

스위치드 릴럭턴스 전동기 설계를 위한 특성해석 및 회로정수 도출

장석명, 유대준, 박지훈
충남대학교

Analytic Derivation and parameters estimation for SRM Design

Seok- Myeong Jang, Dae-Joon You, and Ji-Hoon Park
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - Industrial interest in switched reluctance motor (SRM) drives has varied since 1850s. This has been primarily due to the emerging markets for variable speed drives in consumer and industrial products, such as home appliances, air conditioning, hand tools, fans, pump motor, etc. However, SRM has been plagued with the acoustic noise and vibration problem by input power of fixed section. Therefore, This paper offers electromagnetic analysis for torque ripple reduction in mechanical geometry and electric parameters. This means that the rotor pole arc and electric parameters have related to produce the active and negative torque. This analysis results are verified by the finite element method.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고, 가격이 저렴하며 토크/관성의 비가 크기 때문에 출력밀도가 우수하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 구동원리상 일정 형태를 가지지 않은 펄스형태의 상 토크 파형에 의해 토크 리플이 크다는 치명적인 단점을 가지고 있다. 따라서 토크 리플은 소음, 진동의 원인이 되므로 전동기의 효율 및 적용 분야에 있어서 많은 제약을 가지고 있다. 그러므로, 본 논문은 스위치드 릴럭턴스 전동기의 초기 설계에 있어서, 전자기적 해석 용법에 따른 토크 리플 저감을 위한 설계 조건에 대해 제시하며 회로 정수 도출에 따른 동작 범위의 예측을 나타낸다.

스위치드 릴럭턴스 전동기의 동작원리는 전류가 고정자의 한 권선에 흐르면, 토크는 회전자가 여자 된 고정자의 극에 정렬하는 방향으로 발생되며 발생 토크의 방향은 고정자 여자 상에 대한 회전자 위치에 의해 결정되고, 전류방향과는 무관하다. 또한 연속전인 토크는 회전자 위치에 대해 고정자 각상을 순차적으로 여자하면서 발생한다. 그림. 1은 3상 6/4 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자와 가동자의 기하학적인 구조를 보여주고 있다. 스위치드 전동기의 구동 원리에 있어서 인덕턴스는 전동기의 효율 및 출력을 제시하며, 초기 설계에 있어서 기하학적인 구조의 변수들에 의해 얻어진다. 그림. 2는 위치에 따른 인덕턴스에 있어서 스위칭된 전압에 의한 전류 파형과 그에 따른 토크를 제시하고 있다. 여기서 토크 리플의 저감을 위하여 고정자와 가동자의 극호는 전류 수를 인가하기 위한 시간에 의해 최적의 상태가 얻어져야 하며 정토크를 얻기 위한 전기적 회로 정수와 부토크를 피하기 위한 전류 소호의 충분한 시간을 가져야 한다. 또한, 그림. 3은 전류에 따른 권선의 쇄교 자속을 보여주고 있다. 스위치드 전동기는 적층된 철심 코어의 사용에 의해 일정한 B-H 곡선을 가지게 되며 이는 일정 전류 이상에 있어서 포화된 특성을 보여 준다. 따라서 철심 코어의 에너지 효율을 최대한 이용하기 위한 구간에 있어서 초기 설계는 이루어 져야 한다.

