

압축기용 단상 전동기의 회전자 자계구조 변경에 따른 성능에 관한 연구

A Study on the Performance Improvement of Rotor Structure Modifications in Single-Phase Motors for Compressor Applications

정태욱*

Tae-Uk Jung*

〈Abstract〉

Contemporary power systems demand efficient and sustainable technologies. Single-phase induction motors, while widely used, face efficiency challenges due to inherent rotor losses. Proposed solutions include the Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM), leveraging permanent magnets for enhanced energy density but facing demagnetization and cost issues. Alternatively, the Line-start Synchronous Reluctance Motor (LSRM) operates as a hybrid motor without permanent magnets, reducing rotor losses and potentially improving efficiency. This paper focuses on designing an LSRM rotor for air conditioner compressors, analyzing start-up characteristics and efficiency through finite element analysis. A comparative study with single-phase induction motors provides insights for future motor technology selection, balancing efficiency and other requirements.

Keywords : Compressor, Single Phase, Induction Motor, LSRM, Efficiency

* 정회원, 교신저자, 경남대학교 전기공학과, 정교수
E-mail: tujung@kyungnam.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University, Professor

1. 서론

현대 전기 동력 시스템은 지속 가능한 에너지와 효율적인 전력 변환 기술에 대한 수요를 충족하기 위해 지속 발전하고 있다. 단상 유도 전동기는 간단하고 비교적 생산성이 용이한 특성으로 상용 전원을 활용해 기동 및 운전이 가능해 가전 분야 등에서 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 전동기는 회전자 슬립으로 인한 손실과 회전자 동손으로 인한 효율 제약이 따른다.

최근 수년간, 이러한 문제를 극복하기 위한 기술적 대안 중 하나로 직립 기동형 영구자석 동기기(Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor; LSPMSM)가 소개되었다. 이 기술은 회전자에 영구자석을 도입하여 출력 에너지 밀도를 높이고, 동기속도 운전으로 회전자 도체바의 동손을 감소시킬 수 있다. 그러나 이 기술은 큰 순시 기동 전류에 따른 영구자석 불가역 감자 및 고온 운전시 효율 저하가 큰 특성이 있으며 영구자석으로 인해 비용이 증가할 수 있는 단점이 있다[1][2].

한편, 직립 기동형 동기 릴럭턴스 전동기(Line-start Synchronous Reluctance Motor; LSRM)는 영구자석 없이 운전하며 유도 기동과 릴럭턴스 토크를 결합한 하이브리드 형태이다. 이러한 구조로 인해 정상 운전 시에는 회전자의 동손 감소로 인한 효율 향상이 가능하며, 간단한 철심과 도체바 구조로 비용적인 측면에서도 단상 유도전동기와 큰 차이가 나지 않는다[3].

본 논문은 공조기 압축기용 LSRM의 성능에 영향을 미치는 회전자 구조를 유한요소 해석을 통해 설계하고, 일반적인 단상 유도전동기와 비교하여 두 기술의 장단점을 명확히 하고자 한다.

2. LSRM의 구동원리와 특성

Fig. 1은 유도전동기, SynRM, 그리고, LSRM의 회전자 구조를 각각 나타낸다. Fig. 1(a)의 유도전동기의 회전자는 도체바에 의해서만 구성되어 있으며 Fig. 1(b)의 SynRM의 회전자 구조는 자속장벽으로만 구성되어 있다. 그리고, Fig. 1(c)의 LSRM은 Fig. 1(a), (b)의 구조를 결합하여 도체바와 자속장벽이 동시에 존재하는 구조를 나타내고 있다.

LSRM은 기동 특성이 우수한 유도전동기의 회전자에 SynRM(Synchronous Reluctance Motor)에서 돌극 구조를 위한 자속장벽을 삽입한 구조로서 유도전동기와 SynRM의 특성을 동시에 갖는 하이브리드형 전동기이다.

단상 전원을 인가하면 LSRM은 유도기와 동일한 원리로 고정자 자속의 변화에 의해 도체바에 유기되는 맴돌이 전류(eddy current)와 고정자 자속에 의해 기동이 된다. 그리고 동기속도 부근에서는 고정자 자속 주파수 대비 슬립이 크게 떨어지므로 유도 토크는 급격히 떨어지면서 동기속도에서는 자속장벽에 의한 릴럭턴스 토크에 의해 동기속도로 회전된다. 그러므로, 기동시에는 유도전동기의 원리를 이용하며 정상 운전시에는 돌극형 동기전동기의 원리를 이용하는 전동기이다.

