

차량용 계자 권선형 동기전동기 제어에 대한 연구

김남훈*, 윤영기*, 이종석*, 황돈하**, 최경호***
 *한화테크윈, **한국전기연구원, ***경북전문대학

Study of Wound Field Synchronous Motor for Hybrid vehicle

Namhun Kim*, Youngki Yun*, Jongsuk Lee*, Donha Hwang**, Keynggho Choi***
 *Hanwha Techwin, **KERI, ***Kyungbuk College,

ABSTRACT

최근 친환경 차량에 대한 관심이 급증함에 따라 고효율 운전이 가능한 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle, 이하 HEV)에 대한 관심이 급증하고 있다. 구동형 전동기로는 효율이 높고 단위 체적당 토크가 큰 전동기가 요구되고 있으며, 본 논문에서는 계자권선형 동기전동기(Wound Field Synchronous Motor, 이하 WFSM)를 적용하였다. WFSM은 자속 성분을 임의로 제어할 수 있기 때문에 저속영역부터 고속영역까지 좋은 운전 특성을 가지는 장점이 있지만, 기존 동기전동기와는 달리 제어변수가 증가한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 HEV용 WFSM에 적용된 MTPA(Maximum Torque Per Ampere, 이하 MTPA) 등에 대한 제어 알고리즘을 제안한다.

1. 서론

회토티계 원자재의 가격과 공급의 불확실성으로 인하여 비회토티계 전동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, HEV용 고효율 견인 전동기(Traction Motor)를 위해서 유도전동기(Induction Motor), SRM(Switched Reluctance Motor), PMA-SynchRM(Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor) 그리고 WRSM과 같은 다양한 전동기가 회토티계 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)을 대체할 전동기로 연구가 진행되고 있다^[1].

비회토티계 전동기 중 WFSM은 다른 전동기와 비교하였을 때 고정자 전류(D,Q전류) 뿐만 아니라 계자 전류도 제어할 수 있다는 특징을 갖는다. 따라서 최근에 높은 역률과 폭 넓은 운전범위를 필요로 하는 견인 구동용, ISG등의 어플리케이션으로 연구가 확장되고 있다.

2. WFSM 모델링

WFSM의 전압방정식은 (1)에서 보여주고 있으며, 토크 수식은 (2)와 같다^{[2][3]}.

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

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

여기서 v_{ds}^e, v_{qs}^e 는 동기좌표계 d,q축 고정자 전압
 i_{ds}^e, i_{qs}^e 는 동기좌표계 d,q축 고정자 전류
 L_{ds}, L_{qs} 는 동기좌표계 d,q축 인덕턴스
 R_s 는 고정자 저항, ψ_f 는 계자쇄교 자속

WFSM의 경우는 IPM과 유사하게 회전자기 기구적인 돌극 구조를 가지며, 이에 따른 릴럭턴스 토크를 발생한다.

3. 시험결과

WFSM에서 MTPA운전, 약계자 운전을 구현하기 위하여 유한 요소법을 이용한 시뮬레이션을 통하여 모터의 최적 운전 영역에 해당되는 속도별 DQ전류, 계자전류를 계산하였으며, 시험을 통하여 이를 검증하였다.

표1.은 연구에서 사용한 WFSM의 파라미터를 나타내고 있다.

제작된 WFSM의 특성을 확인하기 위하여 MCU(Motor Control Unit, 이하 MCU)를 제작하였으며, 그림 1과 같은 시스템을 구성하였다.

WFSM과 MCU의 효율과 온도를 측정하기 위한 전력분석계/온도계측장비, 냉각을 위한 냉각 칠러 그리고 부하를 모의하기 위한 다이내모 시스템을 사용하였다.

표 1 계자 권선형 동기전동기 파라미터
 Table 1 The parameters of WFSM

항목	값	단위
고정자 외경	260	mm
적층 길이	250	mm
회전자 외경	177.7	mm
고정자 전류	500	A _{max}
회전자 전류	8	A _{bc}
고정자 상 저항	0.013	Ohm
회전자 저항	21.87	Ohm