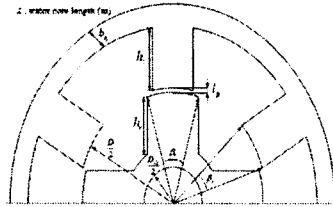


그림.1 6/4-극을 갖는 SRM

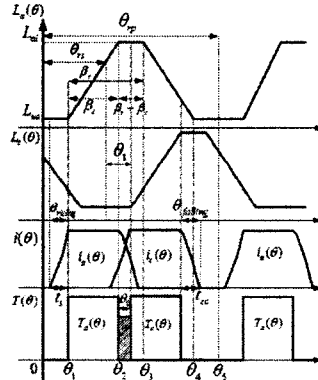


그림.2 인덕턴스 프로파일에 따른 토크 특성

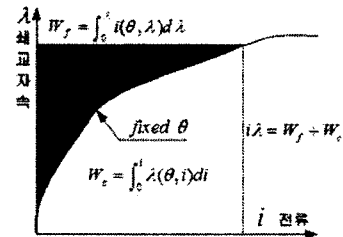


그림.3 전류에 따른 에너지

2. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성해석

2.1 수학적 모델링

그림.2에 있어서 SRM의 설계 조건은 다음의 가정에 의해 제시된다.

가정: 1. self-starting requirements

2. shape of static torque Vs. rotor position

위 가정을 만족하기 위한 노력으로 그림.2로 부터 식 (1)을 제시한다.

$$\theta_0 = \theta_{rs} + \theta_1 - \theta_2 = \theta_{rs} - (\theta_2 - \theta_1) \leq 0 \tag{1.1}$$

$$\theta_2 - \theta_1 = \theta_{rs} = \beta_s = \frac{\theta_{rp}}{q} = \frac{4\pi}{p_r p_s} \tag{1.2}$$

$$\min[\beta_s] = \frac{4\pi}{p_r p_s}, \quad \beta_r \geq \beta_s \quad (1.3)$$

여기서, $p_r = 4, p_s = 6$ 일때, $\beta_s \geq 30$ 보다는 커야 하며, 부토크와 효율을 고려한 회전자 극호는 고정자 극호보다 커야 한다.

본 논문에서는 β_s 를 30도로 지정하였으며, 최적의 θ_{on} 과 θ_{off} 은 독립적인 설계 변수가 아니라 가동자 극호 β_r 에 따른 각각의 θ_{on} 과 θ_{off} 를 제시하여야 한다. 식 (2)는 SRM의 전압방정식을 나타내며 이 식을 이용하여 계산된 인덕턴스 프로파일에 따라 SRM의 턴 온 시간과 턴 오프 시간을 예측할 수 있다.

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta)}{dt} = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega i \quad (2)$$

여기서, $\lambda(\theta) = L(\theta)i$, $\theta = \omega t$ 이며, 상승 인덕턴스의 구간과 평활인덕턴스의 구간에 의한 전류가 같음을 이용하여 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{rising} &= \omega \times t_s \times \frac{180}{\pi} [\text{deg}] \\ &= -w \frac{L_{ua}}{R} \ln\left(1 - \frac{R}{R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} w}\right) \frac{180}{\pi} [\text{deg}] \end{aligned} \quad (3)$$

또한 인덕턴스의 하강구간에 의한 전류와 인덕턴스의 평활 구간에서의 전류 소화에 의해 식 (4)와 같이 전류가 0이 되는 턴 오프 시간을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{falling} &= \omega t_{zc} \frac{180}{\pi} \\ &= -w \frac{L_{al}}{R} \ln\left(\frac{R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} w}{2R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} w}\right) \frac{180}{\pi} [\text{deg}] \end{aligned} \quad (4)$$

그림.3에 전류에 따른 에너지에 대해 SRM의 토크 방정식은 자기수반에너지에 의해 식 5과 같이 얻어진다.

$$T_e(\theta, i) = \frac{\partial W_c(\theta, i)}{\partial \theta}, \quad i, \text{constant} \quad (5.1)$$

$$T_c = \frac{dW_c}{d\theta} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (5.2)$$

