

하이브리드 자동차용 계자 권선형 동기전동기의 최대 토크 운전

유성환, 송우현, 김준석
국립인천대학교 전기공학과

Maximum Torque Control Of Salient-Pole Synchronous-Induction Motor For Hybrid Electric Vehicle

SeongHwan Yoo, WooHyun Song, JoohnSheok Kim
Incheon National University

ABSTRACT

친환경 차량에 대한 관심이 급증함에 따라 고효율 운전이 가능한 하이브리드 전기자동차(이하 HEV)에 대한 관심이 급증하고 있다. HEV에는 효율이 높고 단위 체적당 토크가 큰 고성능 전동기가 적용되고 있으며 자동차에 적용되는 특수성으로 인해 고속영역에서의 안정된 출력 특성이 요구되고 있다. 회전계자부에 권선을 적용한 계자권선형 동기전동기는 영구자석형 전동기에 비해 효율이 다소 감소하는 단점이 있으나, 공극 자속을 임의로 제어할 수 있기 때문에 저속영역부터 10,000rpm 이상의 고속영역까지 탁월한 가변속 능력을 발휘하는 장점이 있으며, 저용량 HEV에 매우 적합한 특성을 지니고 있다. 그러나, 일반적인 영구자석형 동기전동기와는 다르게 d,q축 전류 뿐만 아니라 자속성분 전류까지 제어 대상에 포함되므로 제어계가 복잡해지는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 HEV용 계자 권선형 동기전동기의 단위 전류당 최대토크 제어(MTPA)에 대하여 연구를 진행하였으며, 전압 전압제한 하에서 이론적으로 발생 가능한 최대토크 능력 커브를 기반으로 실제 시스템에서 쉽게 구현할 수 있는 약계자 제어 알고리즘을 제안한다.

1. 서 론

영구자석 매입형 동기 전동기(IPM)는 기계적으로 강인하고 돌극성으로 인한 리터턴스 토크가 과생되므로 HEV에 적용하기에 적합한 전동기로 인식되고 있다. 그러나, 저속영역에서 큰 토크를 얻기 위한 강한 자속은 고속영역에서의 전압제한으로 나타나는 경향이 있기 때문에 4,000~5,000rpm이상의 고속에서 토크가 급격히 감소하는 문제를 지니고 있다. 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 계자자속을 직접 제어할 수 있어야하며 이러한 관점에서 계자에 권선을 도입한 계자권선형 동기전동기(WRSM: Wound Rotor Synchronous Motor)는 매우 적절한 해결책이 될 수 있다. 또한, WRSM은 자체적인 돌극성으로 인해 비교적 큰 리터턴스 토크를 출력할 수 있기 때문에 단위 체적당 토크가 IPM에 못지않은 우수한 출력특성을 갖는다. 그러나, 계자용 슬립링이 부차되어야하는 기계적인 제한으로 인해 자동차 엔진과의 직결형 구조가 어렵기 때문에 본격적인 HEV에 적용하기 어려운 문제가 있다. 한편, 엔진직결형 구조가 아닌 미들 수준의 MHEV(Mild HEV)의 경우 통상적으로 전동기가 풀리 벨트로 엔진과 결합하는 구조를 갖고 있고 풀리비가 1:2가 넘는 경우가 많기 때문에 10,000rpm이상의 고속운전이 가능한 전동기가 요구되며, WRSM의 특성이 이러한 요구에 매우 적합하다고 할 수 있다.

WRSM을 제어할 때 마주치는 문제는 MTPA제어에서 공극 자속이 변수로 작용한다는 점이다. 이점은 IPM의 제어와 매우 큰 차이가 있으며 해석적인 제어가 더욱 어려워지는 문제를 야기한다. 본 연구에서는 전동기의 파라미터를 이용하여 전압제한 하에서 WRSM이 구현할 수 있는 최대 토크 능력 곡선을 추적하고 이를 바탕으로 WRSM의 MTPA를 수식적으로 쉽게 모사할 수 있는 해석적 제어방법에 대하여 연구를 진행하였다.

