

오픈 와인딩 머신을 이용한 하이브리드 시스템의 제어

곽무신, 설승기
서울대학교 전기컴퓨터공학부

Control of Hybrid System using Open Winding Machine

Mu-Shin Kwak, Seung-Ki Sul
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

ABSTRACT

오픈 와인딩 머신을 이용한 새로운 하이브리드 시스템을 제안한다. 본 시스템은 기존 하이브리드 시스템의 DC/DC 전력 변환기와 이에 필요한 인덕터를 필요로 하지 않으며, 주어진 DC 링크 전압과 배터리 전압으로 보다 높은 속도 운전영역까지 최대 토크 운전이 가능하다. 또한 전동기의 기계 출력, 배터리의 입출력 전력, DC링크단의 입출력 전력을 모두 양방향으로 제어할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다.

오픈 와인딩 머신은 고효율 교류 구동시스템이나 제한된 DC 링크 전압을 사용해야 하는 시스템에서 사용되어 왔다^{[2][3]}. 교류 전동기의 3상 권선의 양단을 모두 사용하여 6개의 터미널 단자를 모두 이용하는 방식의 전동기를 오픈 와인딩 머신이라 한다. 본 논문에서는 앞의 그림1에서 MG2로 표시된 전동기를 오픈 와인딩 머신으로 이용한 새로운 하이브리드 시스템을 제안하고 기존의 시스템과 비교했을 때의 장단점 및, 제안된 시스템을 제어하기 위한 알고리즘을 제시한다.

1. 서론

최근 자동차의 하이브리드 구동 시스템에 대한 연구가 활발하다. 이미 일본의 자동차 회사인 토요타에서는 자사 모델중의 하나인 프리우스에 하이브리드 구동 시스템을 적용하여 양산을 시작하였고 국내에서도 수년 내에 본격적인 양산을 계획하고 있는 상황이다.

토요타에서는 1997년에 첫 번째 하이브리드 모델을 발표하였고 2003년에 새로운 하이브리드 시스템인 THS-II (Toyota Hybrid System - II) 구조를 발표하였다^[1]. 기존의 THS-II 시스템은 그림1에 보이는 것과 같이 배터리, 부스트 컨버터, 전동기, 발전기, 인버터, 엔진, 플래너터리 기어(Power Split Device) 등으로 구성되어 있다. 그림에 표시된 수치들은 THS-II 시스템의 수치들과 같은 값은 아니며 본 논문에서 대상으로 하는 용량을 나타낸 것이다.

본 논문에서는 기존의 하이브리드 시스템 구조에서 오픈 와인딩 머신을 이용하여 배터리와 DC 링크 사이의 부스트 컨버터를 필요로 하지 않는 새로운 하이브리드 시스템을 제안한다.

2. 제안된 하이브리드 구동 시스템

제안한 하이브리드 구동 시스템의 구조를 그림2에 나타내었다. 기존의 시스템에서는 배터리가 인덕터와 1-leg 전력용 스위치로 구성된 DC/DC 컨버터를 통하여 DC 링크 캐패시터에 연결되어 있는 반면에 제안된 시스템에서는 배터리가 3-leg 인버터를 통해 전동기(MG2)의 오픈 와인딩의 다른 쪽 단자들에 연결되어 있는 구조이다.

제안된 시스템에서 배터리의 충방전 및 전동기-발전기의 독립적인 제어 등의 기본적인 기능이 기존의 시스템에서와 같이 구현될 수 있는가 하는 문제는 다음 장에 소개되는 제어 알고리즘에서 보이기로 하고 본 장에서는 기존의 하이브리드 구동 시스템과 비교했을 때의 구조적 측면에서의 장단점을 분석해보기로 한다. 기존의 시스템과 비교했을 때의 장단점을 비교해보면 다음과 같다.

