

SRM의 고효율화를 위한 적정권선 설계의 연구

정태욱* 추영배 공관식 안영주 황영문
부산대학교

Design standard of winding number of stator pole
for high efficiency Switched Reluctance Motor

Tae-Uk Jung* Young-Bae Choo Gwan-Sik Kong Young-Ju Ahn Young-Moon Huang
Pusan National University

Abstract

S R M drive system is suitable for high performance drive over a wide speed range because of its outstanding instantaneous torque characteristics, controllability and simple drive structure. The realization of high efficiency S R M system is achieved by design of optimal magnetic structure, and by development of switching drive circuit.

So, this study describes the design standard of the winding number of stator pole for optimal magnetic structure.

1. 서론

2중 돌극구조를 가진 Reluctance motor는 그 구조가 간단하고 견고하기 때문에, 고속회전에 적합할 뿐만 아니라 가변속 특성이 뛰어나고 고온 및 진동 등의 좋지 않은 환경 조건 하에서도 사용할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 회전자의 위치에 따라 릴럭턴스의 값의 변화가 크기 때문에 철심중의 자속의 피그러짐이 심하고 정현파가 아닌 펄스파에 의한 스위칭으로 인하여 고조파가 많이 포함되어 철손이 크다. 또한 펄스파에 의한 스위칭에 의해 토오크가 발생하므로 토오크 백동과 소음이 심하고 회전자의 돌극으로 인해 중손이 크다.

그러나 전력전자기술의 발전에 의한 인버터의 개발과 자계구조의 최적화 설계 연구의 성과로 인하여 고효율로서 가변속운전이 가능한 Switched Reluctance Motor(SRM)가 연구되고 있다.

SRM 자체의 고효율화를 위해서는 릴럭턴스 토오크의 극대화를 위한 자계적 구조 설계의 최적화가 이루어져야 한다. 자계적 구조의 최적화를 위해서는 비선형적인 릴럭턴스 프로파일에 대한 해석이 필요하다.

최적의 릴럭턴스 프로파일은 위한 적정권선의 설계는 릴럭턴스 토오크의 이용을 극대화하는 데 중요한 파라미터로서 작용할 뿐만 아니라, 고효율화의 실현을 위한 설계의 기준이 된다.

2. 고효율화를 위한 적정 권선 설계

2.1. 토오크의 발생과 인덕턴스 프로파일

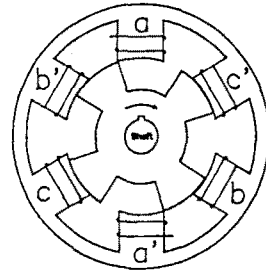


그림 1 6/4 SRM의 구조

SRM의 토오크는 릴럭턴스가 최소로 되는 방향, 즉 여자되는 코일의 인덕턴스가 최대가 되는 방향으로 발생한다 [1]. 따라서 토오크는 전류의 방향과 무관하다. 토오크 T를 magnetic coenergy W'의 값으로 표시하면

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W'(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

과 같다.

여기서, θ 는 회전자의 위치각도이다.

자기적인 비선형성을 무시하면 발생토오크는 식(2)와 같다.

$$T(\theta, i) = I^2/2 (dL/d\theta) \quad (2)$$

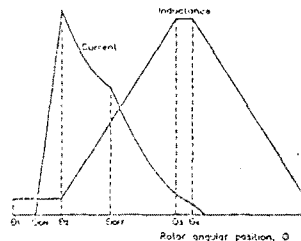


그림 2 인덕턴스 프로파일과 상전류

회전자의 위치각도에 대한 인덕턴스 프로파일과 그것에 의

한 토크 발생[1]은 그림 2와 같다. 전류의 확립을 위해 turn on은 θ_2 에 앞서 θ_{0n} 에서 행한다.[2] $\theta_2-\theta_3$ 에서는 인덕턴스가 증가하여 결국 최대값 L_{max} 로 되며, 실질적인 정토크의 발생구간이다. 이때의 동작방정식은

$$V = Ri + d\lambda / dt \quad (3)$$

이다. 여기서 λ 는 쇠교자속이다.

자기적인 비선형성을 무시하면

$$V = L(di/dt) + i(d\lambda/dt)\omega \quad (4)$$

이며, 에너지 흐름은

$$V_i = d/dt(1/2 \cdot Li^2) + 1/2(i^2 dL/d\theta)\omega \quad (5)$$

$\theta_3-\theta_4$ 는 인덕턴스가 L_{max} 로 일정하고 Dead Zone에 해당하며 다음 구간에서의 부토크를 억제하기 위하여 상전류를 소멸시키는 구간이다.

