

---

# 전기자동차 구동시스템 설계

오진석\*

## Design of Drive System for Electric Vehicle

J. S. Oh\*

### Abstract

This paper presents a design method of driving system for EV(Electric Vehicle). EV driving system consist of batteries, battery interface system and inverter. The power control circuit of the driving system is simple, since only one PWM(Pulse Width Modulation) inverter is used.

These test spectrums and waveforms can be used to determine the filter component ratings as well as to compute the harmonics injected into the source.

The hybrid control strategy which can reduced harmonic components. The analysis results indicate that the required capacity of the condenser can be reduced with LC filter. In this paper, the design and implementation of the proposed systems are described and some experimental results are given to show the performance of this driving system. The control strategy of the system to available inverter's power and motor's power and torque is discussed.

**주요기술용어** : EV(전기 자동차), Inverter(인버터), PWM(펄스폭변조), Battery Interface System(배터리 인터페이스 시스템)

### 1. 서론

전기자동차에 관한 연구는 환경문제와 더불어 가속화 되고 있다. 전기자동차는 구동시스템을 제외하고는 일반 자동차와 유사하다. 전기자동차에

포함되는 기술은 전기, 전자, 기계, 제어 및 화학 분야까지 광범위하다. 우수한 전기자동차를 개발하기 위해서는 설계, 배터리, 전기추진 및 전력제어관리시스템 분야의 기술들이 집합되어야 한다. 일반적으로 전기자동차의 구동시스템은 배터리,

---

\* 정회원, 한국해양대학교

접수일자 : 1999년 4월 9일

인버터, 전동기 및 제어시스템으로 구성된다.

본 연구에서는 효율적인 전기자동차 구동시스템을 구현하기 위하여, 체계적인 연구가 필요한 부분인 배터리 인터페이스, 인버터 및 토오크 특성에 관한 연구를 수행하고자 한다. 배터리 인터페이스는 전기자동차의 전력계통의 정밀도를 만족하는 선형 모델을 중심으로 연구를 수행하며, 인버터는 스위칭시에 발생하는 고조파를 효율적으로 억제할 수 있는 하이브리드 알고리즘<sup>1)</sup>을 이용한 인버터로 설계하고자 한다.

## 2. 시스템 구성

### 2.1 배터리 인터페이스

전기자동차의 휠(wheel)을 구동하는 전동기를 제어하기 위해 인버터가 이용된다. 인버터는 스위칭 동작을 행하여 전동기에 공급되는 전력을 조절하며, 이 과정에서 스위칭 리플(ripple)<sup>2,3)</sup>이 발생한다. 이러한 리플을 줄이기 위해서는 배터리와 인버터간에 적합한 인터페이스를 하여야 한다. 인터페이스 회로 설계과정에서 배터리는 단순한 전압원으로 다루는 경향이 있다. 그러나 인터페이스 회로 설계시 효율을 개선하기 위해서는 배터리의 특성을 반영한 변수를 고려해야 한다. 본 연구에서는 인터페이스 회로 설계시 반영하는 몇가지 모델 중에서 선형모델을 이용하여 회로를 해석하고자 한다. 그림 1은 배터리가 내부저항만 있는 선형모델 인터페이스인 경우의 3상 인버터 시스템을 도시한 것이다. 그림 1에 도시한 시스템을 체계적으로 해석하여 효율적인 구동시스템을 설계하고자 한다.

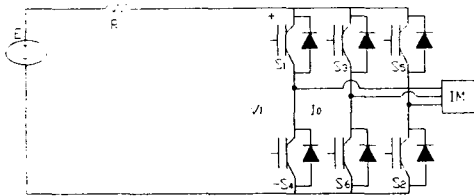


Fig. 1 Three-phase Inverter System with Linear Battery Model

그림 2는 배터리에서 출력되는 전류가 필터 C를 거쳐서 인버터에 입력되는 과정을 도시한 것이다. 그림 2에서 배터리 출력전류  $I_b$ 가  $i_c$ 에 의해 평활된 인버터 입력전류  $i_i$ 를 푸리에 급수로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$i_i = I_a + \sum_{n=1}^{\infty} I_n e^{jn\omega t} \dots\dots\dots (1)$$

