

## 하이브리드 자동차용 BLDC 전동기 제어 방법

강신원, 장종훈, 정지에, 원충연  
성균관대학교 정보통신공학부

### BLDC motor control method for hybrid electric vehicle

Sin-Won Kang, Jong-Hoon Jang, Ji-ye Jeong, Chung-Yuen Won  
School of Information & Communication Engineering, Sunkyunkwan University

**Abstract** - Hybrid electric vehicle has three operating mode, depending on the operation of the engine and electric motor. According to the speed range of BLDC motor, In hybrid traction mode, both the engine and electric motor deliver to drive train. Battery charge mode, the electric motor operates as generator and is driven by the engine to charge the batteries. In engine alone traction mode, the electric motor is de-energized, and vehicle is propelled by the engine alone. we propose hysteresis current control technique to maintain constant speed in the motor load torque at the reverse direction. The proposed method is verified by using Matlab Simulink software.

### 1. 서 론

하이브리드 자동차는 기계적인 엔진과 전동기를 함께 사용하여 구동력을 얻기 때문에 기존의 기계적 엔진만으로 구동되는 자동차에 비해 이산화탄소 배출량 및 연료 소모가 적다. 국제적으로 환경규제가 엄격해지고 있는 가운데 여러 자동차 업계에서는 이러한 장점을 지닌 하이브리드 자동차에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.

하이브리드 자동차용 전동기는 차체에 엔진을 비롯하여 전동기, 배터리 등을 취부하여야 하기 때문에 용적률이 작다. 따라서 단위 체적 당 토크 밀도가 높은 PMSM의 사용이 일반적이며, 그 중 BLDC 전동기는 제어가 용이하고 제작이 쉬워 산업계에서 자주 사용되고 있다. [1]

하지만 BLDC 전동기의 출력은 속도에 따라 토크가 감소하는 특성을 갖기 때문에 하이브리드 자동차의 전속도 영역에서 구동하기 어렵다. 또한 취부할 수 있는 용적률이 작기 때문에 고효율의 대용량 BLDC 전동기를 사용하기가 어렵다. [2]

따라서 하이브리드 자동차에서 BLDC 전동기는 주로 엔진 출력을 보조하는 역할로 사용된다. 특히 언덕길을 주행하거나, 정지 상태에서 기동할 때에는 높은 토크를 필요로 하며 이때 엔진의 연료소모는 매우 크다. 이러한 주행 상태에 따라 BLDC 전동기를 사용하여 엔진의 출력을 보조하면 연료소모를 줄일 수 있어 효율적인 구동이 가능하다.

한편, 하이브리드 자동차 운전은 주행뿐만 아니라 급격한 정지를 필요로 하는 경우가 있다. 이 때 BLDC 전동기는 역방향의 토크를 인가하여야 하며, 주행자의 안전을 위해서는 일정 속도로 안정적으로 제어해야 한다. 뿐만 아니라, BLDC 전동기의 정방향과 역방향의 속도 제어가 빠르면 빠를수록 주행성능이 향상된다.

본 논문은 하이브리드 자동차의 주행상태에 따라 구동방법의 전환에 대해서 설명하였다. 자동차의 주행상태에 따라 높은 토크가 필요한 영역에서는 전동기와 엔진을 함께 구동시키며(하이브리드모드), 높은 속도 영역에서는 엔진으로(엔진모드), 낮은 속도에서는 전동기로(배터리모드)

구동시킨다. 차량의 속도에 따라 이러한 각각의 구동 모드들을 전환하는 알고리즘을 구현하였다.

또한 BLDC 전동기의 동특성을 향상시키기 위해 정방향 토크와 역방향 토크가 가능한 히스테리시스 전류제어 방법을 제안하였다. [3] 기존의 히스테리시스 전류 제어 방법이 단방향의 토크만을 발생시키기 때문에 역방향 토크가 필요한 구간에서는 동특성이 떨어진다. 뿐만 아니라, 역방향의 속도 지령을 추종하지 못하는 단점이 있어 제어가 용이하지 못하다. 이를 해결하기 위해 정방향 및 역방향 토크에 대해 순시적으로 제어하는 방법을 Matlab Simulink 시뮬레이션으로 제안하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 하이브리드 자동차의 구동모드 전환 방법

하이브리드 자동차의 구동모드는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 기계적인 엔진과 전동기를 함께 구동하는 모드, 기계적 엔진만을 구동하는 모드, 전동기만을 구동하는 모드이다.

