge LLC converter

Parameter	Value	Unit
Rated Power	1.6 / 3.3	kW
Input Voltage	110 / 220 ±10%	Vrms
Output Voltage	250 - 450	Vdc
Output Current	12.4 / 7.3	A _{dc}
Ripple Voltage	< 10	V _{pp}
Switching Frequency	65 - 200	kHz
Resonant Inductance	10	μH
Resonant Capacitance	110	nF

출력은 1.6kW, 220V 입력에 대해 충전기 출력은 3.3kW가 되도록 하였다.

다음은 본 논문에서 제안된 토폴로지를 적용시킨 단상전원 입력을 가지는 3.3kW급 탑재형 충전기 시작품을 나타내고 있다.

그림 6은 3.3kW 전부하에서 PFC 제어로 단상 교류 입력전압과 교류입력전류가 거의 역률 1에서 동작하는 것을 보여주고 있다. 충전기 출력 파형에서 고조파 리플 성분이 크게 제거된 직류성분의 전압과 전류 파형을 보여주고 있다.

그림 7은 출력전압 320V일 때의 공진전류와 출력전압, 출력전류를 나타낸다. 공진전류의 파형에서 양(+)의 구간과 음(-)의 구간에 흐르는 전류가 일정하게 흐르는 것을 알 수 있다.



Fig. 5 Prototype of OBC

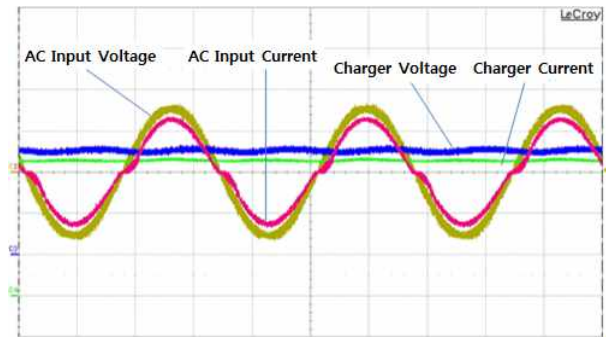


Fig. 6 Charger input and output waveform

그림 8과 그림 9는 LLC 공진 컨버터의 스위칭 주파수 변화에 따른 출력전압의 크기 변화를 나타내고 있다.

하프브리지의 각 스위칭 소자에 걸리는 전압의 파형에 따른 출력전압의 파형을 비교하여 나타내고 있다. 그림 8은 스위칭 주파수를 150kHz로 인가했을 때 출력전압은 250V가 되고, 그림 9는 스위칭 주파수를 68 kHz인 가했을 때 출력전압은 450V가 된다.

파형에서 LLC 공진형 컨버터의 선택도에 따른 DC 부하특성곡선에서의 최소 스위칭 주파수와 최대스위칭 주파수의 설계치 안에서 동작함을 알 수 있고, 이에 따른 안정된 출력전압과 전류가 흐름을 알 수 있다.

다음 그림들은 전 부하구간에 대해 충전전압의 변화에 따른 효율곡선을 그림 10에 나타내고 있으며, 역률곡선을 그림 11에 나타내고 있다.

그림 10의 효율곡선에서 출력전압이 330V에서 전 부하에 걸쳐 전반적으로 효율이 높게 나타나고, 출력전압이 450V에서 전 부하에 걸쳐 효율이 낮게 나타난다.

