

횡방향 성층형 회전자를 가지는 동기형 릴럭턴스 전동기 설계

이지영, 남혁, 이근호, 홍정표, 장기찬*
 창원대학교 전기공학과, 그린모텍(주)

Design of Synchronous Reluctance Motor with Conventional Laminated Rotor

Ji-Young Lee, Hyuk Nam, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Ki-Chan Chang*
 Changwon National University, Green MoTech Co.

Abstract - This paper deals with design of Synchronous Reluctance Motor with conventional laminated rotor for driving an air conditional compressor in a vehicle. To design both stator and rotor, design parameters, such as laminated axial length, rotor diameter, resistance and inductance are considered. The design variables are selected to get the highest power by analyzing the characteristics. The current angle in which torque is maximum is accomplished by finite element method(FEM).

따라서, 본 논문에서는 자동차 에어컨 컴프레서 구동용 전동기의 요구 조건을 만족하는 횡방향 성층형 회전자를 가지는 SynRM을 설계하도록 한다. 기존의 SynRM 설계에 관련된 논문들과는 달리, 주어진 설계조건으로 고정자와 회전자를 모두 설계하고, 축방향 길이, 권선 저항, 회전자 형상과 같은 각 설계 파라미터의 변화에 따른 특성을 분석하도록 한다. 제한된 일력조건에 대해서 최대 토크를 발생시키는 설계 파라미터 값을 찾고, 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 이용한 비선형 해석을 통해서 전류 위상 각을 찾도록 한다.

1. 서 론

환경문제가 심각하게 고려되고, 전기자동차에 대한 관심이 높아짐에 따라, 자동차 부품을 유압식에서 전동식으로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 전동식 조향 보조장치(Electrical Power Steering, EPS)에 대해서는 많은 논문과 연구 결과가 발표되고 있으나, 국내에서는 아직 실용화가 이루어지지 못하고 있다. 단위 회전자 체적당 토크(Torque per Rotor Volume, TRV)가 높고, 일반적으로 5[%] 미만의 토크 리플을 요구하며, 고온의 환경에서 운전이 되어야 하기 때문이다. 이와 같이 열악한 환경에서 우수한 운전 특성을 가질 수 있는 전동기로서는 영구자석 전동기와 릴럭턴스 전동기를 들 수 있으나, 릴럭턴스 전동기는 토크리플 측면에서 요구사항을 만족시키기 어렵다.

그러나, 출력과 효율, 내환경성 면에서 모두 우수한 특성을 가지는 릴럭턴스 전동기에 대한 지속적인 연구가 필요하며, 이를 효과적으로 응용하기 위한 연구분야로서 토크리플이 크게 문제가 되지 않는 에어컨 컴프레서에 대해서 고려해 볼 수 있다. 논문 [1]에서는 일반 에어컨 컴프레서 구동용 전동기로서 여러 가지 종류의 전동기를 비교, 분석하고 그 중에서 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)와 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor, SynRM)를 그 응용분야에 적합한 것으로 판단하고 있다. SynRM은 영구자석을 사용하지 않기 때문에 IPMSM에 비해서는 효율이 낮으나, 다른 전동기, 특히 유도기에 비해서는 높은 효율과 역률을 가지며, 제작비용 또한 저렴하다[1].

SynRM은 성층 방법에 따라 축방향 성층형과 횡방향 성층형으로 분류된다. 축방향 성층형 회전자의 경우, 들극비는 증가하지만, 구조가 복잡하고 축에 회전자 철심을 고정시켜야 되므로 횡방향 성층형에 비해 제작이 어렵고 비용이 증가하며, 고정자 슬롯 형상에 따라 회전자에서 발생하는 손실이 증가될 수 있다[2]. 이에 비해 횡방향 성층형 SynRM은 제작이 비교적 용이하고, 고정자의 슬롯으로 인해 발생하는 토크 리플을 스류를 이용해 개선시킬 수 있으며, 축방향 성층형 못지 않은 높은 들극비를 갖도록 설계가 가능하므로 최근 국내외적으로 개발이 활발하다.

2. 본 론

2.1 설계 순서

표 1은 자동차 에어컨 컴프레서 구동용 전동기에 대한 설계 조건이다. 자동차의 배터리 전압은 최근 국내외적으로 검토되고 있는 전압의 최대 값인 42[V]로 정하였다. 전동기 설계 조건과 극수 및 예상 출력을 결정하여 설계 제원이 구성되면, 그림 1의 순서로 설계를 진행한다.

