

Design of 65kW Class Switched Reluctance Motor for HEV Drive

文 載 元* · 安 珍 雨†
(Jae-Won Moon · Jin-Woo Ahn)

Abstract - This paper presents the reasonable design parameters of a switched reluctance motor to drive a hybrid electric vehicle by using the equivalent magnetic circuit method. The designed motor can be redesigned by using finite element analysis as a variation of the parameter for the purpose of improving performance. This paper shows that a flat-topped current of a phase can be made from a change of the lamination stack length for high average torque and a lower torque ripple. The change of current falling time as a variation of turn-off angle was shown by finite element analysis. The core loss and copper loss were described. The torque of the redesigned motor is suitable for low and high speed ranges to drive a HEV, which is verified by the speed-torque curve.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Hybrid Electric Vehicle(HEV), Lamination Stack Length, Flat-Topped Current

1. 서 론

에너지 절약과 자동차 배기공해배출 저감을 위한 차세대 자동차 중의 하나로 하이브리드자동차(Hybrid Electric Vehicle)가 현재 미래형 자동차로 주목을 받고 있으며, 자동차 개발 선진국을 중심으로 세계적으로 연구와 개발이 진행 중에 있다. 하이브리드 자동차와 일반 자동차의 차이점은 구동용 엔진(engine) 외에 구동용으로 전동 모터를 함께 사용한다는 것이다. 하이브리드 자동차는 일본의 자동차 업체인 도요다(Toyota)사와 혼다(Honda)사의 선도(先導)로 연구, 개발이 진행되고 있으며, 기 개발된 구동용 모터들은 주로 영구자석형 브러쉬리스 모터들이 주류를 이루고 있다. 하이브리드카 구동용 모터의 요구사항은 저속운전영역에서 고토크 운전이 가능하여야 하고, 고속에서도 안정된 운전이 가능하여야 한다[1].

이러한 속도-토크특성을 수용하기 위하여 직류직권전동기의 수하특성이 적당하다. 따라서 본 논문에서는 속도-토크특성이 직류기의 수하특성과 매우 유사하고, 차세대 모터 중의 하나로 꼽히는 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)를 선정하여 설계 및 해석을 수행하였다 [1][2]. 그림 1은 하이브리드 자동차의 구동시스템을 보여 주는 그림으로, SR 모터와 엔진이 각각의 동작영역에서 자동차의 구동에너지를 발생시키게 된다. 그림 1에서 PS.는 회전자의 위치각 센서(position sensor)를 나타내고 있으며, DC

Converter는 보조배터리전압을 승압시키는 기능을 한다. 이러한 하이브리드 자동차의 핵심기술 중의 하나는 자동차 구동을 위한 적절한 모터의 설계기술이라 할 수 있다. 또한 설계된 모터를 해석함으로써 원하는 설계가 이루어 졌는지 검증하고 설계된 모터의 취약점이나 문제점의 발생 등을 사전에 시뮬레이션을 통해서 예측할 수 있어야 한다. 일반적인 설계법에 의한 설계 시 고효율 운전을 위한 전류의 플랫폼(flat-top) 형상과 속도별로 토크특성을 정확하게 예측하기 어려우므로 해석을 통하여 기 설계된 설계 매개변수를 보완함으로써 향상된 성능을 발휘 할 수 있도록 재설계할 수 있다. 그리고 정해진 설계 사양을 충족하여 원하는 출력을 발휘할 수 있는지를 해석을 통하여 검증, 보완하려고 한다.

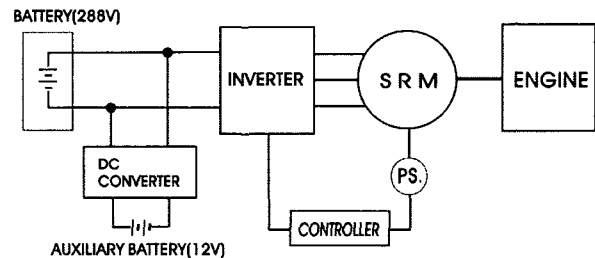


그림 1 하이브리드 자동차 구동시스템의 구성
Fig. 1 The configuration of the driving system for HEV

2. 하이브리드 자동차용 SR 전동기의 설계

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 고정자 극에만 권선이 위치한 집중권 전동기 구조로써 SRM은 단위면적당 발생토크가 크고 구조가 간단하여 전동기의 제조 시 경제적인 장점과 제작이 용이한 장점

