

HEV용 SRM의 설계 및 구동특성

김태형, 안진우, 안영주, 문재원*
경성대, *부경대, *RPI

Design and Drive Characteristics of SRM for HEV

Tae-Hyoung Kim, Jin-Woo Ahn, *Young-Joo An, Jae-Won Moon
Kyungsung 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.

여러우므로 해석을 통하여 기 설계된 설계 매개변수를 보완함으로써 향상된 성능을 발휘 할 수 있도록 재설계 하였다.

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 설계 하였다.

표. 1 전동기 설계조건
Table 1. Motor design condition

Speed	base	5250[rpm] - 90[m/h]
Output power	Nominal	65W - 5250 [rpm]
	Peak	117W - 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)	

1. 서 론

에너지 절약과 자동차 배기공해배출 저감을 위한 차세대 자동차 중의 하나로 하이브리드자동차(Hybrid Electric Vehicle, 이하 HEV)가 현재 미래형 자동차로 주목을 받고 있으며, 자동차 개발 선진국을 중심으로 세계적으로 연구와 개발이 진행 중에 있다. 하이브리드 자동차에서는 구동용 엔진외에 구동용으로 전동 모터를 함께 사용한다는 것이다.

이러한 HEV용 전동기는 저속에서 고토크를 요구하며 정속에서는 속도-토크특성을 수용하기 위하여 직류직권 전동기의 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,

표. 2 설계된 전동기의 주요사양
Table 2. The specification of the designed motor

Design Motor	Stator	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 자속과 인가된 상전류에 의한 회전자의 위치변화에 따른 인덕턴스의 변화에 의하여 결정되게 된다. 따라서 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스 프로파일 특성은 SRM의 설계에 있어 중요한 요소라고 할 수 있다. 해석을 위하여 상용의 유한요소해석 프로그램인 Flux2D를 사용하였다.

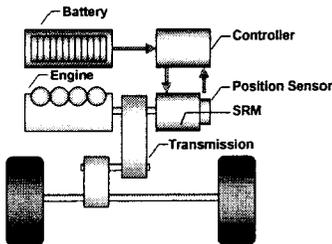


그림 1 하이브리드 자동차 구동시스템의 구성
Fig. 1 The configuration of driving system for HEV

일반적인 설계법에 의한 설계 시 고효율 운전을 위한 전류의 형상과 속도별로 토크특성을 정확하게 예측하기

$$T = \frac{\partial W'_e}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

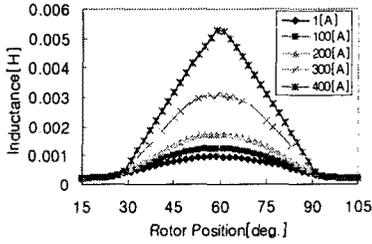


그림 2. 인덕턴스 프로파일
Fig. 2 Inductance profile

여기서 T 는 발생토크, W_c 는 코에너지, θ 회전자위치 각, 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 적정하게 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 위치 각 변화에 대한 발생하는 토크를 나타내는 것으로서 모터의 구동 시 적정토크를 발생시키기 위하여 스위칭 온 각과 오프 각을 정하는 기준이 될 수 있다.

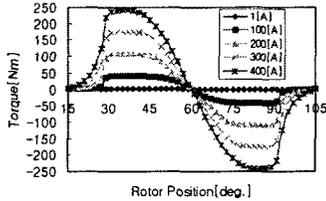


그림 3. 정적 토크
Fig. 3 Static torque

4. 동적해석 및 재설계

동적해석은 유한요소해석법을 이용하여 모터의 운전조건으로 회전하는 상태를 해석하게 된다. 본 논문에서는 SRM 구동용으로 비대칭 인버터에 대하여 각 상의 스위칭을 턴-온, 턴-오프하여 각 상을 하는 경우의 동작 특성을 해석하였다. 인버터의 직류단 전압은 288[V]이다. 본 해석에서는 정격속도 5250[rpm]으로 정속운전하며, 선행각을 14도, 통전각을 27도로 선정하였다.

동적해석을 통해 SRM의 전류의 플랫탑 형상을 형성하기 위하여 중요한 매개변수를 변화시켜 적절한 매개변수를 검색하였다. 전류의 플랫탑 형상은 전류의 발생구간내의 평균치가 커지게 되어 발생 토크가 증가하게 되고 전류의 형상이 평평한 부분이 커지므로 토크리플도 줄어들게 된다. 이렇게 되면 효율과 토크리플의 성능을 개선시킬 수 있게 된다.

4.1 철심적층길이 가변에 의한 플랫탑 전류형성

전류의 형상을 플랫탑으로 바꿀 수 있는 첫 번째 매개변수는 고정자/회전자의 철심의 축방향 적층길이이다. 철심의 적층길이는 전류의 형상에 직접적인 영향을 미치는데, 앞서 설명한 바와 같이 전류의 형상이 플랫탑에 가까울수록 모터의 효율, 출력과 토크 리플 등 성능이 좋아지게 된다. 따라서 고정자의 철심적층길이를 변경할 때 각각의 경우를 해석을 통해 전류파형이 가장 플랫탑 형상에 가까운 적층길이를 선정할 수 있다.

