

자기저항 동기전동기의 정수추출을 통한 특성 연구

이정섭\* · 홍정표 · 한성진 · 주수원  
 동아대학교 전기공학과

Performance Analysis According to Parameter Measurement of Synchronous Reluctance Motor

J.S.Lee\*, J.P.Hong, S.C.Hahn, S.W.Joo  
 Dept. of Elec. Eng Dong-A Univ.

**Abstract** - The performance of a SRM in terms of torque and power factor depends on the two-axis inductances (Ld and Lq) and iron loss of the machine. Finite element method has been used to determine these parameters for a motor with segmented rotor structure. Fock and Hart Method has been conducted to compare to verify the accuracy of proposed analysis method.

모델로서 권선분포가 대칭성이므로 전체의 1/4만 해석하였다. 또한 해석모델의 양쪽 경계조건은 권선배치에 따른 전동기특성을 보아서 반주기 경계조건으로 처리를 하였다. 본 해석모델의 요소망은 6800개의 절점과 15307개의 요소로 이루어져 있고 공극 부분은 2개층으로 나누어 더욱 세분하여 해석하였다.

1. 서 론

자기저항 동기전동기는 회전자 구조와 고정자 권선형태를 개선하면 전동기의 성능을 향상시킬 수 있어 회전자 설계에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 유한요소법에 의해 계산된 정수값과 Fock and Hart Method를 통한 실험정수값과 비교검증하고자 한다. 실험대상 기기는 세그먼트형 회전자를 가지는 3상 S.R.M 이며, 정격용량은 0.175 KW이다. 유한요소 모델링 해석에서는 먼저 해석기기에 대한 공극에서의 평균자속밀도를 구한 후 돌극부분과 비돌극부분에서의 쇄교자속을 구한다. 여기서 회전자의 돌극부분은 직축이되며 비돌극부분은 횡축이 된다. 3상의 전류분은 직축성분과 횡축성분으로 나누어 고려하였으며 회전자의 변위와 3상의 전류의 전기각에 따라 여자를 달리하였다. 이때 발생하는 인덕턴스의 변화와 토크를 계산하여 산정하기로 한다.[1] 또한 실험에서는 세그먼트형 회전자의 구조 및 특징을 파악하고, 입력전압 및 입력주파수를 변화시켜 Fock and Hart Method를 통한 정수값 (Iron Loss, Torque, Xd, Xq)을 추출하고자 한다.[2]

표.1 SRM 해석모델 제원

고정자[mm]	회전자[mm]	전원
권선수 42	외경 94.59	3상208 [V]
슬롯수 36	축의 직경 16.4	2.36 [A]
외경 159.7	공극 0.33	175 [W]
내경 95.25		60 [Hz]

2.2 지배 방정식

일반적으로 회전기기에서는 속도와 주파수가 낮으므로 변위전류는 무시된다. 따라서 정상상태에서 맥스웰 방정식  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$  에  $\nabla \cdot \vec{A} = 0$  의 조건을 적용하면

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 \tag{1}$$

와 같은 Poisson방정식이 된다.

여기서 H: 자계의 세기, B: 자속밀도, J<sub>0</sub>: 인가전류밀도, A: 자기벡터포텐셜이다.

이 방정식을 Galerkin법을 사용하면 다음과 같은 계방정식의 유도가 가능하다.

$$[K]\{A\} + \{F\} = 0 \tag{2}$$

여기서 [K]는 계수행렬이며, [F]는 구동행렬이다.

$$\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}) - j\omega\sigma\vec{A} = -\vec{J}_0 \tag{3}$$

한편 정현 입력전류에 대해, 코일의 자기인덕턴스는

$$L = \frac{1}{I^2} \int_s A \cdot J ds \tag{4}$$

각 요소의 자속밀도는

$$\vec{B} = \frac{\partial A}{\partial y} \hat{x} - \frac{\partial A}{\partial x} \hat{y} \tag{5}$$

각 상의 자속은

$$\lambda = N \int B \cdot ds \tag{6}$$

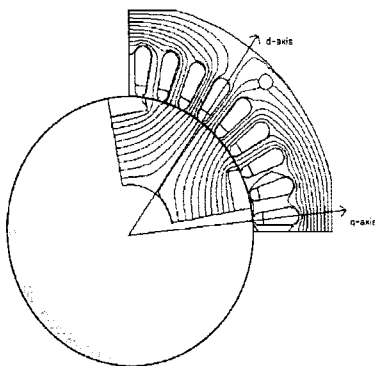


그림 1. d,q축 자속선도

유한요소법과 같은 분포정수 해석은 자기적 비선형성 및 복잡한 형상의 전동기를 비교적 정확하게 해석할 수 있다. 3상 4극을 가진 세그먼트형 자기저항 동기전동기의 해석영역은 전동기 절단 단면을 x, y평면으로 하고 기하학적 및 전기적 대칭성을 고려하여 1극분에