LSRM은 이론적으로 이상적인 조건에서는 정상 운전시 고정자 자속과 동기속도로 회전하므로 도

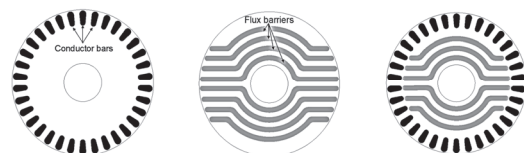


Fig. 1 Rotor structure of each motor (a) induction motor (b)SynRM (c) LSRM

체바에 유기되는 전류가 없으므로 회전자 동손이 없어진다. 그러므로 단상 유도기 대비 자기포화손은 증가하지만 회전자 동손과 회전자에서의 와류손이 크게 저감되므로 효율이 개선될 수 있다.

Fig. 2는 각각 LSRM의 구조를 더 상세히 보여주고 있다. 고정자는 단상 유도전동기와 동일하게 주권선과 보조권선이 공간적으로 90(deg.)의 위상차로 배치되어 있으며 회전자는 도체바와 자속장벽으로 구성되어 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 LSRM의 정상상태 특성 향상을 위해서는 d-q축 인덕턴스의 차이인 돌극비를 충분히 확보하여야 한다.

이를 위해서는 d축 자속은 전체 자극 표면을 따라 흘러 d축 인덕턴스(자화인덕턴스)를 충분히 확보하여야 하며, q 자속은 적게 흐르도록 q축 인덕턴스를 최소화하여야 한다.

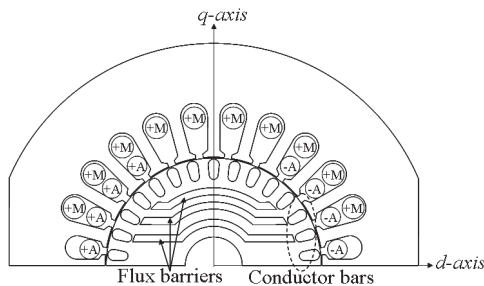


Fig. 2 Structure of LSRM

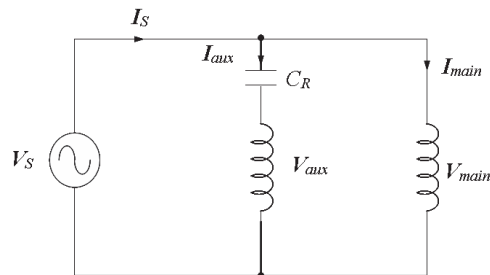


Fig. 3 Wiring diagram of LSRM

그러나, 릴럭턴스 토크 확보를 위한 자속장벽은 전체 자로면적의 저감과 자기회로의 불평형의 원인이 되어 균일한 기동 토크 확보의 어려움을 초래할 수 있다. 따라서, 도체바의 개수 및 형상 결정은 LSRM의 자기회로 설계에 있어서 가장 중요한 설계 변수가 된다.

Fig. 3은 LSRM의 구동을 위한 전원과 권선의 결선도를 보여주고 있다. 단상 유도전동기와 동일한 구조로서 Fig. 3에서와 같이 단상 전원과 연결된 주권선과 커패시터와 직렬로 연결된 보조권선은 병렬로 연결되어 있다. 여기서, V_s, I_s 는 각각 전동기의 입력 전압과 전류, V_{main}, I_{main} 은 각각 주권선 측의 전압과 전류, V_{aux}, I_{aux} 는 각각 보조권선 측의 전압과 전류를 나타내며, C_R 은 구동 커패시터를 나타낸다.

Fig. 4는 단상유도기와 LSRM의 속도-토크 특성의 비교를 보여주고 있다.

LSRM은 유도기와 동일하게 회전자 도체바에 유기되는 전류와 자속에 의해 기동이 되고, 기동 후에는 돌극형 동기전동기로 동기속도 회전을 하므로 속도의 변동이 없음을 알 수 있다.

LSRM은 이론적으로 동기속도로 운전하는 정상 운전시 회전자 도체바에 유기되는 전류가 없으므로 회전자 동손이 없어진다. 그러므로 단상 유도전동기 대비 자기포화손은 증가하지만, 회전자 동손과 회전자에서의 와류손이 크게 저감되므로 효율이 개선될 수 있다.

