

무접점 전원장치를 위한 커플러 개선

송환국*, 강성인*, 김은수^{†*}, 김운호^{**}
 전주대학교^{†*}, 중앙대학교^{**}

An Improved Inductive Coupler for Contact-less Power Supply

Hwan-Kook Song, Sung-In Kang, Eun-Soo Kim, Yoon-Ho Kim
 Jeonju University, Chung-Ang University*

1. 서론

기존의 태양광 발전 시스템은 태양광으로부터 발전된 직류전압을 바로 가전기기 및 부하에 직접 전달하지 못하고 계통연계를 통하여 가전기기 및 부하에 전력을 전달하도록 구성되어 있다. 그러나 이러한 시스템의 구성은 많은 전력 변환기를 거쳐야 하기 때문에 전체적인 시스템의 효율이 저감될 뿐만 아니라 부피가 커지게 되는 단점을 가지고 있다. 그렇기 때문에 향후에는 하이브리드 전원 시스템을 적용시킨 수송가 직류서비스의 사용이 증가될 것으로 예상되고 있다.^[1]

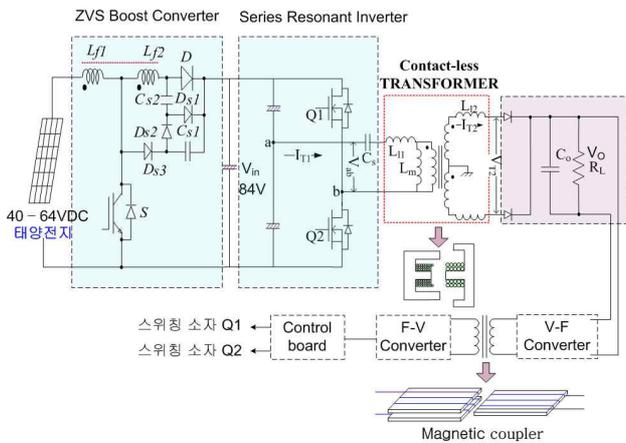


그림 1 제안된 무접점 전원장치

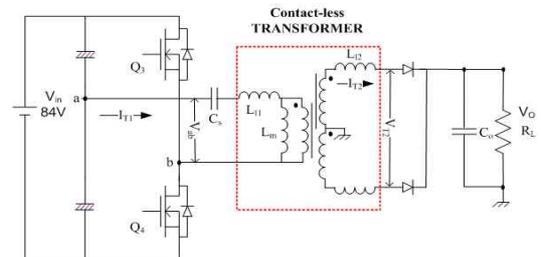
그림 1은 본 논문에서 제안된 수송가 직류서비스를 위한 무접점 전원장치이다. 제안된 무접점 전원장치에서는 탭-인덕터를 적용한 무손실 스너버 Boost DC/DC Convert를 사용하여 태양전지와 연료전지에서 출력되는 낮은 전압(40V~64V)을 84VDC로 승압시켜 배터리에 충전하고, 태양전지를 보호하기 위해 전력제어를 하였다. 그리고 승압된 높은 전압이 주변 환경에 영향을 받지 않고, 부하에 안전하게 전력을 전달할 수 있도록 무접점 변압기를 적용한 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터를 적용하였다.^[2] 그러나 기존 EI 코어를 이용한 무접점 변압기는 1차 측 코어와 2차 측 코어의 레그(Leg) 사이에서 발생하는 플링징 자속(Flinging flux)과 코어 내부에서 발생하는 누설 자속(Leakage flux)에 의하여 무접점 변압기의 커플링 계수(k)가 저감되었다. 본 논문은 누설 자속(Leakage flux)과 플링징 자속(Flinging flux)의 양을

저감 시키고, 커플링 계수(k)를 향상 시킬수 있는 새로운 형태의 무접점 변압기를 제안, 적용하여 기존 EI 코어를 이용한 무접점 변압기보다 더 나은 특성을 얻고자 하였다. 본 논문에서는 제안된 무접점 변압기에 대한 이론적 해석을 통하여 80W급 시제품을 제작하였고 수송가 직류 서비스를 위한 무접점 전원시스템에 적용, 실험한 결과를 서술하였다.