† 교신저자, 正會員 : 경성대 전기전자·메카트로닉스공학부 교수
E-mail : jwahn@ks.ac.kr

* 正會員 : 미국 랜슬리어공대(RPI) 방문연구원
接受日字 : 2005年 4月 30日
最終完了 : 2005年 7月 22日

이 있으며, 최근 고용량 전력소자의 개발 및 저가격화로 인하여 SRM의 적용에 대한 연구가 활발해 지고 있다[3][4].

본 논문에서는 정격속도 5250[rpm]의 정격출력 65[kW]급(정격전압 288[V], 연속토크 118[Nm], 최대토크 800[Nm]) SRM을 설계 목표로 정하고, 먼저 설계식과 등가자기회로법을 사용하는 상용 설계소프트웨어에 의하여 설계사양을 만족하는 전동기를 설계하였다. 전동기의 냉각방식은 하우징(housing)에 나선형으로 물이 유입되는 수냉각방식으로 설계하였다. 표 1은 요구되는 설계사양에 대하여 설계 되어진 주요 치수를 나타내고 있다. 그림 2는 표 1에서 제시한 설계된 전동기의 외형도를 보여준다.

표 1 설계된 전동기의 주요사양
Table 1 The specifications 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	

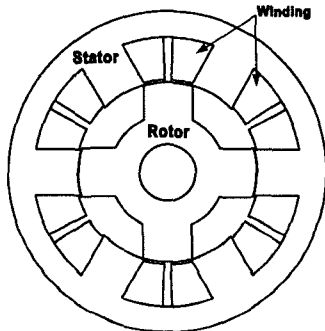


그림 2 설계된 SRM의 외형도
Fig. 2 The outline of the designed SRM

설계된 전동기는 해석을 통하여 각각의 설계 매개변수의 변화에 의한 최적의 성능을 가질 수 있도록 재설계 하려고

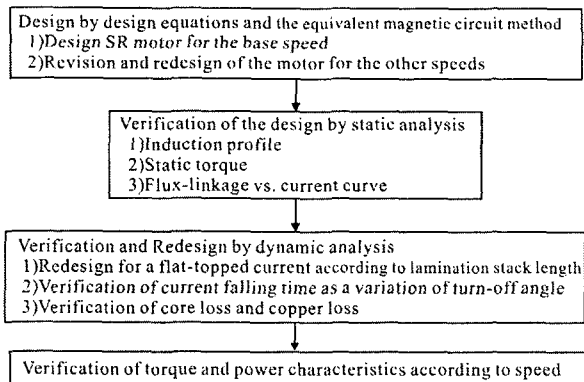


그림 3 구동용 SR Motor의 기본 설계 흐름도
Fig. 3 The design flow chart for the driving SR Motor

한다. 본 논문에서 설명하고 있는 하이브리드 자동차 구동용 SR 전동기를 설계하기 위한 과정을 요약한 기본 설계 흐름도를 그림 3에서 보여주고 있다.

3. 정적해석(Static Analysis)

SRM에서 토크는 식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 상전류의 자속과 인가된 상전류에 의한 회전자의 위치변화에 따른 인덕턴스의 변화에 의하여 결정되게 된다.

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

여기서 T 는 발생토크, W'_c 는 코에너지, θ 는 회전자위차, i 는 전류, L 은 자기인덕턴스이다. 그러므로 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스 프로파일 특성은 SRM의 설계에 있어 중요한 요소라고 할 수 있다. 해석을 위하여 상용의 유한요소 해석(finite element analysis) 프로그램인 Flux2D를 사용하였다. 본 논문에서는 전류를 1, 100, 200, 300, 400[A]로 일정하게 인가 할 때의 인덕턴스 값을 구하여 프로파일을 완성하였으며, 그림 4는 이에 해당하는 인덕턴스 프로파일을 보여주고 있다. 인덕턴스 프로파일에서 비정렬(unalign)시 인덕턴스가 0.224[mH]이고, 비포화, 정렬시 인덕턴스가 5.27[mH]이다. 그러므로 설계된 SRM의 정렬/비정렬 인덕턴스비는 23.5배이다. 일반적으로 인덕턴스의 비가 10배 이상이면 적절하게 설계된 모터로 볼 수 있다[3].