먼저 전동기와 기계적 엔진을 함께 구동하는 모드인 듀얼모드는 큰 토크를 낼 수 있는 장점이 있다. 한편 기계적인 엔진만을 구동하는 모드인 엔진모드에서는 고속 및 중속영역에서도 안정적인 동작이 가능하다. 전동기만을 구동하는 전동기모드는 엔진을 이용한 구동보다 소음 및 진동이 감소하며 이산화탄소를 배출하지 않아 친환경적인 장점이 있다.

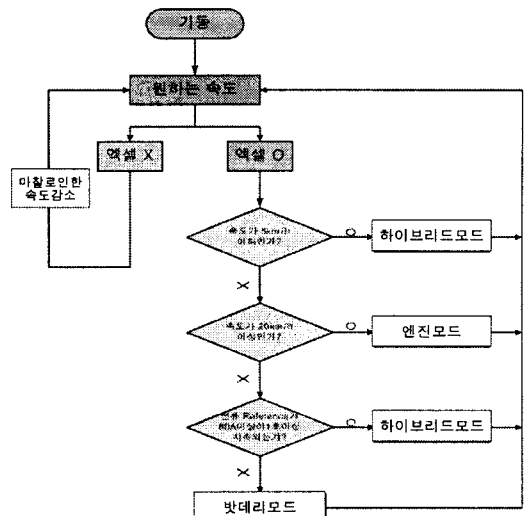


그림 1. 하이브리드 자동차의 속도에 따른 구동모드 전환 방법

그림 1은 자동차의 속도에 따라 각각의 모드를 제어하는 순서도이다. 기동신호는 사용자가 엔진 시동과 전동기를 제어하기 위한 제어를 턴 온 시키는 것으로부터 시작한다. 만약 사용자가 원하는 속도로 하이브리드 자동차가 구동되고 있다면 사용자는 엑셀레이터를 인가하지 않을 것이고 자동차는 자체 마찰에 의해 속도가 감소할 것이다. 한편 사용자가 원하는 속도에 도달하지 않았을 경우엔 사용자는 엑셀레이터를 밟을 것이고 밟는 세기에 따라 필요 토크가 결정된다. [4]

먼저 초기구동 모드, 즉 속도가 5km/h 이하일 경우엔 정지마찰력에 의해 큰 토크가 필요하므로 전동기와 엔진을 함께 쓰는 듀얼모드로 동작시킨다. 한편 속도가 20km/h 이상인 경우는 전체 출력이 상승해야 하므로 전동기의 구동특성과 맞지 않기에 엔진만으로 동작시킨다.

한편 엑셀레이터에 의한 지령토크 상승에도 속도가 20km/h 이상의 구동이 되지 않는 경우엔 자동차가 경사진 도로를 올라가는 경우이므로 큰 토크를 필요로 한다. 이때는 지령토크를 관찰하여 이 값이 일정값 이상을 계속 유지하고 있다면 듀얼모드로 동작시켜 큰 토크를 가능하게 한다. 만약 이와 같은 상태가 아닐 경우에는 BLDC 전동기만으로 하이브리드 자동차를 구동시켜 승차감을 향상시키고 연료소모를 억제한다. [5]

## 2.2 양방향 히스테리시스 전류 제어기

BLDC 전동기에 입력되는 전류를 제어하기 위해서는 일반적으로 3상 인버터가 사용되며, 각 상의 인버터 스위치는 BLDC 전동기의 역기전력에 따라 제어해야만 한다. BLDC 전동기의 역기전력 정보는 전동기에 취부되어 있는 홀센서 신호를 통해 얻을 수 있다. 회전자의 자속이 홀센서를 통과할 때 홀센서에서 발생되는 전압은 전기각으로 180도의 구형파가 발생된다. 회전자 위치에 따라 180도로 발생되는 홀센서 신호는 그림 2의 논리회로를 이용하여 120도 통전 신호로 변환한다.

