

65kW급 HEV용 SRM의 설계

김태형, 안진우, 안영주*, 문재원**
 경성대, *부경대, **RPI

Design of 65kW Class SRM for HEV

Tae-Hyoung Kim, Jin-Woo Ahn, *Young-Joo An, **Jae-Won Moon
 Kyungshung Univ., Pukyong National Univ.*, RPI**

ABSTRACT

This paper presents the reasonable design parameters of a SRM for hybrid electric vehicle driving. For the design of SRM, the initial model is designed using the equivalent magnetic circuit method. In order to optimize the SRM for HEV. The initial model is redesigned by FEM with the variation of the stack length and turns of winding. This paper shows that a flat-topped current of a phase can be made from a change of the stack length and the number of turns for high efficiency, high average torque and a lower torque ripple. The change of current falling time as a variation of turn-off angle was shown by FEA. The iron loss and copper loss were described. The torque of the redesigned motor is suitable for low and high speed ranges to drive a HEV that was verified by the speed-torque curve.

1. 서 론

미래형 자동차로 주목받고 있는 하이브리드 자동차(Hybrid Electric Vehicle, 이하 HEV)용 전동기는 저속에서 고토크를 요구하며 정속에서는 속도-토크특성을 수용하기 위하여 직류직권전동기의 수하특성이 적당하다. 따라서 본 논문에서는 속도-토크 특성이 직류 전동기의 특성과 매우 유사한 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)를 선정하여 설계^{[1]-[4]} 및 해석을 수행하였다. 그림1은 하이브리드 자동차의 구동시스템을 나타낸다,

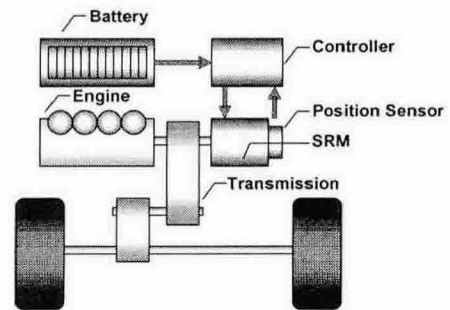


그림 1 하이브리드 자동차 구동시스템의 구성
 Fig. 1 The configuration of driving system for HEV

일반적인 설계법에 의한 설계 시 고효율 운전을 위한 전류의 형상과 속도별로 토크특성을 정확하게 예측하기 어려우므로 해석을 통하여 기 설계된 설계 매개변수를 보완함으로써 향상된 성능을 발휘할 수 있도록 재설계하였다.

2. 하이브리드 자동차용 SR 전동기의 설계

본 논문에서 다루어지는 하이브리드 자동차용 전동기의 설계조건은 아래 표 1과 같다. 설계조건에 따라 설계식과 등가자기회로법을 사용하는 상용 설계소프트웨어에 의하여 설계조건을 만족하는 전동기를 표 2와 같이 설계하였다.

표. 1 전동기 설계조건

Table 1. Motor design condition

Speed	base	5250[rpm] - 90[km/h]
Output power	Nominal	65[kW] - 5250 [rpm]
	Peak	117[kW] - 1400 [rpm]
Torque[Nm]	Nominal	118[Nm] - 5250[rpm]
	Peak	800[Nm] - 0~1400[rpm]
Cooling system	spiral groove	
Battery	Ni-MH, 6.5Ah, 288V(12V*24ea)	

표. 2 설계된 전동기의 주요사항

Table 2. The specification of the designed motor

Design Motor	Stotor	Rotor
Number of poles	6 poles	4 poles
Pole arc[deg.]	30	32
Outer diameter[mm]	299.7	167.6
Pole height[mm]	41.4	29.7
Stack length[mm]	200	200
Steel	M19	M19
Number of phases	3 phases	
Turns/pole[turns]	11	
Air gap[mm]	0.5	

3. 정적해석

기본설계를 통하여 설계된 전동기의 토크 특성을 살펴보기 위하여 전동기의 위치와 전류에 따른 인덕턴스를 분석하였다. SRM에서 토크는 식 (1)과 같이 상전류의 자승과 인가된 상전류에 의한 회전자 위치변화에 따른 인덕턴스의 변화에 의하여 결정되게 된다. 따라서 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스 프로파일 특성은 SRM의 설계에 있어 중요한 요소라고 할 수 있다. 그림 2는 분석결과를 나타낸다.