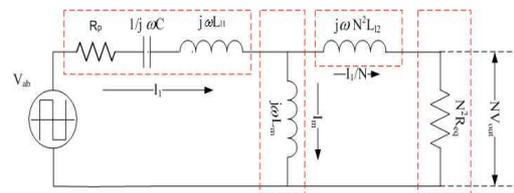
2. 본론

2.1 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터 적용 무접점 전원

그림 2는 본 논문에 적용된 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터의 회로도로서 하프-브리지 LLC 인버터와 센터-탭 정류회로로 구성 되어있다. 본 논문에서는 무접점 변압기의 2차 측에 전달되는 전력을 안정화하기 위해 별도의 레귤레이터를 사용하지 않았으며, 무접점 변압기의 측면에 제어용 마그네틱 커플러를 사용하여 출력전압 및 전류의 제어 신호를 제어용 마그네틱 커플러의 1차 측에 비접촉으로 전달하여 정전압/정전류 제어를 할 수 있도록 구성하였다. 또한 모든 부하에 대해 스위칭 소자는 소프트 스위칭 동작을 하도록 하였으며, 스위칭 소자의 스트레스 저감과 스위칭 손실을 줄여 높은 효율을 얻고자 하였다.



(a) 무접점 변압기 적용 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터



(b) 등가회로

그림 2 무접점 변압기 적용 하프-브리지 LLC 직렬공진 컨버터와 등가회로

2.2 FEMM을 이용한 전자장 해석

본 논문에서는 기존의 EI코어를 이용하여 제작한 무접점 변압기의 양쪽 레그 (Leg) 에서 발생하는 플린징 자속(Flinging flux)을 줄이기 위하여 새로운 구조의 무접점 변압기를 제안하였다. 제안된 무접점 변압기는 자속이 1차 측 코어에서 2차 측 코어로 전달이 더 잘되도록 1차 측 코어가 2차 측 코어에 삽입되는 형태의 무접점 변압기를 제작, 시뮬레이션 및 실험하였다. 무접점 변압기에서는 결합된 상태에서도 공극이 필연적으로 존재하게 되지만 본 논문에서 제안한 무접점 변압기는 플린징 자속(Flinging flux)이 통과하는 자로가 기존의 EI 코어보다 넓기 때문에 커플링 계수(k)가 증가한다. 기존의 EI코어를 이용하여 제작된 무접점 변압기와 제안된 무접점 변압기와의 누설 자속(Leakage flux)과 플린징 자속(Flinging flux)의 차이, 그리고 커플링 계수(k)에 대하여 비교, 분석하기 위해서 FEMM 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 및 이론적으로 해석하였다. 그림 3은 EI코어를 이용하여 제작한 무접점 변압기를 FEMM 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 한 그림이다. 시뮬레이션 결과 양쪽 레그(Leg)의 갭(Gap)에 의해 발생하는 플린징 자속(Flinging flux)과 변압기 내부의 권선에 의해 발생하는 누설 자속(Leakage flux)을 확인 할 수 있다. 그림 4 (a)와 (b)는 EI코어 형태의 변압기를 커플링 계수(k)에 대하여 표현하기 위한 EI코어 형태의 무접점 변압기 모형과 등가회로도이다. 그림 4 (b)의 등가회로에서 기전력 F 에 대하여 식 (1), (2)와 같은 두 개의 수식을 얻을 수 있었고, 두 개의 식 (1), (2)를 이용하여 EI코어를 이용한 무접점 변압기의 커플링 계수(k)를 구하면 식 (3)과 같은 수식을 얻을 수 있다.^[3]