해당하는 x-y평면상의 제1상한 영역으로 하였으며 해석 대상의 모델의 사양은 표 1과 같다. 해석대상은 3상 4극

여기서  $l$ 은 축의 길이이고  $N$ 은 코일의 턴수를 나타낸다. 식 (4)과 식 (6)을 park's 변환법을 이용하여  $d, q$ 축 성분의 인덕턴스 및 자속을 구할 수 있으며 전류 성분을 유도할 수 있다.

자속밀도의 법선 성분과 접선 성분 ( $B_n, B_t$ ) 을 통해서 힘의 접선 성분을 유도할 수 있다.

$$f_t = \frac{B_n B_t}{\mu_0} \quad (7)$$

맥스웰 응력법을 이용하여 구한 최종토크는 다음과 같다.

$$T = rdl \left( \sum \frac{B_n B_t}{\mu_0} \right) \quad (8)$$

### 2.3 Fock and Hart Method

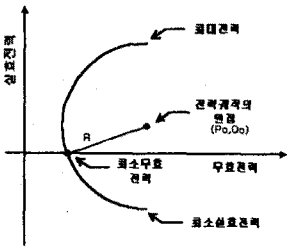


그림 2. Circle Diagram

Fock and Hart Method는 자기저항 동기전동기의 정수측정 방법중의 하나로 1984년에 제안되었다. 이 실험방법은 실효, 무효전력 평면상에서 자기저항 동기전동기의 작동점이 1사분면과 4사분면을 포함하는 원주상에 놓여진다는 사실에 기인하고 있다. 그러므로 이 방법은 계자

권선으로부터의 개방회로시 data값에 의존하지 않고 특별한 실험설비도 필요로 하지 않는다. [2]

$$\begin{bmatrix} -2Q_1 & -2P_1 & 1 \\ -2Q_2 & -2P_2 & 1 \\ -2Q_3 & -2P_3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_0 \\ p_0 \\ p_0^2 + q_0^2 - R^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_1^2 \\ -S_2^2 \\ -S_3^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$P_{max}$ ,  $P_{min}$ , 그리고  $Q_{min}$ 은 식 (10)를 통하여 결정된다.

$$\begin{aligned} P_{max} &= p_0 + R \\ P_{min} &= p_0 - R \\ Q_{min} &= q_0 - R \end{aligned} \quad (10)$$

이 결과를 통한 기기정수값은 다음과 같다.

$$\frac{r}{X_d} = \frac{1}{2} \frac{|P_{min}| - |P_{max}|}{|Q_{min}|} \quad (11)$$

$$\frac{X_d}{X_q} = 1 + \frac{|P_{min}| + |P_{max}|}{|Q_{min}|} \quad (12)$$

$$X_d = \frac{V^2}{\left[ \left( \frac{r}{X_q} \right)^2 \left( \frac{X_q}{X_d} \right) + 1 \right] |Q_{min}|} \quad (13)$$

$$r_m = \frac{p_0 V^2}{p_0^2 + (q_0 + R)(q_0 - R)} - r \quad (14)$$

여기서,  $S$ : 피상전력 [VA],  $q_0, p_0$ : 원주의 중심점,  $R$ : 원주의 반지름,  $r$ : 고정자저항,  $V$ : 선간전압

정수값은 자기저항 동기전동기가 동기속도로 구동되는 상태에서 외부부하가 점진적으로 가해질때 측정할 수 있다. 그때 3종류의 외부부하에 따른 유효전력과 무효전력

이 측정된다. 이 측정값으로부터 그림 2와 같은 Circle 다이어그램을 그릴 수 있고 고정자의 정수는 식 (11), (12), (13)을 통해 Circle Diagram의 반지름과 원점 및 최대전력, 최소전력으로부터 얻을 수 있다. [3]

