

FEM을 이용한 영구자석형 릴럭턴스 동기 전동기의 설계에 대한 연구

김남훈*, 김민회**, 백원식**, 김동희***

*청주대학교, **영남이공대학, ***영남대학교

A Study of Permanent Magnet Assisted Reluctance Synchronous Motor Design using FEM

Namhun Kim*, Minhuei Kim**, Wonsik Baik**, Donghee Kim***

*Chungju Univ., **Yeungnam College of Sci. & Tech., ***Yeungnam Univ.

ABSTRACT

In this paper, design of PMA-RSM(permanent magnet assisted reluctance synchronous motor) for washing machine using FEM(finite element method) is presented and algorithms to maximize electromagnetic torque is introduced. FEM has been approached to show the effects of motor parameters on the developed average torque and maximum torque. The designed motor is a combination of salient poles, which is making reluctance torque, and permanent magnet which are located on the air-gap of rotor to get a enough torque during low speed resign. And to verify availability of the proposed PMA-RSM, various simulation are done as compared with bldc motor which is used for washing machine.

Keyword : FEM, Reluctance motor, Permanent magnet, Synchronous reluctance motor

1. 서론

급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 전동기는 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 특히 고성능의 특성을 가지는 액츄에이터가 요구되는 산업분야에서는 영구자석형 동기전동기(Permanent magnet synchronous motor)와 유도전동기(Induction motor)가 많이 사용되고 있으며, 영구자석형 동기전동기는 유도전동기에 비해 높은 효율, 제어의 용이성, 소형화의 장점으로 인해 이상적인 교류전동기로 연구되고 있다. 한편으로 최근에는 유도전동기나 영구자석형 동기전동기와 같이 상호 토크(Reaction torque)와 PM 토크(permanent magnet torque)가 아니라 릴럭턴스가 최소화 되도록 정렬하려는 릴럭턴스 토크(Reluctance torque)를 사용하는 릴럭턴스 전동기(Reluctance motor)에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다[2].

릴럭턴스 전동기는 크게 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched reluctance motor)와 릴럭턴스 동기전동기(Reluctance synchronous motor : RSM)로 나누어지고, 릴럭턴스 동기 전동기의 토크 특성이나 역률은 인덕턴스의 차나 인덕턴스의 비율에 의해서 결정되어진다. 릴럭턴스 동기 전동기의 구조적인 면에서 보았을 경우, 고정자의 경우는 일반적인 유도 전동기나 영구자석형 동기전동기와 같으며, 회전자는 크게 자속 장벽형(Flux barrier type)과 축방향 성층형(Axially

laminated type)으로 나누어진다. 자속 장벽형은 코어를 편칭하여 길이 방향으로 적층한 것으로 내부의 공간은 공기로 두며 기계적인 유지를 위하여 리브가 존재하는데 이로 인하여 q축의 자속 경로가 발생하여 인덕턴스 비율의 저하를 야기하지만 제작공정이 단순하고 제작단가가 싸다는 이점이 있다. 축방향 성층형이고 개개의 철판을 절곡하여 그사이에 절연물을 삽입하여 축방향으로 절연한 것이며, 인덕턴스 비율이 높지만 제작공정이 복잡하고 제작 단가가 비싸다는 단점이 있다. 또한 릴럭턴스 동기전동기의 인덕턴스 비율을 높이기 위해서 회전자에 영구자석을 삽입함으로써 인덕턴스 비율을 높이는 PMA-RSM(Permanent magnet assisted reluctance synchronous motor)에 관하여도 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 PMA-RSM의 경우는 회전자 내부에 slit effect로 인해서 Flux의 분포가 고르지 못하고, 자석을 장벽내부에 삽입하고 자석의 배열과 양에 따라서 전동기의 특성이 달라지기 때문에 전동기 해석이 매우 난해하다는 단점이 있다[2].

본 논문에서는 세탁기용으로 사용하기 위해서, 자속 장벽형 릴럭턴스 동기전동기에 영구자석을 삽입하고, PM토크와 릴럭턴스 토크를 동시에 사용함으로써 전동기의 특성을 최대화하고, 제안된 PMA-RSM의 실제 토크를 Ansoft의 Maxwell 이라는 FEM 프로그램을 통해서 확인한다[1].

2. PM Assisted RSM

전형적인 릴럭턴스 동기전동기의 회전자 장벽(Barrier)에 자석을 넣음으로써, 릴럭턴스 토크와 자석에 의한 PM토크를 동시에 사용함으로써 일반적인 릴럭턴스 동기전동기에 비해서 좋은 토크 특성이나 동특성을 얻을 수 있는 장점을 가지며, 영구자석형 전동기에 비해서는 가격 대비 성능 특성에서 좋은 특성을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 영구자석형 전동기에 비해서 동손(copper loss)과 철손(iron loss)이 크다는 단점이 있지만, 고속 영역에서의 약제자 제어에 용이하다는 장점이 있다.