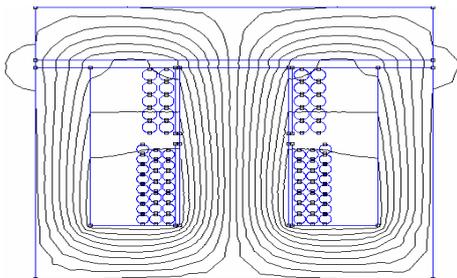
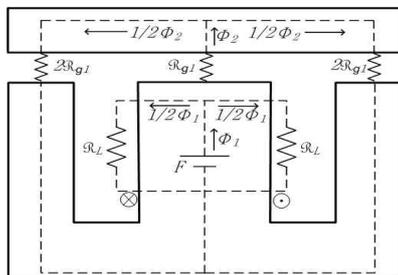
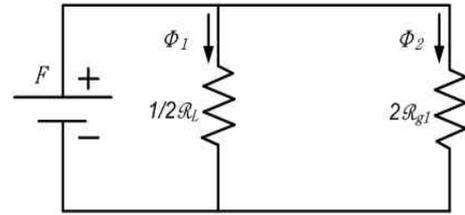


그림 3 EI코어를 이용한 무접점 변압기 FEMM 시뮬레이션



(a) EI코어를 이용한 무접점 변압기 등가회로



(b) 등가회로

그림 4 EI코어를 이용한 무접점 변압기 등가회로와 등가회로

$$F = \frac{1}{2} \mathcal{R}_L * \Phi_1 \rightarrow \Phi_1 = \frac{2F}{\mathcal{R}_L} \quad (1)$$

$$F = 2\mathcal{R}_{g1} * \Phi_2 \rightarrow \Phi_2 = \frac{F}{2\mathcal{R}_{g1}} \quad (2)$$

$$k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2} = \frac{\frac{F}{2\mathcal{R}_{g1}}}{\frac{2F}{\mathcal{R}_L} + \frac{F}{2\mathcal{R}_{g1}}} = \frac{\mathcal{R}_L}{4\mathcal{R}_{g1} + \mathcal{R}_L} \quad (3)$$

그림 5는 본 논문에서 제안한 무접점 변압기 모형의 누설 자속(Leakage flux)과 플린징 자속(Flinging flux)을 살펴보기 위해 FEMM 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 한 그림이다. EI형 코어를 이용한 무접점 변압기 FEMM 시뮬레이션의 그림 3과 비교해 보았을 때 양쪽 레그(Leg)의 갭(Gap)에 의해 발생하는 플린징 자속(Flinging flux)은 본 논문에서 제안한 무접점 변압기에서 더 적게 발생하는 것을 확인 할 수 있고 무접점 변압기 내부에서 발생하는 누설 자속(Leakage flux) 역시 EI형 코어를 이용한 변압기보다 본 논문에서 제안한 변압기에서 더 적게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

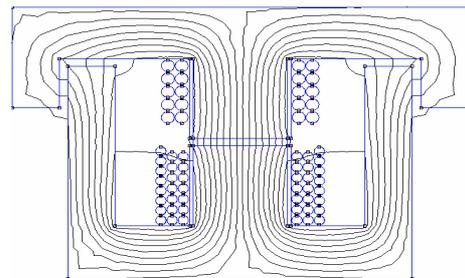
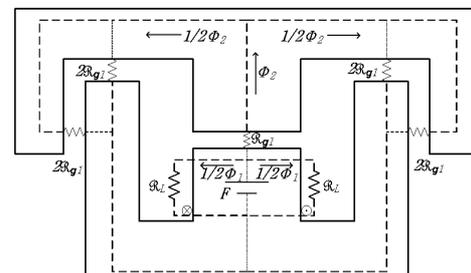
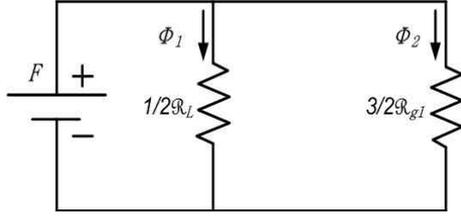


그림 5 본 논문에서 제안한 무접점 변압기 FEMM 시뮬레이션

그림 6 (a)는 본 논문에서 제안한 변압기에서의 누설 릴럭턴스와 자화 릴럭턴스를 표현한 것이며, 그림 6 (b)는 제안한 무접점 변압기를 등가회로화 한 것이다.