표 1. 전동기 설계 조건

사 양	값
전 원	DC 42V
정격 전류	100 A
최대 전류	110 A
운전 온도	120 °C
속 도	3500 rpm
전동기 외경	110φ

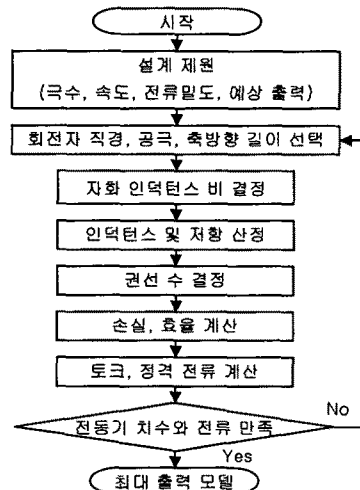


그림 1. SynRM 설계 순서

처음 결정되어야 하는 설계 변수는 회전자 직경과 공극, 축방향 길이이다. 이 파라미터가 결정되고 나면, 공극 길이와 극 간격에 의해서 d, q축 자화인덕턴스비 k_{dm1} , k_{qm1} 을 결정할 수 있고[3], 이 비의 정의로부터 d, q축 인덕턴스 L_{dm} 과 L_{qm} 을 다음의 관계 수식으로 부터 산정 할 수 있다[4].

$$k_{dm1} = \frac{L_{dm}}{L_m}, \quad k_{qm1} = \frac{L_{qm}}{L_m} \quad (1)$$

$$L_m = \frac{6\mu_0\tau L(P_1 q n_s k_{wl})^2}{\pi^2 P_1 g k_c (1 + k_s)} \quad (2)$$

μ_0 는 공기의 투자율, τ 는 극간격, L 은 축방향 길이, P_1 은 극쌍수, q 는 상수, n_s 는 슬롯당 도체수, k_{wl} 은 권선계수, g 는 공극 길이, k_c 는 카터계수, k_s 는 포화계수이다.

논문 [3]에서는 축방향 성층형 SynRM에 대해서 공극 길이에 따른 자화인덕턴스비를 산정한 것이나, 횡방향 성층형 SynRM의 초기 설계에 있어서, 미지의 값을 결정하기 위한 판단의 지표로 사용될 수 있다.

자화 인덕턴스 비가 결정된 후, 권선의 인덕턴스 및 저항을 권선수로 표현하고, 전압 방정식으로부터 이 값들을 산정할 수 있다. 설계 변수 값들을 결정하기 위한 자세한 설계 수식들은 [4]의 내용을 참고로 할 수 있으며, 산정된 파라미터로부터 정격전류를 재 계산하여 제한된 전동기 치수와 전류를 만족하는지에 대한 여부를 확인할 수 있다.

2.2 설계 변수에 따른 출력 특성

주어진 설계조건에서 최대 출력을 얻기 위하여 축방향 적층 길이, 회전자 직경, 도선 단면적, 권선 계수와 고정자 및 회전자의 슬롯 형상을 설계 변수로 보고, 일정한 입력과 속도 3500[rpm]에서 설계 변수의 변화에 따른 토크의 추이를 보았다.

그림 2는 축방향 적층길이 변화에 따른 토크의 양상을 본 것이다. 적층 길이는 증가하나, 입력은 일정하므로 80 [mm] 이상에서는 토크가 더 이상 크게 증가하지 못하고, 저항과 인덕턴스의 증가로 인하여 110[mm] 이상에서는 오히려 감소하기 시작한다. 그림 3~그림 5에서 다른 설계 변수들의 변화와 함께 축방향 적층 길이를 같이 고려했을 때에도, 동일한 양상을 가진다.

그림 3은 회전자 직경의 변화에 따른 토크 양상을 본 것이다. 회전자 직경이 증가할수록 돌극비가 증가하고 [4], 힘을 받는 회전반경이 증가하므로 토크가 증가하나, 고정자 외경이 제한되어 있으므로 점적률이 함께 고려되어야 한다. 슬롯 점적률을 40[%]로 제한 할 때, 회전자 직경은 65[mm]로 제한된다.

권선 저항에 따른 토크 양상은 그림 4에서 보여주고 있다. 슬롯의 점적률에 의해서 최대 도선 단면적과 그에 따른 최소 저항 값이 결정되고, 도체의 전류밀도에 의해서 최소 도선 단면적과 그에 따른 최대 저항 값이 결정된다. 슬롯의 점적률 40[%], 도체의 전류밀도 $9[A/mm^2]$ 이하를 만족하는 범위에서, 저항이 증가할수록 일정한 전압에 대해서 입력 전류가 감소하게 되므로, 전반적으로 토크는 감소하게 된다.

