

전기적인 파라메터 변화에 따른 스위치드 릴럭턴스 전동기의 힘특성 해석

*전연도, **이철직, ***이택기, *이 주

*한양대학교 전기공학과 에너지변환연구소, **대림대학 전기과, ***한경대학교 전기공학과

Analysis of Force Characteristic in Switched Reluctance Motor According to Electric

*Yon-Do Chun, **Cheol-Jick Ree, ***Taek-Kie Lee and *Ju Lee

*Energy Conv. Lab. in Hanyang Univ., **Elec. Eng., in Darim College, ***Elec. Eng. in Hangy

Abstract - In this paper, the influence of electrical parameters such as the turn-on and turn-off angle on the torque and force characteristics is investigated for the reduction of the torque ripple which is main source of vibration and noise in switched reluctance motor (SRM). The four different types of the turn-on angle are set to the section of rising inductance profile respectively. The optimum turn-on angle is proposed for the acquisition of the flat current shape minimizing the torque ripple. 2D finite element method (FEM) considering the iron saturation and the actual switching circuit of the SRM drive is applied for the dynamic analysis. The simulation results of phase current and torque are also compared to the experimental results.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)는 구조가 간단하고 견고하며, 높은 효율과 낮은 제작비용의 장점을 가지고 있으며, 최근 전력전자 기술의 급속한 발달에 따라 가전 분야 및 산업분야에서의 구동원으로서 크게 주목받고 있다 [1]. 또한 유한요소법에 기초한 수치해석 기술의 발달에 따른 설계기술의 향상 및 센서, 제어 기술 등의 진보에 따라 많은 성능 향상이 이루어지고 있다.

그러나 SRM은 고정자와 회전자의 이중 돌극 구조를 가지고, 펄스형태의 여자방식으로 인해 근본적으로 토크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 SRM을 산업 분야에 확대 적용하기 위해서는 토크 맥동을 감소 및 고토크 밀도가 요구되며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

소음 진동의 원인이 되는 토크 맥동을 저감하기 위한 방법으로서 SRM의 기하학적 파라메터인 고정자 극호각 (β_s)와 회전자 극호(β_r)각을 변경하거나 전기적 파라메터인 턴온 각과 턴오프 각을 조정하는 방법 등이 제시되고 있다 [3][4].

본 논문에서는 토크 맥동을 저감하기 위한 방법으로서 SRM의 전기적 파라메터인 턴온, 턴오프 각도의 변화에 따른 SRM의 토크 및 힘 특성에 미치는 영향을 살펴본다. SRM의 정확한 해석을 위해서 구동회로를 고려한 2차원 유한요소법을 사용하였으며 인덕턴스 증가구간에 대해 서로 다른 턴온각을 4가지 경우로 나누어서 토크 맥동에 미치는 영향을 살펴본다. 또한 인덕턴스 증가구간에서 토크 맥동을 최소화 할 수 있는 평활전류가 흐르도록 최적의 턴온 각을 계산하였다. 해결결과의 검증 을 위해 실험치와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

그림 1은 해석모델의 단면도이다. SRM은 6개의 고정자와 4개의 회전자로 이루어져 있고 회전자 극호와 고정자 극호는 각각 50°, 30°로 선정하였다. 그림 2는 턴온각 및 턴오프 각에 따른 토크 및 전류특성을 고찰하기 위해 턴오프 각을 고정시키고, 턴온각을 인덕턴스의 프로파일에 따라서 4가지 경우로 나누어 특성을 비교하였다. Case II는 회전자의 치가 고정자와 정렬되지 않은 상태에서 턴온 각은 0°이고, Case I은 회전자의 치가 고정자의 치를 지나가고 있을 때로서, 턴온 각은 +3°인 경우이다. Case III은 턴온 각이 -3°인 경우이며, Case IV은 토크 맥동을 저감하기 위해서 평활전류가 흐르도록 계산된 경우로, 턴온 각은 -5.9°이다. 표 1은 SRM의 주요사양을 나타내고 있다.