(a) 본 논문에서 제안한 무접점 변압기 등가회로



(b) 등가회로

그림 6 본 논문에서 제안한 누설철 변압기 등가회로와 등가회로

그림 6 (b)의 등가회로를 통하여 기전력 F 에 대한 수식 (4)와 수식 (5)를 얻을 수 있고, 제안한 무접점 변압기의 커플링 계수(k)는 식 (6)과 같다.

$$F = \frac{1}{2} R_L \Phi_1 \rightarrow \Phi_1 = \frac{2F}{R_L} \quad (4)$$

$$F = \frac{3}{2} R_{g1} \Phi_2 \rightarrow \Phi_2 = \frac{2F}{3R_{g1}} \quad (5)$$

$$k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2} = \frac{\frac{2F}{3R_{g1}}}{\frac{2F}{R_L} + \frac{2F}{3R_{g1}}} = \frac{R_L}{3R_{g1} + R_L} \quad (6)$$

본 논문에서 적용한 무접점 변압기 커플링 계수(k)와 EI코어를 이용한 무접점 변압기 커플링 계수(k)를 비교해보면, 커플링 계수(k)는 누설 릴럭턴스 R_L 과 자화 릴럭턴스 R_{g1} 에 의하여 결정이 된다는 것을 알 수 있고, 본 논문에서 제안된 변압기 모형의 커플링 계수(k)가 EI코어를 이용한 변압기 모형의 커플링 계수(k)보다 더 개선될 수 있음을 식 (3)과 식 (6)을 통해 이론적으로 확인하였다. 표 1은 EI코어를 이용하여 제작된 무접점 변압기와 제안된 무접점 변압기를 동일한 권선방법으로 제작하였을 때 각각의 파라미터와 커플링 계수(k)를 비교한 것이다. 측정결과를 통해서 제안된 무접점 변압기의 커플링 계수(k)가 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

표 1 권압기 파라미터 비교

	EI코어	제안한 코어
갭(Gap)	1mm	
1차 측 자화인덕턴스(L_m)	65.7uH	74.1uH
1차 측 누설인덕턴스(L_{l1})	31.3uH	10.4uH
2차 측 누설인덕턴스(L_{l2})	0.37uH	1.4uH
등가 누설인덕턴스(L_{eq})	37.7uH	27.5uH
커플링 (k)	0.782	0.805

$$V(f, R) = \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + \frac{L_{l1}}{L_m} - \beta(f) + jQ_s(f, R) \left(\frac{f_s}{f_r} - \frac{f_r}{f_s} \right)} \right| \quad (7)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{N^2} + \frac{L_{l2}}{L_m} \right) \quad \beta(f) = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_m C_s} \quad (8)$$

$$Q_s(R) = \frac{2\pi f_r \alpha L_{eq}}{N^2 R_{eq}} \quad (9)$$

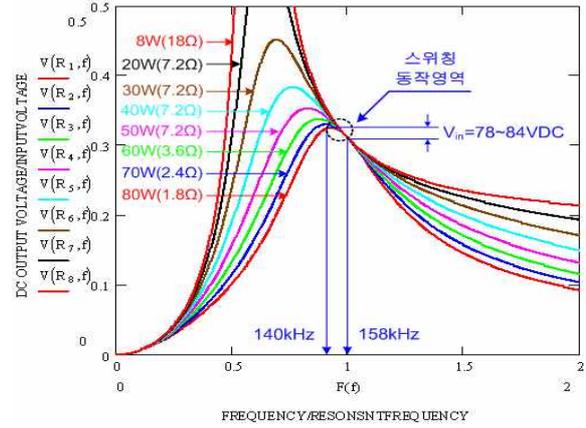


그림 7 하프-브리지 LLC 직렬공진 컨버터 전압이득 특성

그림 7은 식 (7)의 전압이득 수식을 이용하여 제안된 코어 형상의 무접점 변압기를 적용한 하프-브리지 LLC 직렬공진 컨버터의 전압이득(M)특성이다. 시뮬레이션 결과 정격부하(1.8Ω, 80W)에서 요구된 입력전압 범위 ($V_{in}=80\sim 84VDC$)에 대해 일정 출력전압($V_{out}=12VDC$)를 얻을 수 있고, 모든 부하범위 내에서 공진점 이하에서 스위칭 동작을 하도록 하여 주 스위칭 소자(Q1, Q2)는 항상 ZVS(Zero Voltage Switching)를 하고 불연속 공진전류에 의해 2차측 정류 다이오드의 역 회복 특성에 따른 손실을 줄일 수 있다. 또한 주 스위칭 소자의 하드 스위칭을 막기 위해 최소 스위칭 주파수를 140kHz로 제한을 시켰고, 이 때에는 입력전압이 78~84VDC에서 출력전압($V_{out}=12VDC$)을 제어할 수 있다.