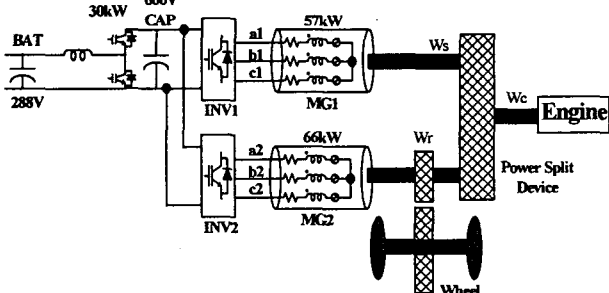


그림 1 기존의 하이브리드 구동 시스템 구조
Fig. 1 Structure of conventional hybrid system

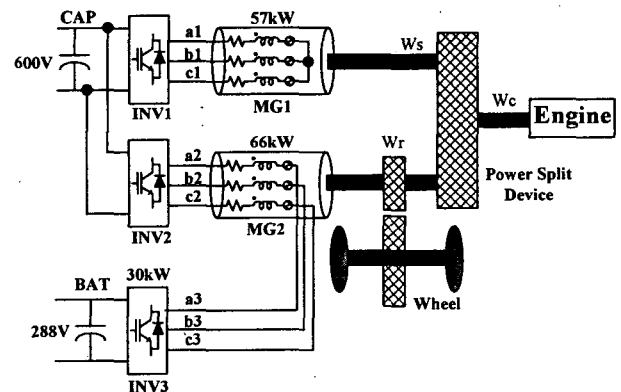


그림 2 제안된 하이브리드 구동 시스템의 구조
Fig. 2 Structure of proposed hybrid system

우선 두 개의 전압원 사이에 필요한 인덕터의 기능을 전동기의 인덕턴스가 감당하게 되어 인덕터를 사용하지 않아도 된다. 또한 엔진을 정지하고 배터리만을 이용하여 구동하는 EV(Electric Vehicle) 모드나 회생 제동 모드 등의 배터리 충전 전 모드에서의 효율이 증가하게 된다. 기존의 시스템에서는 이러한 모드에서 두 번의 전력변환이 필요했지만 제안된 시스템에서는 한번의 전력변환만으로 이러한 변환이 가능하기 때문이다. 다음으로 배터리 전압과 DC 링크의 전압을 함께 사용함으로써 전동기(MG2)에 인가할 수 있는 가용 전압이 증가한다. 이와 관련한 자세한 설명은 다음 장의 제어 알고리즘 및 시뮬레이션 결과에서 하기로 한다. 마지막으로 전동기 자석의 자속 사양을 보다 크게 할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 전동기 자석의 자속은 인버터 고장시의 안전성 문제로 인해 크기가 제한받게 되는데 제안된 시스템에서는 허용되는 선간 전압이 기존의 600V에서 배터리 전압과 DC 링크 전압의 합인 888V로 커진다. 일반적으로 전동기 자석의 자속이 커지면 같은 출력을 내기 위한 전류 크기가 작아진다.

단점으로는 일반적으로 중성점이 내부에서 연결되어 있는 전동기가 아닌 오픈 와인딩 머신을 사용해야 한다는 점을 들 수 있다. 기존의 전동기에 비해 다소 제조상의 불리한 점으로 볼 수 있다. 또한 기존의 1-leg 전력용 반도체 대신 전동기 전류 용량을 감당할 수 있는 3-leg 인버터(INV3)가 추가적으로 필요하다는 점도 단점으로 들 수 있다. 다만 이 인버터의 전압 용량은 배터리 전압의 용량으로서 DC링크단의 인버터(INV2) 보다는 전압 사양이 작아도 된다.

위에 열거한 장단점을 정리해보면 다음과 같다.

장점

- 기존의 DC/DC 컨버터에 사용하는 인덕터 불필요
- 배터리 사용 모드에서의 효율 증가
- 전동기(MG2)의 가용전압 증가
- 전동기 자석의 자속 스펙 증가 가능

단점

- 오픈와인딩 전동기 사용
- 전동기의 전류 사양과 같은 용량의 인버터 필요

3. 제안된 시스템의 제어 알고리즘

3.1 오픈 와인딩 머신의 모델링

오픈 와인딩 머신을 두 개의 인버터로 제어하기 위해서는 양쪽의 전압이 포함된 전압 방정식과 토크 방정식이 필요하다. 그림3의 모델에서 이러한 방정식을 유도해보면 다음과 같다.

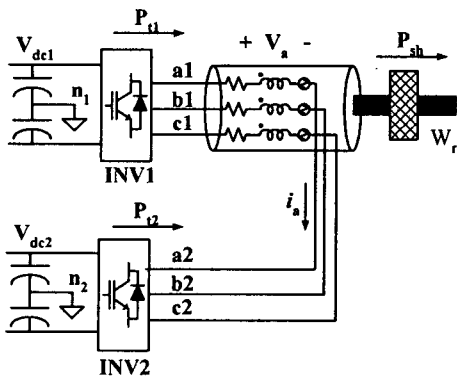


그림 3 오픈 와인딩 머신의 기본 모델
Fig. 3 Simplified model of open winding machine

우선 전동기 양단의 전압을 인버터의 극전압으로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a1n1} \\ V_{b1n1} \\ V_{c1n1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{a2n2} \\ V_{b2n2} \\ V_{c2n2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{n1n2} \\ V_{n1n2} \\ V_{n1n2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식을 회전자 기준 좌표계로 변환하면,

$$\begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{d1} \\ V'_{q1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V'_{d2} \\ V'_{q2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

