

# 전동식 조향장치용 스위치드 릴럭턴스 모터 드라이브 개발

## Development of Switched Reluctance Motor Drive for Electric Power Steering System

정민창\* · 주민기\* · 김재혁†  
 (Min-Chang Jeong · Min-Gi Joo · Jaehyuck Kim)

**Abstract** - Demand for high fuel efficiency and smart features of the vehicles, research has been intensified. Hence, research and development on electric power steering (EPS) system to replace the existing hydraulic steering system has been actively conducted. Permanent magnet motors are widely used in automotive applications due to their high power density and high efficiency. However, increasing price and limited production of rare-earth permanent magnets has recently prompted the auto parts makers to substitute permanent magnet motors by non- or less rare earth magnet motors. Switched reluctance motors (SRMs), known as typical non-rare earth motors have simple structure, low manufacturing cost, and high reliability. This paper discusses design, modeling, simulation, and experimental verification of a prototype SRM drive for electric power steering system.

**Key Words** : Electric Power Steering (EPS), Switched Reluctance Motor (SRM), Motor Design, Motor Drive

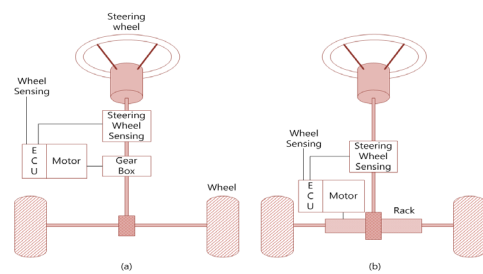
### 1. 서론

미래 자동차시장에서는 연비향상과 고기능 안전장치(자동 주차장치, ABS 등)에 대한 요구확대로 인해 기존의 유압식 조향장치를 전동식 조향장치로의 대체가 점차 증가될 것이다. 전동식 조향장치(Electric power steering: EPS)의 구동 모터로는 고효율과 고출력의 장점을 지닌 영구자석 모터가 선호되는 경향이다. 그러나 최근 희토류 광물의 수급문제로 인하여 비 희토류 또는 저 희토류 전동기에 대한 관심 및 연구개발 또한 증대되고 있는 추세이다. 대표적인 비희토류 모터인 SRM (Switched Reluctance Motor)은 영구자석 형 모터에 비해 가격이 저렴하고 구조가 간단하며 내구성 및 내환경성이 뛰어나다[1]. 이러한 장점에도 불구하고 토크리플과 진동, 소음의 큰 단점으로 인하여 전동식 조향장치에 SRM을 적용하여 개발된 사례는 거의 없는 실정이다. 본 논문에서는 SRM의 전동식 조향장치 구동모터로서의 가능성을 검토하기 위하여 SRM 및 드라이브 시스템의 모델링, 동적 시뮬레이션, 및 부하 실험을 수행하였다.

### 2. 전동식 조향장치 용 SRM 설계

#### 2.1 전동식 조향장치용 모터의 요구 성능

전동식 조향장치의 대표적인 구동방식으로는 컬럼 타입



(a) 컬럼타입 전동식 조향장치, (b) 랙타입 전동식 조향장치

그림 1 전동식 조향장치 시스템(a) C-EPS, (b)R-EPS

Fig. 1 Electric Power Steering System

(column assisted) 과 랙 타입 (rack assisted) 두 가지가 있다. 그림 1(a)는 컬럼타입 전동식 조향장치 (Column-assist Electric Power Steering, C-EPS), 그림 1(b)는 랙타입 전동식 조향장치 (Rack-assisted Electric Power Steering, R-EPS) 가 적용된 조향 시스템의 모식도이다. C-EPS는 운전 시 핸들에 전달받는 진동 및 소음이 다른 방식의 구동효과 보다 적다는 장점이 있으며, R-EPS는 구조가 간단하며 운전 중 connector 와 센서에 가해지는 충격이 적다는 것이 장점을 갖는다. 표 1과 그림 1은 각각 본 논문에서 사용된 EPS 구동 용 SRM의 제원과 형상 단면도를 나타낸다.

표 1 EPS용 SRM 제원

Table 1 Specifications of SRM for EPS

No. of stator/rotor poles	6/4
No. of phases	3
Output power (W)	460
Rated torque (N-m)	2.1
Rated speed (rpm)	1150
Stator current, r.m.s (A)	65
DC link voltage (V)	12

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University, Korea.

E-mail : jaehkim@wku.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University, Korea