3. 실험결과

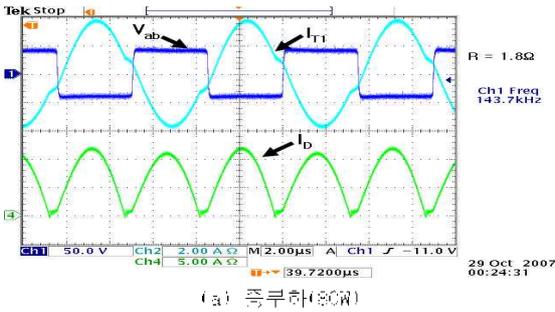
본 논문에서는 제안된 무접점 변압기 적용 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터를 입력전압 80~84VDC에서 출력전압($V_{out}=12VDC$, 80W)에 대하여 실험하였다. 그리고 실험에서 적용한 조건과 적용된 소자 정격에 대해서 표 2에 나타내었다.

표 2 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터 주요 편견

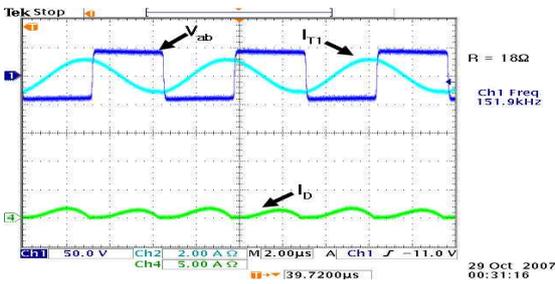
입력전압(V_{in})	80~84VDC	직렬 커패시터(C_s)	33nF
출력전압(V_{out})	12VDC	스위칭 주파수 범위(f_s)	143~157kHz
출력전류(I_o)	6.7A	공진주파수(f_r)	158kHz
출력 전력 (P_o)	80W	주 스위칭 소자 (Q1, Q2)	IRF640 (200V, 18A)
공진 주파수(f_r)	158kHz	출력정류다이오드	STPS1545D (45V, 15A)

그림 8과 그림 9는 입력전압의 변화($V_{in}=80V\sim 84V$)에 대해서 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터의 1차 측 단자전압과 전류 및 2차 측 정류 다이오드의 전류를 측정 한 파형이다. 그림 8 (a)와 그림 9 (a)는 중부하(1.8Ω) 일

때의 파형이고, 그림 8 (b)와 그림 9 (b)는 경부하 (18Ω) 일 때의 파형이다. 스위칭 주파수(f_s)는 중부하에서 경부하까지 공진 주파수(f_r)보다 낮은 주파수에서 동작을 하기 때문에, 단자 전류(I_{T1})가 단자 전압(V_{ab})보다 지상전류가 흘러 주 스위칭 소자(Q1, Q2)는 영 전압 스위칭(ZVS) 동작을 하고있다. 그리고 제안된 코어를 적용한 무접점 변압기 2차 측 정류 다이오드는 불연속 전류(I_D)에 의해 영 전류 스위칭(ZCS) 동작이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 입력전압(V_{in})을 80V~84V로 가변 하여도 일정한 출력전압을 얻을 수 있도록 제어가 가능하였다.