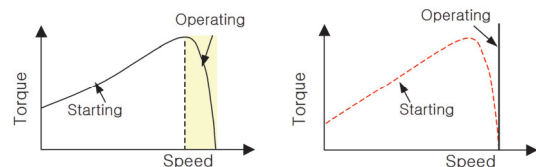


Fig. 4 Speed-torque characteristics of single phase induction motor(a) and LSRM(b)

3. 주요 설계 변수에 따른 특성 분석

3.1 LSRM의 회전자 설계 최적화

LSRM의 동기속도에서의 토크는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 토크 성능은 d-축 및 q-축의 인덕턴스의 차이에 영향을 받는다.

$$T = \frac{m}{4} p (L_d - L_q) I_s^2 \sin(2\delta) \quad (1)$$

여기서 m은 상(phase) 수, p는 폴 페어(pole pair) 수, L_d , L_q 는 각각 d축 및 q축 인덕턴스, δ 는 토크각을 나타낸다.

압축기에서 요구하는 설계 제원은 Table 1과 같으며, 동일 조건에서 최적 설계된 LSRM과 단상 유도전동기의 구동 특성을 Fig. 5와 같은 유한요소 해석을 통해 각각 비교하였다.

Table 1. Design specification

Parameter	Unit	Value
Out diameter	mm	139
Stack length	mm	105
Pole numbers	-	2
Rated output	kW	1.6
Voltage	Vrms	230
Frequency	Hz	60

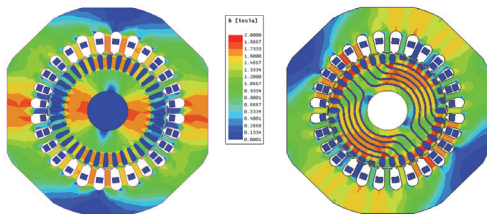


Fig. 5 Flux density distribution through finite element analysis, (a)single phase induction motor and (b)LSRM

Fig. 6은 LSRM의 성능을 확보하기 위한 전체 설계 변수를 나타내었다. LSRM은 회전자 내부에 자속 장벽(flux barrier)을 가지는 구조이므로 회전자 자로의 유효 폭 측면에서 불리하다. 따라서 자기포화를 줄이기 위해 유도전동기의 회전자 직경보다는 크게 설계하는 것이 일반적이다. 이러한 경우에 권선을 위한 슬롯의 면적은 상대적으로 작아지므로 1차측 동손은 유도전동기 대비 불리함을 예상해 볼 수 있다.

공극은 압축기 시스템의 조립 공차 등을 고려하여 유도전동기와 동일하게 0.5 mm를 적용하였다.

Fig. 7은 Fig. 6의 주요 설계 인자의 로직 트리

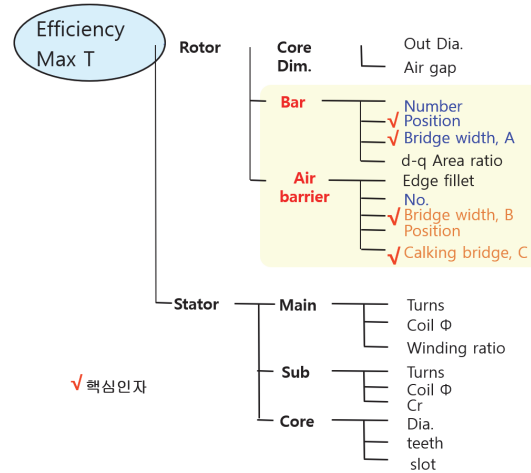


Fig. 6 Design factors of LSRM

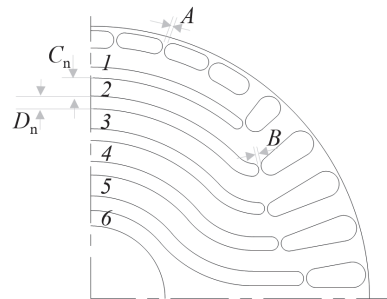


Fig. 7 Rotor design parameters of LSRM

(Logic Tree)를 근거로 하여 회전자 구조에서의 주요 설계변수를 정리하였다.