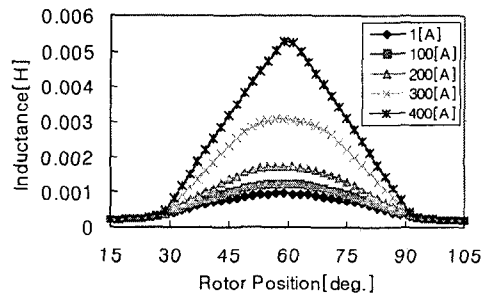
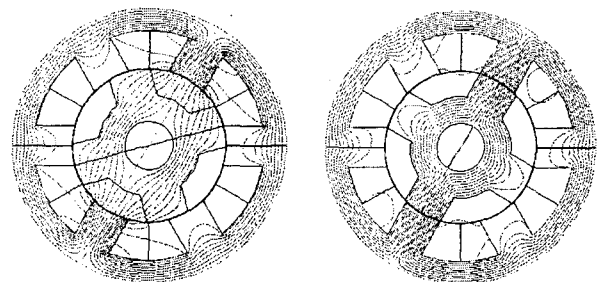


그림 4 인덕턴스 프로파일
Fig. 4 Inductance profile

그림 5는 그림 4의 인덕턴스 프로파일에서 회전자극이 여자된 고정자극에 정렬 될 때와 비 정렬될 때의 자속분포도를 보여 주고 있다.



(a) 비 정렬시(unaligned position) (b) 정렬시(aligned position)
그림 5 정렬시 와 비정렬시의 자속분포도
Fig. 5 Flux plots at the aligned and the unaligned position

정적 토크(static torque)는 일정한 전류를 인가할 때 회전자의 위치각 변화에 대한 발생하는 토크를 나타내는 것으로서 모터의 구동 시 적정토크를 발생시키기 위하여 스위칭 온 각과 오프 각을 정하는 기준이 될 수 있다. 아래의 그림은 전류가 1, 100, 200, 300, 400[A]의 각각의 일정한 전류를 인가할 때 발생하는 토크를 나타내고 있다. 그림 6에서 종축은 토크[Nm]이며, 횡축은 회전자의 위치각을 나타낸다. 본 논문에서 나타나는 회전자 위치각은 기계각으로 표시한다.

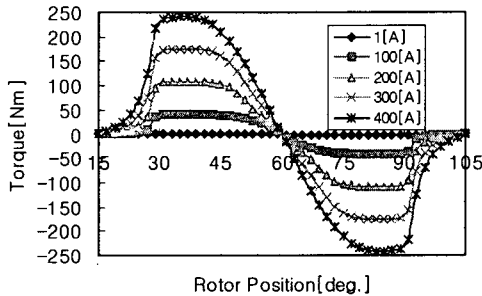


그림 6 정적 토크
Fig. 6 Static torque

자속쇄교수 대 전류 곡선은 입력된 전기에너지가 기계에너지로 변환되는 비율과 추세를 파악 할 수 있는 곡선이다. 설계된 모터의 비 정렬(unalign) 시의 자속의 누설 정도, 여자시의 포화 정도를 파악 할 수 있다. 그림 7은 자속쇄교수 대 전류 곡선으로, 종축이 자속쇄교수[Wb]이며 횡축이 전류[A]이다.