2. 계자 권선형 동기전동기 모델링

WRSM의 동기좌표계 전압방정식과 토크방정식은 식 (1), (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_{ds} \frac{d}{dt} & -w_r L_{ds} \\ w_r L_{ds} & R_s + L_{qs} \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w_r \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, v_{ds}^e, v_{qs}^e : 동기좌표계 d, q축 고정자 전압

i_{ds}^e, i_{qs}^e : 동기좌표계 d, q축 고정자 전류

L_{ds}, L_{qs} : 동기좌표계 d, q축 인덕턴스

R_s : 고정자 저항 ψ_f : 쇄교 자속

$$T_e = \frac{3}{2} P (\psi_f i_{qs}^e + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^e i_{qs}^e) \quad (2)$$

WRSM의 경우 IPM과 매우 유사하게 돌극성에 의한 리터턴스 토크가 나타난다. 다른 점은 $L_{ds} \geq L_{qs}$ 가 성립한다는 것이며 0보다 큰 d q전류의 조합에서 최대토크가 발생한다.

다음 식은 각각 최대전류 I_m 및 최대전압 V_m 에 따른 전류제한 및 전압제한 식을 나타낸다.

$$(i_{ds}^e)^2 + (i_{qs}^e)^2 \leq (I_m)^2 \quad (3)$$

$$(v_{ds}^e)^2 + (v_{qs}^e)^2 \leq (V_m)^2 \quad (4)$$

3. 최대토크 운전

WRSM에서 MTPA운전을 하기 위해서는 IPM과 매우 유사하게 d q축 전류에 따른 공극자속에 의한 토크와 리터턴스 토크의 적절한 조합을 구현해야한다. 한가지 다른 점은 공극자속이 더 이상 상수가 아닌 제어변수라는 것이며 이는 IPM과 동일한 제어 로직이 더 이상 통용되지 않는다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 컴퓨터 연산을 통해서 위 식(3)(4)의 전류 및 전압제한 하에서 식(2)에 따른 최대토크를 연산하는 최대토크스캔(Maximum Torque Scan)알고리즘을 작성하였다. 이때, 계산의 간소화를 위해 전류에 따른 인덕턴스의 변화는 무시하였다.

표1.은 연구에서 사용한 WRSM의 제정수를 나타내며, 그림 1.은 해당 제정수에 따른 이론적인 속도별 최대토크 능력곡선을 보여준다.

표 1 계자 권선형 동기전동기 제 정수
Table 1 The parameters of SPSIM

인버터 최대 전압	60 [V]	d축 인덕턴스	0.056 [mH]
인버터 최대 전류	600 [A]	q축 인덕턴스	0.02 [mH]
극수	6	쇄교 자속	5.12 [mH]

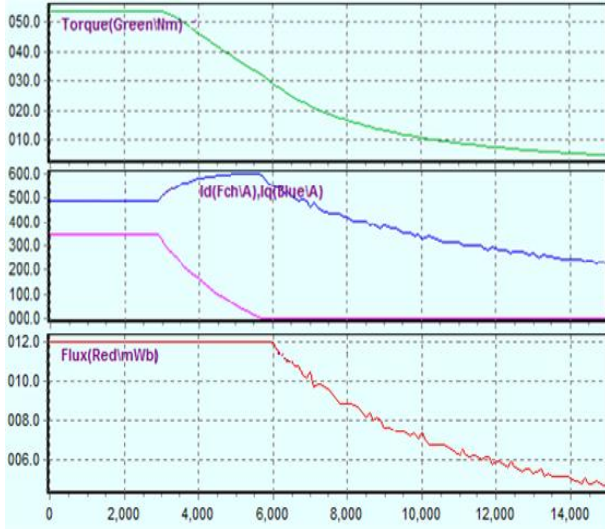


그림1. WRSM의 이론적인 최대토크 능력 곡선
Fig.1 Theoretical maximum torque ability curve of WRSM.

그림1.을 분석하면 상기 전동기는 약 3,000rpm까지는 전압제한에 걸리지 않고 약 54Nm의 최대토크를 출력할 수 있으며, 그 이후로는 전압제한의 경계에서 d q축의 전류분배를 통해 단위전류당 최대 토크를 출력하다가 약 6,000rpm부터는 자속을 감소시킴으로써 MTPA를 유지하는 특성을 보이고 있다.

그림1.에 따른 분석을 통해 본 전동기는 d축전류가 영이 되는 약 5,800rpm까지는 일반적인 IPM전동기와 유사한 알고리즘에 따라 공극자속을 고정된 상태로 제어를 수행하고 그 이후에는 i_{qs}^e 와 ψ_f 의 두 변수에 의해 지배되는 전압 방정식을 따른 제어를 수행하는 MTPA알고리즘을 작성할 수 있다.

