

**유한요소법과 SUMT를 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 단위부피당 토크에 따른 회전자 설계기준의 함수화**

이래화, 이종호  
한밭대학교 전기공학과

**Rotor design functional standard of Synchronous Reluctance Motor according to torque/volume using FEM & SUMT**

Rae Hwa Lee, Jung Ho Lee  
Dept. of electrical Engineering, Hanbat National University

**Abstract** - This paper deals with an automatic rotor design functional standard computation based on torque/volume for a synchronous reluctance motor (SynRM). The focus of this paper is the design relative to the torque/volume on the basis of each rated watt according to the rotor diameters of a SynRM. The coupled finite elements analysis (FEA) & sequential unconstrained minimization technique (SUMT) have been used to evaluate design solutions. The proposed procedure allows to define the rotor geometric design function according to the rotor diameter and rated watt starting from an existing motor or a preliminary design.

**1. 서 론**

동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 유도전동기와 비교해서 구조가 간단하고, 견고하며, 회전자 권선이 없어 동손이 적고, 회전자 과라미터의 영향은 받지 않는다[1]-[6]. 단위 부피당 효율과 토크와 같은 문제는 SynRM 성능 평가에 중요하다[7]-[9]. 이러한 특성은 회전자 철심의 폭, 자속 장벽 폭의 비  $K_w$ 에 관련된 회전자구조에 의존하며, 이를 기준으로 설계해야 한다. 만약  $K_w$ 가 0.5 일 경우, 최대 출력토크 뿐만 아니라, 전체의 전류범위에서 최대 인덕턴스의 차를 얻는 것이 가능하다는 논문이 발표되었다.[10],[11].

그리고 회전자 전체 철심의 폭과 자속 장벽 폭의 비  $K_w$ 의 영향을 다룬 연구가 발표되었다[12]. 참고문헌[10]은 Axially laminated type 을 대상으로 조사한 것이며, 참고문헌[11]은 6개의 자속 장벽을 대상으로 연구를 수행한 것이다. 그러나 참고문헌 [12]는 340W 가전용 SynRM의 설계 해를 구하였고 그 때의  $K_w$ 의 값은 1이다. 따라서  $K_w$ 는 SynRM의 회전자에 관해서 모든 용량과 용도에 적용되는 고정된 값은 아니다.

따라서 설계방법은 자속장벽수,  $K_w$ , 정격용량, 전류가 주어졌을 때의 토크밀도와 역률에 관련된다[13].

참고문헌 [13]에서의 설계 해법은 각각의 정격용량에서 회전자의 형상을 다양하게 설계해서 인덕턴스의 차와 비를 비교하여 설계해를 구하였다.

기존의 초기모델로부터 최적의 설계해를 구하였으며, 자속장벽 수,  $K_w$ 는 회전자의 지름에 관련된 값이라는 것을 알 수 있었다. (3HP, 3.5HP, 4.5HP(회전자 지름:71.4mm)), (5.5HP, 6HP, 7HP, 8HP(회전자 지름:85.75mm)), 각각의 회전자의 적층의 길이는 다르다.

논문에서는 전체 철심영역의 폭과 전체 자속장벽의 폭의 비인  $K_w$ , 자속장벽의 개수, 여기에 추가로 SynRM 회전자의 직경을 설계 변수로 하였다.

논문의 주 관점은 각각의 정격 용량(1HP, 3HP-7HP)에서 회전자의 지름(66.82, 71.4, 84.95, 92.1, 101, 109.1mm: 초기설계)에 따른 출력의 비교를 통하여 설계해를 구하는 것이다.

제한된 절차는 기존의 모터 또는 초기설계로부터 회전자 지름과 정격용량에 따라 회전자의 기하학적인 설계함수를 정의 한다.

