

영구자석회전자를 가진 유도전동기

한승도*,신현정**,안준호**

LG전자 디지털 어플라이언스(연) 요소기술그룹 *선임연구원,**책임연구원

Induction Motor with Permanent Magnet Rotor

S.D. HAN, H.J. SHIN, J.H. AHN
DA Lab. LG Electronics Inc.

Abstract - In this Paper, high efficiency dual air-gap induction motor with permanent magnet rotor is described. The finite element method is used to design the rotor and magnet. And we presented the analysis, construction, experimental results of prototype single phase induction motor with permanent magnet rotor for air-conditioner fan motor.

1. 서론

가전기에 적용되는 각종 Fan 구동 Motor는 Low-cost의 Merit 때문에 단상 유도 전동기가 널리 이용되었으나 효율이 낮다는 문제점을 가지고 있었다. 최근 에너지 절감의 목적 등으로 에어컨 실내 / 실외기 팬 모터 등에 고효율 BLDC Motor가 적용이 확대되는 추세에 있다. 그러나 BLDC Motor는 구동회로(Controllor)를 필요로 하기 때문에 Cost가 높다는 문제점이 있다. 이에 따라 고효율이면서 저가격을 만족하는 획기적인 새로운 Type의 Motor의 개발이 요구되고 있다.

본 논문에서는 신방식의 고효율 모터를 제안하고 전자계 FEM 해석을 통하여 Motor를 설계 한 후 시작품을 제작 및 평가함으로써 에어컨 실외기 Fan Motor로의 적용 가능성에 관하여 고찰하고자 한다.

2. Motor 구조 및 고효율화 원리

2.1 기존 단상유도전동기 구조

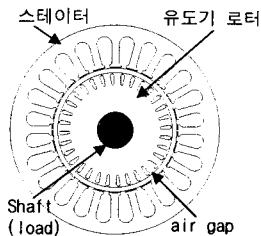


그림 1. 기존 Induction motor 구조

그림1과 같이 기존 단상 유도전동기는 토크를 발생시키는 두 가지 전자기적 성분, 즉 회전자계(자속)를 발생시키는 전류(자화전류) 성분과 Rotor 내에서 발생하는 유도 전류성분을 Stator 기자력을 통하여 공급되어야만 한다. 따라서 영구자석 회전자를 가진 BLDC Motor에 비하여 큰 전류가 흐르고 손실이 증대하므로 효율이 상대적으로 낮게 된다.

2.2 기본구조

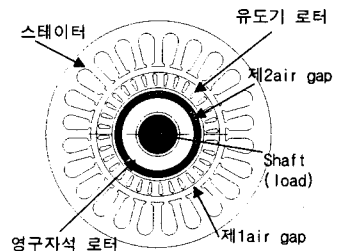


그림 2. 영구자석회전자를 가진 유도전동기

그림2와 같이 영구자석 회전자를 가진 유도전동기는 기본구조가 기존의 단상 유도전동기와 유사하나 유도기 Rotor 내측에 축상을 자유로이 회전하는 Magnet가 추가로 설치된 2중 공극(Dual Air gap)형 Motor이다.

Cage Rotor는 부하 축에 직결되어 Fan을 구동시키고, Magnet는 기계적으로는 부하축과 분리되어 있으면서 Bearing을 통하여 축상을 자유로이 회전하게 되는 구조를 가지고 있다.

2.3 동작원리

본 모터의 회전원리를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) Motor에 상용전원이 직접 투입됨과 동시에 회전 자계가 발생한다.
- 2) 유도기 Rotor 기동 및 가속 : Fan에 직결, Magnet와 전자기적으로 Coupling이 된다.
- 3) 유도기 Rotor의 운전 회전수가 증가함에 따라 Stator 회전자계가 제1,2Air gap을 거쳐서 영구자석 로터를 기동시키고 영구자석 로터는 동기 인입하여 동기속도로 운전하게 된다.
이때, Fan 부하와 분리된 자유 회전하는 영구자석이 기동 가능하기 위해서는 Magnet Rotor의 회전관성 모우멘트가 작아야 하고 Magnet에 작용하는 Stator 기자력이 커야 한다.
- 4) 동기속도로 회전하는 회전자계와 Magnet 사이에서 Fan과 직결된 유도기 Rotor가 그림3과 같이 Slip을 갖는 유도기로 운전을 하게 된다.

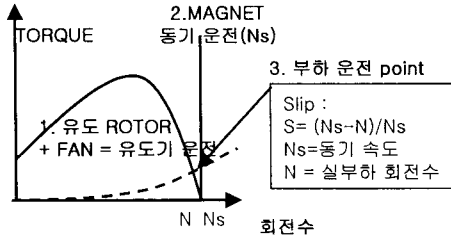


그림 3. 영구자석회전자를 가진 유도기 속도-토크특성

2-4. 특성 방정식

영구자석 회전자를 가진 단상 유도전동기는 기존 단상 유도전동기의 고정자와 회전자 사이에 Magnet가 설치된 구조로 생각할 수 있고 등가회로는 그림4와 같다.