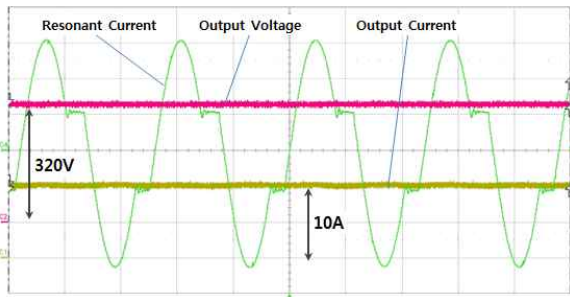


Fig. 7 Full load ZVS characteristic at Vo = 320V

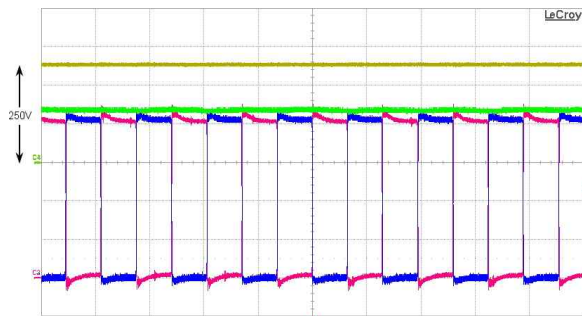


Fig. 8 Output voltage waveform at fs = 150kHz

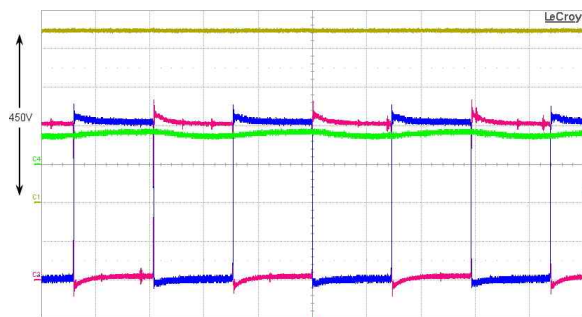


Fig. 9 Output voltage waveform at fs = 68kHz

최고효율은 출력전압 330V, 출력전력 2kW에서 94.0%로 나타났다.

그림 11의 역률곡선에서 출력전압이 450V에서 전 부하에 걸쳐 역률이 높게 나타나고, 출력전압이 330V에서 전 부하에 걸쳐 역률이 낮게 나타난다. 각각의 출력전압에서 부하가 커질수록 역률은 높게 나타나고, 모두 99.6%로 수렴한다.

효율이 높게 나타나는 출력전압 330V에서는 정규화 주파수 $f_s/f_r = 1$ 인 스위칭 주파수가 공진주파수와 비슷한 대역이고, 역률이 높게 나타나는 450V 및 250V에서는 정규화 주파수 f_s/f_r 가 1에서 먼 대역이다. 또한 효율이 우수한 출력전압 대역은 역률이 떨어지고, 역률이 우수한 출력전압 대역은 효율이 떨어진다.

4. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 구동용 배터리를 단상 전원으로 광범위한 충전전압을 얻기 위해 LLC 공진형 컨버터를 이용하여 충전기를 개발하였다. 부하 및 실차 배터리 충전시험에서 충전전압이 250V에서 450V까지의 범위를 만족하는 것을 확인하였으며, 최대효율 94%의 성능조건과 중량 5.8kg, 부피 5.9L의 고밀도 특성을 확인하였다.

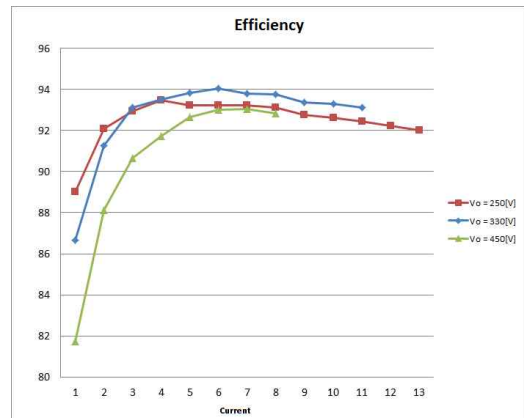


Fig. 10 Efficiency curve

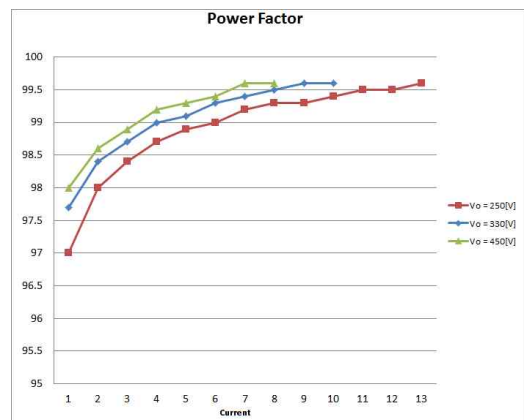


Fig. 11 Power factor curve

본 연구는 울산광역시와 교육과학기술부에 의해 지원된 지방과학연구단지 연구개발사업으로 수행하였습니다.

