

고효율 SRM을 위한 권선설계 및 특성해석

문재원*, 정태욱*, 박한웅**, 황영문*

* 부산대학교, ** 해군사관학교

Winding Number Design and Performance Analysis of High Efficiency SRM

JaeWon MOON*, TaeUk JUNG*, HanWoong PARK**, YoungMoon HWANG*

* Pusan National Univ., ** Naval Academy

Abstract

The torque production of SRM is dependent on the variation of inductance which is related to rotor position angle. So the realization of high efficiency SRM is achieved by design of optimal inductance profile appropriate for magnetic capacity of motor. This can be obtained by optimal design of winding number of stator.

This paper suggests the design standard of winding number of stator for high efficiency. And this paper shows the experimental results of driving performance of SRM.

1. 서 론

2중 돌극형 Switched Reluctance Motor (SRM)는 구조의 간단, 견고함으로 인하여 내구성이 뛰어나서 고속회전에 적합하며 가변속 특성이 우수하다. 그러나, SRM은 자기포화의 현상이 심하고 펄스와 스릿칭으로 인하여 철손이 크며 소음과 풍손이 크다. 그러므로 고효율화의 실현을 위해서는 이러한 점들을 고려하여 설계하여야 한다.

SRM은 회전자의 위치각도에 의해 생기는 인덕턴스의 변화를 이용하여 회전 토크를 발생시키는 전동기이다. 그러므로 토크의 극대화를 위해서는 자기적 용량과 기준 운전점에 대한 적절한 인덕턴스의 산정이 필요하다. 이것은 적정 권선수의 산정으로서 가능하다.

본 연구에서는 자기적 용량과 기준 운전점에 대한 적정권선 산정식을 유도하고 실험에 의해 검증함으로써 고효율 설계의 기준을 제시하였다. 그리고, 고효율 설계의 기준하에서 제작된 다양한 SRM에 대한 실험적 결과를 바탕으로 손실특성을 비롯한 제반 운전특성을 해석하였다.

2. 적정권선 설계

SRM은 고정자의 상에 대한 회전자의 위치각도에 따른 인덕턴스의 변화를 효과적으로 활용하여 회전토크를 발생시키며

축토크는 여자되는 각 상에서 발생하는 토크의 합이다. 그러므로 SRM의 적정권선의 설계는 고정자의 상을 여자시키는 동안에 대해서 가장 이상적인 전류파형과 인덕턴스의 변화를 기준으로 하여 이루어져야 한다.

기준 운전점에 대한 적정권선 산정식을 유도하기 위하여 SRM의 토크 T의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{L_{max}}{\Delta\theta} \left(1 - \frac{L_{min}}{L_{max}}\right) \quad (1)$$

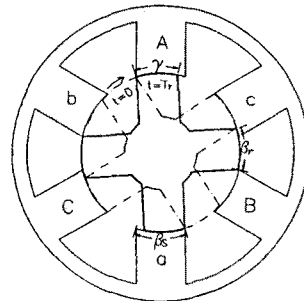
여기서, i : 상전류, θ : 회전자의 위치각,

L : 상인덕턴스,

L_{max} : 인덕턴스의 최대값,

L_{min} : 인덕턴스의 최소값

식 (1)에서 보는 바와 같이 토크가 큰 값이 되기 위해서는 L_{min}/L_{max} 이 작은 값이 되도록 권선설계를 해야한다.



β_s = stator pole arc

β_r = rotor pole arc

그림 1 6/4 SRM의 구조

그림 1에서 회전자가 임의의 시간 $t=0$ 일 때의 L_{min} 의 위치에서 T_r 시간동안 증첩각 γ 만큼 회전하면 인덕턴스는 최고값 L_{max} 이 된다. 이때의 인덕턴스 L_{max} 의 값은 다음과 같다.

$$L_{max} = \frac{k_s \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot D_r \cdot L_c \cdot \gamma}{4\delta} \quad (2)$$

여기서, k_s : 철심의 포화계수, N : 각 상의 턴수,

ω_0 : 공극의 부자율, D : 회전자 철심의 외경,
 L_c : 회전자 철심의 길이, δ : 공극의 길이

인가전압에 대한 적정 권선수를 산정하기 위해서 식 (3)의 SRM의 전압동식에서 인덕턴스와 전압, 전류의 관계를 도출하기로 한다.

$$V = [R + \frac{dL(\theta)}{dt}] \cdot i + L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (3)$$

식 (3)에서 권선저항 R의 값은 작아서 무시할 수 있고 여자 전류는 Flat top이어서 I_r 로 일정하다고 가정한다. 인덕턴스의 증가구간에서 회전자가 T_r 시간동안 중첩각 γ 만큼 이동하여 인덕턴스가 L_{min} 에서 L_{max} 까지 증가하였으므로 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\int_0^{T_r} V dt = \int_{L_{min}}^{L_{max}} I_r dL(\theta) \quad (4)$$

$$V \cdot T_r = (L_{max} - L_{min}) \cdot I_r \quad (5)$$

여기서 시간 T_r 를 각속도와 중첩각의 관계로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_r = \frac{\gamma}{\omega_m} \quad (6)$$

여기서 ω_m 은 기계적 각속도이다.