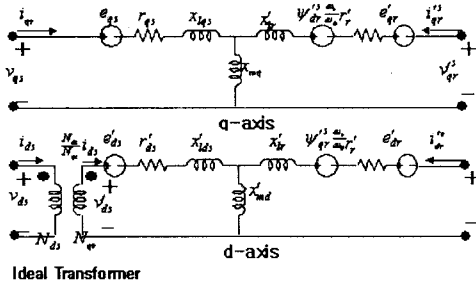


그림 4. 영구자석회전자를 가진 유도전동기 등가회로

전압방정식은 (1)~(4)와 같이 기존의 단상 유도기와 비교하여 Magnet에 의한 역기전력 항이 추가되고 나머지는 기존 유도기와 동일하게 생각할 수 있다.

$$v_{qs} = i_{qs} r_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + e_{qs} \quad (1)$$

$$v_{ds} = i_{ds} r_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} + e_{ds} \quad (2)$$

$$v_{qr} = i_{qr} r_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + e_{qr} \quad (3)$$

$$v_{dr} = i_{dr} r_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + e_{dr} \quad (4)$$

여기서 각 권선에 유기되는 역기전력 식은 (5)~(8)과 같다.

$$e_{qs} = \frac{d\lambda_{mqs}}{dt} = k_{eqs} \omega_m \sin(\theta_m) \quad (5)$$

$$e_{ds} = \frac{d\lambda_{m ds}}{dt} = k_{eds} \omega_m \cos(\theta_m) \quad (6)$$

$$e_{qr} = \frac{d\lambda_{mqr}}{dt} = -k_{eqr} (\omega_m - \omega_r) \sin(\theta_m - \theta_r) \quad (7)$$

$$e_{dr} = \frac{d\lambda_{m dr}}{dt} = -k_{edr} (\omega_m - \omega_r) \cos(\theta_m - \theta_r) \quad (8)$$

여기서 θ_m 은 Magnet의 회전각이다.

그리고 전류에 의한 쇄교자속 식(9)는 단상유도 전동기와 동일하다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{qqs} & 0 & L_{qqr} \cos \theta_r & L_{qsd} \sin \theta_r \\ 0 & L_{dds} & -L_{dqqr} \sin \theta_r & L_{dsd} \cos \theta_r \\ L_{qqr} \cos \theta_r & -L_{dqqr} \sin \theta_r & L_{qrr} & 0 \\ L_{dqqr} \sin \theta_r & L_{dsd} \cos \theta_r & 0 & L_{drr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 인덕턴스의 개념은 단상 유도전동기의 경우와 동일하며, 단지 크기만 차이가 있을 뿐이다. 또한 전압식에서 단상유도기와 동일하게 qd정지좌표계로 좌표변환을 하고, 각각의 변수와 파라미터를 주권선인 qs축으로 환산하면 전압 식은 (10)~(13)과 같다.

$$v_{qs} = r_{qs} i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + (\lambda_m \cos \theta_m) \frac{d\theta_m}{dt} \quad (10)$$

$$v_{ds} = r_{ds} i_{ds} + v_c + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} + (-\lambda_m \sin \theta_m) \frac{d\theta_m}{dt} \quad (11)$$

$$v_{qr} = r_{qr} i_{qr} - \lambda_{qr}^s \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} + (-\lambda_m (-\cos \theta_m)) \frac{d\theta_r}{dt} + (-\lambda_m (\cos \theta_m)) \frac{d\theta_m}{dt} \quad (12)$$

$$v_{dr} = r_{dr} i_{dr} + \lambda_{dr}^s \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} + (-\lambda_m (\sin \theta_m)) \frac{d\theta_r}{dt} + (-\lambda_m (-\sin \theta_m)) \frac{d\theta_m}{dt} \quad (13)$$

전압식에서 $\omega_b \lambda$ 대신 λ 를 사용하여 결과식으로 부터 그림과 같은 등가회로를 얻을 수 있다. 그림자로 표시된 부분은 변수들과 상수들이 주권선인 qs 권선으로 환산된 부분이다. 또한 발생토크 식은 (14)와 같이 정리된다.

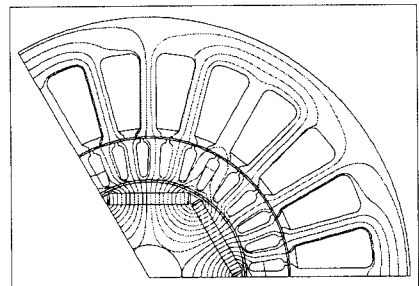
$$T_{emr} = P / 2 (i_{qr}^s \lambda_m \cos \theta_m) - i_{dr}^s \lambda_m \sin \theta_m + [\lambda_{qr}^s i_{dr}^s - \lambda_{dr}^s i_{qr}^s] \quad (14)$$

즉, 단상 유도전동기와 비교해보면 영구자석에 의한 항이 추가된 것으로 생각할 수 있다.

