

태양광 발전 시스템을 위한 LLC 직렬공진컨버터 적용 무접점 전원장치

이현관, 이기식, 강성인, 공영수, 김은수, 김윤호^{*}
전주대학교, 중앙대학교^{*}

A Contact-less Power Supply using LLC resonant converter for
Photovoltaic Power Generation System

H.K Lee, G.S Lee, S.I Kang, Y.S Kong, E.S Kim, Y.H Kim^{*},
Jeonju University, Chungang University^{*}

Abstract - The high efficiency full-bridge LLC resonant converter using a contact-less transformer is proposed for the photovoltaic power generation system. For the series resonance with a series capacitor, the LLC resonant converter utilizes the leakage inductance and magnetizing inductance of a contact-less transformer. Unlike the conventional series resonant converter operated to the continuous resonant current at above resonance frequency, the proposed converter operates to the discontinuous resonant current at the narrow frequency control range below resonance frequency. Due to the discontinuous mode resonant current, the proposed converter can be achieved the zero voltage switching (ZVS) in the primary switches and the zero current switching (ZCS) in the secondary rectification diodes without any auxiliary circuit. In this paper, the experimental results of the proposed full-bridge LLC resonant converter using a contact-less transformer are verified on the simulation based on the theoretical analysis and the 150W experimental prototype.

1. 서 론

화석 연료의 고갈에 대비한 대체에너지원의 확보와 화석연료의 사용에 따른 환경오염 및 지구 온난화 현상, 개발도상국의 에너지 수요 급증 등 에너지 문제에 대처하기 위하여 에너지 고갈이 없고 친환경적인 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 여러 신재생에너지들 중에서 에너지원이 무한정하고 공해가 전혀 없는 태양광 발전이 유망한 대체 에너지원으로 인정받고 있고 그 적용이 증가하고 있다. 이러한 대체에너지원인 태양광을 이용한 계통연계형 발전시스템은 태양광으로부터 발전된 직류전압을 승압형 DC/DC 컨버터(DC to DC Boost Converter)를 사용하여 낮은 직류전압을 높은 전압으로 승압시켜 보조 전원인 배터리에 충전 및 고주파 인버터 입력전원으로 공급하고 고주파 인버터를 통해 고주파 AC 전압을 변환시킨 후 계통 연계를 위한 60Hz 상용전원으로 변환하여 가전기기 및 부하에 전력을 전달하는 방식으로 구성되어 있다.^[1] 그러나 이러한 많은 전력 변환기를 통한 전력공급은 전체 시스템의 효율을 저감 할 뿐만 아니라 부피가 커지는 단점을 가지고 있다. 또한 한전 등의 발전소에서 공급되는 계통과의 연계시스템보다는 향후 미래에는 태양광 및 축전지와와 하이브리드 홈 시스템인 독립형 분산전원발전시스템으로 적용 추세에 있다.^[8] 하지만, 태양광 발전 출력이 직류 전압이기 때문에 직접적인 직류전압을 사용하여 가전기기 및 부하에 적용하는 부분에 있어 스위치 전원 투입과 차단 시 발생 될 수 있는 스파크(Spark) 발생위험과 부주의로 인한 감전사고 및 누전사고 등의 문제점을 갖고 있다. 따