식 (5)와 식 (6)에 의해 기준전압 V_{base} 와 각 상의 전류의 중첩이 가장 이상적일 때의 DC-link 전류 I_{base} 를 기준속도 n_{base} 에 대하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$V_{base} = I_{base} \cdot \frac{1}{\gamma} (L_{max} - L_{min}) \cdot n_{base} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (7)$$

식 (1)의 토크 식에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 L_{max} 에 대하여 L_{min} 의 값이 작아질수록 토크가 증가한다. 이 L_{min} 의 값은 고정자와 회전자의 극호각과 요오크의 지름에 비례하고 공극의 길이에 반비례한다. 그 값을 정확히 산정하는 것은 어렵기 때문에 본 연구에서는 여러 시작기에서의 실험적 측정에 의해 L_{min} 의 값이 보통 L_{max} 의 1/10 정도의 값이 되는 것을 확인하여 이 값을 식 (8)과 같이 권선수 설계식 유도에 적용하였다[1].

$$V_{base} = I_{base} \cdot \frac{1}{\gamma} (0.9L_{max}) \cdot n_{base} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (8)$$

위의 식에 식 (2)의 인덕턴스의 값을 대입시키면 다음과 같은 식이 된다.

$$N = \sqrt{k_w \cdot \frac{V_{base}}{I_{base}} \cdot \frac{\delta}{\pi \cdot D_r \cdot L_c} \cdot \frac{1}{n_{base}}} \quad (9)$$

여기서 권선계수 k_w 는 $1.33 \times 10^8 \sim 1.54 \times 10^8$ 정도가 적당하다. 이 때의 포화계수 k_a 는 0.65~0.75의 값이다.

식 (9)를 권선수에 대한 인가전압의 비 V/N과 암페어-턴 AT로 표현하면

$$V/N = k_w^{-1} \cdot AT \cdot \frac{\pi \cdot D_r \cdot L_c}{\delta} \cdot n_{base} \quad (10)$$

과 같이 된다.

그리고, 식 (10)을 공극의 자속밀도에 대해 표현하면

$$V/N = k_n' \cdot B_r \cdot \pi D_r L_c \cdot n_{base} \quad (11)$$

과 같이 되며 계수 k_n' 는 $9.75 \times 10^{-3} \sim 11.25 \times 10^{-3}$ 정도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험적 해석에 의한 적정권선 설계

여러가지 시작기에 대해 인가전압과 권선수를 변화시키면서 효율을 측정하였다. 그 결과는 그림 2와 같다.

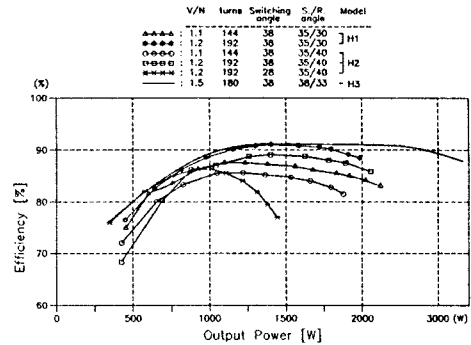


그림 2 적정권선수 산정을 위한 효율특성

효율이 90% 정도인 운전점을 권선 설계식에 대입하여 권선 계수 k_w 를 $1.33 \times 10^8 \sim 1.54 \times 10^8$ 의 값으로 설정하였다.

그리고, 동일 기준속도로 운전할 경우에 권선수를 많이하고 전압을 증가시키면 동손이 감소하여 고효율화되나, 권선수가 많아지면 winding space factor가 커지므로 모터의 치수가 커진다는 점을 고려하여야 한다.

자극의 설계에서 상전류가 소호될 때의 시간적 여유를 고려하면 $\beta_a > \beta_r$ 의 경우와 $\beta_a < \beta_r$ 인 경우 두 가지가 있다[2]. 그림 2에서 일정한 β_a 에 대해서 $\beta_a < \beta_r$ 의 경우인 H2 시작기는 인덕턴스의 증가구간이 넓고 양 자극극간의 중첩특성이 좋아져서 출력이 증가하지만 철손이 증가하여 효율이 감소한다. $\beta_a > \beta_r$ 의 경우인 H1 시작기는 출력은 다소 감소하지만 철손이 작아 효율이 높다.