2-5. 고효율 설계 Concept

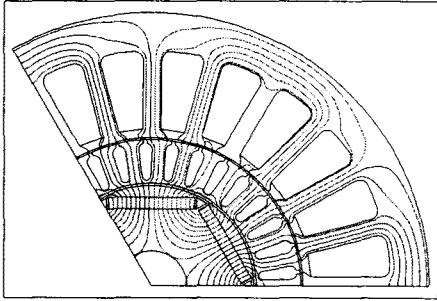
기존 유도전동기의 Torque 식은 $Torque = k(\Phi_{II}) * I_2$ 와 같이 1차 전류에 의해서 Stator에서 발생하는 자속으로 운전하지만 영구자석 회전자를 가진 유도전동기의 $Torque = k(\Phi_{magnet} + \Phi_{II}) * I_2$ 과 같이 된다. 따라서 토크발생에 필요한 자속을 Stator 기자력 및 동기속도로 회전하는 영구자석으로부터 공급받음으로서 Stator Coil의 동손이 저감될 수 있다.

즉, 그림 5,6과 같이 영구자석에 의해 부가된 Gap-flux 때문에 작은 전류로서 요구되는 모터 토크를 발생시킬 수 있게 되어 고효율화가 가능한 것이다.

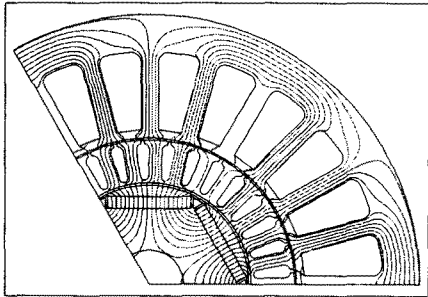


(a) I = 0

3. 설계 및 실험 결과



(b) $I = 0.2A$



(c) $I = 0.4A$

그림 5. 여자전류의 크기에 따른 Equi-flux Line

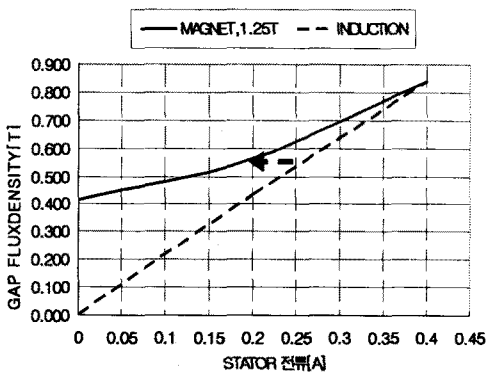


그림 6. 여자전류별 Gap 자속밀도

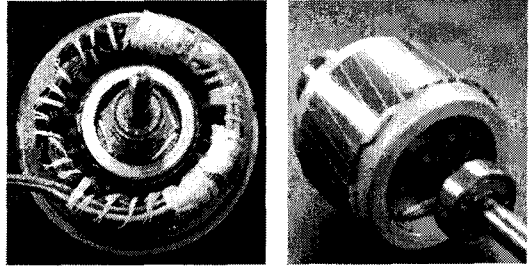


그림 7. Prototype Motor

그림 5,7과 같이 시작품을 제작하여 유도전동기 대비 특성을 측정하였다. 기존 유도전동기의 경우 Fan 부하시 회전수 730rpm, 소비전력은 77W이나 영구자석 회전자를 가진 유도 전동기의 경우 Fan 부하 회전수 730rpm에서 소비전력 65W로서 동일 출력일 경우 소비전력이 12W 저감됨을 알 수 있었다.

표 1. Prototype Motor 사양 및 특성

		기존 유도기	시작품
극수	poles	6	6
정격전압	Vac	단상 230	단상 230
정격주파수	Hz	50	50
정격출력	W	25	25
정격Torque	kg.cm	3.33	3.33
정격회전수	rpm	730	730
소비전력	W	77	65
효율	%	32	38

4. 결 론

본 논문에서는 영구자석 회전자를 가진 유도 전동기에 관하여 에어컨 실외기 Fan Motor로의 적용 가능성을 고찰해 보았다. 실제로 Prototype Motor를 제작하여 평가한 결과, 효율은 기존 유도기 대비 6% 개선되었으며 이는 BLDC Motor의 효율에 비하여는 상당히 낮은 수준으로 평가되었다. 그러나 향후 Magnet의 고자력화에 따른 효율향상을 기대할 수 있으므로 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.A. NASAR, I. BOLDEA, L.E. UNNEWEHR "Permanent Magnet, Reluctance, And Self-Synchronous Motor" CRC Press Inc, 131-137, 1993
- [2] Yoshiyuki Shibata, Nuio Tsuchida, Koji Imai, "Performance of Induction Motor with Free-Rotating Magnets Inside Its Rotor" IEEE transactions on Industrial Electronics, VOL.46, NO.3, June 1999
- [3] Nesimi Ertugrul, Christian Doudle "Dynamic Analysis of a Single-phase Line-Starting Permanent magnet Synchronous Motor", IEEE, 603-609
- [4] H. CHEE-MUN ONG, "Dynamic simulation of electric machinery," pp. 214-220, 1997