3. 회로정수의 산출

3.1. 저항의 계산

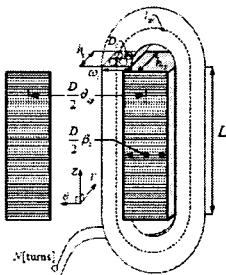


그림.4 저항 산정을 고정자 극당 권선의 모델

그림.4는 저항 산정을 위한 고정자 극당 권선의 형태를 나타내며 정해진 β_s 에 대해 코일의 직경과 권선의 접적

율에 의한 턴수 N 에 의해 극당 권선 저항은 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$R = 4N\sigma \frac{l_{av}}{\pi D_c^2} \quad (6.1)$$

$$\omega_{max} = \frac{D\theta_{sp}}{4} - \frac{D\beta_s}{4} \quad (6.2)$$

$$l_{av} = 2L + \pi w_c \quad (6.3)$$

$$N = \frac{4k_{sp}\omega h_c}{\pi D_c^2} \quad (6.4)$$

$$h_c < h_s < \sqrt{2} h_c \quad (6.5)$$

3.2 인덕턴스의 계산

3.2.1 unaligned 인덕턴스

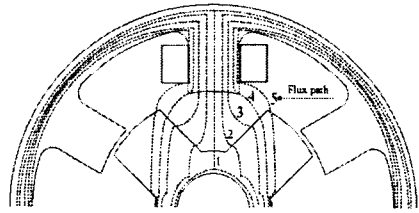


그림.5 구간별 자속 경로

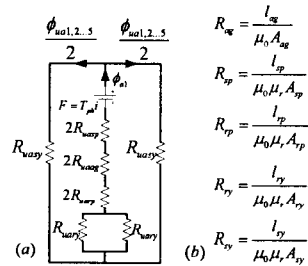


그림.6 자속 경로에 따른 자기저항

인덕턴스 계산을 위한 다양한 방법이 있어서 본 논문은 등가 자기저항법에 의한 간단한 해석 방법을 제시한다. 그림. 5는 가동자의 unaligned 구간에 있어서 자속 경로를 나타내고 있으며, 이때의 한 상에 의한 자기저항은 그림.6과 같이 얻어진다. 여기서 자기회로와 인덕턴스는 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$F = T_{ph} i = R\phi \quad (7.1)$$

$$L = T_{ph} \phi / i \quad (7.2)$$

여기서, T_{ph} 는 상당 권선 턴수로서 극당 턴수의 두 배가 된다. 또한 공극, 요크, 폴에 있어서 각각의 자기 저항은 면적과 거리에 있어서 얻어진다. 본 논문의 unaligned 인덕턴스를 위한 자속 경로는 그림.5와 그림.6에서와 같이 5가지 경우에 있어서 주어진다.

3.2.2 aligned 인덕턴스

aligned inductance에 있어서 자속 경로는 주자속에 대한 성분과 누설 자속에 대한 성분으로 표현되며, 주 자속의 경우 식 (8)과 같이 얻어진다.

$$F = R\phi, R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (8.1)$$

$$\phi_{al} = \frac{T_{ph} i}{2[R_{sp} + R_{ag} + R_{rp}] + \frac{1}{2}R_{ry} + \frac{1}{2}R_{sy}} \quad (8.2)$$

$$L_{a1} = \frac{T_{ph} \phi_{al}}{i} \quad (8.3)$$

누설 자속에 대한 인덕턴스는 식 (9)와 같이 얻어진다.

$$\phi_{a2} = \frac{i3T_{ph}/4}{R_{sp2} + R_{g2} + R_{sy2}} \quad (9.1)$$

$$L_{a1} = 4 \left(\frac{3T_{ph}/4 \phi_{al}}{i} \right) \quad (9.2)$$

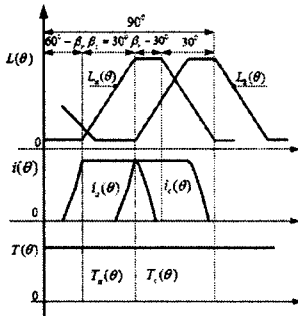


그림.7 요구된 인덕턴스 프로파일과 토크 파형

표1. SRM의 기계적 변수 및 해석 결과

항목	기호	크기(단위)
고정자 내 직경	D	38(mm)
공극 길이	l_g	0.5(mm)
고정자 극호	β_s	$\pi/6(rad)$
가동자 극호	β_r	$5\pi/18(rad)$
가동자 극 길이	h_r	7.66(mm)
고정자 극 길이	h_s	21.34(mm)
shaft 직경	D_0	10(mm)
요크 길이	b_{sy}	6(mm)
상당 턴수	T_{ph}	138(turns)
상당 저항	R_s	0.92(ohm)
unaligned 인덕턴스	L_{un}	0.0072(H)
aligned 인덕턴스	L_{al}	0.235(H)