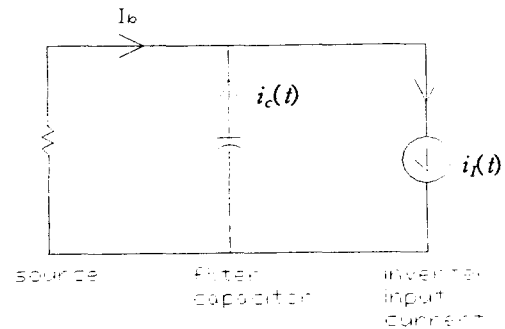


Fig. 2 PWM Model for Harmonic Currents

식(1)의  $I_a$ 는 입력전류의 평균값,  $n$ 는 고조파 차수,  $\omega$ 는 각속도이다. 그리고  $I_b$ 은 식(2)와 같다.

$$I_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_i(t) e^{jn\omega t} \dots\dots\dots (2)$$

그림 3은 배터리 선형모델과 이상적인 출력파형을 도시한 것이며, 그림 (3)에 도시한 인버터 입력 전류 파형은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_i(t) = \frac{I_2 + I_1}{2} + (I_2 - I_1) \frac{t}{t_o} \dots\dots\dots (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하여  $-\frac{t_o}{2}$  에서  $\frac{t_o}{2}$  까지 적분하면  $I_n$ 은 식(4)와 같이 된다.

$$I_n = \frac{1}{2\pi n} [(I_1 + I_2) \sin \frac{n\pi t_o}{T} + j(I_2 - I_1) \cdot (\cos \frac{n\pi t_o}{T} - \frac{T}{n\pi t_o} \sin \frac{n\pi t_o}{T})] \dots\dots\dots (4)$$

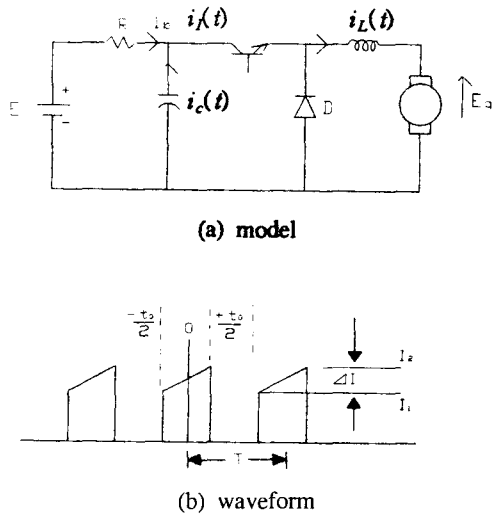


Fig. 3 Linear Battery Model and Its Idealized Waveform

그리고 인버터 입력전압  $V_i(t)$ 는

$$V_i(t) = E - I_b(t) \cdot R \quad \dots\dots\dots (5)$$

이고, 이를 재정리하면 식(6)과 같다.

$$V_i(t) = E - (i_L(t) - i_c(t)) \cdot R \quad \dots\dots\dots (6)$$

2.2 인버터

전기 자동차를 구동하는 전동기는 유동전동기가 많이 이용된다. 그림 4는 전기자동차 구동시스템 블록선도이다.

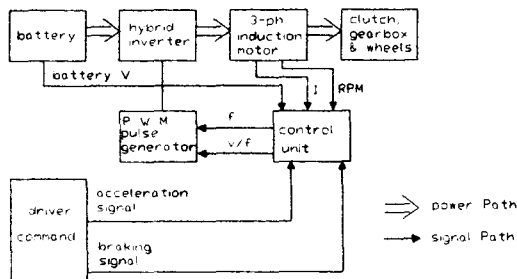


Fig. 4 Block Diagram of the Drive System

유도 전동기는 제어하기 위하여 많은 스위칭 알고리즘이 연구되고 있다. 본 연구에서는 넓은 속도 범위에 걸쳐서 고조파 성분을 억제할 수 있는 하이브리드 알고리즘(hybrid-algorithm)으로 인버터를 구현한다. 하이브리드 알고리즘은 RSPWM(Regular Sampled PWM) 및 HE(Harmonic Elimination) 알고리즘을 기본으로 하여 구성하고, 전압 상승을 부드럽게 하기 위하여 CV(Conversion) 운전모드를 추가한다.