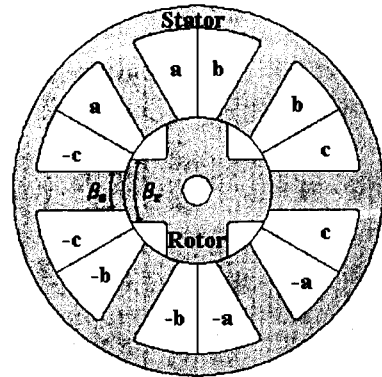


그림 1. 해석모델의 단면도

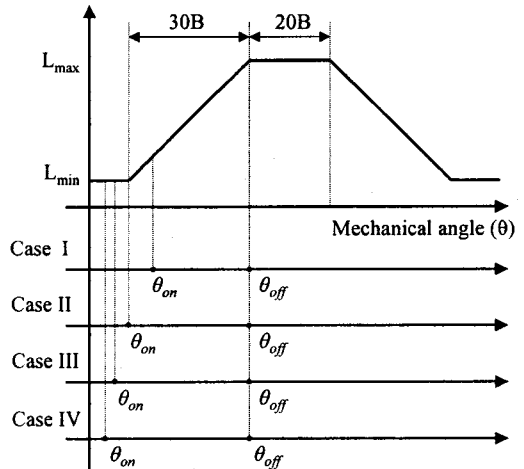


그림 2. 4가지 형태의 턴온 각과 인덕턴스 프로파일

표 1. 해석모델의 주요 사양

항목	값	단위	항목	값	단위
정격전압	12	V	공극 길이	0.3	mm
정격전류	2	A	적층폭	40	mm
턴수	90	T/pole	코일 선경	0.7	mm
고정자 극수	6	poles	권선저항	1	Ω
회전자 극수	4	poles	코어 재질	S18	
동작 속도	1000	rpm			

2.2 유한요소법 정식화

자기 벡터 포텐셜과 전류밀도가 Z축 성분만 존재한다면 SRM의 지배방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다

$$\partial/\partial x(\nu\partial A/\partial x) + \partial/\partial y(\nu\partial A/\partial y) + J_0 = 0 \quad (1)$$

여기서 ν 는 투자율의 역수, A 는 자기벡터포텐셜, J_0 는 입력 전류밀도이다.

또한 구동회로의 전압방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V = R_m I + L_m(dI_m/dt) + E_m \quad (2)$$

여기서 V 는 입력전압, R_m 은 상저항, L_m 은 코일단부의 누설리액턴스, E_m 은 코일에서 발생하는 역기전력이다.

식(1)에 Galerkin 법을 적용시키고 전압방정식 (2)를 합시키면 후퇴차분법을 이용한 시스템 방정식은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q] \\ (1/\Delta t) \times [F] & [R_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{i+\Delta t} \\ I_m^{i+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ (1/\Delta t) \times [F] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^i \\ I_m^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ V^{i+\Delta t} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3 스위칭 각의 결정

SRM의 토크 맥동을 저감하고 평균토크를 증가하기 위한 고정자(β_s) 및 회전자(β_r)의 극호 선정은 기본적으로 6/4 모델에서는 30° 이상이어야 한다. 고정자(β_s) 및 회전자(β_r)의 극호가 30° 보다 작을 경우, 시정수를 무시하고 이상적으로 전류를 흘려도 토크 답이 발생하여 토크 리플을 줄일 수 없다. 본 논문에서는 고정자(β_s) 및 회전자(β_r)의 극호각을 각각 30°, 50°로 선정하였다.

이러한 모델의 스위칭 조건을 살펴보면, 최소 인덕턴스 평활 구간($L_{min}: 60^\circ - \beta_r$)은 인덕턴스가 증가하는 구간에서 평활한 전류가 흐르도록 전류를 확립하는데 필요한 구간이며 최대 인덕턴스 평활구간($L_{max}: \beta_r - \beta_s$)은 전류를 소호 시키는데 필요한 구간이다. 따라서, 최소 인덕턴스 평활구간($L_{min}: 60^\circ - \beta_r$)과 최대 인덕턴스 평활구간($L_{max}: \beta_r - \beta_s$)은 토크를 발생시키지 못하는 구간이므로 인덕턴스가 증가하는 구간(30°)에서 평활한 전류가 흐르면 맥동이 가장 작은 토크특성을 얻을 수 있다. 식(4)와 식(5)는 평활전류가 흐르는 턴 온각과 턴 오프각의 계산 수식을 나타내고 있다.