2.2 비선형성을 고려한 인덕턴스 프로파일

S R M은 고정자의 자극에 대한 회전자의 위치에 따라 인덕턴스의 값이 변화하고, 철심의 공기에 대한 비투자율인 μ_r 은 자로에 기자력이 증가함에 따라 자속밀도의 포화특성 때문에 그 값이 변화하는 특성을 가지고 있다.

인덕턴스를 계산하기 위하여 전동기의 기자력에 관한 등식 및 자속쇄교에 관한 등식으로 부터 인덕턴스[3]를 구하면 다음과 같다.

$$L(\theta, i) = \frac{N^2}{\frac{1}{\mu_r(\theta, i)\mu_0} \sum \frac{\ell_{c,j}}{A_{c,j}} + \sum \frac{\ell_{r,j}}{\mu_0 A_{r,j}}} \quad (6)$$

여기서 N : 고정자 상의 턴수, μ_0 : 공극의 투자율
 μ_r : 철심의 비투자율, $\ell_{c,j}$: 철심의 자로길이
 $\ell_{r,j}$: 공극의 자로길이, $A_{c,j}$: 철심자로의 단면적
 $A_{r,j}$: 공극자로의 단면적

J항은 릴럭턴스 등가회로에서 자로를 요오크, 고정자, 회전자극, 공극등으로 분할하여 계산할 때 각 부분의 표시이다.

회전자 위치각도와 상전류에 대한 인덕턴스 프로파일은 식(6)으로 부터 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

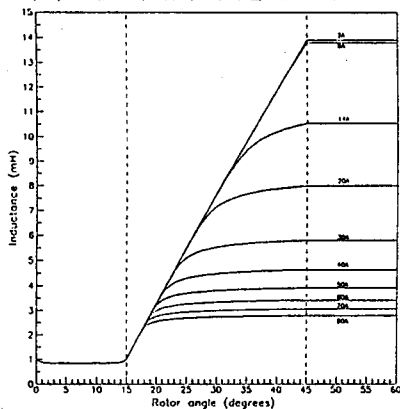


그림 3 산정된 인덕턴스 프로파일

S R M의 인덕턴스는 회전자의 위치각도에 따라 변화하고 비선형적이라는 것을 알 수 있다. 그리고, 릴럭턴스 토크의 이용을 극대화 할 수 있는, $dL/d\theta$ 가 최대가 되는 최적의 인덕턴스 프로필을 얻기 위해서는 고정자와 회전자의 자기적 용량과 여자전압에 대한 적정 권선수를 산정해야 한다.

2.3 적정 권선 설계

S R M Drive의 자기적 작용은 Variable reluctance를 효과적으로 활용하는 기구이다. 즉, 스위칭 할 때마다 자극의 자속이 증가하며, 이것이 현재 활용되고 있는 다른 전동기구와 근본적으로 다르다.

그러므로 아래와 같은 기준하에서 적정 권선설계를 한다.

각 상에서의 최대토크 T_{max} 가 큰 값이 되도록 L_{min}/L_{max} 가 될 수 있는 한 작게 설계할 한다.

고정자 자극의 폭이 β_s , 회전자 자극의 폭이 β_r 일 때 토크의 식은 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{L_{max}}{\gamma} \left(1 - \frac{L_{min}}{L_{max}}\right) \quad (7)$$

여기서

$$L_{max} = \frac{k_s N \omega \mu_0 \gamma D_r L_c}{4\delta}$$

$\gamma = \beta_s$ 와 β_r 와의 중첩각

k_s = core의 포화계수

$N\omega$ = 각 상의 turns

D_r = Rotor core의 직경

L_c = Rotor core의 길이

δ = Air gap의 길이

그리고, 각 상의 전압 방정식은

$$V = \left[R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \right] i + L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (8)$$

이다.

각 상의 전류방정식 $i(t)$ 는 식(8)에 의하여

$$i(t) = \frac{V \cdot t}{L(t)} = \frac{V \cdot t}{L_{min} + [dL(\theta)/d\theta \cdot d\theta/dt] t} = \frac{V}{L_{max}/\gamma \cdot n_{base} \cdot \pi/30} \quad (9)$$

가 된다.

Base speed는 최대출력을 얻을 수 있는 최저속도이고 최대토크를 발생하는 최고속도이다.

속도에 대한 여자기자력의 작용 및 철심의 손실이 효율특성에 큰 영향을 미치므로 Base speed에 대한 고정자 권선의 정격여자전압과 적정한 권선수의 산정이 필요하다. 그러므로 Base speed n_{base} (r.p.m)와 Base rated current I_{base} 를 설정한다. Switching current를 직류성분의 I_{base} 라 하고, 식(9)에서 속도 기전력 E_o 의 기준을 다음과 같이 설정한다.