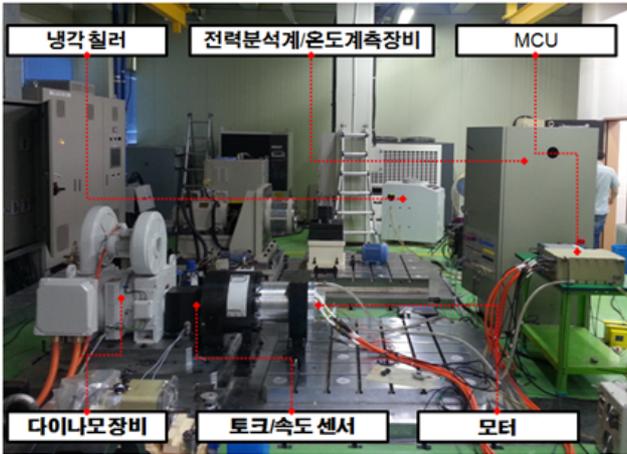


그림 1 시험 시스템 구성
Fig 1. Configuration of test system

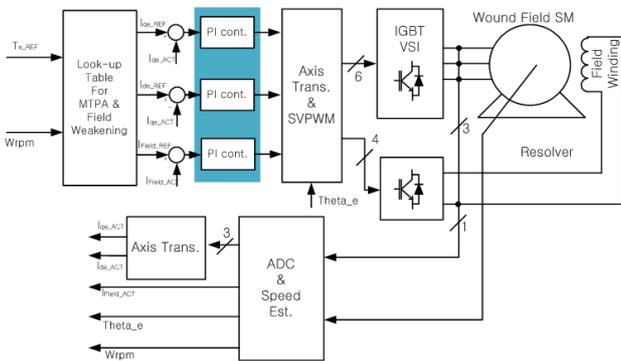


그림 2. 제어 시스템 구성도
Fig. 2. Configuration of Control system

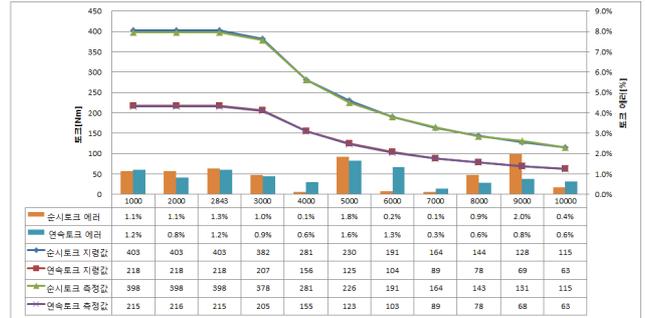
표 2 역기전력 결과 비교
Table 2 Comparison with BEMF

Speed [rpm]	2A			4A		
	측정 결과 [Vrms]	Simulation [Vrms]	결과 비교 [%]	측정 결과 [Vrms]	Simulation [Vrms]	결과 비교 [%]
1,000	20.11	20.25	0.7%	38.92	39.92	2.5%
2,000	40.36	40.72	0.9%	77.84	80.14	2.9%
3,000	60.26	61.12	1.4%	117.04	120.5	2.9%
4,000	80.32	81.32	1.2%	156.28	160.65	2.7%
5,000	100.94	101.23	0.3%	195.8	199.57	1.9%
6,000	120.68	121.97	1.1%	234.64	240.96	2.6%
7,000	140.97	142.29	0.9%	273.96	281.11	2.5%
8,000	161.54	161.96	0.3%	312.09	319.26	2.2%
9,000	182.33	182.19	0.1%	351.59	359.15	2.1%
10,000	203.4	203.67	0.1%	388.87	401.53	3.2%

그림 2는 MCU의 제어 구성도를 나타내고 있다. 고정자 권선의 전류를 제어하기 위해 일반적인 2level VSI, 회전자 권선의 전류를 제어하기 위해 H-bridge 시스템을 구성하였다.

표 2는 유한요소 해석결과와 측정된 역기전력 측정 결과를 나타내고 있다. 계자 전류를 2A, 4A 인가하였을 경우의 역기전력 결과를 비교하고 있고, 해석 결과와 실제 측정 결과가 최대 3.2% 정도의 오차를 나타내고 있음을 확인하였다.

차량용 견인모터의 경우는 실제 상위제어기에서의 기준 토크와 실제 토크사이의 에러가 5%이내에서 만족하여야 하며, 이를 위하여 모터의 속도/토크에 대해서 룩업테이블을 만들어서 DQ전류, 계자전류의 기준값을 생성하였다. 그림 2는 기준 토크에 따른 실제 토크를 측정하여 비교한 값을 나타내고 있으며, 정방향 모터링/제너레이팅 영역에서 모두 5% 이내의 토크 에러만을 나타내고 있음을 확인하였다.



a. 정방향 모터링 영역



b. 정방향 제너레이팅 영역

그림 3. 토크 측정결과

Fig. 3. Test Results of Torque measurement

4. 결론

본 논문에서는 HEV의 견인용 전동기인 120kW WFSM을 제어하기 위한 시스템을 구성하였으며, MTPA 및 약계자 제어를 위하여 유한요소법을 통한 룩업테이블을 사용하는 제어방식을 제안하였다. 또한 제안된 방식의 유용성을 검증하기 위해 시험을 진행하였으며, MCU의 기준토크와 실제 모터에서 발생되는 토크를 비교하여 최대 오차가 2.1% 임을 확인하였다.

참고 문헌

[1] J. HADJI-MINAGLOU and G. HENNEBERGER, "Comparison of different motor types for electric vehicle application," EPE Journal, vol. 8, no.3-4, pp. 46 - 55, Sep. 1999.

[2] 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.

[3] J. W. Park, D. H. Koo, J. M. Kim, and H. G. Kim, Improvement of control characteristics of interior permanent-magnet synchronous motor for electric vehicle," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 6, pp. 1754 - 1760, Nov./Dec. 2001.