그림3에서 양쪽의 DC 링크가 절연되어 있으므로,

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3)$$

따라서 영상분 전류가 없는 정지 좌표계 전압방정식은,

$$\begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_d & 0 \\ 0 & r_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_r \phi_f \sin \theta_r \\ \omega_r \phi_f \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

영상분 전류가 없는 동기좌표계 전압방정식은,

$$\begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & r_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

양쪽의 인버터에서 출력되는 전력의 합을 유도하면,

$$\begin{aligned} P_{i1} + P_{i2} &= V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \\ &= \frac{3}{2} (V'_d i'_d + V'_q i'_q) \\ &= \frac{3}{2} r_s (i'^2_d + i'^2_q) + \frac{3}{2} p \left(\frac{1}{2} L_d i'^2_d + \frac{1}{2} L_q i'^2_q \right) \\ &\quad + \frac{3}{2} \omega_r (\phi_f i'_q - (L_q - L_d) i'_d i'_q) \\ &= (R \sim) + (L \sim) + P_{sh} \end{aligned} \quad (6)$$

위 식으로부터 전동기의 토크 방정식은 다음과 같이 된다.

$$T_e = \frac{3P}{2} (\phi_f i'_q - (L_q - L_d) i'_d i'_q) \quad (7)$$

3.2 하이브리드 운전 모드에서의 전동기 제어 방법

하이브리드 자동차의 운전 모드에는 시동 및 저속 모드, 기본 조건 운전 모드, 감속 모드, 배터리 충전 모드, 순간 가속 모드, 정지 모드 등이 있다. 본 논문에서는 기본 조건 운전 모드 (Driving under normal conditions)에서 오픈 와인딩 머신을 어떻게 제어할 수 있는가를 설명하기로 한다. 기본 조건 운전 모드란, 그림1에서 배터리의 전력은 사용하지 않고 엔진 출력의 일부가 직접 휠로 전달되고 나머지 출력은 MG1으로 발전하여 DC링크를 순환한 후 MG2로 휠에 전달함으로써 기존의 트랜스미션의 기능을 구현하는 모드로서 일반적으로 가장 많은 시간동안 이용되는 모드이다.

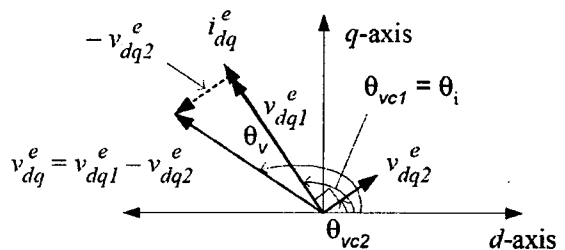


그림 4 전압 직교 방법 (배터리측의 INV2가 무효전력 공급)
Fig. 4 Voltage quadrature method (INV2 supplying reactive power)

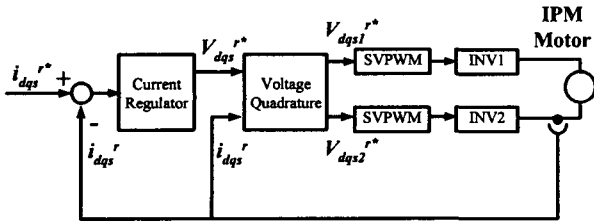


그림 5 직교 전압 방법을 이용한 제어기 블록도
Fig. 5 Block diagram with voltage quadrature method

그림2의 제안된 시스템에서 배터리측 INV2의 3상 단자를 스위치를 이용하여 하나의 노드에 연결하면 위에서 설명한 기본 조건 운전 모드를 동일하게 구현할 수 있다. 그러나 INV2에서 전압을 적절히 인가함으로써 배터리의 입력력 전력을 0으로 하면서 전동기(MG2)에 보다 큰 전압을 인가할 수 있다. 그림4에 보이는 것과 같이 INV2의 전압을 전류 지령 벡터와 수직이 되게 하면 INV1의 전압은 전류 벡터와 같은 선상에 위치하게 되어 INV1에서 유효전력만을 공급하게 된다. 결국 전동기 양단에 인가할 수 있는 전압의 최대값이 커져서 성능곡선에 의한 운전 영역이 보다 넓어지게 된다. 물론 이때 배터리에서 출력되는 유효전력은 0이 되고 무효전력만 공급하게 된다. 이와 같은 제어 방법을 블록도로 도시하면 그림5와 같이 된다.