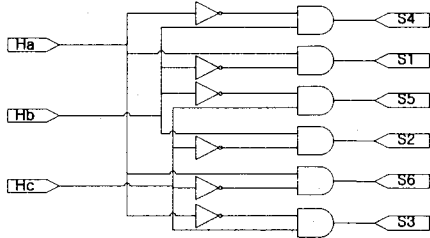


그림 2. BLDC 전동기의 120도 통전 신호를 위한 논리 회로

발생된 통전 신호는 BLDC 전동기 역기전력의 평탄한 구간을 의미하며, 이러한 통전신호에 따라 직류 전류를 흘리게 되면 다음의 수식에 의해 일정 토크를 발생시킨다.

$$T = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 토크,  $e_a, e_b, e_c$ 는 각 상의 역기전력,  $i_a, i_b, i_c$ 는 각 상의 전류,  $\omega_m$ 은 전동기의 각속도이다.

한편 히스테리시스 전류제어 방법은 구현이 용이하고 빠른 응답특성을 갖기 때문에 BLDC 전동기 제어에 자주 사용되고 있다. 하지만 그림 3을 통해 알 수 있듯이 기존의 히스테리시스 전류 제어 방법은 역방향 토크를 발생시킬 수 없기 때문에 지령속도나 부하토크의 방향이 항상 단방향일 때만 제어가 가능하다. 이러한 히스테리시스 전류 제어 방식으로는 다양한 속도 제어가 필요한 하이브리드 자동차에 적용시키기 어렵다. [2]

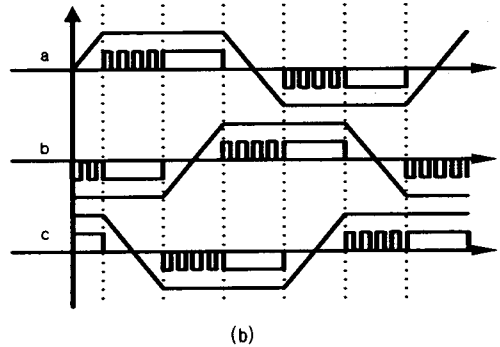
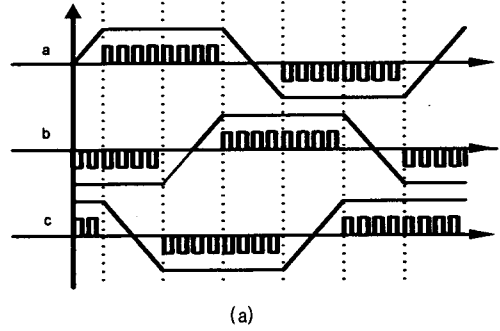


그림 3. 기존의 히스테리시스 전류 제어 방법  
(a) Bipolar PWM 방식  
(b) Unipolar PWM 방식

양방향 히스테리시스 전류 제어기는 그림 4와 같이 역기전력 전압이 평탄한 구간에서 정방향과 역방향의 전압을 인가하여 전류를 제어한다.

정방향 토크를 인가할 때는 기존의 히스테리시스 제어 방법과 같다. 하지만 역방향 토크를 인가할 때는 역전압을 인가하여 전류를 급격히 소호시키는 것은 물론 필요시 역방향의 전류를 발생시켜 양방향 지령 토크를 추종할 수 있게 한다.

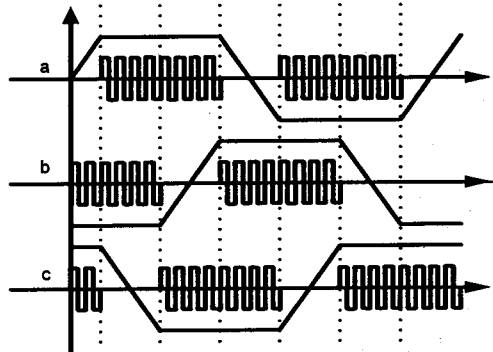


그림 4. 양방향 히스테리시스 스위칭 방식

Bipolar PWM 방식은 스위치를 off 시켜 다이오드를 통해 역방향의 전압을 인가하지만 이러한 방식은 전류가 완전히 소호되면 다이오드에 의해 역방향 전류가 제한되기 때문에 토크 발생이 제한적이다. 하지만 본 논문에서 제안한 방식은 반대 방향 스위치를 on 시켜 역방향 전압을 인가하기 때문에 역방향 전류에 제한이 없다.

