

동기릴럭턴스 전동기의 국내·외 연구 및 개발 동향

김동훈, 김태영, 최종우, 김흥근
경북대학교

Tendency in Domestic and Foreign Research/Development of Synchronous Reluctance Motors

Dong-Hun Kim, Tae-Young Kim, Jong-Woo Choi and Heung-Geun Kim
Kyungpook National University

ABSTRACT

Recent interest in the synchronous reluctance motor has increased in possible applications such as home appliance, hybrid electric vehicles, etc. This paper presents a brief review of the research and development of synchronous reluctance motors, carried out up to now, from the designers' viewpoint. In addition, the key points in the design of synchronous reluctance motors and a new design method for innovating on their rotor structures are discussed.

1. 서론

1990년대 후반부터 학계 및 산업계를 중심으로 가전기기, 자동화기기, 이송장치 및 전기자동차 등에 많이 사용되고 있는 인버터 구동형 가변속 유도전동기 및 영구자석전동기의 대안으로 동기릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor: 이하 SynRM)에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 자속에 대한 이방성 특성을 지닌 비교적 간단한 회전자 구조를 갖는 SynRM이 구조적으로 영구자석이나 회전자 동봉(rotor bar) 등을 사용하지 않기 때문에 제작비가 저렴할 뿐 아니라 운전시 회전자부의 온도상승에 따른 영구자석의 감자 및 동손 발생이 없어 입력전류 당 일정 토오크 특성을 갖고 있기 때문이다. 또한 SynRM은 기존 인버터 구동형 가변속 유도전동기 및 영구자석전동기의 고정자 및 구동회로부 등을 공유할 수 있는 장점도 지니고 있다. 반면 SynRM은 주 토오크 발생을 릴럭턴스 토오크에 의존하고 있으므로 동일 출력대비 기존 영구자석기기에 비해 부피가 커지는 단점을 지니고 있다^[1, 8].

이러한 SynRM은 회전자에 배열되는 자속안내자(flux guide)와 자속장벽(flux barrier)의 형상 및

개수에 의해 결정되는 자속의 d축과 q축 사이의 동기 인덕턴스 비(Synchronous Inductance Ratio)에 의해 토크 및 역률 등의 주요 모터 성능이 결정된다. 지금까지 국내·외 SynRM에 대한 연구는 동기 인덕턴스 비를 최대화하고 아울러 고정자 치(teeth) 및 회전자 사이의 불균일한 릴럭턴스에 의해 나타나는 코깅토크(cogging Torque)를 최소화할 수 있는 회전자 구조설계에 집중되어 있으나 아직 상용화 수준의 결과를 내지 못하고 있다. 이는 기존의 연구들이 과학적인 설계기법 도입 및 전동기의 양산성을 고려한 실용적인 설계를 하지 못하고 있기 때문으로 사료된다.

본 논문에서는 SynRM에 대한 기존 국내·외 연구개발 동향을 전동기 설계관점에서 고찰하고 아울러 회전자의 동기 인덕턴스 비를 극대화 할 수 있는 새로운 회전자 구조설계에 대한 향후 연구방법을 제시하고자 한다.

2. 개발동향

2.1 회전자 구조

SynRM의 초기 출현은 1920년대까지 거슬러 올라간다. 그 동안 SynRM이 주목받지 못한 이유는 유도전동기에 비하여 동일 체적 조건 하에서 토크 및 효율 특성이 크게 떨어지기 때문에 비롯되었다. 그러나 근래 개발된 SynRM의 회전자 구조는 유도전동기의 특성을 충분히 능가할 수 있음을 여러 논문에서 실험을 통하여 증명하고 있다^[7, 8].

그림 1은 지금까지 개발된 SynRM의 대표적인 회전자 구조의 변천을 보여준다. 1920~1930년대 개발된 초기 1세대 회전자 구조는 그림 1(a)와 같고 이를 Kostko 회전자라 부른다. 회전자는 그림에서와 같이 d축의 자속 방향으로 다수의 자속안내자와 그 사이에 자속장벽을 갖는 구조로 되어 있다. 이러한 초기 SynRM의 회전자 구조는 낮은 동

기 인덕턴스 비로 인하여 동일 출력의 유도전동기에 비하여 그 체적이 상대적으로 매우 큰 특징을 갖는다.

1960년대 개발된 그림 1(b)의 2세대 회전자구조는 인버터를 이용한 구동을 적용하여 기동권선을 별도로 설치할 필요는 없었다. 그러나 여전히 5정도 내외의 낮은 동기 인덕턴스 비와 분절(segment)형태의 회전자 철심 구조를 적용하여 회전축에 고정하는데 제작 상 많은 어려움을 수반하였다.

근대적 개념의 3세대 회전자 구조는 1970년대 개발된 그림 1(c)와 같은 축 방향 적층구조를 갖고 있다. 축 방향으로 u 또는 v 형상을 지닌 철심을 반경 방향으로 적층한 구조로 7 이상의 동기 인덕턴스 비를 만들어 낼 수 있다. 이러한 SynRM의 회전자 구조는 유도전동기에 견주어 동등 이상의 출력을 낼 수 있음을 증명함으로써 비로소 산업체 및 학계의 관심을 유도하게 되었다.