Received : April 16, 2014; Accepted : October 23, 2014

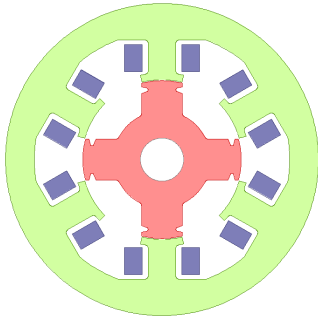


그림 2 EPS용 6/4 SRM  
Fig. 2 Structure of a prototype 6/4 SRM for EPS

2.2 기본 치수 설정

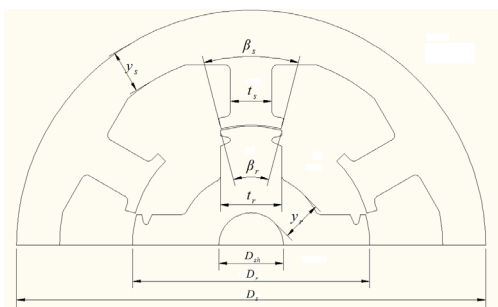


그림 3 SRM의 주요설계 파라미터  
Fig. 3 Key design parameters of SRM

그림 3은 본 논문에서 설계하고자 하는 전동식 조향장치용 SRM의 주요 설계 파라미터를 나타낸다. 일반적으로 모터프레임 사이즈에 의해 고정된 고정자 외경(Ds)에서 최대한의 토크를 얻기 위해선 회전자 외경을 되도록 크게 하는 것이 좋다[2]. 따라서 회전자 외경(Dr)은 초기설계값을 고정자 외경의 약 0.5배로 선정한 후 추후 세부설계시 최종 결정한다. 샤프트 외경(Dsh)은 회전자 외경(Dr), 회전자 슬롯 깊이(ds), 요크 폭(yr)에 의해서 결정되며 샤프트의 외경은 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{sh} = D_r - 2(d_r + y_r) \tag{1}$$

공극은 작을수록 토크가 커지며 고정자 적층(Lstk)을 회전자 외경으로 나눈 비율 (Lstk/Dr)에 따라 결정되며, 초기 공극 설정은 식 (2)처럼 회전자 외경의 5%로 선정하며 세부설계에서 최종 수치를 결정한다. 본 논문의 공극은 세부설계 이후 제작공차를 고려하여 0.25mm 이상으로 설계하였다.

$$g = 0.005 \times D_r \tag{2}$$

극호각은 고정자와 회전자의 극폭(ts, tr)을 결정하는 파

라미터 이다. 극호각의 크기는 정격용량과 정격토크와 비례 관계이지만, 극호각이 커지게 되면 슬롯면적에 영향을 끼치므로 식 (3)의 범위에서 결정한다. (Nr 회전자 극수)

$$\frac{2\pi}{N_r} \geq \beta_s + \beta_r \tag{3}$$

고정자의 요크폭(yr)은 고정자의 진동과 소음을 최소화하고 자속이 포화되지 않기 위해서 충분히 두껍게 설계한다. 일반적으로 식 (4)에 의해 설계 후 적정 설계를 재설정한다. 회전자의 요크 폭(yr)의 경우도 고정자 요크 폭과 마찬가지로 회전자가 포화되지 않을 정도로 충분히 넓어야 하며 일반적으로 식 (4)와 식, (5)의해 설계 후 적정 설계를 재설정한다.

$$y_s > t_s/2 + 20\% \tag{4}$$

$$y_r > t_r/2 + 20\% \tag{5}$$

고정자의 극폭(ts)과 회전자의 극폭(tr)은 자속이 포화되지 않도록 충분히 크게 설계하며 초기 값을 아래의 식과 같이 산정한다.

$$t_r = 2r_1 \sin \frac{\beta_r}{2} \tag{6}$$

$$t_s = 2(r_1 + g) \sin \frac{\beta_s}{2} \tag{7}$$

위의 기초 설계를 바탕으로 설계 파라미터 (Dr, Ds, Dsh, ys, yr, βs, βr)는 권선사양, 부하조건, 및 외부형상 등을 고려하여 최종적으로 결정을 한다[1]. 세부설계 내용을 포함한 설계과정에 대한 전체적인 순서도는 그림 4와 같다.

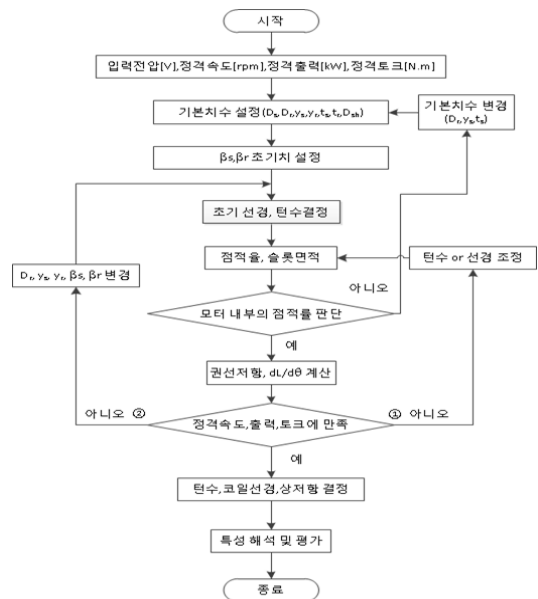


그림 4 SRM 설계 순서도  
Fig. 4 Flowchart of SRM design

### 2.3 권선수 설계

권선 수는 슬롯면적과 권선면적의 비인 점적률을 고려 하고 설계 가능한 최대 권선수와 전류밀도를 고려하여 설계 한다. 전류밀도 ( $J_{rms}$ )와 고정자 극 당 최대 권선수( $N_p$ )는 각각 식(8)과 식(9)와 같으며[2]

$$J_{rms} = \frac{k_{Tpeak} \times T_{mean}}{k_{Ipeak} \times k_s \times A_{slot} \times B_s \times D_r \times L_{stk}} \quad (8)$$

$$N_p = \frac{T_{peak}}{B_s D_r L_{stk}} \quad (9)$$

여기서  $k_{Tpeak}$ 는 최대토크 와 평균토크의 비율,  $T_{mean}$ 는 평균토크,  $k_{Ipeak}$ 는 최대전류와 평균전류의 비율,  $k_s$ 는 점적률,  $A_{slot}$ 는 슬롯 면적,  $B_s$ 는 자속밀도,  $T_{peak}$ 는 최대토크를 나타낸다. 주어진 고정자 극 형상에서 점적률을 고려하며 유효권선 면적은 그림 5와 같다.