### 3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 시뮬레이션에 사용된 BLDC 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. BLDC 전동기의 파라미터

정격출력(output)	1500[W]
입력전압(voltage)	48[V]
정격속도(speed)	2000[r/min]
극수(pole)	8
상저항(Rs)	0.0089[Ω]
상인덕턴스(Ls)	0.0192[mH]
역기전력상수(ke)	0.1016[V/s/rad]

그림 5는 정방향에서 역방향의 속도지령을 인가하였을 때의 전동기의 속도 파형을 비교하였다. 기존의 방법은 역방향 속도 지령이 인가되었을 때 발산하게 되지만 제안된 방법은 역방향의 속도 지령이 인가되어도 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

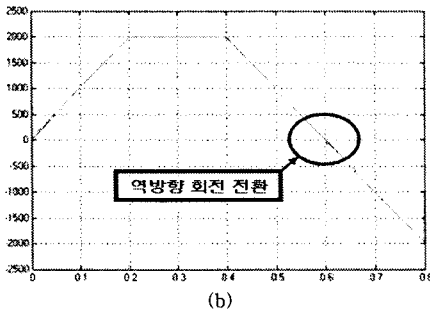
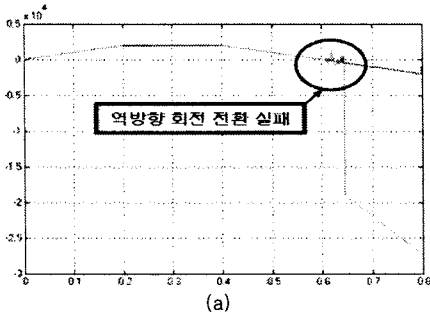


그림 5. 정방향과 역방향 속도지령을 인가하였을 때의 시뮬레이션 결과

- (a) 기존의 히스테리시스 제어방법
- (b) 제안된 히스테리시스 제어방법

그림 6은 정방향과 역방향 부하토크를 인가하였을 때의 시뮬레이션 결과 파형을 비교한 것이다. 기존의 방법은 역방향 토크가 인가되기 시작하면 제어가 되지 않아 진동하기 시작하며, 일정 토크 이상 인가 시 발산하게 된다. 하지만 제안된 히스테리시스 제어방법은 역방향 부하토크에도 안정적으로 제어가 되는 것을 확인할 수 있다.

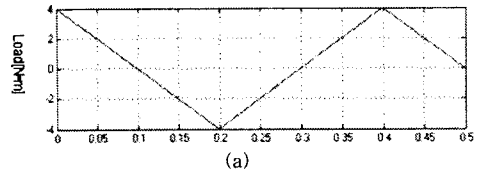
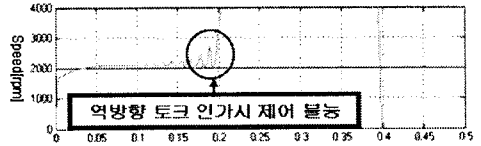


그림 6. 정방향과 역방향 부하토크를 인가하였을 때의 시뮬레이션 결과

- (a) 기존의 히스테리시스 제어방법
- (b) 제안된 히스테리시스 제어방법

### 4. 결론

본 논문은 하이브리드 자동차의 주행상태에 따라 구동 모드를 전환하는 방법에 대하여 설명하였다. 또한 정방향과 역방향 토크를 순차적으로 발생시켜 동특성을 향상시킬 수 있는 양방향 히스테리시스 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 Matlab Simulink 시뮬레이션을 이용하여 기존의 히스테리시스 전류제어 방법과 비교하였으며, 기존의 방법 대비 양방향 회전 및 동특성이 향상되는 것을 확인하였다.

### [참고 문헌]

- [1] 최재혁, "Phase Advance Angle을 이용한 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 고속운전에 관한 연구", 석사학위논문, 고려대, 2003.
- [2] M. A. Rahman, "Modern Electric Motors in Electronic World", Proc. of IEEE IECON'93, pp. 644-648, 1993.
- [3] 백원식, 김동희, 김민희, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 히스테리시스 및 PI 전류제어기 응답특성", 조명·전기설비 학회 논문지 제21권 5호 pp. 25-31, 2007.
- [4] Gunhee Jang and M. G. Kim, "A Bipolar-Starting and Unipolar-Running Method to Drive a Hard Disk Drive Spindle Motor at High Speed With Large Starting Torque", IEEE transaction on magnetics, vol. 41, no. 2, February. 2005.
- [5] Mehrdad Ehsani, Yimin gao, Sebastien E. gay, Ali emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicle, CRC press, 2005.