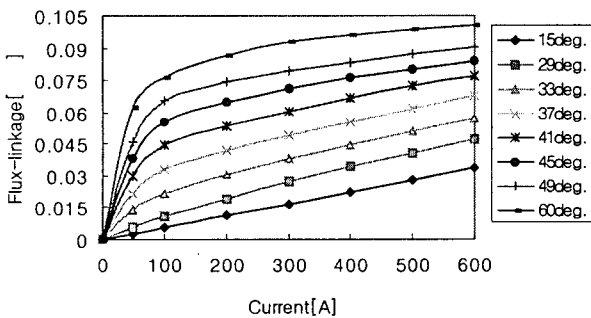


그림 7 자속쇄교수-전류 곡선
Fig. 7 Flux linkage-current curve

4. 동적해석(Dynamic Analysis) 및 재설계

동적해석(Dynamic analysis)은 유한요소해석법을 이용하여 모터의 운전조건으로 회전하는 상태를 해석하는 것으로, 모터를 구동하는 인버터는 비대칭 인버터(Asymmetric inverter) 각 상의 스위치를 턴온, 턴오프하여 각 상을 여자하므로써 동작하는 특성을 해석하게 된다. 인버터의 직류단(DC link)전압은 288[V]이다. 본 해석에서는 정격속도 5250[rpm]으로 정속운전하며, 선행각 및 통전각은 정적토크 해석, 토크발생구간, 속도, 토크발생량 및 부토크발생 등을 고려하여 정격속도 운전일 때 선행각(advanced angle)을 14도(degree), 통전각(dwell angle)을 27도(degree)로 선정하였

다. 그림 8은 동적해석에서 사용된 비대칭 인버터를 보여 주고 있다. 본 논문의 인버터 구동시의 동적해석을 위하여 Flux2D의 외부회로(external circuit)를 사용하여 그림 8의 환류 다이오드(free-wheeling diode) 등 실제 조건과 동일한 비대칭 인버터를 구성하고 해석모델과 커플링하여 해석하였으며, 정격속도로 운전될 때의 각 상의 스위치는 설정된 턴온, 턴오프각에서 스위칭하게 된다.

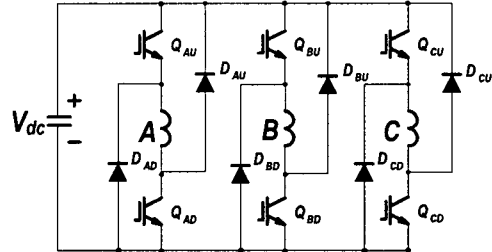


그림 8 동적해석에 사용된 비대칭 인버터
Fig. 8 Asymmetric inverter for dynamic analysis

동적해석에서는 SRM의 초기설계에서 고려되지 못했거나 반영되었더라도 오차 등으로 인해서 정밀하게 고려되지 못한 정격속도에서 전류의 플랫폼(flat-top)형상을 형성하기 위하여 중요한 매개변수를 변화시켜 적절한 매개변수를 찾아내게 된다. 전류의 플랫폼형상은 전류의 발생구간내의 평균치가 커지게 되어 발생 토크가 증가하게 되고 전류의 형상이 평평한 부분이 크므로 토크리플도 줄어 들게 된다. 이렇게 되면 효율과 토크리플의 성능을 개선시킬 수 있게 된다.

4.1 철심적층길이 가변에 의한 플랫폼(flat-top) 전류형성

전류의 형상을 플랫폼으로 바꿀 수 있는 첫 번째 매개변수는 고정자/회전자의 철심의 축방향 적층길이이다. 철심의 적층길이는 전류의 형상에 직접적인 영향을 미치는데, 앞서 설명한 바와 같이 전류의 형상이 플랫폼(flat-top)에 가까울수록 모터의 효율, 출력과 토오크리플 등 성능이 좋아지게 된다. 따라서 고정자의 철심적층길이를 변경할 때 각각의 경우를 해석을 통해 전류파형이 가장 플랫폼(flat-top) 형상에 가까운 적층길이를 선정할 수 있다.

그림 9는 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.

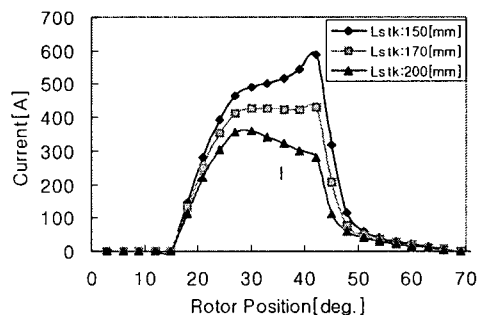


그림 9 적층길이의 변화에 따른 전류파형변화
Fig. 9 Current waveforms of phase A with stack length

적층길이를 초기 설계된 200[mm]에서 170[mm]로 변경하게 되면 상권선의 전류밀도가 4.45[A/mm²]에서 6.02[A/mm²]으로 증가하게 된다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 전류를 플랫폼형상으로 만들기 위해서는 고정자와 회전자의 철심의 적층길이를 적절히 조정하면 만들 수 있을을 알 수 있다.