Fig. 7에서 자로 폭 C와 자속장벽 폭 D는 돌극비 확보와 d-축의 자속량 확보를 위해 주요한 설계 변수이다. 본 논문에서는 회전자 도체바의 개수와 배치를 고려하여 자속장벽 D는 5개, 자로 C는 6개를 기준으로 선정하였다.

Fig. 8은 각각의 자속장벽 폭 D_n을 모두 동일한 임의의 치수로 설계한 경우, 그 치수에 따른 효율에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

Fig. 8에서 1.6 kW 및 2.6 kW에 대해 부하 조건에 따른 최대 효율점이 자속장벽의 폭에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있다.

이는 효율이 토크 각의 영향을 많이 받기 때문인데 자속장벽 폭을 늘려 돌극비를 키우는 설계를 하게 되면 저 부하에서는 토크각이 작게 되어 효율이 저하되고 고부하에서는 효율이 개선된다. 반대로 돌극비를 줄이게 되면 최대 토크가 작게 되어 부하 대응 능력이 떨어진다. 따라서 최대 부하 능력이 요구치에 부합하는 수준의 돌극비 설계가 필요하다.

본 논문에서는 최대 부하 요구 조건을 고려하여 1.1 mm로 선정하였다.

다음은, 이 설계 조건에서 각각의 자로 C_n을

아래의 Table 2와 같은 조합으로 설계 배치하였을 때의 효율 특성을 해석하였다.

이때, 자로는 6개이며, 앞에서 언급한 바와 같이 자로 사이의 각각의 자속장벽 D_n은 1.1 mm이며 전체 자로의 합은 동일하다.

이에 대한 설계 해석 결과는 Fig. 9와 같이 나타났다. 자로 폭 C_n의 배치 설계 조합에 대한 유한요소 해석을 통해 자속밀도가 균일하고 각 경우에 대한 효율을 산출한 후 가장 좋은 치수로 선정하였다.

모델별로 약 0.2 % 수준의 미소한 효율 차이로 나타났으며, 각 출력별로 가장 좋은 사양으로 Ver. 1을 선정하였다. 이를 LSRM 모델의 설계, 제작에 활용하였다.

Table 2. Design combination of each model

Design Parameter	Length [mm]			
	Ver.1	Ver.2	Ver.3	Ver.4
C1	2.85	2.85	2.95	2.95
C2	2.65	2.75	2.85	2.95
C3	2.65	2.75	2.75	2.85
C4	2.65	2.65	2.65	2.85
C5	2.65	2.55	2.45	2.25
C6	2.65	2.55	2.45	2.25
합계	16.10	16.10	16.10	16.10

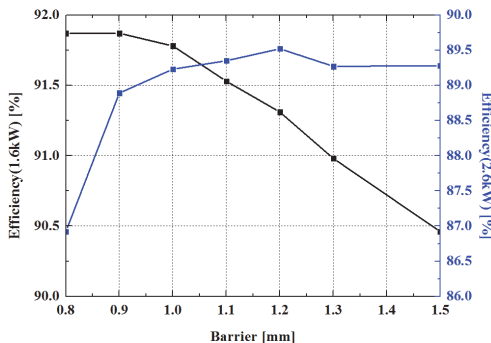


Fig. 8 Efficiency characteristics according to D

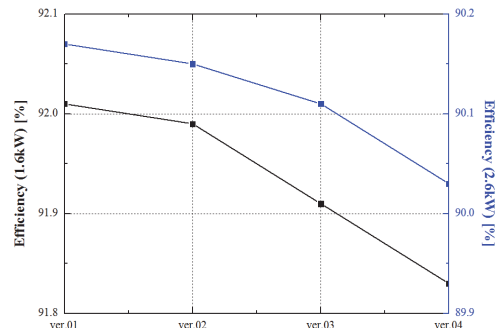


Fig. 9 Efficiency characteristics according to design combination of Table 2

3.2 단상 유도전동기와 LSRM의 효율비교

공조기 압축기용 단상 유도전동기와 단상 LSRM의 객관적 구동특성 비교를 위해, 기저 모델인 단상 유도전동기와 동일한 체적에서의 LSRM의 설계 최적화를 진행하였다. 즉, 이는 재료비는 거의 동일한 조건임을 의미한다.

각 전동기의 성능 해석 결과를 정격출력 1.6 kW와 과부하 출력 2.6 kW에 대해 각각 비교해 Table 3에 나타내었다.