RSPWM 알고리즘은 대칭 변조에서 하나의 샘플 값을 이용하여 펄스폭을 결정함으로써 컴퓨터로 수행하기 용이하다. 그리고 이러한 변조 방법은 QWS(Quarter Wave Symmetry) 및 HWS(Half Wave Symmetry) 특성을 갖기 때문에, 펄스폭  $t_{pw}$ 는 식(7)과 같이 이산화 형태로 나타낼 수 있다.

$$t_{pw} = \frac{T}{2} [1 + M \sin \{ \frac{(1+2n)\pi}{R} \}] \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서 M은 변조지수, R은 주파수 비, T는 반송파 주기, n은 0, 1, 2 ..... (R-1)/4이다.

HE 알고리즘은 기본파 성분에 포함되는 고조파 성분을 제거할 수 있다. 출력파형은 RSPWM 알고리즘처럼 QWS 및 HWS 특성을 갖고 있으며, 이러한 파형을 푸리에 급수로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad \dots\dots\dots (8)$$

식(8)에 계수  $a_n$  및  $b_n$ 은 식(9), 식(10)으로 주어진다.

$$a_n = \frac{4}{n\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^k \cos n\alpha_k] \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$b_n = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

여기서  $k(=1, 2, \dots, N)$ 는  $1/4$  사이클에 포함된  $\alpha$ 각의 수이다. N개의  $\alpha$ 각 중에서 1개는 기본 주파수의 진폭제어에 이용되고, 나머지 (N-1)개는 고조파 제거에 이용된다.

그림 5는 하이브리드 인버터의 3가지 운전모드인 RSPWM ( $0 \leq f_s \leq 55$ ), CV( $56 \leq f_s \leq 58$ ) 및 HE( $58 \leq f_s$ ) 모드의 PWM 출력파형이다.

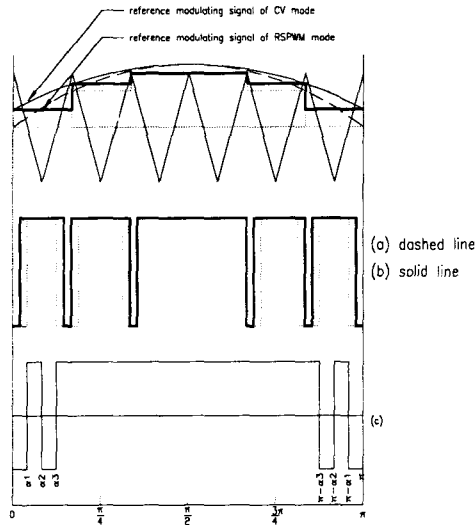


Fig. 5 Waveforms of PWM Signal with Running Mode

하이브리드 알고리즘은 그림5에 도시한 3가지 운전모드와 2가지 스위칭 알고리즘을 겸비한 것으로 디지털화가 용이하고 특정고조파 제거능력을 갖춘 알고리즘이다.

3. 전력 및 토크 특성

인버터는 정격주파수 이하 영역에서는 전압과 주파수 비 V/f를 일정하게 유지하는 정토크 특성을 갖도록 하고, 정격주파수 이상에서는 정출력특성을 갖도록 한다. 본 연구에서는 그림 6에 도시한 것과 정토크 영역에 CV 모드가 추가된 하이브리드 인버터를 이용하였다.

그림 6에서  $T_B$ 는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_B = \frac{3PV^2}{4\pi\omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + \omega_1^2(L_1 + L_2)^2 + R_1}} \dots\dots\dots (11)$$

식(11)에서 P는 극수,  $V_1$ 는 고정자 공급전압,  $\omega_1$ 은 고정자 각속도,  $R_1$ 은 고정자 저항,  $L_1$ 은 고정자 누설 인덕턴스,  $L_2$ 는 회전자 누설 인덕턴스이다.

