

동기릴렉턴스전동기(RSM)의 인덕턴스 고찰

오성업^{*o}, 김민태^{*}, 백동기^{**}, 신기택^{***}, 성세진^{*}
충남대학교^{*}, 주성대학^{**}, 대전기능대학^{***}

Inductance Consideration of Reluctance Synchronous Motor

Sung-Up Oh^{*o}, Min-Tae Kim^{*}, Tong-Ki Paek^{**}, Ki-Tack Shin^{***}, Se-Jin Seong^{*}
Chungnam National Univ.^{*}, Juseong College^{**}, Taejon Polytechnic College^{***}

Abstract

A phase winding of RSM is excited and measured the excited winding inductance, mutual inductance. L_d and L_q is calculated from the measurement result.

Two rotors are manufactured for this paper, measured their inductance and compared the calculated equation with the conventional equation.

This paper confirmed the effectiveness of the proposed method.

1. 서론

최근 초고속 회전을 필요로 하는 부하의 증가와 장치의 소형, 경량화의 필요성으로 초고속 전동기의 수요가 높은 실정이다. 초고속 전동기로서는 유도기가 많이 이용되고 있으나 초고속화에 따른 문제점으로 농형 회전자의 내원심력이나 발열에 문제가 있다.

이에 대해 동기 릴렉턴스 전동기(Reluctance Synchronous Motor, 이하 RSM)는 회전자의 구조가 극히 간단하고, 견고하며 회전자에서의 발열이 적다는 장점이 있어 본질적으로 초고속 회전에 적합하다.

이러한 장점 때문에 초고속 구동용 전동기로서 RSM이 주목을 받고 있다. RSM의 고정자는 유도 전동기와 실제적으로 같기 때문에, 회전자 구조에 따른 특성해석이 매우 중요하다.

초고속전동기는 초고속회전시에 기계적인 문제가 많이 발생하기 쉬워서 부하시험을 하는 것은 일반적으로 어렵다. 또한, 기계적으로 접속할 때 부하의 종류도 제한시키고 있다. 따라서, 부하시험을 행하는 원선도법 등으로 전동기 정수를 구하는 것은 어렵다.

RSM의 d축, q축 인덕턴스 L_d , L_q 를 구하는 방법으로는

(1) 슬라이딩법

(2) 부하각을 검출하여 기자력을 d축 방향에 합하여 L_d 를 구해서 무부하시험을 하고, 다음에 기자력의 방향을 q축 방향에 합하여 무부하시험을 행하고 L_q 를 측정하는 방법

(3) 정지토크를 계산하여 L_d , L_q 를 산출하는 방법

(4) 정지시의 인덕턴스의 최대치, 최소치를 계속하여 L_d , L_q 를 산출하는 방법

등이 있다.

본 논문에서는 (4)의 방법과 같이 정지상태에서 한 상의 권선을 교류여자하여, 여자한 권선의 인덕턴스 또는 타상의 상호인덕턴스를 계속하여, 그 결과에서 L_d , L_q 를 산출해 내었다.

본 논문에서는 2대의 서로 다른 형상의 회전자를 제작하여 인덕턴스를 측정하고 그 결과를 나타내었고, 정현파분포 모델로부터 d, q축 인덕턴스를 산출하고, 종래의 수식과 제안된 공간고조파를 고려한 모델을 기초로 L_d , L_q 를 산출하여 수식을 표시하고, 인덕턴스의 측정결과를 대입하여 제안된 방법에 의한 얻은 정수와 정현파분포 모델로부터 얻은 정수를 비교하여, 본 방식의 유효성을 나타내었다.

2. 인덕턴스와 공간고조파

그림 1은 회전자계형 릴렉턴스 전동기의 축이 가지는 방향을 나타낸 것이다. 돌극형으로된 회전자에 고정하여 직교하는 d, q축을 취하면, 공극의 퍼미언스는 d축방향은 크고, q축은 작다. d, q축 상의 d축을 기점으로 하여 반시계 방향의 각도를 θ_i 이라 한다.