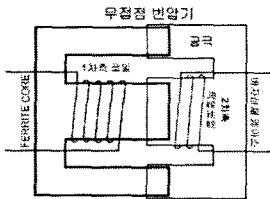
라서 본 논문에서는 Buck-Boost 컨버터, Full-bridge LLC 공진컨버터 적용 무접점 전원장치로 구성된 태양광 발전 하이브리드 홈 전원시스템을 제안하였다. 하지만 적용하고자 하는 무접점 전원장치의 무접점 변압기는 기존의 변압기와 달리 공극(Air-Gap)이 매우 크기 때문에 누설인덕턴스가 증가하고 자화인덕턴스는 상대적으로 감소하게 되므로 결합계수(Coupling Coefficient)가 작아져 전력변환 효율이 매우 저감되는 특성을 보인다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 직렬 공진컨버터가 널리 이용되고 있다.^[2,3] 그러나 기존 직렬 공진컨버터 적용 무접점 전원장치는 소프트 스위칭 동작을 위해 스위칭 주파수를 공진주파수 보다 높은 주파수에서 연속모드 공진전류로 스위칭 동작하는 것이 일반적이다.^[4] 이러한 기존 직렬 공진컨버터 적용 무접점 전원장치는 주스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)은 이룰 수 있으나 2차측 정류다이오드의 영 전류 스위칭(ZCS)은 이룰 수 없는 단점이 있다. 또한, 공진주파수보다 높은 영역에서 스위칭 동작되기 때문에 전압이득특성이 낮고 1차측 순환전류가 많이 흘러 손실을 증가시키는 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 무접점 전원장치에 있어 스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS) 뿐만 아니라 2차측 정류다이오드도 영 전류 스위칭(ZCS)을 이룰 수 있는 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터를 이용한 무접점 전원장치를 제안하였다. 제안된 LLC 공진컨버터는 공진주파수보다 낮은 영역에서 스위칭 동작되기 때문에 높은 전압이득특성에 따라 적은 턴수-비의 변압기 사용과 불연속모드 공진전류 때문에 효율특성을 개선 할 수 있다. 이에 대한 이론적 해석 및 시뮬레이션을 통해 150W급 시제품을 제작하여 태양광 발전전원시스템에 적용 실험한 결과를 서술했다

2. 무접점 변압기 적용 LLC 직렬공진컨버터 특성분석

기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터는 스위칭 동작영역이 규준화된 공진주파수가 1보다 높은 영역에서 스위칭 동작을 하는 것이 일반적이었다.^[2,3,4] 그러나 본 논문에서는 기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터와는 달리 스위칭 동작영역을 규준화된 공진주파수가 1보다 낮은 영역에서의 스위칭 동작을 제안하였다. 이러한 경우 기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터의 문제점들을 개선할 수 있으며, 높은 효율특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그림 1은 Full-bridge LLC 공진컨버터에 적용된 무접점 변압기의 구조를 나타내었다. 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 무접점 변압기 1차측은 자성체이고, 2차측 픽업코일은 공극인 비자성체로 구성되어 있다. 그리고 2차측 픽업코일이 1차측과 결합하여 1차측의 에너지를 2차측으로 전달하며, 무접점 변압기 1차측과 2차측은 많은 공극을 가지고 있다. 이러한 많은 공극을

갖는 무접점 변압기는 기존 변압기와 달리 자화인덕턴스(Magnetizing Inductance)가 상대적으로 작은 값을 가지게 되고, 1차측 누설인덕턴스 및 2차측 누설인덕턴스 값이 증가하게 되어 결합계수(Coupling coefficient)가 낮은 특성을 갖게 된다. 이러한 특성을 갖는 무접점 변압기의 경우 자화인덕턴스를 통한 자화전류가 많이 흐르게 되어 1차측 에너지를 2차측으로 전달하는데 많은 어려움이 있다. 뿐만 아니라, 1차측과 2차측 권선방법 및 결합구조에 따라 1·2차측 누설인덕턴스와 자화인덕턴스 값의 변화가 많이 발생하기 때문에 회로해석에 있어 매우 중요한 고려사항으로 작용하게 된다. 그림 2(a)는 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터에 대한 주 회로이고, 그림 2(b)는 등가회로를 나타낸 것이다. 그림 2(b)의 V_{ab} 는 주 스위칭 소자 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 의 스위칭 동작에 의해서 얻어진 단자전압을 구형파 전원으로 등가화 한 것이며, C 와 L_{11} 은 1차측 직렬 커패시터와 직렬 누설 인덕턴스이고, L_m 은 자화 인덕턴스 그리고 L_{12} 와 R_{eq} 은 1차측에서 바라본 2차측 누설인덕턴스와 등가 부하저항이다. 그리고 등가 부하저항(R_{eq})은 부하저항, 정류다이오드 그리고 커패시터 필터를 등가화한 값이다.