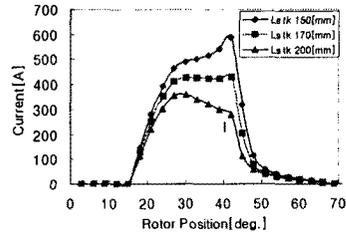


그림 4. 적층길이의 변화에 따른 전류파형변화
Fig. 4 Phase current waveforms with the stack length

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

4.2 철손 및 동손

모터의 손실은 크게 철손과 동손 및 기타손으로 구성된다. 철손은 식 (2)의 스테인메츠 방정식을 이용하여 구할 수 있으며[5], 모터의 정격속도인 5250[rpm]의 주파수에 해당되는 350[Hz]에 해당하는 손실계수를 구하였으며, 자속밀도는 FEA에서 얻어진 값으로 사용하여 철손을 산정하였다. 철심재질은 0.35[mm]의 M19를 사용하였다.

$$P_{Fe} = K_h f E_m^{a+b} + K_e f^2 E_m^2 \quad (2)$$

여기서 P_{Fe} 는 철손, K_h 는 히스테리시스 계수, B_m 는 자속밀도의 최대치, a, b 는 상수, f 는 주파수, K_e 는 와류손계수이다.

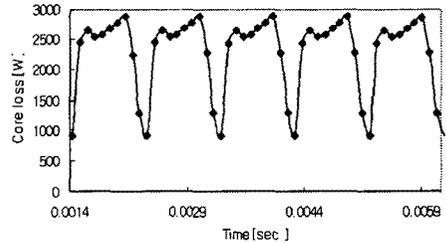


그림 5 고정자부분에서의 철손파형
Fig. 5 Iron loss waveform at the stator part

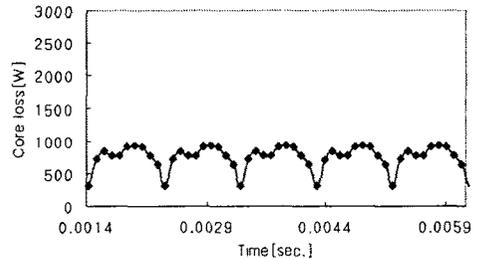


그림 6 회전자부분에서의 철손파형
Fig. 6 Iron loss waveform at the rotor part

그림 5과 그림6은 모터의 정격속도로 운전시 고정자와 회전자의 철손의 파형을 보여주고 있다. 여기서 고정자부분의 철손의 평균치는 2299.77[W]이며 회전자평균치는 755.6[W]이다. 따라서 해석된 SRM의 철손은 고정자와 회

전자부분의 철손을 더하면 3055.37[W]가 된다.
동손은 식 (3)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{cu} = m I_{rms}^2 R_{ph} \quad (3)$$

여기서 P_{cu} 는 동손, m 은 상수, I_{rms} 는 상전류의 실효치, R_{ph} 는 상당 권선저항이다.

그림 7은 식 (3)에 의해서 3상의 동손을 합성하여 산정된 그래프이다. 동손의 파형으로부터 산정된 동손의 값은 868.86[W]이다.

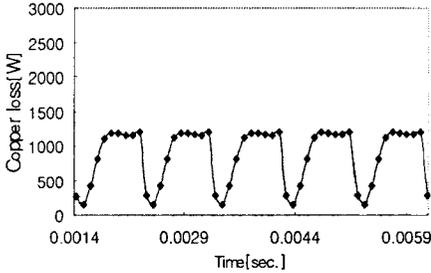


그림 7. 3상(a, b, c상) 동손의 합성파형
Fig. 7 Copper loss waveform

4.3 속도-토크 곡선

그림 8은 입력전압을 정격전압으로 일정하게 인가한 상태에서 속도를 변화시킬 때의 토크를 구한 것이다.

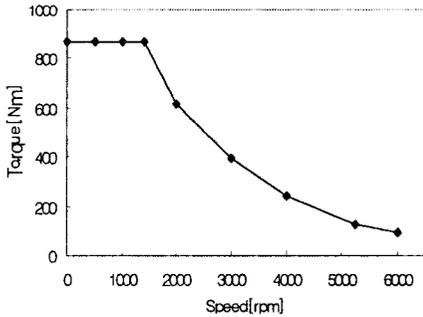


그림 8 속도-토크 곡선
Fig. 8 Speed-torque curve

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 2. 재 설계된 전동기의 출력특성
Table. 2 Output power of redesigned motor

Output power [W]	Nominal	70.7 [W] @5250[rpm]
	Peak	129.3 [W] @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 H중으로 설계하였다. 냉각방식은 그림 9에서 보여 주는 바와 같이 전동기의 하우징에 나선

방향 유입형 수냉각 방식으로 설계하였다.

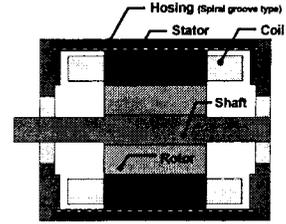


그림 9 설계된 하우징의 나선방향 유입형 수냉각방식
Fig. 9 The designed spiral groove of housing for water cooling

5. 결론

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

기 설계된 전동기의 고효율 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 회전자적 적층길이를 유한요소해석을 통하여 가변함으로써 최적값을 선정하였으며 초기 설계값을 수정, 보완하여 재설계하였다. 그리고 속도-토크 특성해석을 통하여 저속도영역에서의 고투크 구동특성과 고속영역에서 요구조건을 만족함을 검증하였다.

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

[참고 문헌]

- [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