구동시스템 설계과정에서 인버터 정격과 전동기 정격을 반드시 고려해야 한다. 전기자동차<sup>4,5,6)</sup>에 사용되는 유도전동기의 고정자 전류  $I_1$ 은

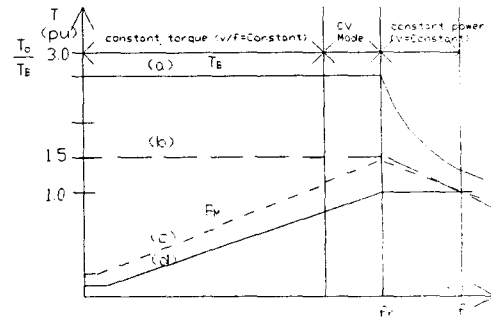


Fig. 6 Power and Torque Curves with Variable Voltage, Variable-Frequency

(a) motor breakdown torque ( $T_B$ ) (b) motor current at  $T_B$  (c) max. motor power ( $P_m$ ) (d) motor Voltage (V)

식(12)로 나타낼 수 있다.

$$I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{(\frac{Rr_s}{S})^2 + [2\pi f(L_1 + L_m)]^2}} \dots\dots\dots (12)$$

$$= \frac{V_1}{f} \frac{f_s}{\sqrt{Rr_s^2 + [2\pi f_s(L_1 + L_m)]^2}}$$

식(12)에서  $Rr_s$ 는 고정자에 대한 회전자 저항, S는 슬립,  $f_s(=sf)$ 는 슬립 주파수,  $Lr_s$ 는 고정자에 대한 회전자 누설 인덕턴스이다.

식(12)는 V/f 일정영역에서  $I_1$ 은  $f_s$  및 주어진 토크에 일정하다는 것을 나타내고 있다. 토크 T는 1/f에 비례하는 특성을 가지고 있다. 전기자동차 구동시스템은 전동기, 인버터, 온도한계등의 3가지 한계점을 고려해서 설계<sup>7)</sup>해야 한다.

4. 결과 및 고찰

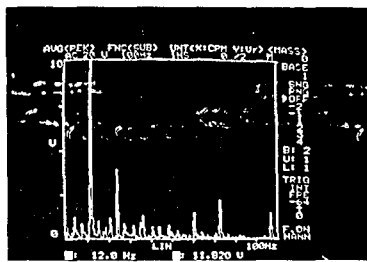
인버터에 입력되는 전압은 식(6)에 나타난 것과 같이 필터 C에서 출력되는 전류  $i_c(t)$ 와 R에 의해 변한다. 일반적으로 C를 크게하면 리플성분도 줄어들고 인버터에 걸리는 전압도 배터리 출력전압에 근접하게 된다. 실험에 사용한 유도전동기는 정격전압 220V, 정격출력 0.75kW, 정격전류 3.6A,  $R_1$ 은 10.9Ω,  $R_2$ 는 11.61Ω,  $L_1$ 은 12.66mH,  $L_2$ 는 9.53mH이다.

본 연구에서는 규격화된 C와 비교적 규격변화가

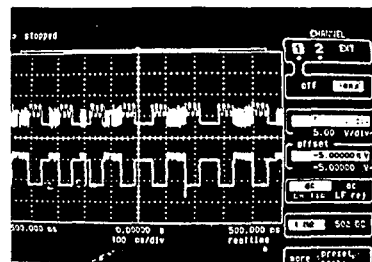
용이한 L을 이용하여 필터를 설계하는 과정에서 필터 C의 용량을 줄이기 위하여 L을 부가한 L-C 필터를 배터리와 인버터간에 부가하여 실험하였다. 그림 7에서 (a)는 2.1mF인 C만 필터로 이용한 경우이고, (b)는 C가 0.95mF이고 L이 1.5mH인 경우의 인버터 입력전류 스펙트럼이다. 그림 7에서 알 수 있는 것은 C의 용량을 줄이기 위해 L-C필터를 이용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

형이다.

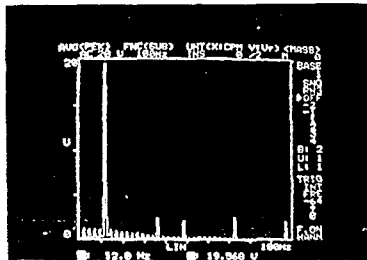
특정한 주파수에서 발생하는 공진을 억제하기 위해서는 특정한 고조파를 억제할 수 있어야 한다. 그러므로 본 연구에서 제시한 하이브리드 알고리즘을 이용하면 식(4)에 제시한 고조파 성분 중에서 원하지 않는 성분을 제거할 수 있으므로, 전기자동차의 진동을 야기하는 공진현상을 억제할 수 있을 것으로 사료된다.