성능해석 결과로부터 LSRM의 효율은 단상 유도전동기 대비 정격 1.6kW에서는 0.68 %, 과부하 조건 2.6 kW에서는 0.11 % 개선되고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 10의 상세 손실에 대한 분석비교를 보면 LSRM의 1차 동손은 유도전동기 대비 증가하는 것으로 나타나며 2차 동손은 유도전동기 대비 절반 이하로 줄었지만, 동기속도임을 고려하면 일정량이 발생하고 있음을 알 수 있다.

LSRM의 1차 동손의 증가 원인은 회전자 자속장벽의 추가로 인한 회전자의 자기포화가 심하여 단위 전류당 발생 토크가 유도전동기 대비 상대적으로 작은 것으로 추정된다.

회전자의 2차 동손은 동기속도임에도 발생하고 있는 이유는, 단상 전동기의 권선 배치로 형성되는 맥동 자속의 백워드(backward) 자기장과 동기 속도에서의 토크리플 등에 의한 순시 속도 변화에 따라 2차측에 지속적으로 전류가 유기되는 것이 원인으로 분석된다.

이상의 결과로부터 단상 유도전동기의 2차측 동손이 충분히 큰 경우에는, 유도전동기 대신 LSRM을 적용하는 것이 효율 관점에서 더욱 개선의 폭이 커질 것으로 판단된다.

Table 3. Comparison of performance analysis results

항목	1.6kW		2.6kW	
	IM	LSRM	IM	LSRM
Pin [W]	1744.6	1732.7	2875.2	2859.8
Pout [W]	1601.2	1602.2	2612	2601.2
Torque [Nm]	4.3	4.25	7.1	6.9
Speed [rpm]	3550	3600	3513	3600
V _s [Vrms]	230	230	230	230
Freq. [Hz]	60	60	60	60
I _s [Arms]	8.07	8.78	13.04	14.24
I _{main} [Arms]	6.37	6.42	10.69	12.19
I _{aux} [Arms]	5.12	5.74	4.9	5.51
Eff. [%]	91.78	92.47	90.85	90.96

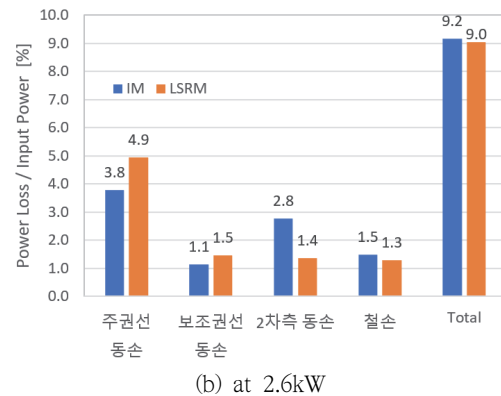
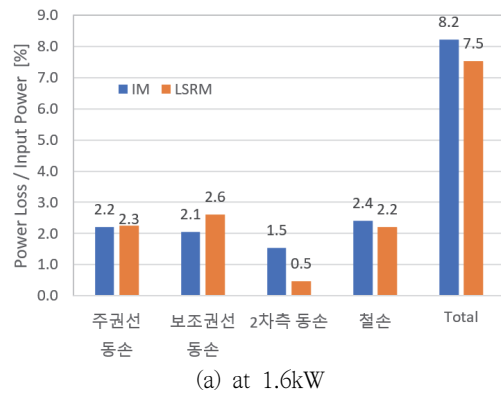


Fig. 10 Classification and comparison of losses

3.3 결과 고찰

3.3.1 최대토크 능력 비교

Table 4는 각 전동기의 최대 토크를 시뮬레이션 한 결과로서, LSRM의 최대토크는 정격 대비 2배 이상의 마진을 확보하고 있어 안전한 수준이다. 그러나, 단상 유도기 대비 차이가 크다.

이는 LSRM의 회전자에서는 자속장벽이라는 추가적인 공간이 있어야 하므로, 유효 자료가 상대적으로 유도전동기보다 좁아지므로 과부하 영역에서 자기포화도 증가에 따라 L_d 가 급격히 저하됨에 따른 것으로 분석된다.

공조기용 압축기의 경우 실외 온도 조건에 따른 냉매 압력차가 전동기의 부하로 작용하므로, LSRM의 최대토크 저하 특성은 극악한 과부하 운전에서는 압축기의 운전 특성을 다소 제한 할 수도 있다[4].