**2. 본 론**

**2.1. SynRM의 초기 모델 설계**

참고문헌 [13]에서 회전자 지름은 두 가지 경우가 있고, 각각의 정격용량은 적층길이에 따라 결정 되어졌다. 논문에서의 정격용량은 적층길이(80mm)가 일정 할 때 그림 1(a),(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 회전자의 직경에 의해 정의 되어진다.

정격용량과 모터의 크기와의 관계는 식(1)에 의해 나타 낼 수 있다. 기기는 정격상태에서 역률이 84%, 효율이 82%, 3상 60Hz, 220V로 한다.

$$P_N \times 10^3 = k_N D_g^2 L(ac) B_g f / p. C_o = E / (2.22 f \phi k_p) \quad (1)$$

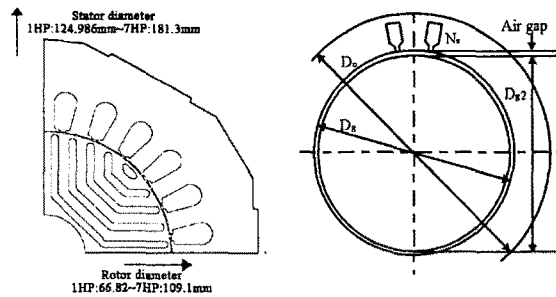
$$N_s = 3 \times P \times (2 \sim 4), I = P_N \times 10^3 / (3\eta P_f)$$

$$\phi = B_g (\pi D_g / P) L, \delta = (0.1 + 2D_g) \times 10^{-3}$$

여기서,  $P_N$ : 정격용량(kW),  $B_g$ : 공극의 평균자속밀도,  $f$ : 주파수,  $P$ : 극수,  $E$ : 상전압,  $k_p$ : 상수(0.9)

$k_N$ : 상수(12),  $C_o$ : 각 상의 도체수,  $\eta$ : 효율,  $P_f$ : 역률,  $\delta$ : 공극의 길이,  $L$ : 적층 길이(80mm)

표1은 각각의 정격용량 일 때의 초기모델 사양을 나타낸다.



(a) 지름증가 범위 (b) 설계변수  
**<그림 1> 초기 회전자와 고정자 설계**

**<표 1> 초기 설계 모델 사양**

Rated watt	Rotor diameter(m)	Rated voltage(V)	Rated current(A)	Stack length(mm)	Slot number
1HP	66.822	220	2	80	24
3HP	71.4	220	6	80	24
4HP	84.95	220	11	80	24
5HP	92.1	220	14	80	24
6HP	101	220	17	80	24
7HP	109.1	220	20	80	24

**2.2. 최적설계 알고리즘**

SUMT에 의해 최적해를 구하는 문제는 수학적으로, 함수  $F=F(Y)$ ,  $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 를 최소화하는 것이 목적이다. 함수  $F$ 는 목적함수이고,  $Y$ 는 독립변수 이다. 각 변수는 상하의 경계 upper and/or lower bounds에 의해 ( $Y_{li} < Y_i < Y_{ui}, i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 제한되어져야 하고, 이러한 변수들은 구조적 제약에 따라 변화 되어진다.

식 (2)는 zandel 함수로 구해진 비례 최소화 함수와 제약조건을 포함한 목적함수를 회전자 직경에 따라 나타낸 것이다.