수식(1)은 릴럭턴스 동기전동기의 토크 방정식을 보여주고 있으며, 전동기 토크는 단지 회전자 인덕턴스 비에 의한 릴럭턴스 토크만을 사용하고 있는 것을 알 수 있다.

$$T_e = \frac{P}{2}(L_d - L_q)I_d I_q = \frac{P}{2}(\Phi_d I_q - \Phi_q I_d) \quad (1)$$

여기서, P는 전동기 폴 수(pole numbers)이고, L_d 와 L_q 는 d 축 q축 인덕턴스, I_d 와 I_q 는 d축 q축 전류성분, 그리고 Φ_d , Φ_q

는 d축 q축 쇠교 자속을 나타낸다.

PMA-RSM은 자석을 사용함으로써 아래와 같이 다시 토크 수식을 정리할 수 있다.

$$T_e = \frac{P}{2} [\Phi_d I_q + (\Phi_{pm} - \Phi_q) I_d] \quad (2)$$

여기서 Φ_{pm} 은 영구자석에 의한 쇠교 자속을 나타낸다.

그림 1에서는 실제 영구자석 동기전동기의 최대 토크 시점과 릴럭턴스 동기 전동기의 최대 토크 시점에 대해서 보여주고 있다. 그림에서와 같이 PM 토크의 경우는 고정자 자속과 회전자 자속이 90[deg]의 전기각을 이루었을 경우에 최대 토크가 발생되고, 릴럭턴스 동기전동기의 경우는 고정자 자속과 회전자 자속이 45[deg]의 전기각을 이루었을 경우 최대 토크가 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 PMA-RSM의 경우는 고정자와 회전자사이의 자속을 90[deg]와 45[deg]사이의 시점에서 최대 토크를 얻는 다는 것을 알 수 있다. 그림 1의 아래의 그림에서 릴럭턴스 토크가 초기에 음의 값을 가지는 것은 릴럭턴스 동기전동기의 회전자 위치가 고정자 쇠교자속에 비해서 앞에 위치하고 있기 때문에 초기에는 음의 값을 가지다가 45[deg]이후에 양의 값을 가지게 된다.

3. 제안된 PM Assisted RSM

세탁기용 전동기를 위해서 PMA-RSM를 적용하였으며, 아래의 표 1은 제안된 전동기의 기본적인 사양을 나타낸다. 제안된 PMA-RSM은 표에서와 같이 고정자는 36 slot을 가지고 풀피치 권선(Full fitted stator winding)을 가지며 그리고 51[mm]의 내부 직경을 가진다.

전동기를 설계하기 위해서 2D-유한 요소법(two-dimensional finite element method)을 프로그램인 Ansoft사의 Maxwell을 이용해서 최적의 값을 구하였다[1]. 그리고 RSM의 회전자 구조는 정격전류를 인가하여 최대 토크를 가지도록 하였고, 전동기 상(phase)간의 Cross saturation effect를 고려하였으며 그리고 철손(iron loss)을 고려하지는 않았다. 릴럭턴스 토크를 최대화하기 위해서 아래에서 장벽설계에 대해서 자세히 다루어진다.

Table 1 Proposed Motor parameters

	PMA-RSM
Stator Outer Dia.	267[mm]
Stator Inner Dia.	51[mm]
Airgap Length	0.6[mm]
Stack Length	42[mm]
Magnet	Ferrite
Stator slot Number	36
Number of Pole	24

3.1 Effect of Single Flux barrier Width

Single flux barrier의 변화에 따른 토크 특성을 살펴보기 위해서, 그림 2에 전동기의 모델을 보여주고 있다.

B1과 B2를 결정하기 위해서 B3=5[mm]로 고정하고, B1=B2=1~7[mm] 변화를 주었으며 6[mm]에서 최대값을 가진다. B3를 결정하기 위해서 B1=B2=6[mm]로 고정하고 B3=1~8[mm]로 1[mm]의 스텝으로 변화를 주었으며, 6[mm]에서 최대값을 가지는 것을 알 수 있었다. B1과 B2의 비율을 결정하기 위해서 B2=B3=6[mm]로 고정하

고, B1을 1~6[mm]로 1[mm]의 스텝으로 변화를 주었으며, 6[mm]에서 최대값을 가진다. 따라서 최대 토크를 얻기 위해서는 B1=B2=B3=6[mm], 즉 같은 넓이를 가지도록 설계 하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