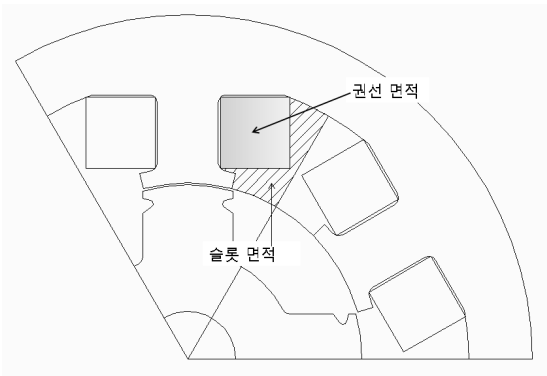


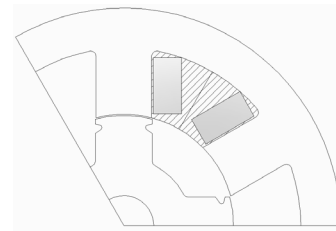
그림 5 권선의 유효 범위  
Fig. 5 Effective area of coil winding

### 2.4 권선 수를 고려한 고정자 설계

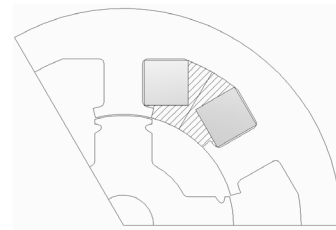
용이한 권선작업을 위해서는 정격출력을 확보하면서 슬롯 면적을 최대한 확대하는 것이 유리하다. 슬롯면적을 확대 하기 위하여 그림 6(a)와 같은 기존의 common cylinder 형태에 대비하여 그림 6(b)와 같이 hexagon 형태의 내경을 갖는 고정자로 설계 하였다. 따라서, 그림 6(b)의 고정자는 그림 6(a) 형태의 고정자에 비하여 슬롯면적이 확대되어 실질적인 권선면적이 확대되고 설계시 코일선정의 폭이 넓어진다. 본 논문에서 제작된 시제품 모터의 경우 기존의 common cylinder 형 고정자에 비해 권선면적이 약 20% 증가 하였다.

### 2.5 고정자 pole shoe 의 최적 설계

전동식 조향장치용 SRM의 평균 토크는 고정자가 hexagon 형태를 취할 경우 고정자의 pole shoe의 폭에 의해서 변동 된다[2-3]. 고정자 pole shoe의 폭은 권선수를 고려하여 1mm, 2mm, 3mm 로 다르게 설계한 후 시물레이션 하였다. 고정자 pole shoe 의 폭 에 따른 토크의 변화는 표 3



(a) Common cylinder shape



(b) Inner hexagon shape

그림 6 권선의 유효 범위를 고려한 고정자 극의 2가지 형태  
Fig. 6 Two different types of stator pole shape considering coil winding area

에 나타나 있다. 고정자 pole shoe 의 폭을 넓게 할수록 평균 토크는 감소하고 토크리플은 증가하는 경향을 나타내었다. 고정자 pole shoe 가 1mm 인 경우에는 토크리플이 적은 장점이 있지만 최대 토크가 목표한 정격 토크에 도달하지 않아 2mm 의 고정자 pole shoe를 최종 선정하였다. 최근 BIST를 구현하는데 있어 고려해야 할 점은 효율성, 스피드, 경제성 등이다[6]. 최대의 고장 검출률을 유지하면서 오버헤드를 줄일 수 있는 방법은 결정 테스트와 의사 무작위 테스트를 혼용하는 혼합 테스트를 사용하는 것이다. 의사 무작위 테스트 저항 고장에 대해서만 결정 테스트를 하는 것이 합리적이다[7]. 이와 같은 방법을 내장된 자체 테스트 라고 한다.