그림 10은 전류의 턴오프각을 42도에서 48도까지 가변시 전류파형의 변화를 보여주고 있다. 전류의 턴오프각은 토크의 발생과 부토크영역을 고려하여 42도로 선정하였다.

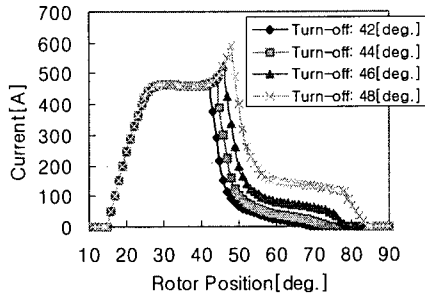


그림 10 전류소호각의 변화에 따른 전류파형변화
Fig. 10 Current waveforms according to turn-off angles

4.2 철손 및 동손

모터의 손실은 크게 철손과 동손으로 나누어 지며, 그 이외에 마찰손, 풍손, 표류부하손 등으로 나누어 진다. 본 논문에서 사용된 Flux2D에서의 철손은 스테인메츠(steinmetz)방정식의 변형식인 식 (2)를 이용하여 구하게 되며[5], 모터의 정격속도인 5250[rpm]의 주파수에 해당되는 350[Hz]에 해당하는 손실계수를 구하였다. 히스테리시스 손실 계수는 361.24이며, 초과손실 계수(excess loss)는 1.96이다. 철심재질은 0.35[mm]의 M19를 사용하였으며, 도전율은 2×10⁶[S/m] 이다.

$$P_{Fe} = K_h B_m^2 f + \pi^2 \frac{\sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + K_e (B_m f)^{3/2} \quad (2)$$

여기서 P_{Fe} 는 철손, K_h 는 히스테리시스손 계수, B_m 는 자속밀도의 최대치, f 는 주파수, K_e 는 초과손(excess loss)계수, d 는 철심두께[m], σ 는 도전율[S/m]이다.

그림 11은 모터의 정격속도로 운전 중 일때의 고정자 전체의 철손의 파형을 보여주고 있다.

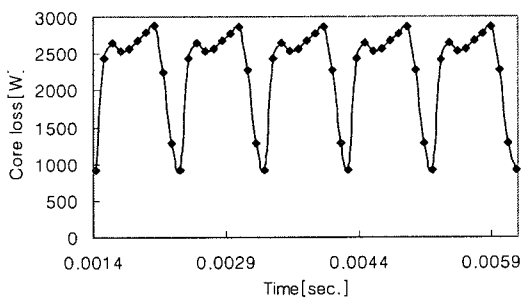


그림 11 고정자부분에서의 철손파형(적층길이:170[mm]일때)
Fig. 11 Iron loss waveform at the stator part (stack length:170[mm])

그림에서 종축이 손실[W]이며 횡축이 시간[sec.]이다. 여기서 고정자부분의 철손의 평균치는 2299.77[W]이다.

그림 12는 모터의 정격속도로 운전 중 일때의 회전자 전체의 철손의 파형을 보여주고 있다. 그림에서 종축이 손실[W]이며 횡축이 시간[sec.]이다. 여기서 회전자부분의 철손의 평균치는 755.6[W]이다.