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi} R_L \quad (1)$$



(a) 무접점 변압기 구조
(a) Structure of contactless transformer



(b) 분리(Decoupling) 시
(b) Decoupling



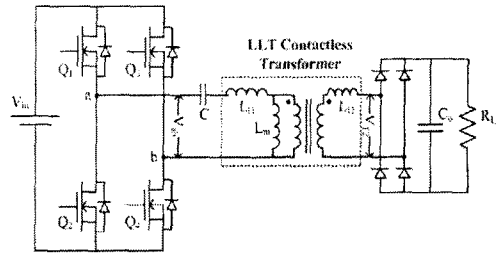
(c) 결합(Coupling) 시
(c) Coupling

그림 1 무접점 변압기의 구조 및 시제품 사진
Fig.1 Structure and prototype of contactless transformer

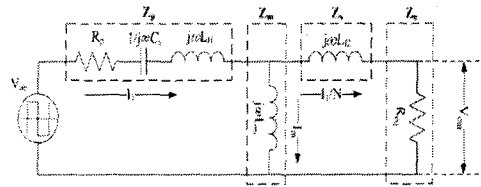
또한 회로 해석의 용이성을 위해 본 논문에서는 권선 비를 1로 하였다. 그림 2(a)를 등가화한 그림 2(b)의 등가회로로부터 등가 부하저항이 단락 일 때의 주파수 즉 공진주파수와 개방 일 때의 주파수 즉 코너 주파수(Corner frequency)를 식(2),(3)에 정의하였다.

$$\omega_r = \sqrt{L_{eq} \cdot C} \quad (2)$$

$$\omega_o = \sqrt{(L_{11} + L_m) \cdot C} \quad (3)$$



(a) 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터
(a) Full-bridge LLC resonant converter using a contactless transformer



(b) 등가회로
(b) Equivalent circuit

그림2 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터와 등가회로

Fig.2 Full-bridge LLC resonant converter using a contactless transformer and its equivalent circuit

그리고 그림 2(b)로부터 등가 부하저항이 단락 일 때의 등가 누설인덕턴스(L_{eq})는 식(4)과 같다.

$$L_{eq} = \frac{L_{11} (L_m + L_{12}) + L_{12} L_m}{L_{12} + L_m} \quad (4)$$

규준화된 공진주파수(ω_n)는 스위칭 주파수(ω_s)와 공진주파수(ω_r)의 비이고, A는 자화인덕턴스(L_m)와 1차측 누설인덕턴스(L_{11}) 비이다. 그리고 B는 자화인덕턴스(L_m)와 2차측 누설인덕턴스(L_{12}) 비이고, Q는 부하 Quality Factor이다.

$$\omega_n = \omega_s / \omega_r \quad (5)$$

$$A = L_{11} / L_m \quad (6)$$

$$B = L_{12} / L_m \quad (7)$$

$$Q = \omega_r L_{eq} / R_{eq} \quad (8)$$

그리고 임피던스 관계 및 위의 수식(1)~(8)에 의해 얻어진 입·출력에 대한 전압이득(M) 특성은 식(9)과 같이 얻었다.

$$M = \left| \frac{\frac{Z_o Z_m}{Z_s + Z_o + Z_m}}{\frac{Z_s Z_m + Z_o Z_m + Z_s Z_p + Z_m Z_p + Z_o Z_p}{Z_s + Z_o + Z_m}} \right| = \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{\omega_n}\right)^2 \cdot \left(A + \frac{B}{B+1}\right) + jQ(1+B) \cdot \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n}\right)} \right| \quad (9)$$