그러나 축 방향 적층구조를 갖는 회전자는 여전히 볼트(bolt) 등을 이용하여 회전축에 고정해야 하는 제작 상의 단점을 지니고 있어 이를 보완한 횡축 방향으로 적층하는 그림 1(d)와 같은 회전자 구조가 개발되었다. 근래 개발 및 연구되고 있는 대부분의 회전자 구조는 그림 1(d)와 같고 최대 동기 인덕턴스 비를 구현할 수 있는 자속안내자 및 자속장벽에 대한 조합에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2000년대에 들어서면서 국외에서는 기존 유도전동기 뿐 아니라 영구자석전동기의 대체 전동기로서 SynRM에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. 그림 1(e)는 일본의 혼다 및 도요타에서 하이브리드 자동차의 견인전동기로서 개발하고 있는 영구자석 보조형식의 SynRM의 구조를 보여주고 있다^[8]. 이 전동기의 주 토크는 릴럭턴스 토크에 의하여 발생되며 추가적으로 영구자석에 의해 보조 토크를 얻는 방식을 채택하고 있다.

2.2 해석 및 설계기법

그 동안 SynRM의 해석 및 설계에는 동기기에 적용되는 Park's equation으로 불리는 d-q변환 원리가 주로 사용되었다. 다음 식들은 각각 d-q 변수에 의해 표현된 토크 및 역률에 대한 표현식이다^[2,3].

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

$$\tan \gamma = \sqrt{k} \left(\sqrt{1 + \frac{r_s^2}{X_d X_q}} + \sqrt{\frac{r_s^2}{X_d X_q}} \right) \quad (2)$$

여기서 P는 극수, r_s 는 고정자 권선저항, X는 리액턴스, $k=L_d/L_q$ 를 의미하며 첨자는 각각 d축 및 q축 방향 성분을 표시한다. 위 식에서 SynRM의 주요 특성들이 d축 및 q축의 인덕턴스 차와 비에 의해 결정됨을 볼 수 있다. 그러나 이러한 고전적인 전기기 해석법은 실제 회전자 구조 설계에 큰 도움을 주지 못 한다. 즉 식 (1)과 (2)를 이용해서는 SynRM에서 가장 큰 설계요소인 자속안내자 및 자속장벽의 개수 및 형상에 대한 정보를 얻을 수 없다.

따라서 최근에는 유한요소법을 이용한 전자장 해석기법을 동원하여 회전자 구조 설계에 대한 초기 연구가 시도되고 있으나 아직까지는 만족스러운 연구결과가 발표되지 않고 있다^[5].

2.3 성능비교

표 1은 정현파 전원에 의해 구동되는 11 kW급 유도전동기와 각각 세 가지 다른 회전자 구조를 갖는 SynRM의 특성을 비교하였다^[3]. 비교된 전동기들은 고정자 직경은 132 mm, 회전자 직경은 126

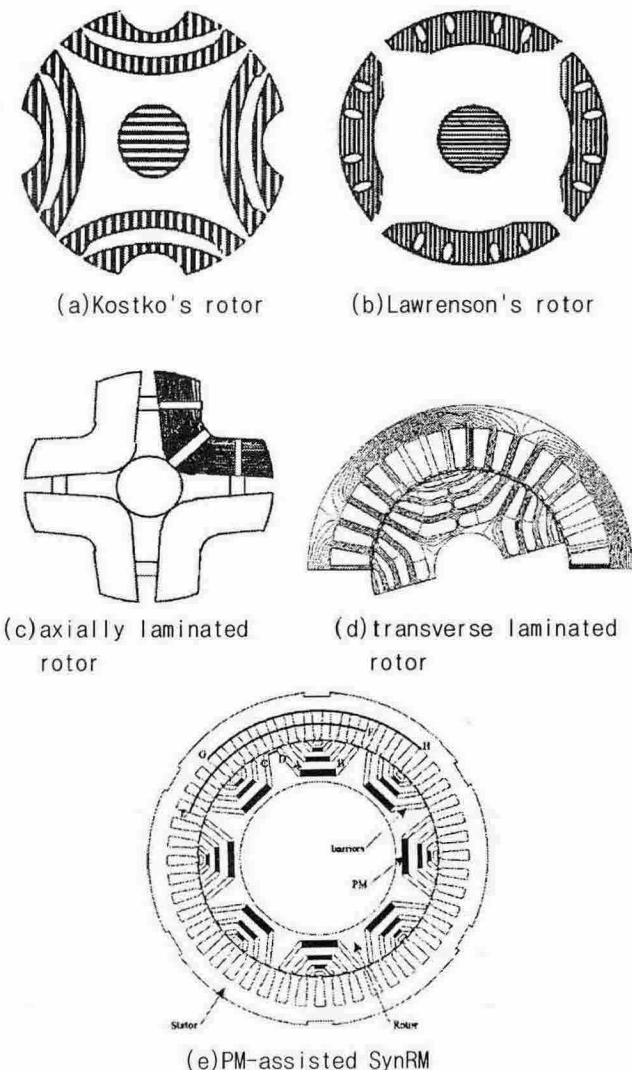


그림 1 다양한 SynRM 회전자 구조

Fig. 1 Various structures of SynRM's rotors

mm, 적층길이 203 mm, 공극길이 0.5 mm 및 36 고정자 슬롯을 갖고 있다. 표 1에서 다수의 자속장벽을 갖는 SynRM은 유도전동기에 비해 정격효율 측면에서 1 % 상승효과가 있음이 확인 되었으며 역률은 거의 동등한 수준임을 알 수 있다. 또한 전동기의 손실 측면에서도 유도전동기에 비해 SynRM이 적게 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