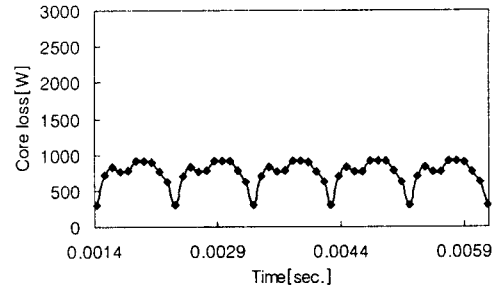


그림 12 회전자부분에서의 철손파형(적층길이:170[mm]일때)
Fig. 12 Iron loss waveform at the rotor part (stack length:170[mm])

따라서 해석된 SRM의 철손은 고정자와 회전자부분의 철손을 더하면 3055.37[W]가 된다. 동손은 식 (3)와 같이 상전류의 실효치의 자승과 상당 권선의 저항을 곱한값을 상수만큼 곱한값에 의하여 계산할 수 있다.

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

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

그림 13은 식 (3)에 의해서 3상의 동손을 합성하여 산정된 그래프이다. 그림 13의 동손의 파형으로부터 산정된 동손의 값은 868.86[W]이다.

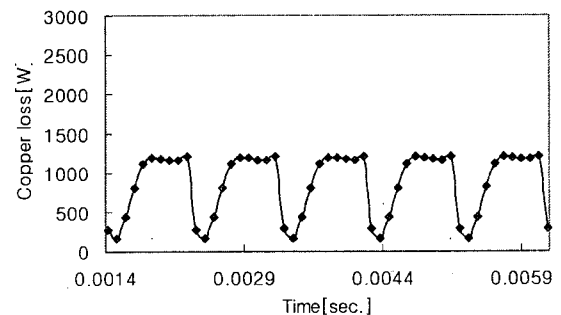


그림 13 3상(a,b,c상) 동손의 합성파형(적층길이:170[mm]일때)
Fig. 13 Copper loss waveform(stack length:170[mm])

4.3 속도-토크 곡선

앞서 언급한 바와 같이 하이브리드 자동차의 구동을 위하여 저속 영역에서 고토크를 발생시킬 수 있으며 고속영역에서도 토크특성이 우수한 수하특성을 가진 전동기가 적절하다. SRM의 속도-토크 특성은 직류직권기와 아주 유사한 수하특성을 가지고 있다. 그림 14는 입력전압을 정격전압으로 일정하게 인가한 상태에서 속도를 변화시킬 때의 토크를 구한것이다. 그림 14에서 속도 1400[rpm]이하 구간은 저속, 고토크 발생구간으로 상전류가 전류제한치를 초과하는 구간으로 전류초핑을 수행하는 구간이다. 속도가 1400[rpm]이상인

구간은 속도의 증가에 따라 토크는 감소하는 수하특성을 나타내는 구간으로, 토크가 감소함에 따라 전류치도 감소하게 된다.

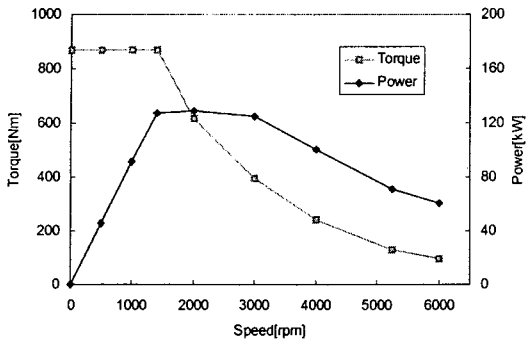


그림 14 속도-토크 곡선(적층길이:170[mm]일때)
Fig. 14 Speed-torque curve(적층길이:170[mm]일때)

그림 14에서 그림에서 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 2는 그림 14의 속도-토크특성곡선에서 사용된 속도 구간별 선행각(advanced angle) 및 통전각(dwell angle)을 나타내고 있다.

표 2 속도별 선행각 및 통전각
Table 2 Advanced angles and dwell angles with speed

Speed	Advanced angle	Dwell angle
0 ~ 2000[rpm]	12[deg.]	30[deg.]
2000~3000[rpm]	12[deg.]	29[deg.]
3000~4500[rpm]	13[deg.]	28[deg.]
4500~6000[rpm]	14[deg.]	27[deg.]
over 6000[rpm]	15[deg.]	25[deg.]