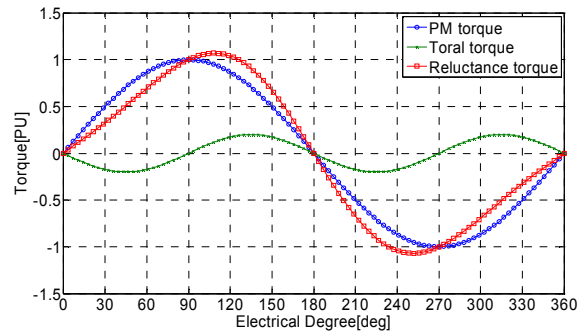
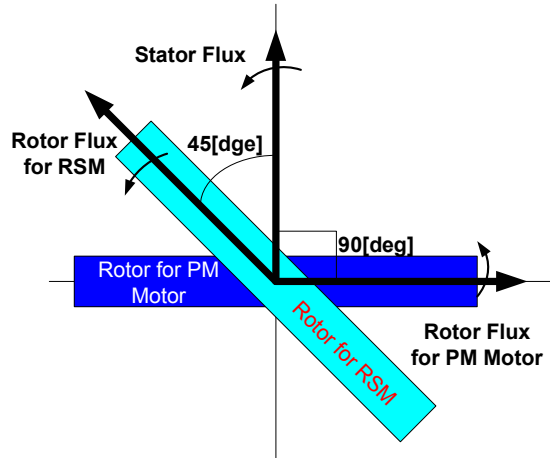


Fig. 1. Relationship between PM torque and reluctance torque

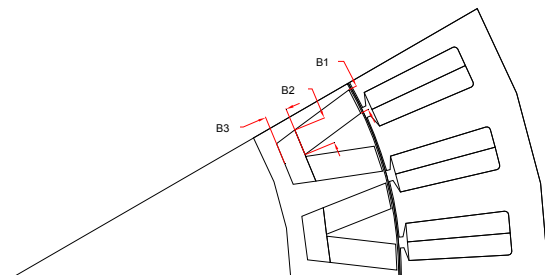


Fig. 2. Effect of Single Flux barrier Width

3.2. Effect of the flux barrier insulation ration

릴럭턴스 토크의 특성 개선에 있어서, 절연 비율의 영향을 살펴보기 위해서, two-layer 자속장벽을 고려하였다. Two-layer flux barrier 회전자의 최대특성을 얻기 위해서, Single flux barrier width의 영향에서 살펴본 바와 같이 총 자속 장벽의 넓이를 6[mm]로 고정을 하고, 여러 가지 변수들의 변화에 따른 특성을 살펴보았다.

자속장벽 사이의 iron layer의 최적 넓이를 결정하기 위해서 그림3과 같이 각각 자속장벽의 넓이를 3[mm](A1=A2=3[mm])로 설정하고, A3를 1~4[mm]로 변화를 주었을 경우의 토크 특성을 살펴보았다. FEA결과에서 알 수 있듯이 iron

layer의 넓이를 최소화 할수록 좋은 토크특성을 얻을 수 있었으며, $A3 = 1[\text{mm}]$ 에서 최대 토크를 얻을 수 있었다. 그림 3는 $A3 = 1[\text{mm}]$ 인 경우를 보여주고 있다.

Barrier ratio의 특성을 살펴보기 위해서, 그림 4에서와 같이 장벽사이의 iron layer의 넓이를 $1[\text{mm}]$ 로 고정을 하고 장벽의 넓이를 변화시키면서 최적의 barrier ratio를 살펴보았다. 그림 4는 $A1 = 5.0[\text{mm}]$ 인 경우를 보여주고 있다. FEA결과에서 알 수 있듯이 첫 번째 barrier가 커질수록 좋은 토크 특성을 얻을 수 있었으며, 두 번째 barrier의 크기 변화에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 최대 토크 특성을 얻기 위해서 $A1 = 5.0[\text{mm}]$, $A2 = 1.0[\text{mm}]$, $A3 = 1.0[\text{mm}]$ 으로 결정하였다.

