

# 회전하는 고정자를 가진 전동기를 포함한 하이브리드 차량 구동 회로

손영락, 하정익  
서울대학교 전기정보공학부

## The Hybrid Electric Vehicle structure including the motor with rotatable stator

Yeongrack Son, Jung-Ik Ha  
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

하이브리드 자동차는 동력을 얻기 위해 엔진과 전동기를 모두 사용한다. 이 하이브리드 자동차의 구동부 구조는 다양한 형태로 구성할 수 있는데, 이 중 직렬-병렬 구조는 엔진의 토크 및 속도 자유도를 모두 확보할 수 있어 높은 효율을 달성할 수 있다. 직렬-병렬 구조는 발전기, 전동기, 그리고 속도 분배를 위한 유성 기어를 이용하여 주로 구현되고 있고, 최근에는 다양한 새로운 형태의 전동기가 개발되어 이를 구동부에 적용하는 것에 관한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 이 중 고정자를 회전자에 독립적으로 회전시킬 수 있는 새로운 형태의 전동기를 사용하는 구조에 관한 내용을 다룬다. 위의 전동기는 기존 구조에서 유성 기어 및 발전기의 역할을 대체하여 토크 분배 및 전기적 출력 변환을 수행할 수 있다. 또한, 회전하는 고정자에 인버터 회로를 탑재하여 슬립 링 대신 회전하는 고정자에 전력을 공급하는 방식을 제안한다.

### 1. 서론

하이브리드 자동차는 바퀴 축의 부하를 엔진과 전동기가 분담한다. 이 중 엔진은 전동기와 비교했을 때 최적 효율 지점에서 벗어날 때 효율이 크게 떨어지는 특성을 가진다. 따라서 엔진이 높은 효율 지점에서 일정하게 동작할 수 있도록 엔진의 토크 및 속도 자유도를 확보하는 것이 시스템 전체 효율 측면에서 유리하다. 지금까지 여러 가지 하이브리드 자동차의 구동 방식이 제안되었다. 이 중 직렬-병렬 방식은 전동기와 발전기, 그리고 유성 기어 및 1차축 기어로 구성된 형태이다. 이 방식은 유성 기어와 발전기를 통해 엔진의 속도 자유도를, 전동기 및 1차축 기어를 통해 엔진의 토크 자유도를 확보할 수 있다. 그러나 직렬-병렬 방식은 여러 부분에서 기계적인 마찰이 발생하며, 기계적 장치의 마모로 인한 안정성 문제를 일으킬 수 있다. 이에 본 논문에서는 직렬-병렬 방식에서 기계적인 마찰을 줄일 수 있는 방법 중 하나인 회전하는 고정자를 가진 전동기에 대해 다룬다. 먼저 2장에서는 회전하는 고정자를 가진 전동기의 구조와 전기적인 특성을 설명하고, 자동차 구동부에 적용 시 어떤 효과가 있는지 소개한다. 3장에서는 회전하는 고정자를 가진 전동기에 사용되는 슬립 링을 대체할 수 있는 장치를 제안한다. 제안 방식의 동작은 시뮬레이션을 통해 확인되었다.

### 2. 회전하는 고정 자를 가진 전동기<sup>[2, 3]</sup>

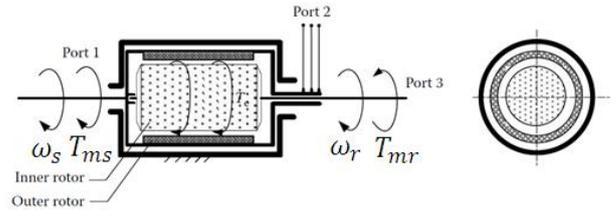


그림 1. 회전하는 고정자를 가진 전동기

회전하는 고정자를 가진 전동기는 그림 1과 같이 같은 축을 중심으로 회전하는 두 개의 회전자로 구성되어 있다. 두 개의 회전자 중 하나는 일반적인 전동기에서 고정자에 해당하는 부분이다. 위와 같은 전동기의 전기적 각속도는 (1)과 같이 두 회전자 각속도의 차로 나타낼 수 있다.