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

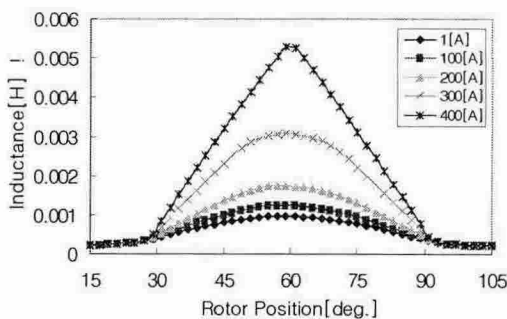


그림 2. 인덕턴스 프로파일
Fig. 2 Inductance profile

여기서 T 는 발생토크, W_c 는 코에너지, θ 회전자 위치각, i 는 전류, L 은 자기인덕턴스이다. 인덕턴스 프로파일에서 회전자와 고정자가 비정렬 상태의 인덕턴스가 5.27[mH]이고, 정렬 상태의 인덕턴스가 0.224[mH]이다. 일반적으로 인덕턴스의 비가 10배 이상이면 적절하게 설계된 모터로 볼 수 있다[3]. 설계된 SRM의 정렬/비정렬 인덕턴스비는 23.5배이므로 적절한 설계임을 알 수 있다.

정적 토크는 일정한 전류를 인가할 때 회전자의 위치각 변화에 대한 발생하는 토크를 나타내는 것으로서 모터의 구동 시 적정토크를 발생시키기 위

하여 스위칭 온 각과 오프 각을 정하는 기준이 될 수 있다.

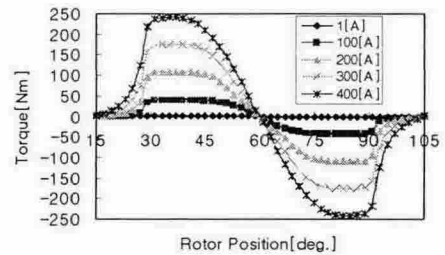


그림 3. 정적 토크
Fig. 3 Static torque

4. 동적해석 및 재설계

동적해석은 유한요소해석법을 이용하여 모터의 운전조건으로 회전하는 상태를 해석하게 된다. 본 논문에서는 SRM 구동용으로 비대칭 인버터에 대하여 각 상의 스위치를 턴-온, 턴-오프하여 각 상을 하는 경우의 동작 특성을 해석하였다.

4.1 철심적층길이 가변에 의한 플랫폼 전류형성

전류의 형상을 플랫폼으로 바꿀 수 있는 첫 번째 매개변수는 고정자/회전자의 철심의 축방향 적층길이이다. 철심의 적층길이는 전류의 형상에 직접적인 영향을 준다. 전류의 형상이 플랫폼에 가까울수록 모터의 효율, 출력과 토오크 리플 등 성능이 좋아지게 된다. 따라서 고정자의 철심적층길이를 변경할 때 각각의 경우를 해석을 통해 전류파형이 가장 플랫폼 형상에 가까운 적층길이를 선정할 수 있다.

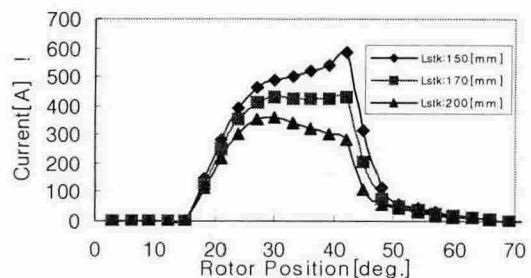


그림 4. 적층길이의 변화에 따른 전류파형변화
Fig. 4 Phase current waveforms with the stack length

그림 4은 철심의 적층길이를 150, 170, 200[mm]로 가변시 전류의 파형을 나타내고 있다. 그림에서 전류의 형상을 플랫폼으로 만들기 위해 철심의 적층길이를 170[mm]로 선정하면 된다. 적층길이를 변경하게 되면 상권선의 전류밀도가 4.45[A/mm²]에서 6.02[A/mm²]으로 증가하게 된다.

4.2 속도-토크 곡선

그림 5은 입력전압을 정격전압으로 일정하게 인가한 상태에서 속도를 변화시킬 때의 토크를 구한 것이다.