또한, u, v, w의 3축은 고정자의 3상 대칭권선 기자력방향을 나타내고, 각 축은 120° 씩 회전한 위치에 있고, 고정자에 고정된다.

u상 권선의 기자력 방향을 기점으로 반시계 방향의

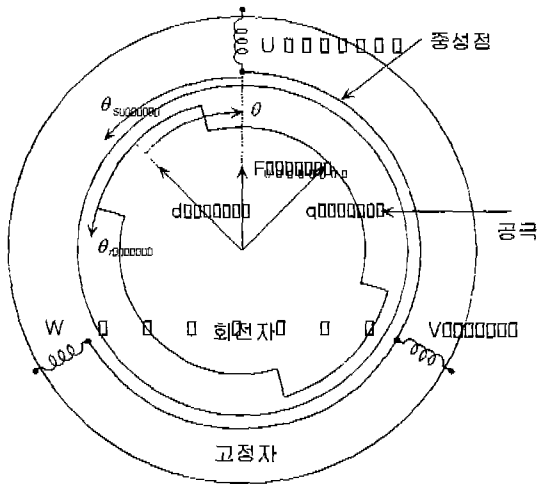


그림 1. Reluctance Synchronous Motor(RSM)

고정자에 고정된 좌표계의 각도를 θ_s 라 하면, 회전자의 회전각 $\theta = \theta_s - \theta_r$ 이고, 자기포화를 무시하면 u상 권선의 자기 인덕턴스, uv상 권선 간의 상호인덕턴스는 θ 에 따라 각각 $L_u(\theta)$, $M_{uv}(\theta)$ 로 표시할 수 있다. 회전자가 대칭인 2극 형상일 때 퍼미언스는 $2\theta_r$ 의 주기함수가 됨으로,

$$P(\theta_r) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i \cos 2i \theta, \quad (1)$$

가 된다. 단, i 는 0 이상의 정수이다.

다음에 권선 분포가 대칭이라면 기자력 분포는 기수차 성분의 주어진 것으로부터,

$$N(\theta_s) = \sum_{m=1}^{\infty} N_m \cos m(\theta_s) \quad (2)$$

단, m 은 기수이다. $L_u(\theta)$ 는 (1), (2)식을 사용하여

$$L_u(\theta) = \frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^{\infty} P_i \sum_{m=1}^{\infty} N_m N_{(2i+m)} \cos 2i\theta + \frac{\pi}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [P_{(k+n)} N_{(2n-1)} N_{(2k+1)} \times \cos 2(k+n)\theta] \quad (3)$$

단, $n=1,2,3,4,\dots$, $k=0,1,2,3,4,\dots$ 이다.

한편, 상호인덕턴스 $M_{uv}(\theta)$ 는 자기인덕턴스와 같은 방법으로 하여 도출하면 (4)식과 같이 된다.

$$M_{uv}(\theta) = \frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^{\infty} P_i \sum_{m=1}^{\infty} [N_m N_{(2i+m)} \times \cos [i(2\theta - \frac{2\pi}{3})]] \cdot \cos [\frac{2(i+m)\pi}{3}] \quad (4) + \frac{\pi}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [P_{(k+n)} N_{(2n-1)} N_{(2k+1)} \times \cos [2(k+n)\theta - \frac{2(2k+1)\pi}{3}]]$$

이 식으로부터, $M_{uv}(\theta)$ 에 대해서도 $L_u(\theta)$ 와 같은 종류의 것이라 말할 수 있다. 기본과 성분의 진폭 L_1 , M_1 은 (3),(4)식에서 $i=1$, $k=0$, $n=1$ 일 때

$$L_1 = (\frac{\pi}{4}) P_1 [N_1^2 + 2(N_1 N_3 + N_3 N_5 + \dots)] \quad (5)$$

$$M_1 = (\frac{\pi}{4}) P_1 [N_1^2 - N_1 N_3 - N_3 N_5 + 2N_5 N_7 - \dots] \quad (6)$$

같은 방법으로 직류분은 $i=0$ 일 때

$$L_0 = (\frac{\pi}{4}) P_0 [2N_1^2 + 2N_3^2 + 2N_5^2 \dots] \quad (7)$$

$$M_0 = (\frac{\pi}{4}) P_0 [-N_1^2 - 2N_3^2 - N_5^2 \dots] \quad (8)$$

만약, 기자력이 고조파를 함유한 정현파분포모델일 때에는 $L_1 = M_1$, $L_0 = -2M_0$ 이다. 그러나, 기자력의 고조파성분이 되면 이 식은 성립하지 아니한다.

