

전기자동차용 축전지의 유도성 충전 장치

김 홍 근* 박 정 우** 김 상 오*

*경북대학교 **한국전기연구소

Inductive Charger of Battery for Electric Vehicles

Heung-Geun Kim* Jeong-Woo Park** Sang-O Kim*

* Kyung-Pook Nat.Univ ** Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

Recent environmental pollutions have intensified the need to develop zero emission vehicles. The most effect method of such solutions is EV. EV is high energy efficiency, easy to maintain, repair and is possible to make high performance control. However, because energy density of batteries is constrained and the distance covered one charge is short range. Also because EV has disadvantage of poor accelation ability, development of high performance battery is required for large scale use of EV. EV charger analogous to gas apparatus must also be developed immediately.

Charger is discriminate between on-vehicle type and off-vehicle type. As off-vehicle type is able to charge fast and safe, inductive charging is considered.

This paper aims to develop off-vehicle inductive charging system. Therefore, it achieved power factor correction converter, high frequency DC/AC inverter control algorithm development which gives proof validity through simulation and formulated the basic concept of high frequency transformer design for inductive charging.

1. 서 론

19세기말부터 연구되어 온 전기자동차(Electric Vehicle)는 제한적인 용도로만 사용되다가 1960~70년대의 유류 파동이 후 주목을 받았으나 유류가가 안정되자 그 연구가 미진하였다. 그러나 근래 들어 환경오염에 대한 인식이 높아지면서 여러 종류의 무공해 자동차(Zero Emission Vehicle) 중에서 가장 밝기 시작했다.

화석연료를 사용하는 내연기관 자동차의 배기 가스는 대기 오염의 주원인이며 특히 시동, 급가속, 공회전 시에는 연료의 불완전 연소로 인해 NO_x , SO_x 의 가스가 다량 배출된다.

이에 비해 전기자동차는 환경오염에 미치는 영향이 적고 소음이 적으며 에너지 효율이 내연기관 자동차에 비하여 좋으며 유지보수가 쉬운 장점을 가지고 있어 현재 연구되고 있는 무공해 자동차들 중 가장 이상적이다.

그러나 전기자동차는 축전지의 에너지 밀도가 제한되어 있어 일충전 주행거리가 짧고 내연기관 자동차에 비해 가속능

력이 떨어지고 전기자동차의 원동기로 사용되는 유도전동기의 제어가 복잡하고 가격이 높은 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 구동시스템에는 벡터제어이론이 적용되고 있으며 새로운 고밀도 에너지의 축전지 개발이 선행되어야 한다. 또한 내연기관의 주유장치에 해당하는 전기자동차 축전지의 충전장치 역시 시급히 개발하여야 한다.

본 논문은 유도성 충전 방법을 사용한 별치형 충전장치 개발을 목적으로 타당성을 검토하였다.

2. 유도성 충전기

그림 1은 충전기 블럭도이다. 이 충전기는 단상 입력 교류 전원을 직류로 정류하는 AC/DC 정류기와 정류된 직류 전압을 유도성 충전개념을 이용하여 축전지에 충전하기 위한 DC/DC 컨버터로 나눌 수 있다.

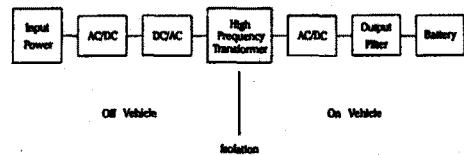


그림 1. 충전기 블럭도

2.1. AC/DC 정류기

그림 2는 AC/DC 정류기의 제어 블럭선도이고 그림 3은 AC/DC 정류기의 전력회로이다. 이 회로의 출력은 DC/DC 컨버터의 입력 전원으로 이용되므로 입력전압 또는 부하가 변하더라도 일정한 직류 전압을 유지하여야 한다. 또한 다이오드 정류기의 단점인 낮은 입력 역률을 개선하여 1로 하여야 한다. 이러한 목적으로 사용되고 있는 능동 역률 개선(active power factor correction) 방법 중에서 스위치 제어가 간단하고 전류모드 제어가 가능한 승압형(boost type)을 채택하였다.