그러므로, 식 (10)에서 V/N 의 설정은 다음과 같은 식이 된다.

$$V/N \approx K_N \cdot B_m \cdot (\beta_s - \beta_r) \cdot \pi D_e L_e \cdot \omega_{base} \quad (11)$$

여기서 K_N 는 수치 및 시작기에서의 실험적 해석결과 $K_N = 0.55 \sim 0.65$

가 적정치이다.

3. 실험결과 및 고찰

시작기에 대해 V/N 의 값을 달리하면서 전기적 입력 P_i 에 대한 기계적 출력 P_k 로서의 효율을 측정하였다. 그 결과는 그림 4, 5와 같다.

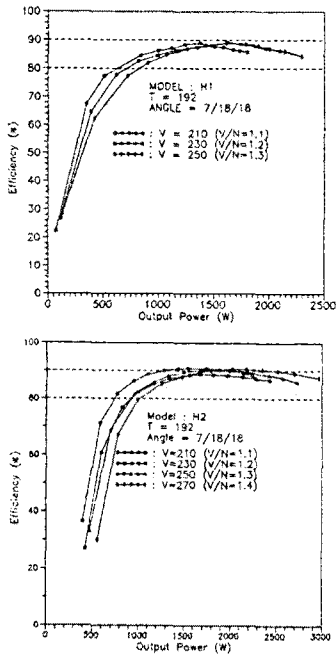


그림 4 V/N 의 값에 대한 출력과 효율특성

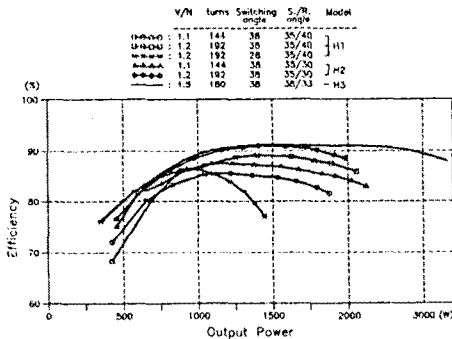


그림 5 다양한 시작기에서의 실험결과

시작기의 공극의 자속밀도 B_m 를 1.2 Wb/m^2 로 계산추정하였을 때 각 전동기의 V/N 는 2.5마력의 Model H1과 H2에서는 $1.2 \sim 1.3$ 이 적정치이며, 출력을 150% 높은 3.8마력의

Model H3에서는 $1.5 \sim 1.6$ 이 적정치였다.

그리고 실험결과에 의해 Base speed가 고속도인 경우는 권선수를 적게 하고 저속도인 경우는 권선수를 많이하는 것이 효율을 향상시키는 것을 알았다.

동일 Base speed에서 운전되는 전동기의 자기적구조에서는 권선수를 많이하고 전압을 증가시키면 고효율화되나, 권선수가 많아지면 winding space factor가 커야 되므로 모터의 치수가 커진다는 점을 고려하여야 한다.

S R M Drive의 손실특성 중 가장 특이한 것은 기자력[AT]에 대한 철손[4]의 지수가 유도전동기 및 동기 전동기에 비하여 매우 크다. 그러므로 속도에 대한 여자기자력의 작용 및 철심의 손실이 효율특성에 큰 영향을 미치므로 Base speed에 대한 고정자 권선의 정격여자전압과 적절한 권선수의 산정이 필요하다.

그리고 다양한 형태의 시작기의 실험결과 고정자의 자극의 폭이 회전자의 자극의 폭보다 큰 경우에 출력은 작지만 철손이 작아져 효율이 높아지는 것을 알았다.[1]

4. 결론

S R M의 자기적 구조는 릴럭턴스 토오크를 극대화하기 위하여 Variable reluctance가 효과적으로 작용할 수 있도록 자계구조의 적정화, 권선수의 적정화가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 S R M의 고효율화를 위해 그 적정 권선수를 이론적으로 도출하고, 그 결과물 여러 시작기에 대한 실험에 의해 검증하였다. 그리고, 이에 관한 설계식도 유도하여 S R M의 설계의 기준을 제시하였다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Slobodan Vukosavic, Victor R.Stefanovic., "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation" IEEE trans. on IA, Vol.27, No.6, Nov/Dec, 1991.
- [3] 공관식, 황영문 외 "Switched-Reluctance Motor에서 인덕턴스 따른 토오크 특성", 대한전기학회 '92 하계종합학술대회 논문집 part A.
- [4] Finch, J.W., Falz, J., and Metwally, H.M.B., "Core Loss In Switched Reluctance Moto Structures:Experimental Results", Proc.ICEM, pp.31-34, Pisa, Sept. 1988.