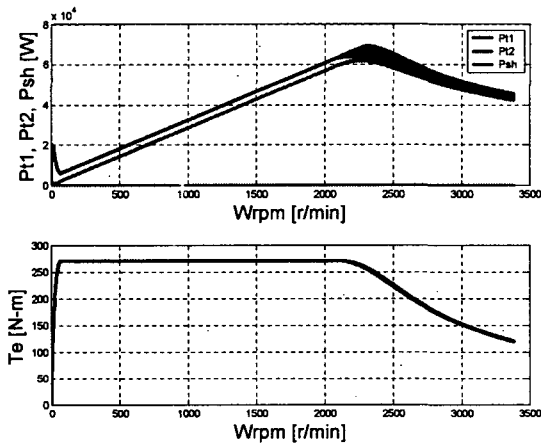


그림 6 기존의 하이브리드 시스템의 성능 곡선
Fig. 6 Capability curve of conventional hybrid system

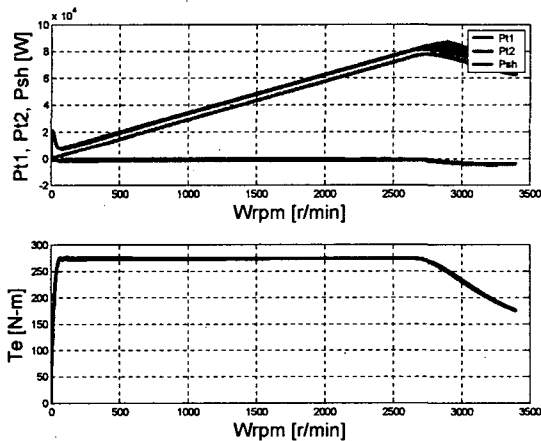


그림 7 제안된 하이브리드 시스템의 성능 곡선
Fig. 7 Capability curve of proposed hybrid system

표 1 모의 실험에 사용된 시스템 용량 및 상수
Table 1 Rated value and parameters used in simulation

DC 링크 전압	600 [V]
배터리 전압	288 [V]
배터리 정격 파워	30 [kW]
전동기(MG2) 정격 파워	66 [kW]
전동기(MG2) 정격 전류	200 [A]
전동기(MG2) 극 수	8

4. 모의 실험 결과

앞에서 제안한 제어 방법을 모의실험으로 확인해보기 위해 다음 표1과 같은 시스템을 가정하였다. 또한 기존의 하이브리드 구동 시스템의 모의실험도 병행하여 제안된 시스템의 성능 곡선이 더 넓어지게 되는 것을 확인해볼 수 있도록 하였다.

그림6은 기존의 하이브리드 시스템의 성능 곡선을 보여주고 있다. 위 그래프에서 볼 수 있듯이 배터리측으로부터 공급되는 전력(P_{b2})은 제안한 것과 같이 0이며 DC 링크에서 전달된 전력(P_{ll})이 모두 전동기의 기계출력(P_{sh})으로 변환된다. 대략 2200r/min의 속도까지가 정토크 영역이며 이 때 66kW 정도의 출력을 내고 있다.

반면 그림7에 보이는 것과 같이 제안된 시스템에서는 대략 2700r/min의 속도까지가 정토크 영역이며 이 때 80kW 정도의 출력이 가능한 것을 알 수 있다.

이러한 모의실험 결과로부터 같은 용량의 DC 링크 전압, 배터리 전압으로 전동기 구동 시스템의 성능 곡선이 향상됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 하이브리드 구동 시스템의 대체 구조의 하나로서 오픈 와인딩 머신을 이용한 하이브리드 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템이 갖는 단점과 장점을 비교 분석하였으며 다양한 하이브리드 구동 모드 중 기본 조건 운전 모드에서의 제어 알고리즘을 모의실험을 통하여 확인하였다. 같은 크기의 DC 링크 전압 및 배터리 전압으로 기존의 시스템보다 넓은 영역에서 전동기를 운전할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Muta, K. Yamazaki, M. Tokieda, J. "Development of New-Generation Hybrid System THS II - Drastic Improvement of Power Performance and Fuel Economy", SAE transactions, NUMB 1833, pages 55-66, 2004.
- [2] Yoshitaka Kawabata, Motoshi Nasu, Takuya Nomoto, Emenike C. Ejiogu, Takao Kawabata, "High-Efficiency and Low Acoustic Noise Drive System Using Open-Winding AC Motor and Two Space-Vector-Modulated Inverters," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 49, NO. 4, AUGUST 2002, pp.783-789.
- [3] Brian A. Welchko and James M. Nagashima, "The Influence of Topology Selection on the Design of EV/HEV Propulsion Systems," IEEE POWER ELECTRONICS LETTERS, VOL. 1, NO. 2, JUNE 2003, pp.36-40.