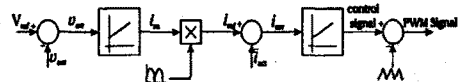


그림 2. 블럭선도

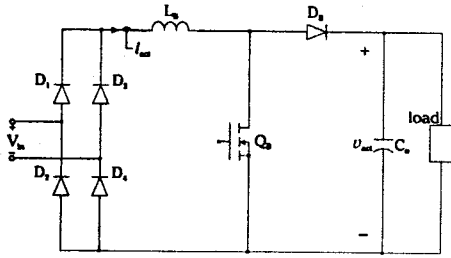


그림 3. 승압형 AC/DC 정류기

2.2. DC/DC 컨버터

그림 4는 DC/DC 컨버터의 전력 회로이다. 컨버터에서는 유도성 충전 방법을 위해 직류 입력 전압을 고주파 교류 전원으로 변환한다. 이때 스위칭 손실을 감소시켜 충전기 전체 효율을 향상시키기 위해 영전압(Zero Voltage Switching) 방법을 사용한 위상 이동(phase shift) PWM 컨버터를 사용하였다.

스위치가 턴오프되기 전에 커패시터에 충전되어 있는 에너지가 방전되면서 전압극성이 영이 되는 순간 역병렬 다이오드가 먼저 도통되므로 ZVS로 동작하게 된다. 커패시터의 충전 전에 변압기 누설 인덕턴스에 축적되어 있는 에너지를 사용하게 되는데 식 (1)과 같이 누설 인덕턴스에 축적되어 있는 에너지가 커패시터에 충전되어 있는 에너지보다 커야만 ZVS이 이루어진다.

$$E = \frac{1}{2} L_s I_s^2 \geq \frac{4}{3} C_{MOS} V_{in}^2 + \frac{1}{2} C_{TR} V_{in}^2 \quad (1)$$

단, $\frac{4}{3} C_{MOS} V_{in}^2$: MOSFET 드레인과 소스간의 비선형 기생 커패시터에 충전되어 있는 에너지,

C_{TR} : 변압기 권선 커패시턴스이다.

누설 인덕턴스와 기생 커패시터 사이의 공진으로 인한 충전 기간동안 데드 타임(dead time)이 필요한데 이는 스위치가 온되기 전에 역병렬 다이오드가 먼저 온되어야 ZVS이 이루어지기 때문이다. 데드 타임은 가능한 최대의 부하 범위에서 ZVS이 이루어지도록 결정해야 하고 최대 데드 타임은 공진 구간의 1/4로 식 (2)와 같다.

$$\delta_{min} = \frac{T_s}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_s C} \quad (2)$$

단, T_s : 공진 주기,

$C = C_{MOS} + C_{TR}$,

δ_{min} : 최대 데드 타임이다.

고정 주파수로 동작하는 위상 이동 PWM 컨버터는 시비율(duty cycle)이 0.5인 게이팅 신호를 위상 이동 시켜 출력을 결정한다. 위상 이동으로 인한 실제 일차측 시비율 D 와 이차측 시비율 D_{eff} 사이에는 ΔD 만큼의 차이가 있다. 이 ΔD 구간 동안은 입력 전압이 일차측 누설 인덕턴스에 인가되어 일차측 전류의 극성을 반전시킨다.

위상 이동 ZVS PWM 컨버터의 전압 이득은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_1}{N_2} D_{eff} \quad (3)$$

단, N_1 : 일차측 권선수,

N_2 : 이차측 권선수,

D_{eff} : 이차측 시비율이다.

일차측 시비율 D 는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$D = D_{eff} + \Delta D \quad (4)$$

그림 4에서 ΔD 는 식 (5)와 같다.

$$\Delta D = \frac{I_1 + I_2}{\frac{V_{in}}{L_s} \frac{T}{2}} \quad (5)$$

식 (1)과 식 (5)에서 L_s 의 증가는 ZVS이 이루어지는 부하 범위를 증가시키지만 ΔD 를 증가시켜 D_{eff} 를 감소시킨다.