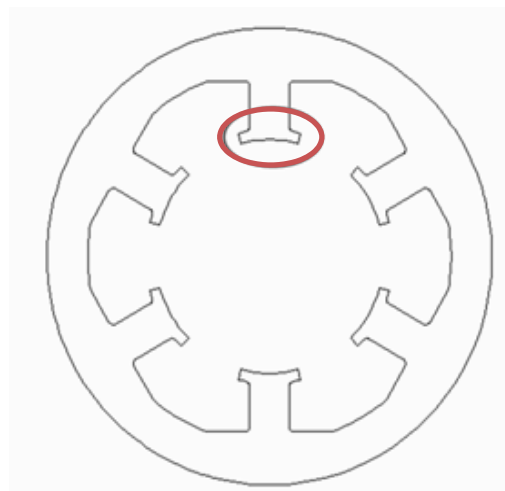


그림 7 고정자 극 shoe  
Fig. 7 Stator pole shoe

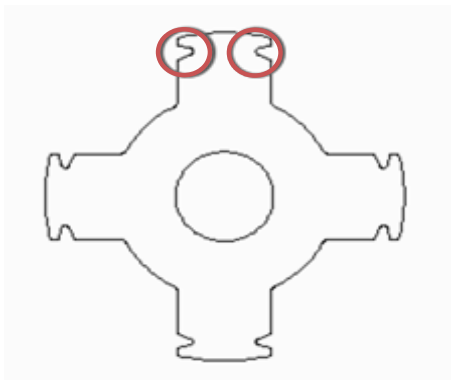
**표 2** 고정자 pole shoe 폭에 따른 평균토크, 최대토크, 토크리플

**Table 2** Comparison of torque between different pole shoe widths

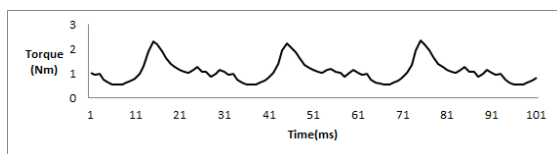
	Max. (N-m)	Average (N-m)	Ripple (%)
1mm	1.78	1.02	22.7
2mm	2.03	1.00	30.7
3mm	2.02	0.98	31.4

**2.6 토크 리플 저감을 위한 회전자 설계**

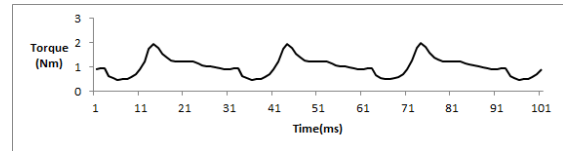
전동식 조향장치의 경우 전동기의 회전특성이 직접적으로 운전자에게 영향을 끼치므로 토크 리플로 인한 소음과 진동을 감소시키는 것이 매우 중요하다. 따라서 회전자 극에 notch를 두는 방법[3]을 적용하여 회전자의 형상을 변화시켜 토크리플이 감소되도록 설계하였다. 본 논문의 모터형상의 경우 정, 역회전을 고려하여 회전자극 양 옆에 2.5[mm]의 notch를 두어 설계하였다. 세부설계 내용과 토크리플 저감 회전자 설계를 적용시킨 모터의 형상은 그림 8과 같다. 본 논문에서 설계한 모터의 notch가 없는 회전자의 토크파형은 그림 9, 토크리플 저감 설계 후 토크의 변화는 그림 10과 같다. notch를 적용할 경우 최대 토크는 약 0.3[Nm] 약 토크리플은 약 1.4%가 감소됨을 알 수 있다.



**그림 8** SRM 회전자 notch  
**Fig. 8** SRM rotor design using notch



**그림 9** 토크리플 저감 회전자 미설계시 토크의 변화 (상전류 지령치 65A)  
**Fig. 9** Torque waveform without notch of the rotor for torque ripple reduction (reference current: 65A)



**그림 10** 토크리플 저감 회전자 설계 시 토크의 변화 (상전류 지령치 65A)  
**Fig. 10** Torque waveform with notch of the rotor for torque ripple reduction (reference current: 65A)

기초적인 치수 선정 이후 표 1의 요구성능을 충족시키기 위하여 그림 4의 설계 과정과 반복적인 시뮬레이션을 통해 표 3과 같은 최종 파라미터를 선정하였다.

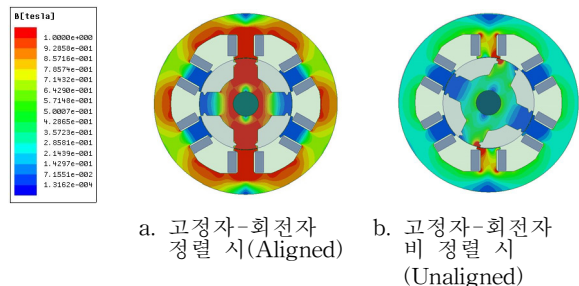
**표 3** 최종 결정된 설계파라미터

**Table 3** Specific of the design target

파라미터		값	단위
고정자 극수	$N_s$	6	-
회전자 극수	$N_r$	4	-
고정자 외경	$D_s$	90	mm
회전자 외경	$D_r$	44	mm
고정자 극호각	$\beta_s$	29	°
회전자 극호각	$\beta_r$	30	°
고정자 요크폭	$y_s$	7	mm
회전자 요크폭	$y_r$	7.5	mm
샤프트 외경	$D_{sh}$	12	mm
공극 길이	g	0.25	mm
적층 두께	$L_{stk}$	87	mm
권선수(극)	$N_p$	10	-

**2.7 유한 요소해석 (Final Element Analysis)**

설계한 SRM의 성능 검증을 위하여 Maxwell 2D software를 사용하여 유한 요소 해석을 하였다. 그림 11은 회전자극과 고정자극의 정렬(aligned) 시와 비 정렬(unaligned) 시에 대한 자속밀도를 각각 나타낸다. 그림 12와 그림 13은 FEA 시뮬레이션을 통하여 얻은 토크와 쇄교 자속의 파형이며 다양한 여자전류(최소10A, 최대100A)에 대하여 회전자 위치에 따른 쇄교자속과 순시 토크의 변화를 각각 보여준다