식(9)로부터 알 수 있듯이 전압이득(M)은 1차측 누설인덕턴스와 자화인덕턴스 비(A), 2차측 누설인덕턴스와 자화인덕턴스 비(B) 그리고 부하 Quality factor(Q)와 기준화된 공진주파수(ω_n) 값에 의존한다. 그림 3은 1차측 누설인덕턴스와 2차측 누설인덕턴스 및 자화인덕턴스 비(A,B)를 0.1로 한 경우 기준화된 공진주파수(ω_n) 및 Q 변화에 대해 전압이득 특성을 나타내었다. 그림 3의 시뮬레이션 결과로 알 수 있는 것처럼 Q와 기준화된 공진주파수 변화에 대한 전압이득 특성은 기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터와 유사한 특성을 보인다. 그러나 본 논문에서는 스위칭 주파수를 기준 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터와는 달리 스위칭 주파수를 기준화된 공진주파수가 1보다 낮은 영역에서 스위칭 동작하는 것을 제안하였다. 기존 무접점 변압기를 적용한 직렬 공진컨버터의 경우 스위칭 동작영역은 주로 기준화된 공진주파수가 1보다 높은 영역에서 스위칭 동작을 하는 것이 일반적이다. 이러한 경우 주 스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)을 이룰 수 있는 장점은 있지만 무접점 변압기 1차측의 단자 전압(V_{ab})과 전류(I_1)의 위상차에 의한 많은 순환전류가 흐르고, 일정 출력 전압을 얻기 위해 부하변화에 따른 넓은 스위칭 동작 주파수 변화와 전압이득이 낮은 영역에서 스위칭 동작을 하므로 낮은 전압이득 특성에 따른 무접점 변압기 2차측 턴 수가 증가되는 단점이 있다. 뿐만 아니라, 무접점 변압기 2차측의 정류 다이오드에 흐르는 전류가 연속모드로 흐르기 때문에 영 전류 스위칭(ZCS) 동작은 얻을 수 없어, 정류 다이오드의 역 회복 특성에 의한 단락 전류에 의해 출력전압에 노이즈가 발생하게 되고 낮은 효율특성을 갖게 된다. 이러한 기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터의 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 그림 3에 나타난 것처럼 스위칭 주파수를 기준화된 공진주파수가 1보다 낮은 영역에서 스위칭 동작을 하였다. 이러한 경우 기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터와 같이 주 스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)을 얻을 수 있고, 좁은 주파수 범위에서도 부하변화에 대해 일정 출력 전압을 제어할 수 있으며, 전압이득이 높은 영역에서 스위칭 동작을 하므로 높은 전압이득 특성에 따른 무접점 변압기 2차측 턴 수를 줄일 수 있다. 뿐만 아니라, 불연속 공진전류에 의해 무접점 변압기 2차측의 정류 다이오드의 영 전류 스위칭(ZCS)도 이룰 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터는 기존 무접점 변압기 적용 직렬 공진컨버터에 비해 출력전압 노이즈 저감 및 높은 효율 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다.

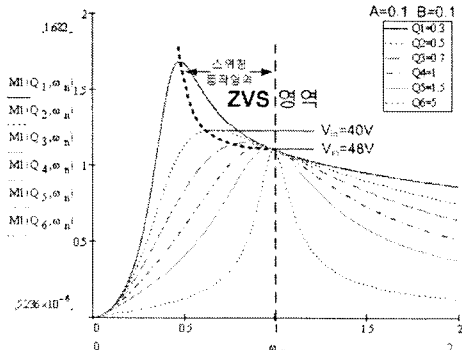


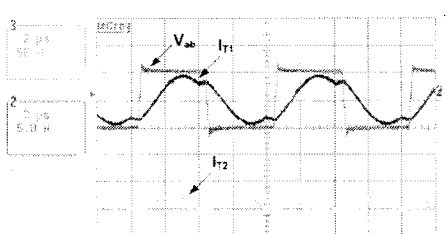
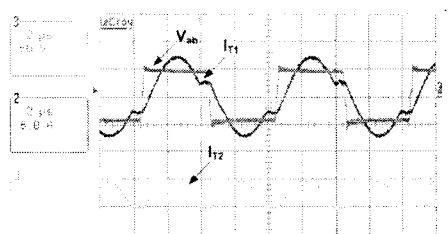
그림 3 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터의 전압이득 특성
Fig.3 Voltage gain characteristics of full-bridge LLC resonant converter using a contactless transformer

3. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 태양광 발전 하이브리드 홈 전원시스템에 적용 실험된 무접점 전원장치 주 회로도도 그림 5와 같다. 위의 그림에서 태양전지에서 출력되는 DC전압을 Buck-boost 컨버터를 사용하여 일정출력전압(48VDC)으로 제어하여 무접점 변압기 적용 LLC 공진 컨버터의 입력전압으로 사용하여 출력전압 30~35VDC에 대해 150W 급으로 설계하였다. 무접점 변압기에 사용한 코어는 페라이트 재질의 E 코어를 이용하여 설계사양에 맞게 E 코어를 제작하였다. 뿐만 아니라 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터에 대한 실험조건과 적용된 소자 성격 및 무접점 변압기 측정값에 대해 표 1에 나타내었다.

표 1 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터 주요성격 및 측정된 파라미터
Table 1. The specifications and measured parameters of full-bridge LLC resonant converter using a contactless transformer

LLC 공진 컨버터 입력전압	40~48VDC
LLC 공진 컨버터 출력전압	30~35VDC
LLC 공진 컨버터 출력용량	150W
공진주파수($\omega_r = 2\pi f_r$), f_r	150kHz
스위칭주파수, f_s	124.5kHz
스위칭 소자(Q1,Q2,Q3,Q4)	I75NF75, 75V, 80A
출력 정류다이오드	30CTH02, 200V, 18A
태양전지 (SE-M181)	181W*2EA(직렬)
1차측 누설인덕턴스(L_{1l})	3.34uH
2차측 누설인덕턴스(L_{2l})	1.47uH
1차측 자화인덕턴스($L_{1\sigma}$)	33.96uH
동가 누설인덕턴스($L_{\sigma v}$)	7.6uH
$A(L_{1l}/L_m)$	0.1
$B(L_{2l}/L_m)$	0.125
$N(n_1/n_2)$	1.6



4. 결 론

본 논문에서는 기존 태양광 발전 분산전원시스템의 문제점을 개선하기 위하여 제안된 태양광 발전 하이브리드 홈 전원 시스템을 위한 무접점 전원장치를 제안하고 시제품을 제작하였다. 이 시스템에 적용된 전력변환 장치는 효율 개선을 위해 소프트 스위칭(ZVS) 기술을 적용하여 스위칭 소자의 스트레스 저감과 스위칭 손실을 줄일 수 있었다. 또한 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터에 대해서도 이론적으로 해석하였으며, 150W급의 시제품을 제작하여 실험한 결과에 대해서 나타내었다. 실험결과 30W~150W 부하 범위에 대해서 스위칭 소자의 소프트 스위칭을 이룰 수 있었고, 88%~90%의 높은 효율도 얻었으며, 2차측 정류다이오드의 불연속전류에 의해 스위칭 손실을 줄일 수 있었다. 이론적 분석과 실험 결과를 바탕으로 무접점 전원장치가 태양광 발전 시스템에 적용 가능함을 보였다.