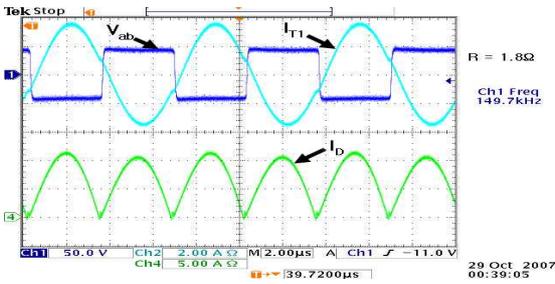


(a) 중부하(80W)

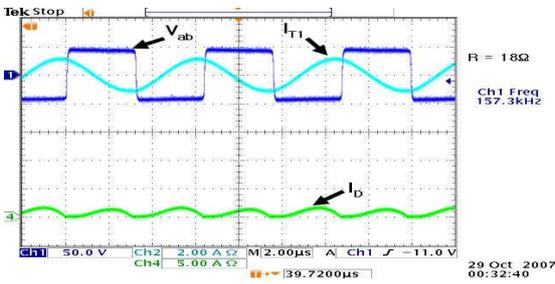


(b) 경부하(80W)

그림 8 입력전압 80VDC일 때 1차측 단자전압과 전류 및 2차측 다이오드 전류



(a) 중부하(80W)



(b) 경부하(80W)

그림 9 입력전압 84VDC일 때 1차측 단자전압과 전류 및 2차측 다이오드 전류

그림 10은 입력전압 변화($V_{in}=80\sim84VDC$)에 대해 무접점 변압기를 적용한 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터의 효율을 측정된 것이다. 표 1에서 확인할 수 있듯이 EI코어를 적용한 무접점 변압기의 커플링 계수($k=0.782$)가 제안된 무접점 변압기의 커플링 계수($k=0.805$)보다 작다. 이것은 제안된 무접점 변압기보다 EI코어를 적용한 무접점 변압기의 자화 인덕턴스(L_m)가 작아져서 상대적으로 순환전류(I_m)가 커지기 때문에 그에 따른 도통손실이 증가하여 효율이 저감된다. 측정 결과 EI코어를 적용한 무접점 전원장치는 효율이 약 86%~89%인 반면 본 논문에서 제안된 무접점 변압기를 적용한 하프-브리지 LLC 직렬 공진 컨버터는 입력전압의 변화($V_{in}=80V\sim84V$)에 따른 효율이 중부하에서 경부하까지의 부하범위에 대해서 약 87%~91%의 높은 효율을 얻을 수 있었다. 또한, 입력전압이 높고 경부하로 갈수록 효율이 개선되고 20W~30W에서 효율이 90%이상으로 가장 높게 나타남을 알 수 있었다.

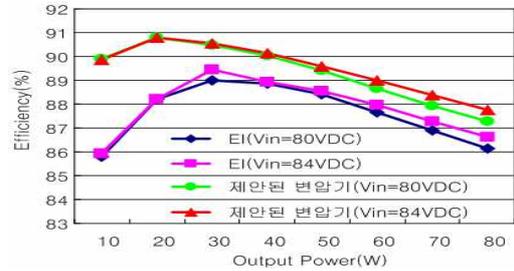


그림 10 부하 출력변화에 따른 효율특성

4. 결론

본 논문에서는 기존의 태양광 발전 전원을 이용한 무접점 전원 시스템의 문제점을 개선하기 위하여 제안된 코어를 이용한 무접점 전원장치를 제안하였고 시제품을 제작하였다. 이 시스템에 적용된 무접점 변압기는 기존의 EI 코어 형태의 변압기보다 커플링 계수(k)가 높고 효율이 향상됨을 확인할 수 있었다. 또한 무접점으로 전력 전달이 가능하기 때문에 스위치전원 투입과 차단 시 스파크 전압(Spark Voltage)의 발생 위험 및 주변 환경에 영향을 받지 않고 안전하게 전력을 전달할 수 있어서 본 논문에서 제안한 코어를 적용한 무접점 전원장치가 수용가 직류서비스에 적용 가능함을 보였다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2005-000-11173-0(2007)) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 장길수, 손광명, “수용가 직류서비스 및 마이크로그리드” 대한전기학회 전기의 시계, 제54권 12호, pp.31-35, 2005.
- [2] 이현관, 공영수, 김은수, 김윤호, 이기식, 강성인, 정봉근, “태양광 발전 시스템을 위한 무접점 전원장치”, 전력전자학회논문지 제 11권 제3호 pp.216-223,2005
- [3] C. G. Kim, D. H. Seo, J. S. You, J. H. Pak, and B. H. Cho, “Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phone” IEEE Trans Vol.28, No.6, December 2001