$$\omega_e = \omega_r - \omega_s = pp(\omega_{rm} - \omega_{sm}) \quad (1)$$

$\omega_s$  및  $\omega_r$  은 각 회전자의 전기적 각속도를,  $\omega_{sm}$  및  $\omega_{rm}$  은 각 회전자의 기계적 각속도를, 그리고  $p$ 는 전동기의 pole pair를 뜻한다. 전동기의 형태가 영구 자석 동기 전동기일 때, 전동기의 회전자 좌표계에서의 전압 방정식 및 토크 식은 아래와 같다.

$$v_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_{ds} \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_e L_q i_{qs}^r \quad (2)$$

$$v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + L_{qs} \frac{di_{qs}^r}{dt} + \omega_e (\lambda_f + L_d i_{ds}^r)$$

$$T_e = 1.5 pp \left\{ \lambda_f + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r \right\} i_{qs}^r \quad (3)$$

$R_s$ ,  $L_{ds}$ ,  $L_{qs}$ ,  $\lambda_f$ ,  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ 는 각각 전동기의 회전하는 고정자 축 저항, d-q 인덕턴스, 역기전력 상수, d-q 전류의 크기를 뜻한다. 회전하는 고정자를 가진 전동기는 양 축의 속도의 차이를 제어할 수 있어, 두 축을 엔진 축과 바퀴 축에 연결하여 엔진의 속도를 휠 쪽의 속도에 독립적으로 제어할 수 있다. 이는 기존 직렬-병렬 구조에서 유성 기어 및 발전기가 수행하던 역할로, 이를 회전하는 고정자를 가진 전동기로 교체하여 유성 기어의 기계적 마찰로 인한 안정성 문제를 해결할 수 있다. 본 논문에서는 영구 자석 동기 전동기 형태의 전동기를 예로 들었으며, 같은 방식으로 유도기로도 회전하는 고정자를 가진 전동기를 구현할 수 있다.

### 3. 고주파 변압기를 통한 슬립 링의 제거

회전하는 고정자를 가진 전동기는 두 축이 모두 회전하므로 고정된 전력 회로와 전력을 주고 받기 위해 최소 한 쌍의 슬립 링을 사용해야 한다. 슬립 링은 두 접촉부 사이의 마찰로 인해 마모가 발생하며, 이 때문에 시스템의 수명 및 안정성에 좋지

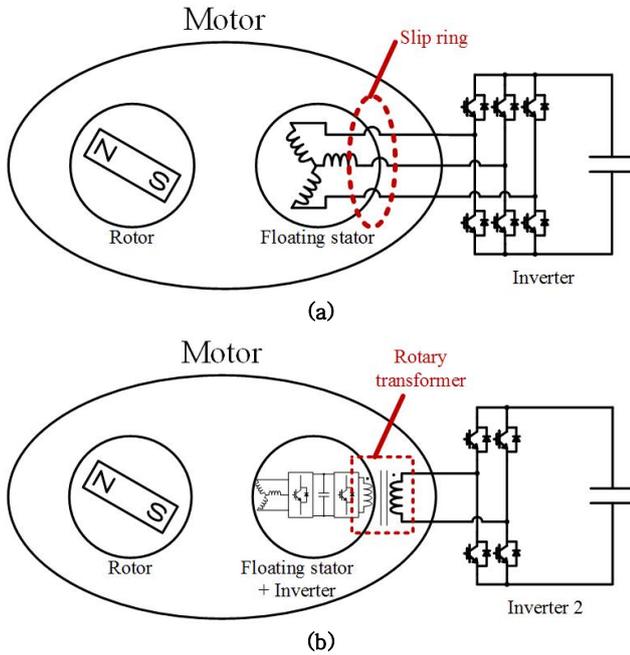


그림 2. (a) 슬립 링을 사용한 전동기 구조, (b) 슬립 링을 제거한 전동기 구조.

않은 영향을 끼친다. 이에 이 논문에서는 변압기를 사용하여 물리적인 접촉 없이 전력을 전달하는 방식을 제안한다. 제안 전력 전달 장치는 그림 2(b)와 같이 회전하는 축에 인버터 회로를 탑재하고, 단상 변압기를 통해 고정된 전력 회로와 전력을 주고 받는다. 변압기의 권선은 축을 따라 감아 자속이 축에 평행한 방향으로 발생하여 전동기 토크에 영향을 미치지 않도록 설계한다. 전류가 흐르는 방향과 축이 회전하는 방향이 같아 회전자 축 전류의 주파수가 전동기의 회전 주파수에 영향을 받는 특성을 보인다<sup>[4]</sup>.