즉, 피크를 억제한 기본파를 크게 하여 사다리꼴에 가까운 기자력분포의 경우에는 제3고조파가 크고, 자기, 상호인덕턴스의 기본과 진폭은 각각 크게 감소, 증가하는 것을 알 수 있다.

그 결과 인덕턴스의 최대, 최소치를 계측하여 정현파 분포모델에 기본을 둔 L_d , L_q 를 산출하여도 반드시 정확하게 값이 얻어지지 않는다는 것을 예측할 수 있다.

3. L_d , L_q 의 도출

고조파를 많이 포함한 방형파 상의 퍼미언스, 기자력분포에 대하여도 인덕턴스는 이것의 적의 적분이 되면, 인덕턴스에 함유된 고조파는 감소된다. 게다가 돌극성에 의해 발생하는 인덕턴스의 변화는 직류분 L_0 , M_0 와 기본파분 L_1 , M_1 으로 근사하여도 공간 고조파의 영향은 L_0 , M_0 , L_1 , M_1 의 값에 함유되어 진다. 그래서 정현파와 직류분으로 인덕턴스를 근사한다.

이제, L_d , L_q 를

$$L_d = \frac{L_1}{2} + M_1 + L_0 - M_0 \quad (9)$$

$$L_q = -\frac{L_1}{2} - M_1 + L_0 - M_0 \quad (10)$$

이고, $\omega = p\theta$ 라 하면

$$\mathcal{L}_{dq} = \begin{bmatrix} pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & pL_q \end{bmatrix}$$

가 된다.

이것은 종래의 d, q축 상의 릴럭턴스기의 인덕턴스 행렬과 같게 된다. 그러나 L_d, L_q 는 (9), (10)식에서 정의한 것에 의해, 인덕턴스 변화의 직류분과 기본파 진폭으로부터 이루어진다. 게다가, 정현파 분포시와 같이 $L_1 = M_1, M_0 = \frac{-L_0}{2}$ 일 필요는 없고, 공간고조파에 의해 이 값의 증감을 고려하였다.

그림 2 (a), (b)는 전동기의 회전자 형상을 나타내었다. 그림 2에 나타난 회전자 1, 2는 방형파상의 퍼미언스 분포를 갖도록 제작한 회전자로 되어 있다.

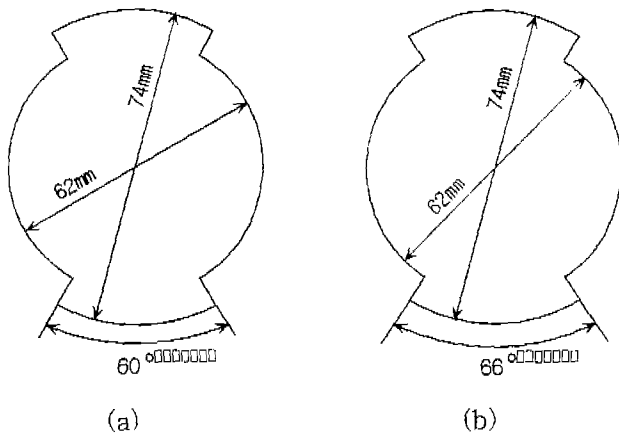


그림 2. RSM의 회전자 형상

이상의 회전자를 가지고 표 1에 나타낸 것과 같이 전동기 1, 2를 시험하였다.

표 1은 이 실험결과에 의해 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스의 최대치, 최소치 또한 이산 푸리에 변환에 의해 구해진 L_0, M_0, L_1, M_1 을 표시하였다.