Table 4. Maximum torque comparison

	IM	LSRM
Max. torque [Nm]	18.7	9.5
Ratio to rated torque	4.3	2.2

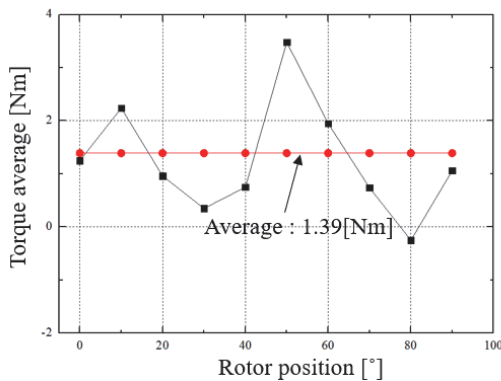


Fig. 11 Starting torque by initial rotor position

3.3.2 기동 안정성 비교

단상 유도전동기와는 달리 LSRM의 경우 초기 기동시 자속장벽으로 인해 회전자와 고정자 권선과의 위치 관계에 따라 기동 토크가 달라지며, 회전자의 초기 위치에 따라 음의 토크가 발생하는 영역이 발생하기도 한다.

이를 최대한 극복하기 위해서는 회전자의 도체바의 면적 설계가 매우 중요하며 일반적으로 d축에 위치한 도체의 면적을 q축에 위치한 도체의 면적보다 상대적으로 크게 설계하는 것이 문제 해결에 도움을 줄 수 있다[5]. 하지만 구조의 복잡성으로 위치에 따른 기동토크의 편차는 불가피하며 이러한 점은 압축기의 기동 신뢰성에 문제를 일으킬 수 있다.

Fig. 11은 최종 설계모델의 회전자 위치별 기동 토크의 크기를 나타낸 것으로 최소 -0.25 Nm에서 최대 3.48 Nm로 평가되었고, 만약 기동토크가 음의 값을 가지는 위치에서 초기 기동이 될 경우 기동 실패의 원인으로 작용할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 공조기 압축기용 단상유도전동기와 LSRM의 성능에 대해 시뮬레이션을 통해 효율, 최대토크, 기동 성능 등을 살펴보았다.

효율 측면에서는 LSRM의 원리상 동기속도로 회전하기 때문에 단상 유도전동기의 2차 동손 부분을 저감하는 것이 가능하나 완전히 제거할 수는 없고 국부적인 자계의 불평형 및 변동으로 인해 약 정격부하에 최적으로 튜닝 시 66%의 저감이 가능한 것으로 나타났다. 하지만 회전자 자속장벽 등의 추가로 인해 자기포화도가 단상 유도전동기보다 높고 회전자의 크기가 상대적으로 커지기 때문에 1차측 권선을 위한 공간적 제약의 심화로 1

차측 동손은 증가하여 최종 정격에서 효율은 0.68 %의 개선이 가능하였다.

반면 최대토크는 단상유도전동기 대비 50 % 수준으로 낮게 평가되었고 이는 다양한 부하 조건에서 단상 유도전동기 대비 불리한 요소로 작용한다고 볼 수 있다. 또한 초기 기동시 회전자의 위치에 따라 기동 토크가 달라질 수 있어 기동 신뢰성 확보가 매우 중요하다.

사 사

이 연구결과물은 2020학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- [1] 강규홍, 남혁, 홍정표, “단상영구자석형 유도동기기의 정상상태 특성해석”, 대한전기학회논문집, vol. 52B, no. 2, pp. 53-60, 2003.
- [2] 정대성, 김승주, 이진현, 최재학, 이주, “단상 유도형 동기전동기(LSPM)의 특성해석에 관한 연구”, 한국조명전기설비학회 논문지, vol. 21, no. 3, pp. 125-131, 2007.
- [3] 이중호, “가전용 340W급 동기형 릴렉턴스 전동기 설계 및 효율특성 실험”, 대한전기학회논문집, vol. 52B, no. 2, pp. 39-52, 2003.
- [4] 심장호, 주정훈, 엄상준, “Compressor용 단상유도전동기의 부하 Matching 설계”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp. 807- 809, 2003.
- [5] 정태욱 외, “LSRM의 기동 안정성 개선을 위한 도체바 설계”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp.1168-1170, 2005.

(접수: 2024.01.31. 수정: 2024.02.19. 게재확정: 2024.02.26.)