$$\theta_{on} = \theta_{b2} + \omega \frac{L_{min}}{R} \ln \left(1 - R / \left(R + \frac{dL}{d\theta} \omega \right) \right) \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

$$\theta_{off} = \theta_{b4} + \omega \frac{L_t}{R} \ln \left(\frac{R + dL/d\theta \cdot \omega}{2R + dL/d\theta \cdot \omega} \right) \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

여기서 L_{min} 은 최소 인덕턴스, L_t 는 턴 오프 때의 인덕턴스, R 은 상저항, ω 는 각속도, θ 는 회전자 위치, θ_{b2} 는 인덕턴스가 상승되는 시점이고 θ_{b4} 는 인덕턴스의 하강시작점이다.

3. 해석 결과

그림 3은 턴온각의 변화에 따른 상전류 특성을 비교하였다. Case IV(-5.9°)의 경우 인덕턴스의 증가시점 보다 앞서서 상전류를 도통하므로 가장 평활한 전류를 얻을 수 있었고, Case I(+3°)의 경우 인덕턴스의 증가후에 상전류가 도통하여 상전류의 충분한 상승시간을 확보하지 못하므로 전류파형의 평활도는 가장 낮은 것을 알 수 있다.

그림 4는 턴 온 각의 변화에 따른 에너지변환루프 특성비교를 나타내고 있다. 루프의 면적은 턴 온 각에 따라 크게 영향을 받게 되며, Case IV의 경우 면적이 가장 넓은 에너지변환루프를 얻을 수 있었다.

그림 5는 턴온각의 변화에 따른 방사방향의 힘 특성 비교를 나타내고 있다. 방사방향 힘의 평균값이 가장 큰 Case IV와 가장 작은 Case I의 차는 111.1%이다.

그림 6은 턴온각의 변화에 따른 접선방향의 힘 특성 비교를 나타내고 있다. 접선방향의 힘 특성으로부터, 토크의 맥동 및 평균 토크의 크기를 유추해 보면 Case IV의 경우가 가장 맥동이 작고 평균 토크값이 크며, Case I의 경우 토크의 맥동이 가장 크고, 또한 평균 토크값이 가장 작은 것을 알 수 있다.

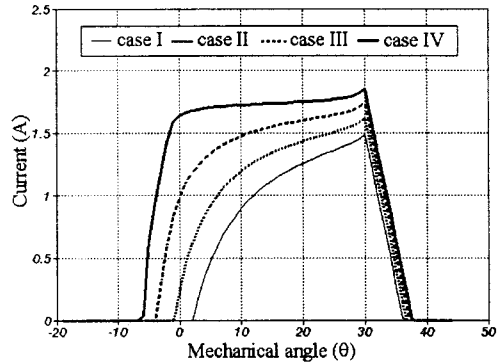


그림 3. 턴온각의 변화에 따른 상전류 특성 비교

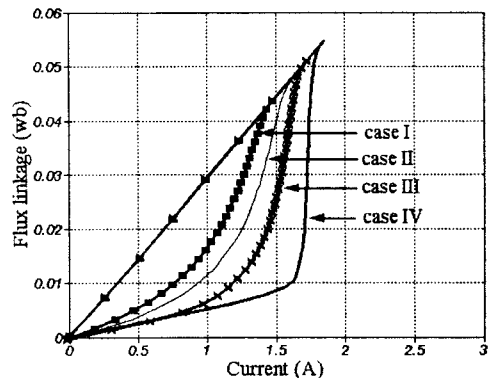


그림 4. 턴온각의 변화에 따른 에너지변환루프 특성비교
그림 7은 Case II의 경우에 대한 상전류와 쇄교자속의 해석치와 실험치 비교를 나타내고 있다. 쇄교자속의 실

협치는 회로방정식으로부터 계산된 수식을 이용하여 구하였으며, 실험치의 피크값은 0.046 Wb이고 해석치의 피크값은 0.049 Wb로서 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 소음 진동의 원인이 되는 토크 맥동을 저감하기 위한 방법으로서 SRM의 전기적 파라미터인 턴온각, 턴오프각의 영향을 살펴보았다. SRM의 정확한 해석을 위해서 구동회로를 고려한 2차원 유한요소법을 사용하였으며 인덕턴스 증가구간에서 평활전류가 흐르도록 최적의 턴온 각을 계산하여 토크 맥동을 최소화 하도록 하였다. 해석결과로부터, 턴온각을 -5.9° 로 선정하는 경우, 토크 맥동이 크게 저감되었으며 동시에, 평균 토크를 증가할 수 있었다.