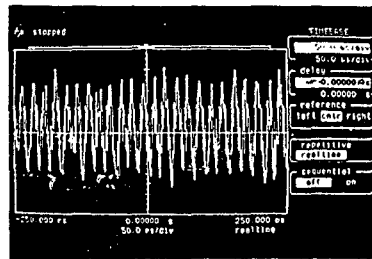
(a)



(a)



(b)

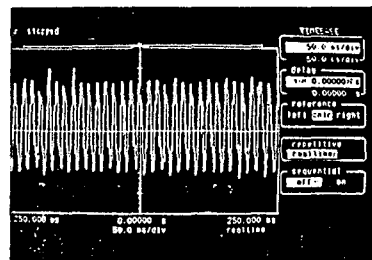


(b)

Fig. 7 Spectrum of Inverter Input Current with Filters  
(a) With C (b) With C and L

그림 7에서 알 수 있는 것과 같이 배터리 내부변수는 인터페이스 회로설계시 선형모델로 해석하여 설계하면 원하는 특성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

그림 8 (a)의 위 파형은 C만으로 필터를 구성한 경우의 인버터 스위칭 소자의 구동신호이고, 아래는 C 및 L로 필터를 구성한 경우의 구동신호 파형이다. (b)는 필터가 C만으로 구성된 경우의 전류 파형이고, (c)는 L-C 필터로 구성된 경우의 전류파



(c)

Fig. 8 Waveforms of the Inverter Drive Signal and Output Current  
(a) drive signals (b) current(with C) (c) current(with C and L)

### 5. 결 론

전기자동차의 구동시스템은 승차감과 에너지 측면에서 가장 중요한 부분이다. 그러므로 구동시스템을 구성하고 있는 배터리, 인버터, 전동기 등을 체계적으로 해석하여 설계과정에 반영해야 한다. 본 연구에서 수행한 배터리 인터페이스, 필터, 인버터 및 토크 특성에 관한 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 전기자동차 구동시스템 설계시 필터를 고려한 경우의 배터리 인터페이스는 선형모델로 해석하여, 그 결과를 회로설계에 반영하여도 원하는 특성을 얻을 수 있다.
2. 필터를 부착할 경우 C만 이용한 경우보다 L-C 필터를 이용하면 C의 용량을 줄일 수 있으며, 동시에 성능도 향상시킬 수 있다.
3. 진동을 유발하는 공진주파수를 효과적으로 억제하기 위해서는 특정 주파수를 제거할 수 있는 하이브리드 인버터의 이용이 바람직하다.

### 참고문헌

[1] J. S. Oh, "A Study on the Design of Hybrid Inverter" , EEIC, Vol. 2, No. 1, pp. 85 ~ 91, 1997.

[2] E. Reimers ; "Design analysis of multiphase dc chopper motor drive", IEEE Trans. Ind. Appl.. vol. IA-8. pp. 136-144, 1972.

[3] J. Bradbury, "Marketing High Performance Electric Delivery Vegicles in the U.K.", Proc. Drive Electric Amsterdam, pp 392~400, 1982

[4] A.B. Plunkett, G.B. Kliman, "Electric Vehicle AC Drive Development", Society of Automative Engineer, Paper No. 800061.

[5] C.C. Chan, W.S. Leung and B.W. Williams, "An A.C. Drive System for Electric Vehicles", Proceeding ICEM, 1984.

[6] P. Bowler and C. Couto, "PWM inverter optimization for a high speed traction drive", Inst. Elect. Eng., Publ. 234, pp. 249 ~ 252.

[7] C. C. Chan, W. S. Leung and W. C. Lo "An electric vehicle with high performance inverter, controller, and battery prediction", Proc. EVS 8, pp. 485 ~ 491, 1986



오진석(Jin-Suk Oh)

1983년~1986년 영국 ZODIAC  
선박회사 엔지니어  
1989년~1992년 국방과학연구  
소 연구원  
1992년~1996년 양산대학 전임  
강사, 조교수, 학과장

1995년~1996년 대한산업안전학회 전기안전 초청  
강사  
1996년~현재 산업안전공단 전기안전 전문위원  
1996년~현재 한국해양대학교 전임강사, 조교수