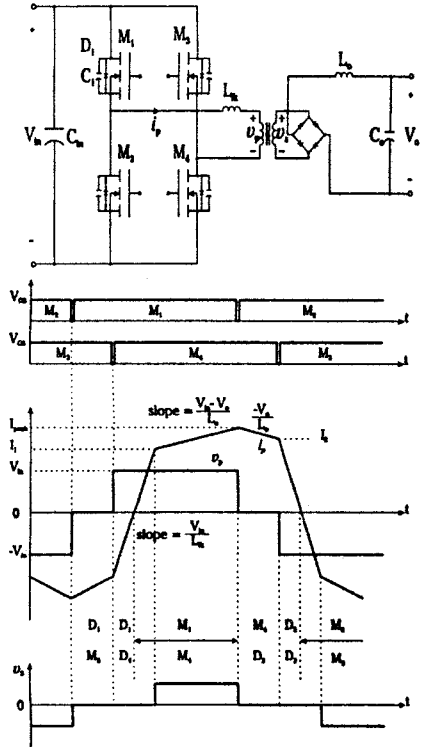


그림 4. 위상 이동 DC/DC 컨버터

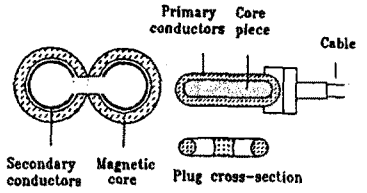
2.3. 고주파 변압기

전기자동차에서는 충전기와 차량 사이의 인터페이스로 전도성 충전 방법과 유도성 충전 방법이 있다. 특히 유도성 충전 방법은 충전되는 전력을 자속의 형태로 전송하기 때문에 전기적인 접촉이 없어 쇼크에 대한 안전성이 우수하다.

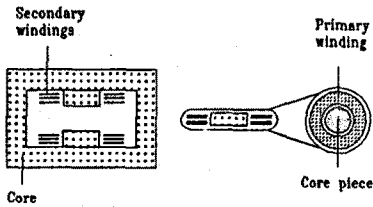
일차측(패들)과 이차측(포트)이 완전히 분리되는 고주파 변압기를 사용하여 축전지에 충전시 패들을 포트에 결합시킨 후 충전시키게 된다. 이러한 유도성 충전 방법은 한 개의 패들로 다른 정격의 다양한 포트에 사용할 수 있어 범용적으로 사용될 수 있다.

또한 유도성 커플러(inductive coupler)는 변압기 일·이차측을 절연할 뿐만 아니라 충전 정보의 전송 매개체의 역할을 한다. 유도성 커플러 안의 안테나를 통하여 무선으로 축전지의 충전상태, 충전전압, 충전전류, 축전지 온도 등의 데이터를 전송하며 충전기는 전송된 정보를 바탕으로 하여 현재 축전지에 적합한 충전 모드를 찾아 충전하게 된다.

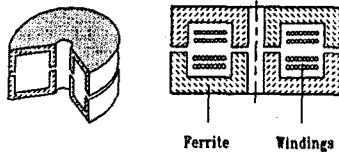
그림 5는 충전기에서 사용되는 고주파 변압기의 종류이다.



(a) Co-Axial Winding Transformer



(b) Helical Winding Transformer



(c) POT Core

그림 5. 고주파 변압기

CWT의 누설 인덕턴스는 내부 권선 공간의 함수인 식 (6)으로 주어지므로 내부 공간을 최소화하면 누설 인덕턴스를 최소화할 수 있으나 턴수가 제한된다. HWT는 권선의 턴수를 크게 할 수 있으므로 변압기 자화 인덕턴스를 크게하여 자화전류를 최소화할 수 있다. POT Core는 누설 인덕턴스가 다른 변압기에 비해 크다.

$$L_{leak_in} = \frac{N_p^2 \mu_0}{8} \left[1 + 4 \ln \left(\frac{r_o}{r_{in}} \right) \right] I_{norm} \quad (6)$$

- 단, N_p : 턴수,
- μ_0 : 진공중의 투자율,
- I_{norm} : 턴당 도체의 길이,
- r_{in} : 내부도체의 반경,
- r_o : 외부도체의 반경이다.