**그림 11** 회전자극 위치에 따른 자속밀도  
**Fig. 11** Flux density according to rotor position

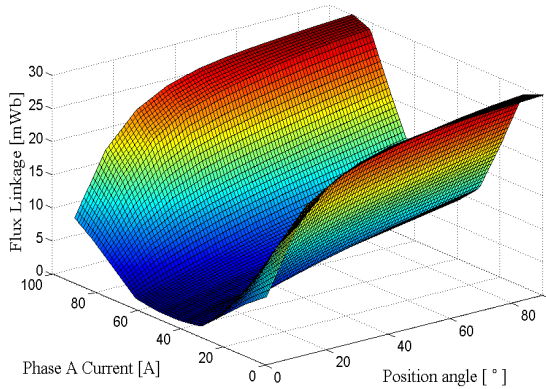


그림 12 유한요소해석을 통하여 얻은 자속특성  
Fig. 12 Flux linkage obtained from FEA

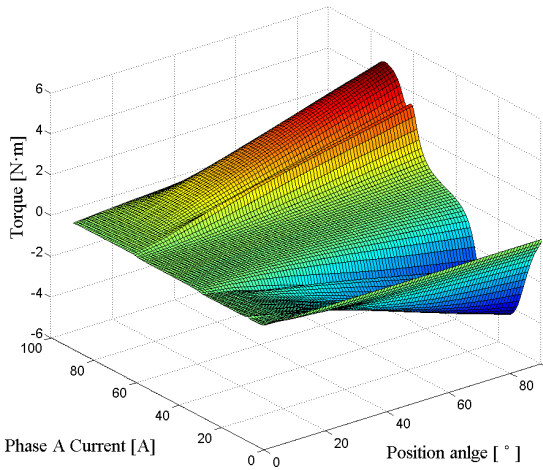


그림 13 유한요소법을 통하여 얻은 토크특성  
Fig. 13 Electromagnetic torque obtained from FEA

### 3. SRM 드라이브 시뮬레이션

EPS 구동 용 SRM의 제작 및 부하 시험에 앞서, 설계한 SRM의 동적성능 검증 및 제어알고리즘 개발을 위해서 Matlab/Simulink을 이용하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 이를 위해 먼저 모터, 구동 컨버터 및 제어알고리즘을 포함한 전체 시스템의 모델링을 하였다. SRM의 자속  $\lambda(\theta, i)$ 은 회전자 위치( $\theta$ ) 및 여자전류( $i$ )에 따라 변하며 정렬위치에 근접하고 여자전류가 증가할수록 자기포화가 커지는 비선형성을 갖는다. 정밀한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 비선형성을 고려한 SRM의 수학적 모델은 다음과 같이 유도할 수 있다

#### 3.1 SRM 드라이브 시스템 모델링

SRM 한 상의 전압방정식을 적분하여 다음과 같이 쇠교 자속  $\lambda$ 를 얻는다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = v - Ri \rightarrow \lambda = \int (v - Ri) dt \quad (10)$$

$v$ 는 권선에 인가되는 전압이고  $R$ 은 권선 저항이며  $i$ 는 권선 전류이다.

유한 요소 해석법에 의해 얻어진  $(\lambda - \theta - i)$ 의 테이블을 이용하면 현재의 회전자 위치에서의 전류를 얻는다.

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i)i \rightarrow i(\theta, \lambda) \quad (11)$$

SRM의 한 상의 토크는 아래의 식과 같다.

$$T_e(\theta, i) = \left. \frac{\partial W'_e(\theta, i)}{\partial \theta} \right|_{i=constant} \cong \frac{i^2}{2} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (12)$$

여기서  $W'_e$ 는 자기수반 에너지,  $L$ 은 회전자의 위치와 전류에 따른 상의 인덕턴스이다. 식(11)에서 얻어진 전류와 전자 위치에서 토크는 유한 요소 해석법에 의해 얻어진 토크 테이블로부터 얻을 수 있다. SRM의 토크-속도식은 다음과 같다.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{T_e - T_L - Bw}{J} \quad (13)$$