[후 기]

이 연구는 과학기술부 지정 국제공동연구(과제번호: 1-00-047)의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. G. C. Neves, R. Calson, N. Sadowski, J. P. A. Bastos, N. S. Soeiro and S. N. Y. Gerges, "Vibrational behavior of switched reluctance motors by simulation and experimental procedures," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3158-3161, 1998.
- [2] M. Besbes, C. Picod, F. Camus and M. Gabsi, "Influence of stator geometry upon vibratory behaviour and electromagnetic performances of switched reluctance motors," *IEE Proceedings Electrical Power Application*, vol. 145, no. 5, pp. 462-468, 1998.
- [3] Garrgan N. R., W. L. Soong, Stephens C. M., Storage A. and Lipo T. A. "Radial force characteristics of a switched reluctance machines," *Thirty-Fourth IAS Annual Meeting Conference Record*, vol. 4, pp. 2250-2258, 1999.
- [4] M. Gabsi, F. Camus and M. Besbes, "Computation and measurement of magnetically induced vibration of switched reluctance machine," *IEE Proceedings Electrical Power Application*, vol. 145, no. 5, pp. 462-468, 1998.

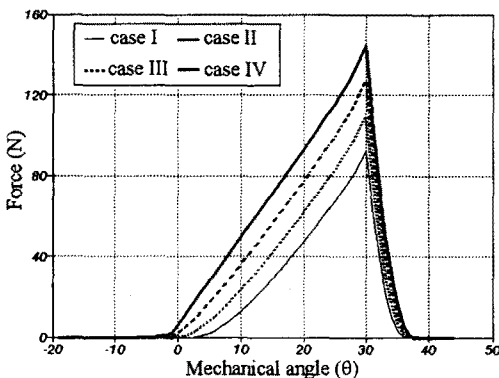


그림 5. 턴온각의 변화에 따른 Radial Force 특성 비교

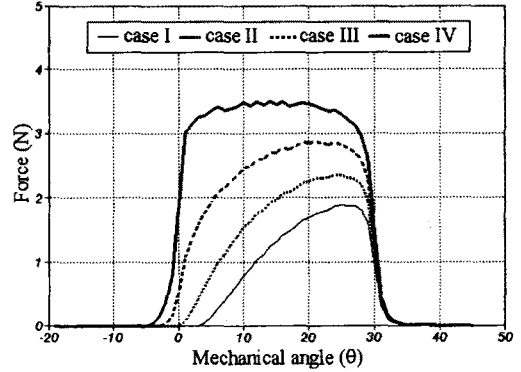
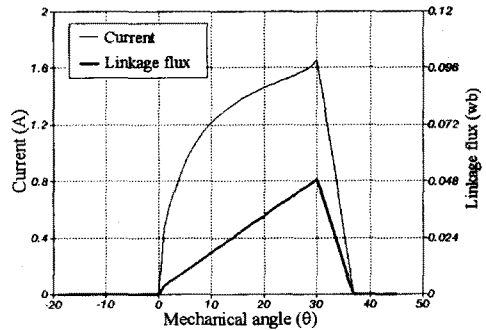
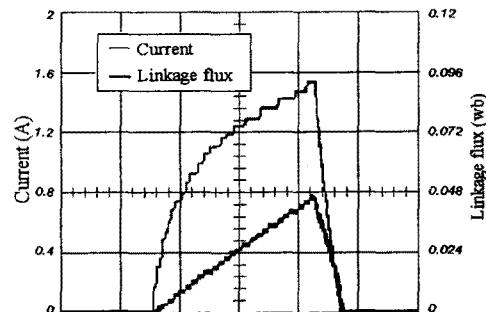


그림 6. 턴온각의 변화에 따른 Tangential Force 특성 비교



(a) 해석결과



(b) 실험결과

그림 7. 쇠교자속의 특성 비교