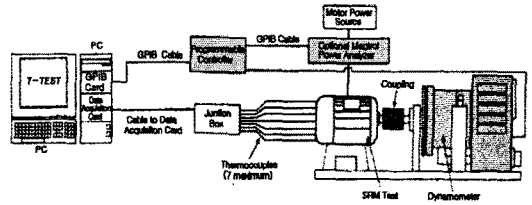


그림 3. 실험장치 구성도

### 3. 측정결과 및 검토

본 실험에서 인버터로 구동되는 전동기의 경우 출력전압은 PWM파형이며 많은 고조파를 함유하는 관계로 인버터의 입력단과 출력단에 surge killer를 투입하여 고조파를 제거 시켰으며 또한 인버터를 투입한 경우와 그렇지 않은 경우의 측정값을 비교하여 오차값을 보정하였다.  $d$ 축의 경우 자계 경로는 철부분이 지배적이며 여자에 민감하고,  $q$ 축의 경우 자계 경로는 공기부분이 지배적이므로 여자에 민감하지 않다. 그러므로 상대적인 전류증가나 전압의 증가에 대해  $d$ 축과  $q$ 축은 서로 다른 포화가 발생한다. 그림 4을 통해서  $d$ 축 인덕턴스는 포화가 일어나면서부터 전류의 증가량에 비해 자속의 증가량이 상대적으로 적어져 인덕턴스가 감소하게 됨을 확인할 수 있으며, 또한  $q$ 축 인덕턴스는 회전자의 구조상  $q$ 축 전류가 증가할 때 리브를 통한 누설성분이 증가하므로 경미하지만  $q$ 축 인덕턴스도 감소하게 됨을 확인할 수 있다. 한편 Fock and Hart Methods와 유한요소법에 의한 데이터값을 비교하여 볼 때 비교적 잘 일치함을 알 수 있으나 유한요소법에 의해 추출한 정수보다 실험에 의한 정수값이 다소 높게 나오는 경향을 보이고 있다. 이것은 2차원 유한요소해석이 단부 권선 인덕턴스가 고려되지 않기 때문으로 생각된다.

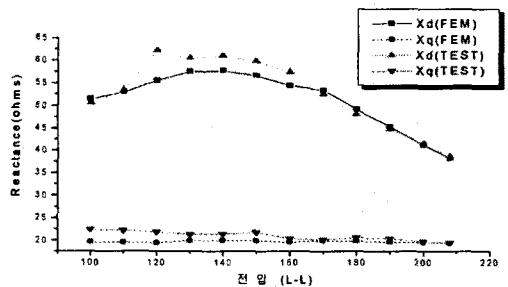


그림 4. 입력전압에 따른 리액턴스의 변화

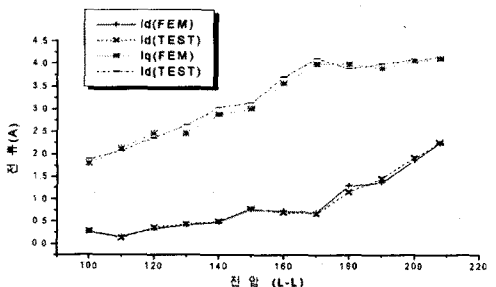


그림 5. 입력전압에 따른 전류의 변화

저항손실은 입력고정자 전류를 분할 하게되고 이 저항 성분에서 의해 입력 고정자 전류와 자화전류사이의 부가적인 각 변위가 일어난다. 정격치에 가까울수록 줄어드는 철손저항값을 그림 7로서 확인되고 160V를 기준으로 거의 일정값  $12\Omega$ 을 유지하고 있다. 전동기의 토크발생은 자속과 전류의 상호작용이므로 자속에 해당하는 전류와 토오크에 해당하는 전류의 변화로 인하여 토크값의 비선형성이 나타날 수 있다. 이를 볼 때 철손의 고려는 매우 중요하며 철손에 의해서도 발생하는 두 전류성분 (d축-q축 전류)간의 간섭에도 영향을 끼친다. 정격치에서 철손을 고려한 경우 실험을 통해서서는 약  $1.8 [N \cdot M]$ 이며 유한요소법의 경우는 약  $1.61 [N \cdot M]$  정도이다. 철손을 고려하지않은 경우는 약  $2.6 [N \cdot M]$  정도를 나타내고 있으며 토크의 비선형성을 그림 6을 통해 증명하였다.

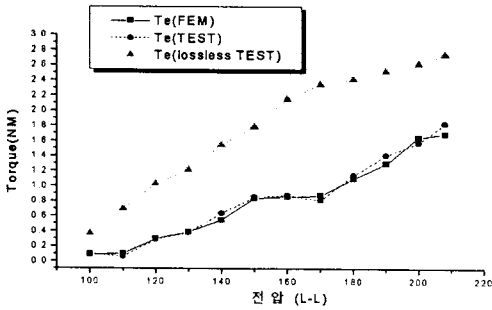


그림 6. 입력전압에 따른 토크의 변화

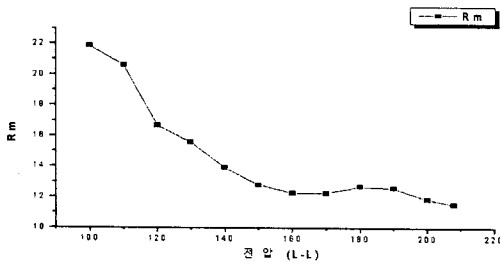


그림 7. 입력전압에 따른 철손저항의 변화(측정값)