그림 5는 인덕턴스 변화에 따른 토크를 본 것이다. 식 (1)과 식 (2)로부터 산정된 d, q축 인덕턴스를 기준으로, 인덕턴스 비인 돌극비는 일정하게 유지하면서, d, q축 인덕턴스 값을 동시에 증감시켰다. 식 (2)에서 알 수 있듯이, 인덕턴스는 축방향 길이와 권선 계수, 고정자 및 회전자 슬롯 형상에 의해서 결정되는 카터계수의 영향을 받으며, 회전자 자속장벽의 개수와 형상에 의해서도 큰

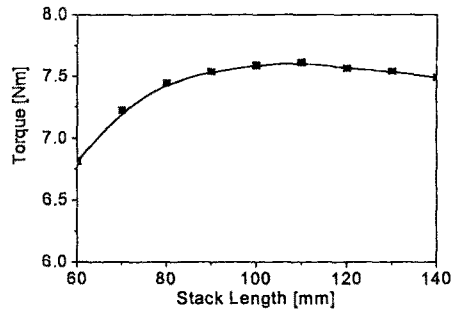


그림 2. 축방향 적층 길이에 따른 토크

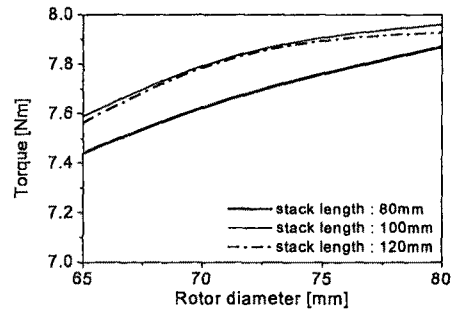


그림 3. 회전자 직경과 축방향 적층 길이에 따른 토크

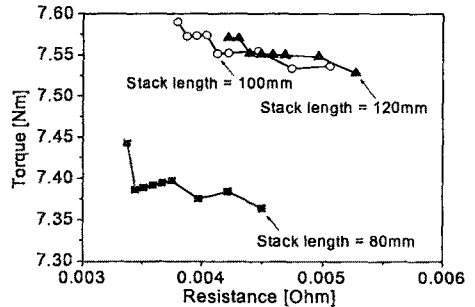


그림 4. 축방향 적층 길이와 저항에 따른 토크

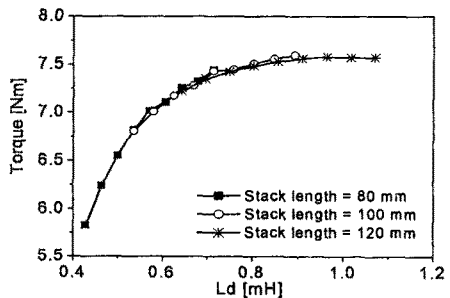


그림 5. 축방향 길이와 인덕턴스 변화에 따른 토크

영향을 받는다[5]. 인덕턴스 비 또는 차가 증가할수록 SynRM의 출력이 증가한다는 사실은 일반적으로 알려진 사실이나, 이 값들을 증가시키기 위하여 인덕턴스를 증가시키는 데는 한계가 있다. 그림 5에서 보듯이 인덕턴스가 증가하면, 결론적으로 일정한 입력 하에서 임피던스가 증가하므로 토크가 더 이상 증가하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

2.3 설계 결과

이상의 설계 변수 변화에 따른 출력특성을 분석하여 회전자 외경, 축방향 길이 및 고정자에 대한 설계를 할 수 있었다. 그러나, 횡방향 성층형 회전자의 상세 설계는 설계 수식에서 결정할 수 없는 값이므로, FEM을 이용한 해석적 방법을 통해서 결정해야 한다. 논문 [5]에서는 이에 대한 다양한 시도를 보여주고 있으며, 그림 6은 본 논문에서 설계된 전동기에 대해 논문 [5]에서 제시하는 방법들을 적용하여 해석한 것의 일부를 보여주고 있다. 회전자 단면의 너비와 자속장벽의 너비가 1: 0.8일 때, 자속장벽 수가 3개 일 때, 정격 전류에서 가장 높은 돌극비와 출력을 가졌다. 전동기 설계 결과는 그림 7과 표 2와 같다. TRV가 약 30[kNm/m³]으로 자기회로가 포화된 상태이므로 돌극비는 최대 4.52로 선정되었다.