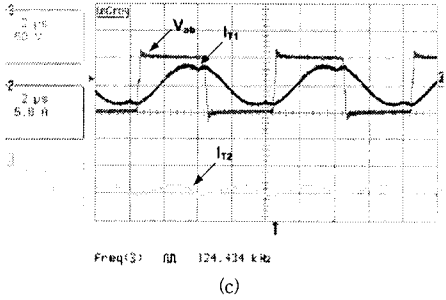


그림 4 무접점 변압기 적용 Full-Bridge LLC 공진컨버터의 1차측 전압(V_{ab}) 및 전류(I_{T1})와 2차측 정류전류(I_{T2}) 실험파형 (50V/div., 5A/div., 10A/div., 2us/div.)
(a)150W (b)80W (c)30W

Fig. 4 Experimental waveforms of the voltage(V_{ab}) and current (I_{T1}) in the primary, and of the rectified current(I_{T2}) in the secondary for the full-bridge LLC resonant converter using a contactless transformer (50V/div., 5A/div., 10A/div., 2us/div.)
(a)150W (b)80W (c)30W

그림 4(a)와 그림 4(b) 그리고 그림 4(c)은 일정 스위칭 주파수 (124.5kHz)에서 150W, 80W, 30W에 대한 무접점 변압기 적용 Full-Bridge LLC 공진컨버터의 실험파형을 나타낸 것이다. 그림 4(a)에서부터 그림 4(c)를 통해 알 수 있는 것처럼 중 부하 (150W)에서 경 부하(30W)까지 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터는 주 스위칭 소자에 단자 전압 (V_{ab})보다 단자 전류(I_{T1})가 항상 지상전류(lagging current)가 흘러 영 전압 스위칭(ZVS) 동작을 하며, 무접점 변압기 2차측 정류다이오드의 불연속 전류(I_{T2})에 의해 영 전류 스위칭(ZCS) 동작이 되는 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 5는 무접점 변압기 적용 Full-bridge LLC 공진컨버터의 효율 특성 곡선을 나타낸 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 30W~150W 부하범위에 대해 88%~90%의 높은 효율을 얻었다.

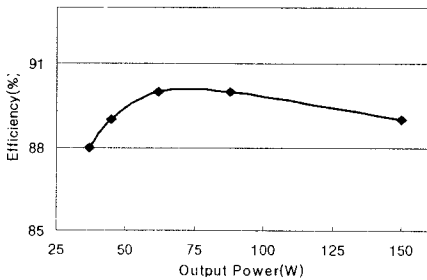


그림 5 부하출력 변화에 대한 효율특성
Fig. 5 Efficiency characteristics for output load variations

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-11173-0(2006)) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Hirachi, K.; Mii, T.; Nakashiba, T.; Laknath, K.G.D.; Na kaoka, M. "Utility-Interactive Multi-Functional Bidirectional Converter for Solar Photovoltaic Power Conditioner with Energy Storage Batteries", Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE IECON, Volume 3, pp 1693 - 1698, 1996, 8
- [2] G.B.Joung, and B.H. Cho, "An energy transmission system for an artificial heart using leakage inductance compensation of transcutaneous transformer," IEEE Trans. P E., vol. 13, pp. 1013-1022, 1998. 11
- [3] C.G. Kim, D. H. Seo, J.S. You, J.H. Park, and B.H. Cho, "Design of a contactless battery charger for cellular phone," IEEE Trans. vol. IE-48, pp.1238-1247, 2001. 12
- [4] Ashoka K. S. Bhat "Analysis and Design of LCL-Type Series Resonant Converter", IEEE Trnas, Industrial Electronics, vol. 41, pp. 118-124, 1994.
- [5] Y.S. Kong, E.S Kim, I.G. Hwang, H.K. Lee, "High-Efficiency Series-Parallel Resonant Converter for the Non-contact Power Supply," IEEE-APEC'2005, Vol. 3, pp. 1496 -1501, 2005.
- [6] Bo. Yang, F.C. Lee, A.J. Zhagn, "LLC Resonant converter for Front End DC/DC Conversion," IEEE-APEC'2002, Vol. 2, pp. 1108-1112, 2002.
- [7] 박진영,공영수,김은수,황인갑, "LLCT적용 고집적 스위칭 전원을 위한 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터" 전력전자학회 논문지, 제11권1호, pp.56-64, 2006
- [8] 장길수, 손광명, "수용가 직류서비스 및 마이크로그리드" 대한전기학회 전기의 세계, 제54권 12호, pp.31-35, 2005