3.2 손실과 효율특성

SRM의 출력특성 중 손실특성식은 식 (12)와 같이 산정할 수 있다.

$$W_{loss} = k_c I^2 R + k_i [AT]^a (n + \tau^2 \cdot n^2) + k_m \cdot n^3 \quad (12)$$

여기서, W_{loss} : 총손실

k_c : 철손의 계수,

k_i : 철손의 계수,

k_m : 기계손의 계수,

AT:상당 기자력, n:회전수,

τ :철심의 두께

그림 3에서는 SRM의 운전 실험 결과를 식(12)에 의하여 효율과 손실의 특성으로 해석한 결과를 나타내었다.

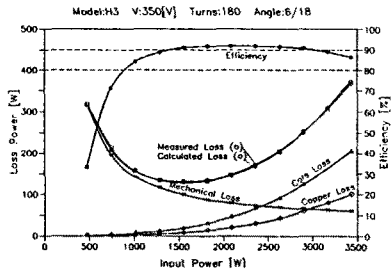


그림 3 효율과 손실의 특성곡선

그림 3에서의 손실특성을 살펴보면 SRM은 기계적 구조상 공극이 작아서 자기포화 현상이 심하고 펄스전류 스위칭에 의한 구동으로 인하여 고조파 성분이 많이 포함되어 있기 때문에 기자력에 대한 철손의 지수가 유도기나 다른 일반 전동기의 1.5 배 정도로서 전체 효율에 미치는 영향이 크다[3][4]. 동손은 권선이 고정자 상에만 있기 때문에 전체 손실에 대한 영향이 작다.

그림 4는 3.8 마력의 SRM을 230V, 1100 r.p.m으로 운전한 경우의 효율을 암페어-턴에 대해서 나타낸 결과로서 본 시작기에서는 암페어-턴이 900~1100의 범위일 때 효율이 높음을 보여주고 있다.

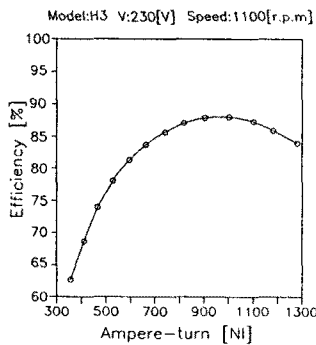


그림 4 암페어-턴에 대한 효율특성

실험적 해석에 의하면 효율은 운전속도, 전압 및 암페어-턴과 관련이 있으며 다양한 속도와 인가전압의 운전조건에서의 효율특성을 해석한 결과 효율은 그림 4에서와 같이 암페어-턴과 직접적인 관계가 있으며 고효율의 운전점은 한정된 암페어-턴의 범위에 존재함을 알 수 있었다. 그러므로 고효율 SRM의 설계를 위해서는 전동기의 자기적 용량에 대한 적정 암페어-턴의 산정이 이루어져야 한다.

4. 결 론

- (1) 적정 권선수의 설계식은 식 (9)와 같으며 권선계수 k_w 는 $1.33 \times 10^8 \sim 1.54 \times 10^8$ 정도이다.
- (2) SRM은 기자력에 대한 철손의 지수가 커서 철손이 전체 효율에 미치는 영향이 크다.
- (3) 고효율의 운전점은 적정 암페어-턴의 범위에 한정되므로 자기적 용량에 대한 적정 암페어-턴을 설계하여야 한다.

5. 참고문헌

- [1] 황영문, 공관식 외, "자기적 비선형성을 고려한 투자율 산정방식의 Switched Reluctance Motor의 전류 및 토오크 해석", 대한전기학회 논문지, 제 42권 8호, pp.7-13, 1993.8.
- [2] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J.Corda and N.N.Fulton., "Variable-Speed Switched Reluctance Motors" IEE Proc. B, Vol.127, No.3, pp.253-265, 1980.
- [3] J.M. Stephenson, M.A.El-Khazender, "Saturation in Doubly Salient Reluctance Motors" IEE Proc. Vol.136, P.B, No.1, Janu. 1989
- [4] Finch, J.W., Faiz, J.S, and Metwally, H.M.B., "Core Loss In Switched Reluctance Motor Structures: Experimental Results", Proc. ICEM, pp.31-34, Pisa, Sept. 1988.