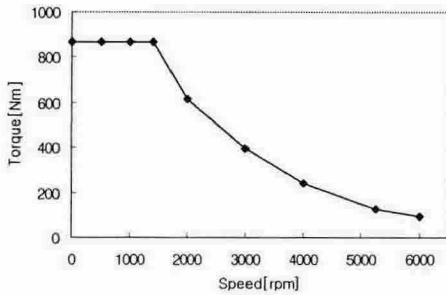


그림 5 속도-토크 곡선
Fig. 5 Speed-torque curve

정격속도인 5250[rpm]에서 발생토크는 약 128[Nm]로 요구되는 토크인 118[Nm]를 만족하고 있으며, 저속구간인 1400[rpm]이하에서 약 870[Nm]로 최대 요구토크인 800[Nm]보다 큰 토크를 발휘하고 있음을 알 수 있다.

표 3. 재 설계된 전동기의 출력특성
Table. 3 Output power of redesigned motor

Output power[kW]	Nominal	70.7[kW] @5250[rpm]
	Peak	129.3[kW] @2000[rpm]
Torque[Nm]	Nominal	128.7[Nm] @5250[rpm]
	Peak	870.2[Nm] @1400[rpm]
Base speed[rpm]	5250	
Stack length[mm]	170	

이때 SRM의 적층길이는 효율과 토크리플을 고려하여 전류가 플랫탑의 형상이 될 수 있도록 동적해석을 통하여 기존에 200[mm]에서 170[mm]로 변경되었다. 적층길이를 170[mm]로 설계할 때 상권선의 전류밀도가 6.02[A/in²]로 변경되므로 절연등급을 H종으로 설계하였다. 그림 6는 설계된 전동기의 냉각구조를 나타낸다.

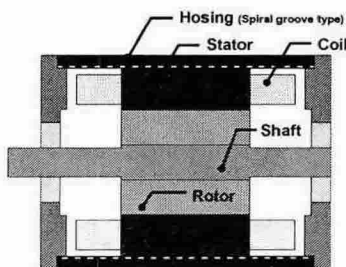


그림 6 설계된 하우징의 나선방향 유입형 수냉각방식
Fig. 6 The designed spiral groove of housing for water cooling

5. 결 론

본 논문에서는 65[kW]급 하이브리드 자동차 구동용 SRM의 적정설계를 위하여 먼저 설계식과 등가 자기회로법에 의하여 요구사양을 만족하는 설계치를 제시하였다. 정적해석에서는 토크가 인덕턴스의 변화율에 비례하기 때문에 토크발생 등 특성파악을 위해 중요한 인덕턴스 프로파일을 해석하였으며, 토크발생구간과 발생량을 고려하려 턴-온, 턴-오프 각을 결정하기 위한 중요한 요소가 되는 정적토크를 해석하였다.

기 설계된 전동기의 고출력 및 토크 리플을 고려한 구동이 가능하도록 하기 위하여, 철심의 적층길이를 변화시켜 줌으로써 전류를 플랫탑 형상으로 만들 수 있음을 증명하였고, 이를 통하여 재설계할 수 있음을 동적해석에서 보였다. 플랫탑의 전류를 형성하는데 중요한 요소로 작용하는 고정자와 회전자의 적층길이를 유한요소해석을 통하여 가변함으로써 최적값을 선정하였으며 초기 설계값을 수정, 보완하여 재설계하였다. 그리고 속도-토크 특성해석을 통하여 저속도영역에서의 고토크 구동특성과 고속영역에서 요구조건을 만족함을 검증하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호:R2005-B-109)주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] K. M. Rahman, B. Fahimi, G. Suresh, A. V. Rajarathnam, M. Ehsani, "Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.36, No.1, pp177-182, Jan./Feb. 2000.
- [2] W. Wu, H. C. Lovatt, J. B. Dunlop, "Optimisation of Switched Reluctance Motors for Hybrid Electric Vehicles" Power Electronics, Machines and Drives, 16-18 Apr. 2002, Conference Publication No.487, pp177-182, IEE, 2002
- [3] T.J.E Miller, Switched Reluctance Motors and their Control, Magna physics publishing and clarendon press-oxford, 1993
- [4] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson and P. T. Blenkinsop et al, "Variable-speed Switched Reluctance Motors", IEE Proc. B, vol.127, no.4, 1980
- [5] Y. Hayashi, T.J.E Miller, "A New Approach to Calculating Core Losses in the SRM," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Denver, CO, pp.322-328, 1994
- [6] P. Materu and R. Krishnan, "Estimation of Switched Reluctance Motor Losses," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Pittsburgh, PA, pp.79-90, 1988