$$\omega_{es} = pp\omega_{rm} + \omega_{er} \quad (4)$$

$\omega_{es}$ ,  $\omega_{er}$ 는 각각 고정된 전력 회로 측 전류의 주파수와 회전하는 회로 측 전류의 주파수를 뜻한다. 양측의 H-브릿지 컨버터에서 스위칭 주파수의 구형파를 출력하고, 두 전압의 위상차를 이용하여 전달되는 전력의 크기를 제어한다. 이는 Dual Active Bridge (DAB) 에서 전달하는 전력의 크기를 제어하는 방식<sup>[6]</sup>과 동일하다. 위상차에 따른 전달 전력의 크기는 아래 식과 같다.

$$P = \frac{V_{dc,1}V_{dc,2}}{2Lf_{sw}} d(1-d) \quad (5)$$

$V_{dc,1}$ ,  $V_{dc,2}$ ,  $L$ ,  $f_{sw}$ ,  $d$ 는 각각 1차측 및 2차측 직류단 전압, 변압기의 누설 인덕턴스, 스위칭 주파수, 그리고 두 전압의 시간차를 스위칭 주기의 반으로 나눈 비율을 뜻한다. 이와 같이 제어할 경우 변압기의 크기를 작게 설계할 수 있어 전체 전력 전달 장치의 부피 및 무게를 줄일 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 통해 논문에서 다룬 전동기 및 전력 전달 장치의 동작을 확인했다. 전동기의 제정수는 표 1과 같다. 표 2는 정격 토크 부하 상황에서 몇 가지 속도 별로 슬립 링을 적용한 경우와 아닌 경우에 시스템의 효율을 비교 및 정리한 것이다. 논문에서 제안한 전력 기준 슬립 링을 사용한 회로와

비교했을 때, 변압기 측의 손실로 인해 효율이 다소 감소하는 것을 확인할 수 있다.

표 1. 전동기의 제정수

제정수	값
$R_s$	0.05[Ω]
$L_d, L_q$	0.635[mH]
Rated torque	180[N·m]
Rated speed	1500[r/min]

표 2. 기존 방식과 제안 방식의 운전 속도별 효율 비교

속도 [r/min]	750	1500	1875
$P_{mech}$ [kW]	14.18	28.29	35.36
$P_m$ (slip ring) [kW]	15.25	29.38	36.49
$P_m$ (Proposed) [kW]	15.58	30.67	38.54
$Eff.$ (slip ring) [%]	93.02	96.30	96.91
$Eff.$ (Proposed) [%]	91.01	92.22	91.75

#### 5. 결론

이 논문에서는 하이브리드 자동차 구동부에서 기계적인 마찰을 줄이기 위한 방안으로 회전하는 고정자를 가진 전동기를 다루고, 해당 전동기에서 슬립 링을 변압기를 이용한 회로로 치환한 구조를 제안했다. 시뮬레이션을 통해 제안된 구조가 기존 구조와 동일한 역할을 수행할 수 있음을 확인했다. 향후 변압기의 설계를 통해 효율 감소를 최소화하는 연구가 필요하다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2009-0083495).

#### 참고 문헌

- [1] M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design” SE, CRC Press, 2010, pp. 141–150.
- [2] A. ghayebloo and A. Radan, “Superiority of Dual Mechanical Ports machine based structure for Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle Applications”, IEEE Trans. Veh. Technol., to be published.
- [3] H. Nasiri, A. Radan, A. Ghayebloo, and K. Ahi, “Dynamic modeling and simulation of transmotor based series-parallel HEV applied to Toyota Prius 2004,” in Proc. Int. Conf. Environ. Eng., 2011, pp. 1–4.
- [4] M. Ruviano, F. Rüncoş, N. Sadowski, I. M. Borges, “Analysis and Test Results of a Brushless Doubly Fed Induction Machine with Rotary Transformer,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, issue 6, pp. 2670–2677, Jun. 2012.
- [5] Y. Han and J. I. Ha, “Wound Rotor Machine Fed by a Single-Phase Grid and Controlled by an Isolated Inverter,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, issue 9, pp. 4843–4854, Sept. 2014.
- [6] H. K. Krishnamurthy and R. Ayyanar, “Building block converter module for universal (AC-DC, DC-AC, DC-DC) fully modular power conversion architecture,” in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., Jun. 2007, pp.