표 1. 각 시착기의 구성과 인덕턴스

| | 전동기 1 | 전동기 2 |
|-----------------|-------|-------|
| 회전자 형상 | 60° | 66° |
| L_{\min} (mH) | 1.03 | 1.02 |
| L_{\max} (mH) | 1.19 | 1.18 |
| M_{\min} (mH) | -0.85 | -0.92 |
| M_{\max} (mH) | 0.46 | 0.53 |
| L_0 (mH) | 1.73 | 1.71 |
| M_0 (mH) | -0.37 | -0.40 |
| L_1 (mH) | 0.32 | 0.31 |
| M_1 (mH) | 1.18 | 1.36 |

그림 3은 시착기의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 측정방법을 표시하였다. u상 권선과 중성점 사이

에 포화가 발생하는 과정의 교류전류 I를 흘림으로 발생하고, θ 를 변화시켜 θ 에 대칭하는 u, v상의 상전압 V_u, V_v 를 측정한다.

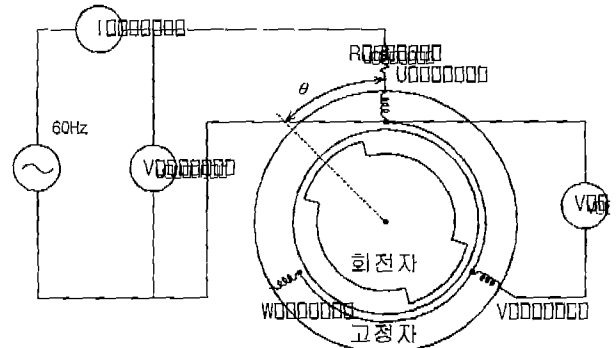


그림 3. 인덕턴스 측정회로

이 실험으로부터 $L_u(\theta), M_{uv}(\theta)$

$$L_u(\theta) = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_u}{I}\right)^2 - R_u^2}}{2\pi f} \quad (11)$$

$$M_{uv}(\theta) = \frac{V_v}{2\pi f I} \quad (12)$$

으로서 구하는 것이 가능하다. 단 R_u 는 권선 저항, f 는 여자 주파수이다.

4. 전동기 정수의 비교

실험적으로 계측된 인덕턴스로부터 L_d, L_q 를 구하여 종래의 방법과 제안된 방법을 비교한다. 제안된 모델에서는 (9), (10)식을 이용하여 L_d, L_q 를 구하고, 자기인덕턴스를 이용한 정현파 분포모델은 (5)~(8)식에 $N_3=0, N_5=0, N_7=0, \dots$ 을 대입하면

$$L_1 = M_1 = \left(\frac{\pi}{4}\right) P_1 N_1^2 \quad (13)$$

$$L_0 = \frac{-M_0}{2} = \left(\frac{\pi}{2}\right) P_0 N_1^2 \quad (14)$$

이 되고, L_1, L_0 는 M_1, M_0 에 대하여 종속 또는 그 역이다. 그러면,

$$L_d = \frac{3}{2}(L_1 + L_0) = \frac{3}{2} L_{\max} \quad (15)$$

$$L_q = \frac{3}{2}(-L_1 + L_0) = \frac{3}{2} L_{\min} \quad (16)$$

이다.

한편, 자기 인덕턴스 대신에 상호 인덕턴스의 최대치, 최소치를 측정된 방법도 제안되어 있다. 이 때에는 상호인덕턴스 변화의 최대값과 최소값을 각각 M_{max} , M_{min} 으로 하고, 정현파분포로 되면,

$$M_1 = \frac{(M_{max} - M_{min})}{2}, M_0 = \frac{(M_{max} + M_{min})}{2}$$

로 되어,

$$L_d = -(3/4)M_{max} - (9/4)M_{min} \quad (17)$$

$$L_q = -(9/4)M_{max} - (3/4)M_{min} \quad (18)$$

가 된다.

표 2는 (9), (10)식과 (15)~(18)식을 이용하여 이미 표 1에 나타낸 인덕턴스의 측정결과에서 L_d , L_q 를 산출한 결과를 나타낸다.

공간고조파의 영향을 명확하게 하기 위해서, 자기포화에 의한 정수 변화를 방지할 필요가 있다. 표 3의 ()안은 정격전압의 반분으로 실측값과 비교할 때의 오차를 나타낸다.