표 3은 설계된 전동기의 부하각에 따른 특성을 주요 부하각에 대해서만 나타낸 것이다. 정격 전류와 최대 전류에서 효율은 모두 90% 이상이며, 정격전류에서 출력은 약 2.4[kW], 최대 전류에서 출력은 2.9[kW] 정도이다. 그러나 이 값들은 자기회로의 비선형성을 고려하지 않은 설계 수식과 전압방정식으로부터 선정된 값들이므로, FEM에 의해 전류위상각 변화에 따른 토크를 산정하면, 그림 8과 같이 전류 위상각이 45[°]를 벗어난 지점에서 최대 토크를 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, FEM으로부터 선정된 토크에 의해 출력을 계산하면, 정격 전류에서 2.8[kW]의 출력을 가진다.

3. 결 론

본 논문에서는 자동차 에어컨 컴프레서 구동용 전동기로서, 횡방향 성층형 회전자를 가지는 SynRM을 설계하였다. 120[°C]의 높은 온도와 제한된 체적 내에서 약 30[kNm/m³]의 TRV를 가지는 전동기를 설계하기 위하여 주어진 설계 조건을 만족시키는 범위에서 설계 변수의 변화에 따른 특성을 분석하여 최대 출력을 갖는 값을 결정하였다. 제시된 설계 변수와 출력과의 관계들이 SynRM을 설계하는데 있어서 좋은 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Murakami, H., Honda, Y., Kiriya, H., Morimoto, S. and Takeda, Y., "The performance comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in use as air-conditioning compressor," Industry Applications Conference, vol. 2, pp. 840 -845, 1999.
- [2] Vagati, A., "The synchronous reluctance solution: a new alternative in AC drives," IECON '94., 20th International Conference, vol. 1, pp. 1 -13, Sep 1994
- [3] I. Boldea, Z. X. Fu, and S. A. Nasar, "Performance Evaluation of Axially Laminated Anisotropic(ALA) Rotor Reluctance Synchronous Motors," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, No. 4, pp. 977-985, July/August 1994
- [4] I. Boldea, *Reluctance Synchronous Machines and Drives*, Clarendon press, OXFORD, 1996
- [5] 이중호, "가전용 340W급 동기형 릴럭턴스 전동기 설계 및 효율특성 실험", 대한전기학회논문지, vol. 52B, No. 2, pp. 39-52, Feb. 2003
- [6] 백동기, 김민태, 황영성, 성세진, "철손과 포화를 고려한 동기 릴럭턴스 모터의 최대토크제어", 대한전기학회논문지, vol. 49B, No. 2, pp. 116-122, Feb. 2000

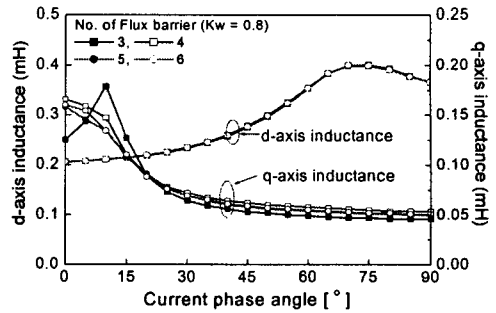


그림 6. 자속장벽과 전류 위상각에 따른 d, q축 인덕턴스

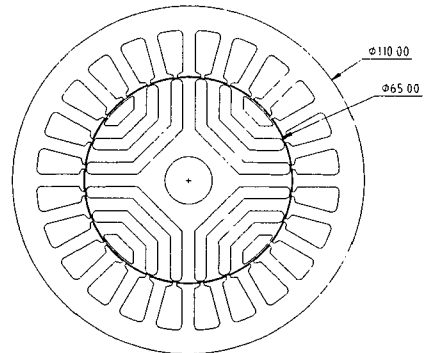


그림 7. 설계된 전동기 형상

표 2. 전동기 설계 결과

파라미터	값
회전자 직경	65 mm
고정자 직경	110 mm
공극	0.3 mm
Rib 너비	0.3 mm
축방향 길이	80 mm
상당 직렬 턴 수	12
접착률	40 %
전류밀도	8.6 A/mm ²
TRV	29 kNm/m ³
Ld, Lq (100A)	0.280, 0.062 mH
Ld/Lq (100A)	4.52

표 3. 부하각에 따른 전동기 특성

부하각	6	9	11.5
토크	4.85	6.53	7.87
전류	90.16	100.23	109.99
효율	90.88	91.58	91.58

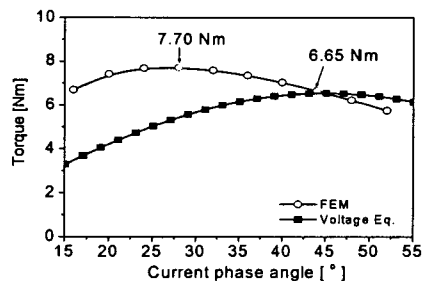


그림 8. 전류 위상각에 따른 토크 특성