전압제한이 걸리지 않는 기저속도 이하에서 동기 좌표계 전류 평면에서 MTPA영역의 최대 토크 운전점은 식(5),(6)와 같다.

$$i_{ds}^e = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 i_{qs}^2}}{4(L_{ds} - L_{qs})I_m} \quad (5)$$

$$i_{qs}^e = \sqrt{I_m^2 - i_{ds}^2} \quad (6)$$

이때 운전점은 식(3),(4)의 최대전류 전압에 의해 제한되어지며, 전류 제한원의 외곽을 따라 움직이게 된다. i_{ds}^e 가 0이 되는 시점부터는 토크가 다음의 식에 따라 결정되며,

$$T_c = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_f i_{qs}^e) \quad (7)$$

전압 제한식은 다음으로 결정된다.

$$(w_r L_q i_{qs}^e)^2 + (w_r \psi_f)^2 \leq V_{smax}^2 \quad (8)$$

위 식(7),(8)을 이용하면 i_{qs}^e , ψ_f 평면상에서 최대 토크를 발생시키기 위한 i_{qs}^e 와 ψ_f 를 구할 수가 있으며 이에 따른 시뮬레이션 결과가 그림2.에 도시되어 있다.

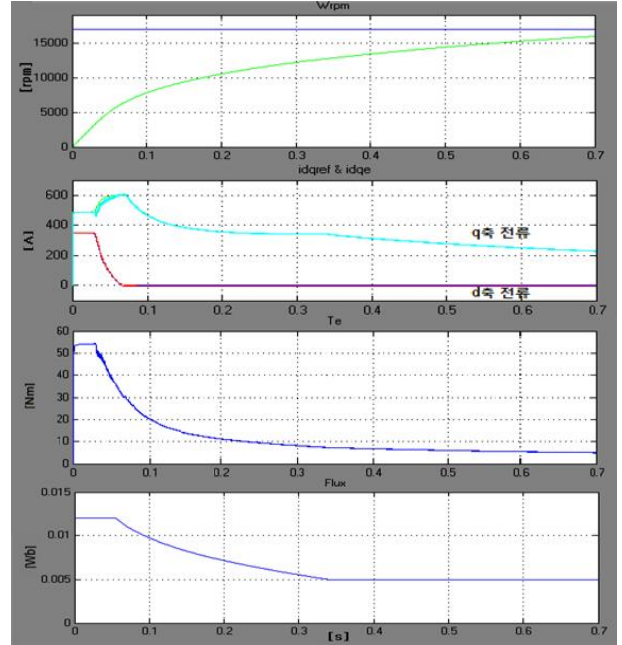


그림 2. WRSM의 MTPA제어
Fig. 2. MTPA control of WRSM.

시뮬레이션 결과를 검토하면, 약 0.5초까지는 기존의 IPM과 거의 유사한 제어를 수행하여 약 6,000rpm까지 속도가 증가하며 그 이후로는 자속을 감소시켜서 16,000rpm까지 가속하고 있음을 볼 수 있다. 이는 IPM에서 구현할 수 없는 WRSM만의 고유한 고속 운전 특성을 보여주고 있는 것으로 크게 복잡하지 않은 MTPA알고리즘을 통하여 MHEV에 적합한 최대 토크 운전이 가능함을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 계자권선형 동기전동기(WRSM)의 효율적인 MTPA제어알고리즘을 제시하였다. 제시된 알고리즘을 이용한 시뮬레이션을 통하여 WRSM이 MHEV용 전동기로 사용하기에 매우 적합한 고속 주행이 가능하다는 것을 보였다. 실험을 진행할 예정이며 전류에 따른 인덕턴스 및 자속의 외곽을 감안하면 보다 실용적인 제어시스템이 될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Amit Kumar Jain. "Modeling and Field Oriented Control of Salient Pole Wound Field Synchronous Machine in Stator Flux Coordinates", Proceedings of the IEEE, Vol. 58, No. 3. pp. 960-970, 2011, March.
- [2] Alfio Consoli. "Steady state and Transient Operation of IPMSMs Under Maximum Torque per Ampere Control", Proceedings of the IEEE, Vol. 46, No. 1. pp. 121-129, 2010, January.
- [3] 김성민, "실시간 신호 주입을 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 단위 전류당 최대 토크 제어", 전력전자학회 전력전자학회논문지 15(2), pp. 142-149, 2010