$$F1(Y) = -10.40 Y^2 - 20.127 Y - 82.16 \quad (66.822mm) \quad (2)$$

$$F2(Y) = 170.80 Y^3 - 181.40 Y^2 - 112.31 \quad (71.4mm)$$

$$F3(Y) = 52.65 Y^3 - 51.48 Y^{2.5} - 32.31 \quad (84.95)$$

$$F4(Y) = -109.20 Y^2 - 780.24 Y^{0.5} + 635.51 Y + 178.09 \quad (92.1mm)$$

$$F5(Y) = -473.10 Y^2 + 1181.32 Y^{1.5} - 796.96 Y + 29.41 \quad (101mm)$$

$$F6(Y) = -397.05 Y^2 + 980.41 Y^{1.5} - 653.21 Y + 18.92 \quad (109.1mm)$$

본 논문은  $K_w$ 는 0.1에서 1.2로 고려 하였고, 산업용을 위해 기계적인 제약, rib의 제약조건을 고려해 자속 장벽수는 3, 4, 5, 6, 7로 하였다. SynRM의 최적화에 대한 관점으로 최대토크를 설정하였고, 인덕턴스의 차( $L_d, L_q$ )의 최대화를 위해 목적함수  $F(Y)$ 가  $K_w$ 를 기준으로 계산 되어진다. 최적화 알고리즘(SUMT)은 변화하는 디자인에 따라 목적함수의 극부 최소를 발견하는 기법이다.

그림 2는 전체의 설계 흐름도를 보여준다.

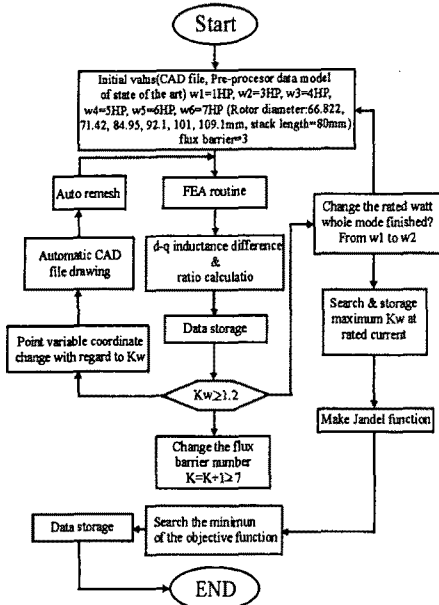
**2.3 설계 결과 분석**

그림 3(a)-(f)는 각각의 정격용량에서의 zandel 함수를 보여준다.(회전자 지름:66.822mm 71.4mm, 84.95mm, 92.1mm, 101mm, 109.1mm)

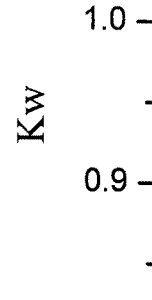
각 정격용량에서 정격전류를 주었을 경우  $K_w$ 의 값을 찾아 냈으며, 전체 설계 결과를 표 2에 나타내었다. 설계 결과를 보면 직경이 작으면  $K_w$ 의 값은 1에 가까워지고, 직경이 증가함에 따라  $K_w$ 의 값은 0.5의 값에 가까워진다.

다. 또한 자속장벽의 개수도 증가한다.

결론적으로 그림 4에서 각각의 정격용량에서 회전자의 직경이 증가함에 따른 회전자의 설계 함수의 특징을 보여준다. 설계해는 회전자의 직경과 관련 되어 있고, SynRM의 설계에 있어서 중요한 자료가 될 수 있다.