표 2. L_d , L_q , α

| | 전동기 1 [회전자 60°] | | | 전동기 2 [회전자 66°] | | |
|----------------|--------------------|---------------|----------------------------|--------------------|---------------|----------------------------|
| | L_d (mH) | L_q (mH) | α (= L_q/L_d) | L_d (mH) | L_q (mH) | α (= L_q/L_d) |
| 원선도 [1/2정격] | 3.28 | 2.04 | 0.62 | 3.45 | 2.08 | 0.60 |
| 제안방법 (%) | 3.44 (+5) | 1.99 (-3) | 0.58 (-7) | 3.64 (+6) | 2.01 (-4) | 0.55 (-9) |
| 정현파 모델[L] | 1.79 (-46) | 1.55 (-24) | 0.86 (+38) | 1.77 (-49) | 1.53 (-27) | 0.86 (+43) |
| 정현파 모델[M] | 1.57 (-53) | 0.39 (-81) | 0.25 (-60) | 1.67 (-52) | 0.50 (-76) | 0.30 (-50) |

전동기 1에는 L_d 의 산출값은 제안방식에서는 변함이 없다. 그러나, 릴럭턴스기에서 얻어지는 정수 중 문제가 되는 L_q 의 산출값은 정현파모델[L]에서 산출하는 것은 24% 정도 작게 되고, 정현파모델[M]에서 산출하는 것은 81%정도 작다. 따라서, L_q 와 L_d 의 비 α 도 정현파모델[L]에서 산출한 경우가 38%정도 크고, 한편 정현파모델[M]에서 산출한 것은 60%로

극히 작다.

이에 대하여 제안된 산출방법에서는 L_d 가 5%, L_q 가 3%, α 가 7%의 오차 정도이다. 이처럼 본 논문에서 도출한 인덕턴스의 관계식은 매우 유효하다. 전동기 2에서는 전동기 1과 대부분 같은 식의 결과가 얻어졌다.

5. 결론

본 논문에서는 릴럭턴스 전동기의 공간고조파를 고려한 새로운 인덕턴스 관계식을 도출하여, 이것을 전동기 정수 측정에 응용하여 그 유효성을 나타내었다.

인덕턴스는 퍼미언스 분포와 기자력 분포의 적이 되고, 회전자의 공극성에 의해 생기는 인덕턴스의 회전각에 대한 변화의 기본과 진폭과 직류분의 크기는, 기자력분포와 퍼미언스 분포의 기본과 성분 만큼으로 되어 고조파 성분에 의해 결정된다. 그래서 인덕턴스 값의 회전자 위치에 대한 변화의 기본과 진폭과 직류분은 공간고조파의 영향을 포함하고 있다.

공간고조파를 함유한 전동기를 이용하여, 인덕턴스의 변화의 실측치에서 기본과 진폭과 직류분을 도출하여 전동기 정수를 구하고, 이것을 원선도에서 얻은 d, q축 상의 전동기 정수와 비교한 결과 리액턴스 비는 정현파 분포 전동기 모델에는 최소 38% 이상의 오차가 발생하였으나, 본 논문에서 제안된 모델의 오차 최대는 9%이하로 되었다.

참고 문헌

- [1] 深尾 正 외 2인, “超高速リラクタンس電動機の閉ループ制御の一方式”, 電學論 D, 107卷 No. 2, pp.271-278, 1987
- [2] "Synchronous Reluctance Motors and Drives A New Alternative", IEEE IAS 29th Annual Meeting, 1994
- [3] 千葉明 외 4인, “リラクタン스電動機のインダクタン스關する一考察”, RM-92-30, pp.1-10, 1992
- [4] 杉浦 修 외 1인, “リラクタン스モータの精密な始動捲線定數の測定法”, RM-91-20, pp.39-48, 1991
- [5] I. Boldea, "Reluctance Synchronous Machine and Drives", Clarendon Press Oxford, 1996
- [6] 深尾 正 외 1인, “超高速リラクタン스電動機の高速度トルク制御方式”, 電學論 D, 107卷 No. 10, pp.1229-1235, 1987