단위 전류당의 토크는  $(L_d - L_q)$ 의 함수이고, 역률과 정출력 영역은  $(L_d/L_q)$ 의 함수이므로, 돌극비가 높을 것을 요구하지만 본 논문에서의 전동기는 돌극비가 낮게 설계된 세그먼트형이므로 돌극비가 최대 약 3정도되며 토크에 영향을 주는 리액턴스차는 실험 및 유한요소법 모두  $20(\Omega)$  정도이다. 역률에 영향을 주는 돌극비는 유한요소법의 경우 약 2.1정도로 비교적 정확함을 그림 8은 보여주고 있다.

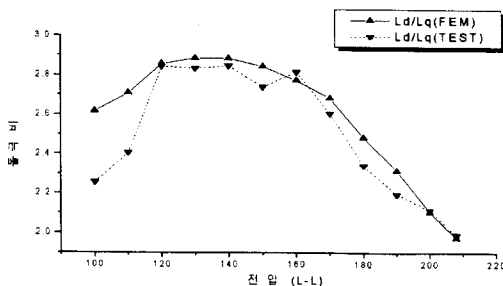


그림 8. 입력전압에 따른 돌극비의 변화

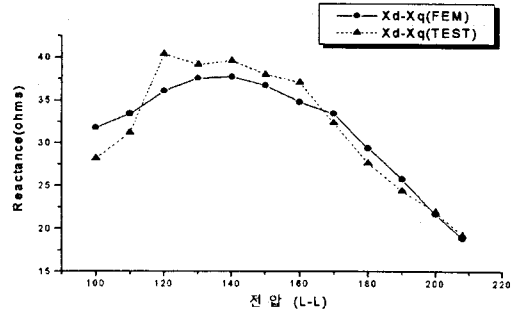


그림 9. 전압에 따른 리액턴스차의 변화

표.2 유한요소법 및 실험의 정수측정 결과

Parameter (at rated 208V)	Finite Element Method	Experiment
Id (A)	2.2458	2.354
Iq (A)	4.1	4.356
Xd (ohms)	38.21	39.675
Xq (ohms)	19.349	19.435
Tem (NM)	1.754	1.734
Xd/Xq	1.974	2.04
Xd-Xq (ohms)	18.861	20.24

### 3. 결 론

본 실험에서는 0.175kw 삼상 자기저항 동기전동기를 Fock and Hart Methods를 통해서 전압 및 주파수의 변화에 따른 철손을 고려한 정수값을 추출하였으며 추출한 정수값은 유한요소해석을 통한 정수추출치와 비교하였다. 이상의 연구결과를 통하여 철손저항은 출력토크값에 큰 영향을 끼침을 확인할 수 있었고 제안한 유한요소법에 의한 정수추출방법은 실험치와 비교적 일치하였다. 향후, 실험에 의한 정수측정 방법과 유한요소해석방법의 결합을 통해 정수측정기법을 확립하고자 하며 본 결과에 이타를 회전자 설계자의 기초자료로써 활용하고자 한다.

### [참고 문헌]

- [1] 이중호, 김정철, 현동석, "단편형 회전자 구조 동기형 리액턴스 전동기와 유도전동기의 특성비교에 관한연구". Trans. KIEE. No9. 1998.9
- [2] Peter Y.Wong, "Synchronous Reluctance Motor Operating Point Dependent Parameter Determination IEEE TRANS ON IAS, VOL.28, No.2, March/April
- [3] Katsumi Uezato, Tomonobu Senjyu, "Parameter measurement of Synchronous Reluctance Motor Including Stator and Rotor Iron Loss", SMIC '93, P247 - P252, 1993
- [4] Longya Xu, Xingyi Xu, Member, IEEE, Thomas A. Lipo, Fellow, IEEE, and Donald W. Novotny, Fellow, IEEE, "Vector Control of a Synchronous Reluctance Motor Including Saturation and Iron Loss" IEEE Trans On IAS. VOL. 27, NO.5 SEP/OCT 1991
- [5] 주수원, 한성진, 홍정표, "유한 요소법에 의한 절편회전자를 가진 자기저항전동기의 특성 해석", 동아대학교 공과대학 정보통신연구소 논문집, 제 5권, 제 1호, pp.19 ~ 24, 1997