$$w = \frac{d\theta}{dt} \rightarrow \theta = \int w dt + \theta_0$$

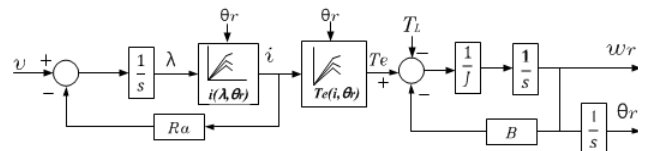


그림 14 SRM 한상의 블록도  
Fig. 14 Blockdiagram of an SRM phase

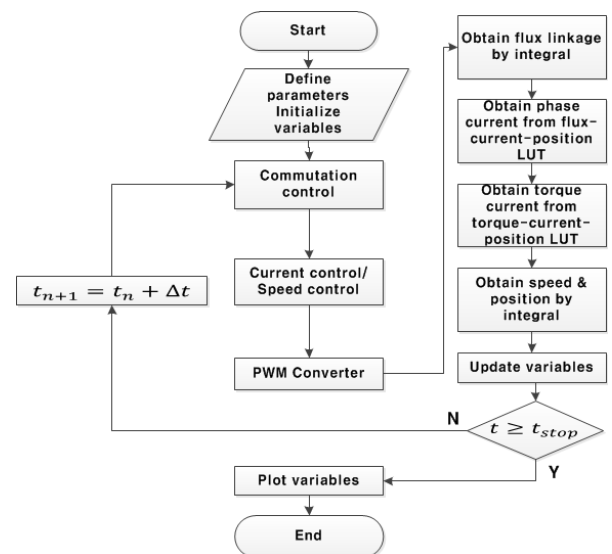


그림 15 동적 시뮬레이션 순서도  
Fig. 15 Dynamic simulation flow chart

위 식에서  $B$ 는 마찰계수,  $J$ 는 관성계수,  $w$ 는 각속도 이다. 토크 방정식의 양변을 적분하여  $w$ 를 구하고 다시 적분을 하면, 회전자의 새로운 위치를 알 수 있다.

SRM의 수학적 모델을 이용하여 동적 시뮬레이션을 수행하는 순서도는 그림 15 와 같다. 위에서 기술된 식(10), (11), (12), (13)의 블록도 표현하면 그림 14 와 같다[4].

그림 16 은 본 논문에서 사용한 전동식 조향장치 용 3상 6/4 SRM 구동을 위한 컨버터 회로이다.

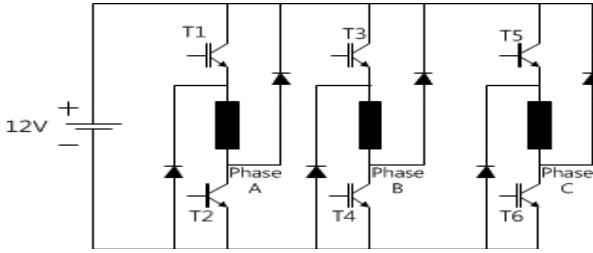


그림 16 SRM 구동을 위한 Asymmetric H-Bridge 컨버터  
Fig. 16 Asymmetric H-Bridge converter for SRM drive

컨버터의 입력전압( $v_{dc}$ )는 12[V]이며, 전류 커뮤테이션을 위한 턴-온 및 턴-오프 각은 구동 속도와 부하 토크에 따라 최적 효율을 갖도록 조절 하였다. 가변 속도 제어에 가장 핵심이 되는 전류 제어기의 제어 이득은 그림 17 과 같은 페루프 전류제어 블록다이어그램을 통하여 구하였다.

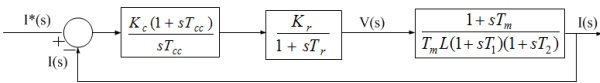


그림 17 전류제어 블록 다이어그램  
Fig. 17 Current control block diagram

위 다이어그램에서  $T_r$ 은 컨버터의 지연시간이고,  $K_c$ 와  $T_{cc}$ 는 각각 PI 전류 제어기의 이득과 시정수이며,  $T_m$ 은 기계상수로 관성 계수  $J$ 를 탄성계수  $B$ 로 나눈 것으로, 위 전류제어루프의 전달함수는 다음과 같다[5].

위 다이어그램에서 왼쪽부터 첫 번째 블록은 PI전류 제어기 이며  $K_c$ 와  $T_{cc}$ 는 각각 PI 전류 제어기의 이득과 제어기의 시정수이다. 두 번째 블록은 컨버터를 모델링한 것으로,  $K_r$ 은 컨버터의 이득,  $T_r$ 은 컨버터의 지연시간이다. 세 번째 블록은 SRM의 전압방정식을 나타낸다. 여기서  $T_m (= J/B)$ 은 기계상수이며 관성계수,  $J$  를 마찰계수,  $B$ 로 나눈 값이다. 위 전류제어루프의 전달함수는 다음과 같다[5].

$$G_{ic} = \frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{\frac{K_c(1+sT_{cc})}{sT_{cc}} \cdot \frac{K_r}{1+sT_r} \cdot \frac{sT_m+1}{T_mL(1+sT_1)(1+sT_2)}}{1 + \frac{K_c(1+sT_{cc})}{sT_{cc}} \cdot \frac{K_r}{1+sT_r} \cdot \frac{sT_m+1}{T_mL(1+sT_1)(1+sT_2)}} \quad (14)$$

컨버터 지연시간은 상대적으로 작으며, 기계상수는 비교적 큰 값을 가지므로, 컨버터 지연시간은 0과 같다.

$$1+sT_r \cong 1 \quad (15)$$

$$1+sT_m \cong sT_m \quad (16)$$

을 가정하면 식(14)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$G_{ic} = \frac{\frac{K_cK_r+sK_cK_rT_{cc}}{T_1T_2T_{cc}L}}{s^2+s\left(\frac{K_cK_r+LT_1+LT_2}{LT_1T_2}\right)+\frac{LT_{cc}+K_cK_r}{LT_{cc}T_1T_2}} \quad (17)$$

식(18)를 2차 시스템의 전달함수 표준형과 비교하면

$$\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \quad (18)$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{K_cK_r+LT_1+LT_2}{LT_1T_2} \quad (19)$$

$$\omega_n^2 = \frac{LT_{cc}+K_cK_r}{LT_{cc}T_1T_2} \quad (20)$$

와 같다. 여기서  $\zeta$ 는 감쇠계수이고,  $\omega_n$ 는 고유주파수이다.