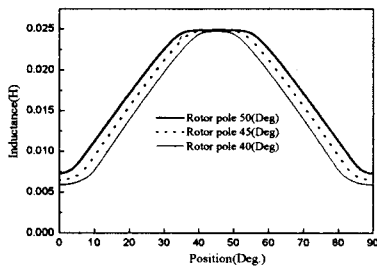


그림.8 가동자 극호에 따른 인덕턴스의 변화

그림.7은 요구된 인덕턴스 프로파일로서 48(V) DC 전압에 있어서 2000(rpm), 0.5(Nm)를 제시하고 있으며, 토크 리플을 저감하기 위한 노력에 있어서 초기 설계를 위한 기계적 변수 및 회로 정수 값을 표 1에서 제시하

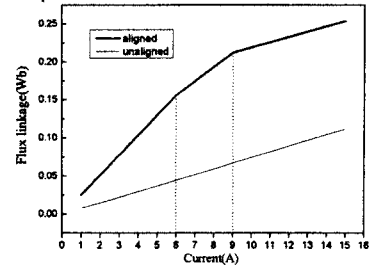


그림.9 전류에 따른 쇄교자속(가동자 극호 50(Deg.))

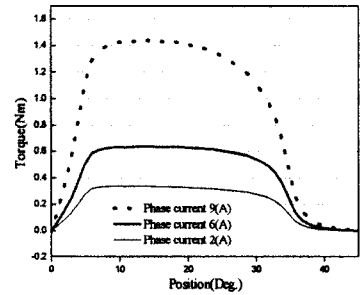


그림.10 일정 상 전류에 따른 토크 파형(가동자 극호 50(Deg.))

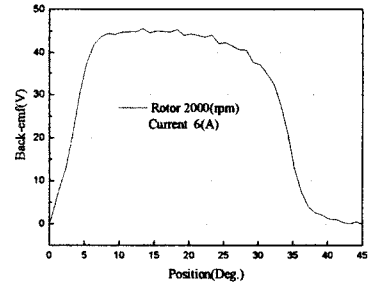


그림.11 상 전류 6(A)와 가동자 속도 2000(rpm)에서의 역기전력(가동자 극호 50(Deg.))

고 있다. 본 논문에 사용된 가동자의 극호는 50도로서 각각의 쇄교자속, 토크, 역기전력에 대해 그림. 9, 10, 11은 제시하고 있다.

4. 결 론

SRM의 토크리플을 저감하고 효율을 최대화하기 위한 노력에 있어서 본 논문은 가동자의 극호에 따른 토크 및 역기전력 특성을 제시하고 있다. 또한 SRM은 일정구간 전류 입력에 대해 턴 온과 오프 시간에 대해 회로 정수의 영향을 크게 받는다. 따라서 저항과 인덕턴스의 정확한 예측은 SRM의 설계 조건에 중요한 요소로 작용되어진다.

[참고 문헌]

- [1] 김운현, 김술, 최재학, 이주, "에너지 변환법에 의한 스위치드 릴럭턴스 모터의 토오크 추정," 대한 전기학회 논문지, Vol. 50B, No. 8, Aug. 2001.
- [2] R. Krishnan "Switched Reluctance motor drives" CRC Press, 2001
- [3] Funda Sahin, H. Bulent Ertan and Kemal Leblebicioglu, "Optimum geometry for torque ripple minimization of Switched Reluctance Motors," IEEE Trans. Energy conversion, Vol 15, No.1, PP30-39, March 2000.