표 1 11 kW급 직경 132 mm 유도전동기와 SynRM 특성비교
Table 1 D132 induction and synchronous reluctance motors with 11 kW rating

parameter	IM	SI	MU	AX
Full load shaft power (KW)	11.0	11.0	11.0	11.0
Full load speed (rpm)	1439	1500	1500	1500
Full load torque (N · m)	73.0	70.03	70.03	70.03
KVA rating	14.38	22.68	14.44	14.36
Full load power factor	0.867	0.533	0.850	0.855
Full load efficiency	88.2	87.63	89.63	89.55
Total loss (W)	1473	1552	1272	1283
L_d/L_q		3.97	10.86	7.18

IM: induction motor

SI: single barrier motor

MU: transverse laminated motor (multiple barrier)

AX: axially laminated motor (multiple barrier)

3. 결론

현재 SynRM은 아직까지 유도전동기를 월등히 능가하는 만족스러운 성능을 발휘하지 못하고 있는 실정이다. 이는 SynRM의 주요 특성을 결정하는 회전자 구조설계에서 획기적인 설계기법을 사용하지 못 하기 때문인 것으로 사료된다.

따라서 본 논문에서는 향후 SynRM의 회전자 구조 설계 시 모터의 양산성을 고려하여 정밀전자장 해석도구와 결합한 위상최적설계(Topology Optimization) 및 형상최적설계(Shape Optimization) 등의 최신의 최적설계기법들을 동원한 체계적인 연구의 필요성을 제기하고자 한다. 우선 회전자부의 개념 설계 단계에선 정밀전자장 해석도구와 위상최적화 기법을 사용하여 회전자부에 위치하는 초기 자속안 내자 및 자속장벽에 대한 기본 형상, 위치 및 개수 등을 탐색한다. 이를 바탕으로 상세설계 단계에서는 정밀전자장 해석도구와 결합된 연속체민감도법(Continuum design sensitivity)을 이용한 형상최적 설계기법을 사용하여 회전자부의 외곽형상을 비롯

한 주요 내부형상에 대한 정밀 형상 최적설계가 수행되어야 한다. 아울러 기존의 유도전동기 및 영구 자석전동기와 다른 토크 발생원리를 갖는 SynRM의 최적의 운전성능을 실현하기 위하여 고성능 전력변환기 및 제어 알고리즘에 대한 연구도 필수적으로 수반되어야 한다.

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

참 고 문 헌

- [1] T. J. E. Miller, Alan Hutton, Calum Cossar and David A. Stone, "Design of a Synchronous Reluctance Motor Drive", IEEE transactions on industry application, Vol. 27, No. 4, pp.741-749, 1991, July.
- [2] D. A. Staton, T. J. E. Miller and S. E. Wood, "Maximizing the saliency ratio of the synchronous reluctance motor", IEE Proceeding-B, Vol. 140, No. 4, pp. 249-259, 1993.
- [3] Takayoshi Matsuo, T. A. Lipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, pp. 359-365, 1994.
- [4] D. A. Staton, W. L. Soong and T. J. E. miller, "Unified Theory of Torque Production in Switched Reluctance and Synchronous Reluctance Motors", IEEE Transactions on industry application, Vol. 31, No. 2, pp. 329-337, 1995, March.
- [5] I. E. Chabu, J. R. Cardoso, V. C. Silva, S. I. Nabeta and A. Foggia, "A new design technique based on a suitable choice of rotor geometrical parameters to maximize torque and power factor in synchronous reluctance motors: Part II -Finite-element analysis and measurements", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 605-609, 1999, September.
- [6] Alfredo Vagati, Aldo Canova, Mario Chiampi, Michele Pastorelli, and Maurizio Repetto, "Design Refinement of Synchronous Reluctance Motors Through Finite-Element Analysis", IEEE Transactions on industry application, Vol. 36, No. 4, pp. 1094-1102, 2000, July.
- [7] Masayuki Sanada, Kenji Hiramoto, Shigeo Morimoto and Yoji Takeda, "Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor Using an Asymmetric Flux Barrier Arrangement", IEEE Transactions on industry applications, Vol. 40, No. 4, pp. 1076-1082, 2004, July.
- [8] Ion Boldea, Lucian Tutelea and Cristian Ilie Pitic, "PM-Assisted Reluctance Synchronous Motor/Generator (PM-RSM) for Mild Hybrid Vehicles: Electromagnetic Design", IEEE Transactions on industry applications, Vol. 40, No. 2, pp. 492-498, 2004, March.