2.4. 충전알고리즘

축전지의 모델링으로는 식 (7)의 Shepard Eq.을 사용한다.

$$E = E_0 - K \times i - L \left(\frac{1}{1-i} \right) \times i \quad (7)$$

- 단, E 는 축전지 단자 전압,
- E_0 는 축전지 만충전시 전압,
- i 는 축전지 충전 전류,
- K 와 L 은 축전지 상수,
- f 는 축전지 방전상태로서 사용한 전하량과 축전지 정격 용량의 비이다.

충전제어방법으로는 정전류, 정전압, 정전류-정전압, 정전류-정전압-정전류 방법 등이 있는데 이 중 축전지의 과충전을 방지하고 충전 시간이 비교적 빠른 정전류-정전압-정전류 충전 방법을 사용한다.

이러한 충전 방법들은 만충전시까지 축전지의 충전 상태와 충전 전압, 충전 전류를 측정하여 제어하여야 한다. 그림 6은 정전류-정전압-정전류 충전 방법의 특성곡선이다. 충전초기에는 정적전류의 2~2.6 배 전류로 정전류 모드 충전을 시작하고 축전지의 전압이 가스발생전압에 도달하면 정적 전압으로 정전압 모드 충전으로 전환되고 충전 전류가 감소하게 된다. 충전전류가 정적전류의 20%에 도달하면 다시 정전류 모드로 만충전까지 충전한다. 이러한 충전 방법은 다른 충전 방법에 비해 충전 시간이 짧다. 130% 만충전시까지 6.5~7.5 시간이 요구된다.

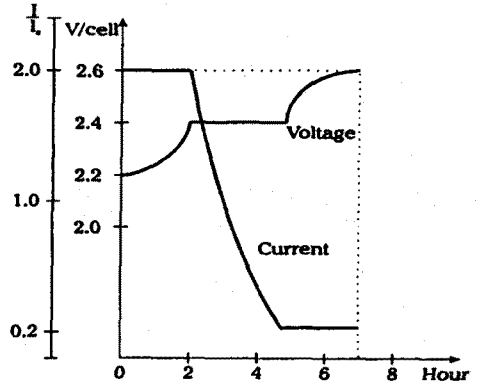


그림 6. 정전류-정전압-정전류 충전모드별 특성곡선

2.5. 시뮬레이션 결과

그림 7은 기준출력전압이 DC 220 V, 입력전압은 AC 110 V 일 때의 승압형 AC/DC 정류기의 정상상태 출력전압, 입력전압과 입력전류의 파형이다. 입력전압과 입력전류가 거의 동상으로 입력역률이 거의 1이 됨을 보인다. 제어기의 이득을 잘 선정하게 되면 맥동은 더 감소시킬 수 있다.