References

- [1] M. M. Morcos, C. R. Mersman, G. G. Sugavanam, and N. G. Dillman, "Battery charger for electric vehicles," *IEEE Power engineering Review*, pp. 8-11, Nov. 2000.
- [2] I. A. Kahn, "DC-to-DC Converters for Electric and Hydrid Vehicle," *Power Electronics in Transportation*, pp. 113-122, Oct. 20-22, 1994.
- [3] Y. C. Chiang, Y. L. Ke, H. S. Chuang, and H. K. Chen, "Implementation and analysis of an improved series-loaded resonant dc-dc converter operating above resonance for battery chargers," *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference(ICPS)*, pp. 1-8, May 2008.
- [4] Chang-Yeol Oh, Jong-Soo Kim, and Byoung-Kuk Lee, "Design of Optimal Resonant Frequency for Series-Loaded Resonant DC-DC Converter in EVs On-Board Battery Charger Application," *The Transactions of the KIPE*, Vol. 17, No. 1, pp. 77-84, Feb. 2012.
- [5] Hang-seok Choi, "Design consideration of half bridge LLC resonant converter," *Journal of Power Electronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 13-20, Jan. 2007.
- [6] Bong-Chul Kim, Ki-Bum Park, Chong-Eun Kim, Byoung-Hee Lee, and Gun-Woo Moon, "LLC Resonant Converter With Adaptive Link-Voltage Variation for a High-Power-Density Adapter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 25, No. 9, Sept. 2010.
- [7] Wujong Lee, Ju-Kyoung Eom, Byung-Moon Han, and Hanju Cha, "Design and Experiment of Three-phase Interleaved DC-DC Converter for 5kW Lead-Acid Battery Charger," *The Transactions of the KIPE*, Vol. 16, No. 3, pp. 227-233. June 2011.
- [6] B.L. Sheng E. Jansson A. Blomberg H-O Bjarme D. Windmar, "A New Synthetic Test Circuit For the Operational Tests of HVDC Thyristor Modules," *Paper presented at IEEE PELS APEC2001 Conference* on March 04-08, 2001, at Anaheim, USA. Conf. Proceedings, pp. 1242-1246, Mar. 2001.
- [7] T. Bauer, H.P. Lips, G. Thiele, T. Tylutki, M. Uder "Operatonal Tests on HVDC Thyristor Modules in a Synthetic Test Circuit for the Sylmar East Restoration Project," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 3, Jul. 1997.
- [8] M.L. Woodhouse, T. Simanwe "A New Facility for Testing HVDC and SVC Thyristor Valves," B4-309, CIGRE 2006.



김경만(金京滿)

1971년 1월 11일생. 1996년 울산대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기전자정보시스템공학과 박사수료. 현재 (주)이지트로닉스 수석연구원. 현재 울산과대학 전기전자학부 겸임조교수.



유종욱(劉鍾旭)

1982년 4월 16일생. 2007년 강원대 제어계측공학과 졸업. 2007년~2010년 (주)동아일렉콤 연구원. 2010년~현재 (주)이지트로닉스 선임연구원.



김태권(金泰權)

1968년 1월 3일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업. 2013년 한양대 전기공학과 석사과정. 1995년~2008년 (주)동아일렉콤 책임연구원. 2008년~현재 (주)이지트로닉스 연구소장.



강찬호(姜燦鎬)

1959년 4월 13일생. 1986년 중앙대 전자공학과 졸업. 1996년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2003년 SOJO대(일) 전력전자공학 졸업(공학박). 1988년~1989년 LG정보통신(주) 연구원. 1989년~2008년 (주)동아일렉콤 연구소장. 2008년~현재 (주)이지트로닉스 대표이사.



전태원(全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 Tennessee대학 방문교수. 2005년~2006년 미국 Virginia Tech 방문교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수. 당 학회 감사.