〈그림 2〉 설계 흐름도



〈그림 4〉 회전자지름이 증가함에 따른  $K_w$  함수

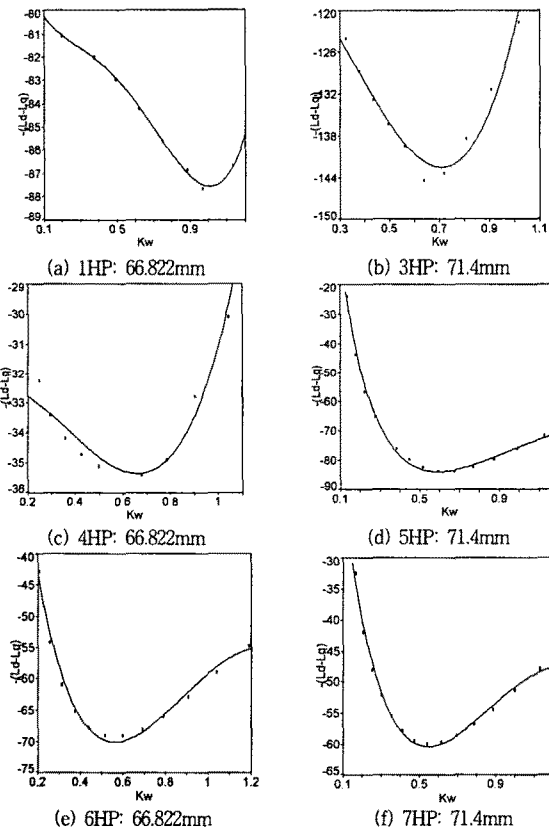
### 3. 결 론

본 연구에서 SynRM의 토크 및 역률 특성에 영향을 미치는 자속장벽의 수,  $K_w$  등의 설계 변수는 회전자의 직경에 의해 정해진다는 것을 알 수 있었다.

설계시 정확한 해석을 통한 특성분석을 위해 자기적 비선형성 및 복잡한 형상의 전동기를 정확 하게 해석 할 수 있는 장점을 가지고 있는 유한 요소법을 이용하여 해석을 수행 하였다. 또한 형상변화에 따르는 자동 CAD 파일 작성프로그램을 개발하고 이에 따르는 자동선처리 프로그램의 개발을 통해 설계과정 시간을 단축하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Y. J. Jang, J. H. Lee, "Characteristic Analysis of Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motor for High Power Application", *Journal of Applied Physics*, Vol.97, No.10, 10Q503, May, 2005.
- [2] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Characteristics Computation on PWM Fed Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 36, No. 7, pp 1209-1213, July 2000.
- [3] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Hysteresis Modeling of Synchronous Reluctance Motor considering PWM Input Voltage", *Journal of Physica B*, Vol. 275, pp238-247, January, 2000.
- [4] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for the Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.35, No.3, pp1203-1206, May, 1999.
- [5] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp2629-2632, September, 1998.
- [6] J. H. Lee, J.C. Kim, I. S. Jung, D. S. Hyun, "Vector Control Scheme of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp3522-3525, September, 1998.
- [7] J. H. Lee, "Efficiency Evaluations of Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM and Preisach Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 39, No. 5, pp 3271-3274, September, 2003.
- [8] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Effect of Magnet on  $L_d$  and  $L_q$  Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 3, pp11 99-1202, May, 1999.
- [9] J.H. Lee, "Design Solutions to Minimize Iron Core Loss in Synchronous Reluctance Motor using Preisach Model and FEM" *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.38, No. 5, pp 3276-3278, September, 2002.
- [10] Takayoshi Matsuo, Thomas A.Lipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.9, No.2, pp.359-365, June 1994
- [11] Hiroyuki Kiriya, Shinichiro Kawano, Yukio Honda, Toshiro Higaki, "High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-flux Barrier for the Appliance Industry", *IEEE Industry Application* Vol. 1. pp. 111-117, 1998.
- [12] Jung Ho Lee, "Design and Efficiency Characteristic Test of 340W Home Appliance Synchronous Reluctance Motor", *Transaction of KIEE*, Vol.52B. No.2, Feb., 2003.
- [13] S. B. Kwon, S. J. Park, J. H. Lee, "Optimum Design Criteria Based on the Rated Watt of a Synchronous Reluctance Motor Using a Coupled FEM and SUMT", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.41, No.10, pp 3970-3972, Oct. 2005.



〈그림 3〉 각 용량별 zandel 함수

〈표 2〉 각 정격전력의 설계해

Rated watt	$L_d - L_q$	$K_w$	Diameter (mm)	Rated current(A)	Flux barrier
1HP	87.68	0.968	66.822	2	3
3HP	54.94	0.708	71.4	6	3
4HP	35.4316	0.6645	84.95	11	3
5HP	84.0694	0.596	92.1	14	5
6HP	69.1375	0.5635	101	17	6
7HP	60.0284	0.5465	109.1	20	6