식(19), 식(20)으로부터 제어기의 이득( $K_c$ )과 시정수( $T_{cc}$ )을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_c = \frac{2\zeta LT_1T_2\omega_n - L(T_1+T_2)}{K_r} \quad (21)$$

$$T_{cc} = \frac{K_cK_r}{L(T_1T_2\omega_n^2 - 1)}$$

식(21)에서 계산한 이득을 토대로 시뮬레이션 및 부하 시험에서는 반복 실험을 통하여 최적 효율의 이득 값을 찾았다. 설계한 PI제어기, PWM 컨버터, 전압방정식, 그리고 토크-속도 방정식을 이용하여 <그림 18>과 같은 시뮬링크 모델을 만든 후 시뮬레이션을 수행하였다.

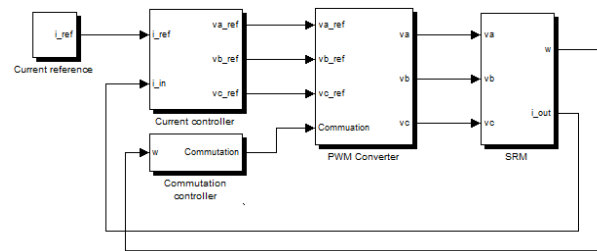


그림 18 전류제어 구동 시뮬레이션을 위한 Simulink 모델  
Fig. 18 Simulink model for Current control drive simulation

### 3.2 SRM 드라이브 시스템의 동적 시뮬레이션 결과

앞 절에서 얻은 SRM 드라이브의 시뮬링크 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과는 그림 19 와 그림 20에 나타내었다. 그림19 는 각 상의 인덕턴스 프로파일과 각 상의 토크 그리고 합산토크를 보여준다. 그림 20 은 전

류 지령치 65A에서 각 상의 전류파형을 보여준다.

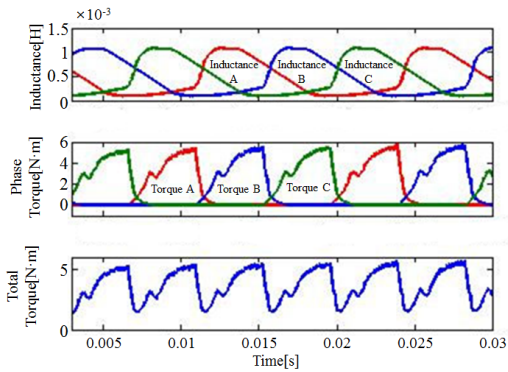


그림 19 시뮬레이션 결과 (인덕턴스, 각 상의 토크, 전체 합산토크)

Fig. 19 Simulation result (waveforms of inductance, phase torque, and total torque)

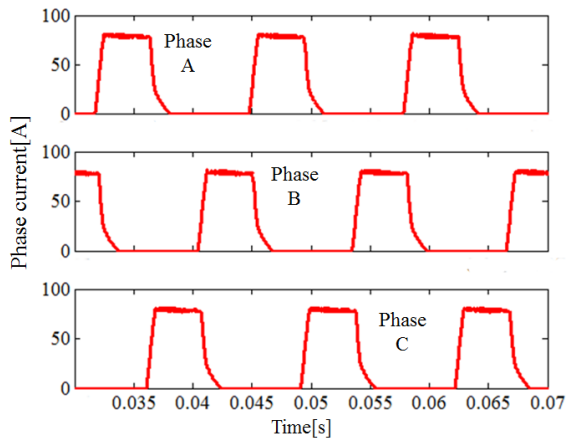


그림 20 시뮬레이션 결과 (각 상의 전류)

Fig. 20 Simulation results (waveform of each phase current)

#### 4. 부하시험

제작한 시제품 SRM이 다양한 여자전류 변화에 대하여 회전자 위치에 토크를 측정하기 위하여 그림 21과 같이 토

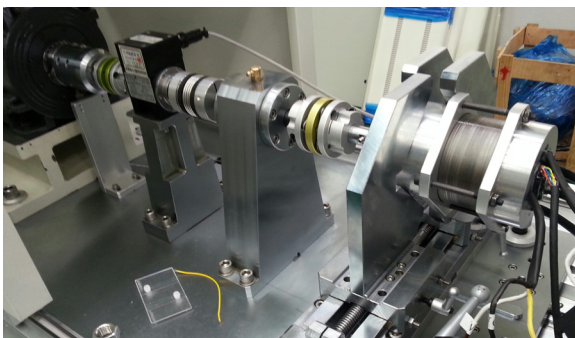


그림 21 SRM 드라이브 실험을 위한 다이내모 셋업

Fig. 21 Dynamo set-up for SRM drive experiment

크측정 및 부하시험을 위한 다이내모 셋업을 구성하였고 가변 부하로는 유도전동기 드라이브를 사용하였다. SRM 구동을 위한 드라이버는 컨트롤 보드, 게이트 보드로 구성되며, 컨트롤 보드의 메인프로세서로는 150MHz의 연산속도가 가능한 TI사의 TMS320F28335를 사용하였으며, 120kHz의 ADC 샘플링과 20kHz의 PWM 스위칭으로 전류제어를 수행하였다.