3.3 제안된 PMA-RSM와 토크 특성

앞에서 제시된 디자인 과정을 통해서 얻어진 회전자의 자속장벽(Flux barrier) 설계값을 바탕으로, 세탁기용 전동기에서 요구하는 토크를 얻기 위해서 자속장벽에 페라이트 자석을 삽입하였다. 다음의 그림 5는 제안된 PMA-RSM의 FEM를 통한 자속라인과 토크 특성을 보여주고 있다. 일반적으로 IPM type의 전동기나 영구자석을 사용하는 릴럭턴스 전동기의 경우는 토크특성을 얻기 위해서 제어의 복잡함으로 인해서 릴럭턴스 토크를 무시하고 PM토크가 최대가 되는 시점인 회전자와 고정자 자속이 $90[\text{deg}]$ 가 되는 시점에서 운전하는 방법을 사용한다. 제안된 PMA-RSM의 최대 토크특성은 자속만 사용한 경우보다 9.85%(4.1[Nm])정도의 특성 개선을 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 세탁기용 전동기를 위해서 PMA-RSM을 제안하였으며, 전동기 회전자의 자속장벽의 크기를 결정하기 위해서 FEM을 이용하여 최적의 크기를 구하였으며, 회전자의 자속장벽에 자석을 삽입하여 토크특성을 개선할 수 있었다. 제안된 PMA-RSM 전동기는 자석만 사용한 IPM 형태의 전동기와 비교하였을 경우보다 9.85%정도의 토크 특성개선을 얻을 수 있었고, 제안된 전동기의 최대 토크 특성을 얻기 위해서 릴럭턴스 토크와 PM토크의 합성토크가 최대가 되는 시점, $114[\text{deg}]$,을 FEM을 통해서 알 수 있었으며, 회전자와 고정자 쇠교자속이 $90[\text{deg}]$ 가 되는 시점에 비해서 10.63%의 토크 특성을 개선할 수 있었다. 제안된 전동기는 일반적인 영구자석형 전동기에 비해서 높은 토크 밀도를 가지도록 설계가 가능하며 결과적으로 전동기를 소형화 시킴으로서 전체적인 시스템의 크기와 비용을 줄일 수 있다. 또한 저속의 영역에서 사용되는 전동기 응용뿐만 아니라 고속에서 사용되는 산업응용에서도 충분히 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Maxwell, Electrical engineering Simulation Software, Copyright 1984-2003, Ansoft Corporation.
- [2] W.L.Soong, T.J.E.Miller, "Design of a New Axially Laminated Interior Permanent Magnet Motor", Proceeding of annual meeting of IEEE Industrial Applications Society, 1993, pp.27-36

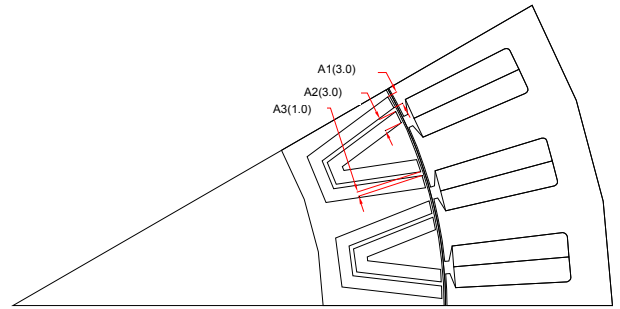


Fig. 3. The effect of the Iron layer width

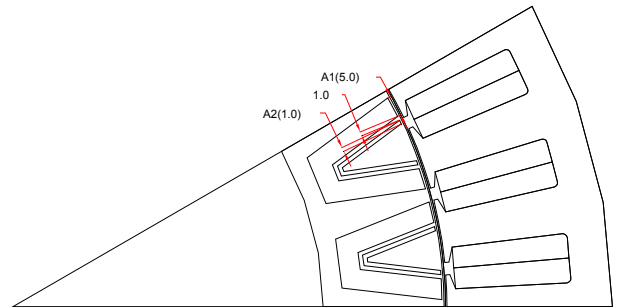


Fig. 4. The effect of the barrier ratio

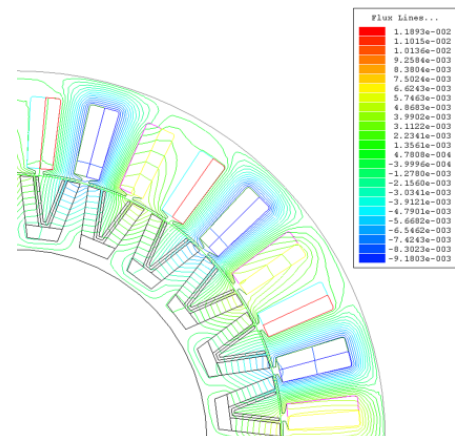


Fig. 5. The Flux path of proposed motor

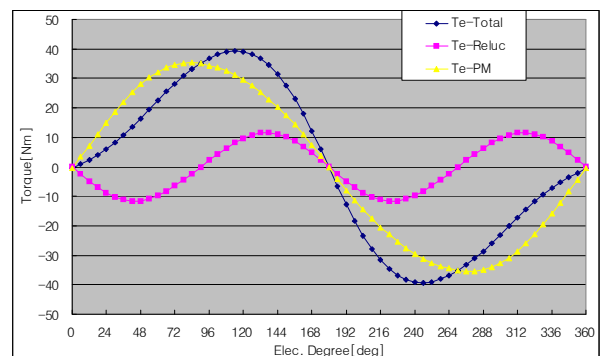


Fig. 6. The Flux path of proposed motor