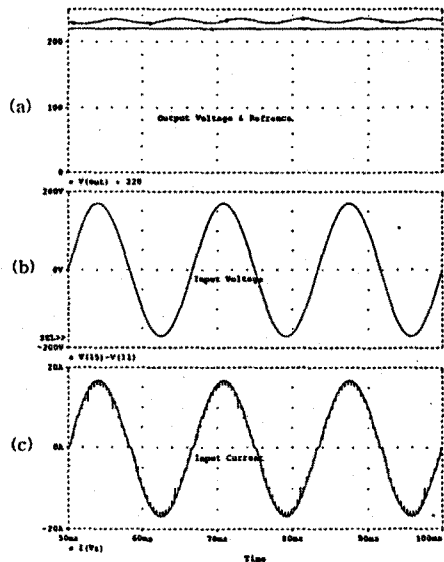


그림 7. 승압형 AC/DC 정류기 정상상태 특성
(a) 출력전압 (b) 입력전압 (c) 입력전류

그림 8은 스위칭 주파수 20 kHz, 입력전압 700 V, 고주파 변압기 권선비는 3:1, $L_m = 12 \mu\text{H}$ 인 위상 이동 ZVS PWM DC/DC 컨버터의 변압기 일차측 전압, 일차측 전류와 이차측 전압이다. 시뮬레이션 결과 ΔD 는 4 μs 이다.

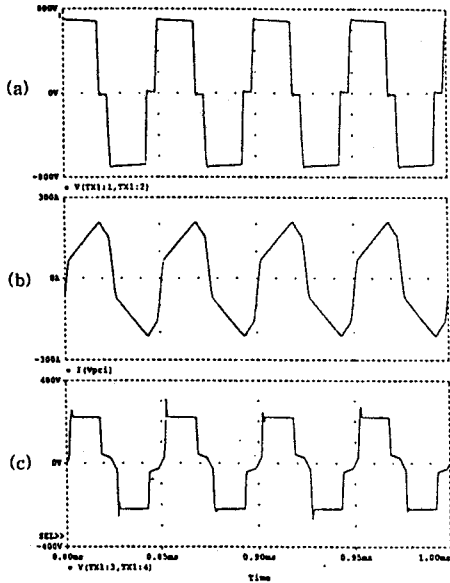


그림 8. 위상 이동 DC/DC 컨버터 정상상태 특성
(a) 변압기 일차측 전압 (b) 일차측 전류 (c) 이차측 전압

3. 결론

본 논문에서는 전기자동차용 별치형 충전기의 제작을 위한 유도성 충전의 개념을 파악하고 시뮬레이션을 통하여 선정된 전력회로의 타당성을 입증하였다. 시뮬레이션은 실제 실험 결과와 유사한 것으로 알려진 SPICE를 사용하였다.

시뮬레이션의 결과로 AC/DC 정류기에서는 입력전압과 입력전류가 동상이 되어 단위 입력역률을 이루었고 DC/DC 컨버터에서 ZVS를 이용하여 스위칭 손실을 최소화하여 컨버터의 효율을 높일수 있다.

또한 고주파 변압기를 유도성 커플러로 사용하면 서로 다른 정격의 축전지를 사용하는 여러 종류의 전기자동차에도 동일한 커플러를 사용할 수 있다.

4. 참고 문헌

- [1] K. W. Klontz, A. Esser, R. R. Bacon, D. M. Divan, D. W. Novotny, R. D. Lorenz "An Electric Vehicle Charging System with 'Universal' Inductive Interface" PCC, 1993
- [2] Robert L. Steigerwald, Rik W. De Doncker, Mustansir H. Kheraluwala "A Comparison of High Power DC-to-DC Soft-Switched Converter Topologies" IEEE IAS Annual Meet. Conf. Rec. 1994
- [3] J. A. Sabaté, V. Vlakovic, R. B. Ridley, F. C. Lee and B. H. Cho "Design Considerations for High-voltage High-power Full-Bridge Zero-Voltage-

Switched PWM Converter" APEC, 1990

- [4] Fumimasa ANAN, Kiyomi YAMASAKI, Koosuke HARADA, Hiroshi SAKAMOTO, Kuniharu HARA, Mituo INOH, Kenji OKANO, Yoshinori KODATE "A High Efficiency High Power EV Charging System with Inductive Connector" IPEC-Yokohama, 1995
- [5] Nasser H. Kutkut, Deepak M. Divan, Donald W. Novotny "Charge Equalization for Series Connected Battery Strings" IEEE Transaction on Industry Applications, VOL. 31, NO. 3, MAY/JUNE 1995
- [6] Unitorde Switching Regulated Power Supply Design Seminar Manual, 1991