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	

동적해석에서는 고효율 운전 등을 위하여 철심의 적층길이나 상권선의 턴수를 가변하므로써 전류를 플랫폼형상으로 만들 수 있음을 보였다. 철심의 적층길이를 가변하여 전류가 플랫폼의 형상이 될 수 있도록 기존에 200[mm]에서 170[mm]로 수정, 보완할 수 있었다. 표 3은 동적해석을 통해서 재 설계된 출력특성을 요약하여 보여 주고 있다. 적층길이를 170[mm]로 설계할 때, 정격토크의 발생시 상권선의 전류밀도가 6.02[A/mm²], 최대 토크발생시 상권선의 전류밀도가 10.86[A/mm²] 된다. 따라서 냉각방식은 그림 15에서

보여 주는 바와 같이 전동기의 하우징(housing)에 나선방향 유입형 수냉각방식(spiral groove)으로 설계하였으며, 절연등급은 H종으로 설계하였다.

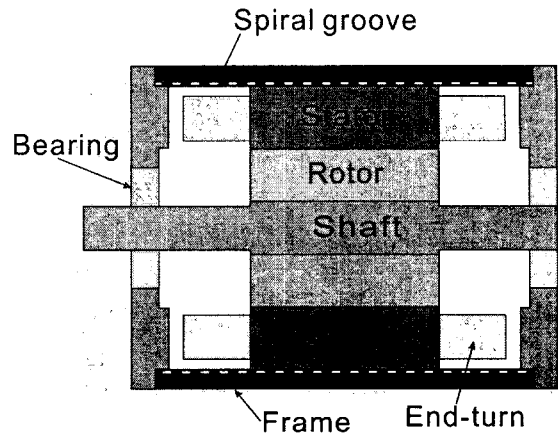


그림 15 설계된 하우징의 나선방향 유입형 수냉각방식
Fig. 15 The designed spiral groove of the housing for water cooling

5. 결론

본 논문에서는 65[kW]급 하이브리드 자동차 구동용 SRM의 적정설계를 위하여 먼저 설계식과 등가자기회로법에 의하여 요구사양을 만족하는 설계치를 제시하였다. 정적해석(Static analysis)에서는 토크가 인덕턴스의 변화율에 비례하기 때문에 토크발생 등 특성파악을 위해 중요한 인덕턴스 프로파일을 해석하였으며, 토크발생구간과 발생량을 고려하여 턴온(turn-on), 턴오프(turn-off) 각을 결정하기 위한 중요한 요소가 되는 정적토크(static torque)를 해석하였다.

기 설계된 전동기의 고효율 및 저토크리플을 고려한 구동이 가능하도록 하기 위하여, 철심의 적층길이를 변화시켜 줌으로써 전류를 플랫폼(flat-top)형상으로 만들 수 있음을 증명하였고, 이를 통하여 재설계할 수 있음을 동적해석에서 보였다. 플랫폼의 전류를 형성하는데 중요한 요소로 작용하는 고정자와 회전자의 적층길이를 유한요소해석을 통하여 가변함으로써 최적값을 선정하였으며 초기설계값을 수정, 보완하여 재설계하였다. 각 상스위칭소자의 턴오프각의 변화에 따른 전류의 소호시간의 변화를 보여 주었다. 운전시의 철손 및 동손의 파형의 변화를 보여 주었으며, 그 때 발생하는 철손과 동손량을 제시 하였다. 그리고 속도-토크 특성해석을 통하여 저속도영역에서의 고토크 구동특성과 고속영역에서 요구조건을 만족함을 검증하였다.

감사의 글

“이 논문은 2003년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (No. M01-2003-000-20211-0).”

참 고 문 헌

[1] K. M. Rahman, B. Fahimi, G. Suresh, A. V. Rajarathnam, M. Ehsani, "Advantaes of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues", IEEE Transactions on Indusary 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, 1994, pp.322-328.

[6] P. Materu and R. Krishnan, "Estimation of switched reluctance motor losses," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Pittsburgh, PA, 1988, pp.79-90.

지 자 소 개



문 제 원 (文載元)

1971년생. 1994년 경성대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년 1월~현재 미국 랜슬리어공대 방문연구원.

Tel : +1-518-276-8708
Fax : +1-518-276-8708
E-mail : moonj3@rpi.edu



안 진 우 (安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수.

Tel : 051-620-4773
Fax : 051-624-5980
E-mail : jwahn@ks.ac.kr