SRM의 부하테스트는 궁극적으로 EPS system의 타당성을 증명하기 위하여 300rpm에서 1150rpm의 운전영역에 대하여 부하시험을 수행하였고 그림 22는 정격속도인 1150rpm에서 구동시 전류파형을 나타낸다.

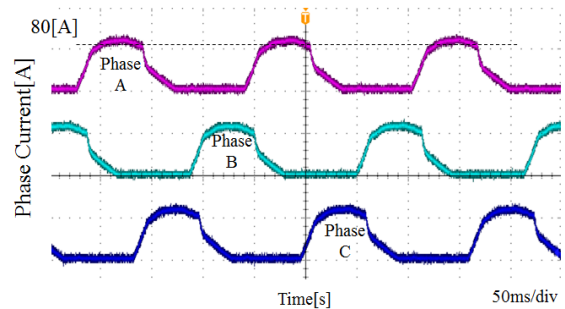


그림 22 Simulation결과 및 실험결과 비교

Fig. 22 Compare simulation with experiment result

그림 23은 부하테스트는 가변하는 속도에 따른 토크를 측정하기 위해 SRM은 80A의 전류제어를 수행하고, 부하의 속도는 200rpm부터 1150rpm까지 점차적으로 올려 토크가 4.3Nm에서 2.1Nm로 점차적으로 감소하는 토크-속도곡선을 얻어 냈다.

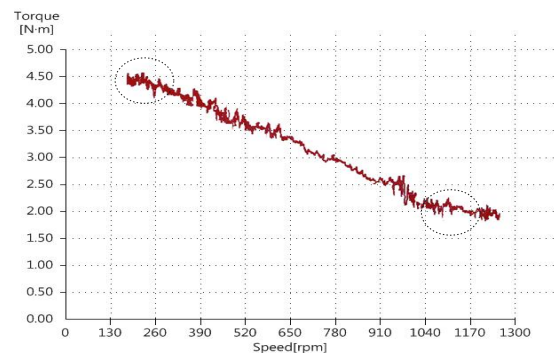


그림 23 Torque-Speed 실험 결과 그래프

Fig. 23 Torque-speed characteristic

#### 5. 결 론

본 논문에서는 전동식 조향장치(EPS)에 적용하기 위하여 SRM을 설계·제작하고 부하시험을 통하여 성능을 검증 하였다. 권선의 유효범위를 고려한 hexagon 형태의 고정자 형상과, 토크리플의 감소를 위해 회전자 극에 notch를 두어 토크리플을 저감 하였다. 설계의 타당성과 모터의 정확한 해석을 위해 유한요소해석법에 의해 얻어진 자기특성과 토크특

성을 이용하였고, SRM의 비선형성을 반영하는 전기적, 기계적 특성을 고려한 수학적 모델링을 바탕으로 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 부하 토크 측정 실험을 수행하여 시뮬레이션과 유사한 것을 확인 하였다. 토크리플이 높은 점을 보완하면 요구하는 제원 값을 만족하므로 SRM이 EPS에 적용 가능함을 확인하였다.



**주 민 기 (Min-Gi Joo)**

1986년 10월 17일 생. 2013년 원광대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

**감사의 글**

본 연구는 2012년도 한국 연구재단의 지원(NRF-2012R1A1A1015767) 및 2013년도 산업통상자원부의 지원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20134030200250)을 받아 수행된 것이며 전동기 및 시험장치는 ㈜센트랄의 제공에 의한 것으로써, 관계부처에 감사드립니다.



**김 재 혁 (Jaehyuck Kim)**

1973년 4월 25일 생. 1992년 한양대 전기공학과 졸업. 1998~2000 UL Korea, Engineer, 2004년 Univ. of Wisconsin at Madison 졸업(석사), 2010년 Virginia Tech 졸업(박사), 2010년 Ramu Inc. Senior Engineer, 현재 원광대학교 전기공학과 교수

**References**

- [1] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001.
- [2] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993
- [3] S. M. Jang, P. I. Park, S. H. Lee, S. Y. Sung, Jung Ho Lee, Sang-Gyu Choi 'Performance Analysis of Switched Reluctance Motor with considering pole shoe', KIEE Annual Summer Conference, P672-P674, 2000
- [4] Jin Woo Lee, Hong Seok Kim, Byung Il Kwon, and Byung Taek Kim, "New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM Using FEM", IEEE, Vol.40, pp 754-757, March 2004
- [5] Jaehyuck Kim, "High Efficiency Single-Pulse Controlled Switched Reluctance Motor Drive for High Speed (48k RPM) Application: Analysis, Design, and Experimental Verification", IEEE IAS Annual Meeting, 2008,

**저 자 소 개**



**정 민 창 (Min-Chang Jeong)**

1988년 2월 27일 생. 2013년 원광대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.