

비대칭 브리지 컨버터를 고려한 6/4 스위치드 릴럭턴스 전동기의 유한요소 해석

최재학\*, 박재범\*, 이승준\*, 안병립\*, 이주\*, 김석태\*\*  
 \*한양대학교 전기공학과 \*\*기술 표준원

Finite Element Analysis considering Asymmetric Bridge Converter  
 in 6/4 Switched Reluctance Motor

Jae-Hak Choi\*, Jae-Bum Park\*, Seung-Jun Lee\*, Byeong-Lib Ahn\*, Ju Lee\*, Suk-Tae Kim\*\*  
 \*Dept. of Electrical Eng. at Hanyang University \*\*Korean Agency for Technology and standards(ATS)

**Abstract** - This paper presents a design schemes to minimize torque ripple in 6/4 Switched Reluctance Motor (SRM) using transient Finite Element Analysis (FEA) in which the magnetic field is combined with a driving circuit. Pole arcs and switching angles are major design factors. If these design factors are considered independently, the enhancement of SRM performance is restricted. Therefore, this paper proposes not only optimal combination of stator pole arc and rotor pole arc but also the turn-on and turn-off angles as a function of pole arcs. Especially, turn-on and turn-off angle are formulated from a voltage equation and feasible design ranges are suggested with variable speed.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)는 높은 토크와 간단한 구조 때문에 최근에 지속적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 SRM은 이중 돌극 구조와 펄스 형태의 여자방식으로 인해 토크리플이 크며, 소음과 진동이 심하다는 단점을 가진다. 따라서, 산업 분야에 SRM을 적용하기 위해서는 낮은 토크리플과 높은 토크 밀도가 요구된다[1,2,3]. 그러므로 설계와 구동 시에 토크리플을 최소화 할 수 있는 방법의 연구가 필요하며, 본 논문에서는 비선형, 과도 특성을 고려한 유한요소법을 이용하여 스위치드 릴럭턴스 전동기의 성능을 향상하기 위하여 토크 리플 최소화를 목적으로 하는 설계 방법을 연구하였다. 이러한 목적을 만족시키는 설계 변수로 고정자 극호( $\beta_s$ )와 회전자 극호( $\beta_r$ )의 최적의 조합뿐만 아니라 고정자 극호( $\beta_s$ )와 회전자 극호( $\beta_r$ )의 함수로써 턴온 각( $\theta_{on}$ )과 턴오프 각( $\theta_{off}$ )을 제시하였다. 즉, 기하학적 변수인  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 에 대하여 토크 리플을 최소화하기 위한  $\theta_{on}$ 과  $\theta_{off}$ 는 고정된 값이 아닌 각각의  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 의 함수로 제안된 값으로 주어진다. 유한 요소 해석의 검증을 위해 실험적인 결과도 함께 제시되었다.

2. SRM 설계 및 특성

2.1 6/4 SRM에 대한 설계 기법

3상 6/4 스위치드 릴럭턴스 전동기 설계 시 두 가지의 설계 변수들은 반드시 고려되어야만 한다. 첫 번째는 기하학적인 변수인 고정자 극호와 회전자 극호이며, 또 다른 한 가지는 전기적인 변수인 스위칭 각도이다. 만약 전동기를 고정된 스위칭각도에서  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 만 변화시키면서 설계 및 해석을 한다면 좋은 성능을 얻을 수 없다. 그러므로 SRM의  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 을 설계할 때 스위칭 조건인

턴온 각( $\theta_{on}$ )과 턴오프 각( $\theta_{off}$ )은 반드시 고려해야 한다.

그림 1은 본 논문에서 고려된 여자 방법을 나타내고 있다. 인덕턴스 파형은 고정자 극호와 회전자 극호의 조합에 따라 변하고 토크 성능에 영향을 준다. 점적율과 기자력 그리고 평균 토크의 관점에서는 고정자의 극호를 넓히는 것보다 회전자의 극호를 넓히는 것이 좋다. 그러므로 본 논문에서는  $\beta_r > 30^\circ$ 인 경우는 고려하지 않았다. 기본적으로 토크 리플을 최소화하기 위해 고정자와 회전자의 극호는  $30^\circ$ 보다 커야한다. 만약 고정자와 회전자의 극호가  $30^\circ$ 보다 작다면 그림 1(a)에서 보여준 것처럼 큰 토크 리플이 정기적으로 발생한다. 비록 상전류가 이상적으로 흐른다고 해도 토크 리플을 줄이는 것은 불가능하다. 본 논문에서는 그림 1(a)의 경우를 설계 대상에서 제외하였다. 그림 1(b)에서의 설계 방법과 스위칭 방법은 토크 리플이 영(零)이 될 수 있음을 도식적으로 나타내고 있다. 그림 1(b)의 경우에서 토크 리플을 줄이기 위한 여러 가지  $\beta_s$ 와  $\beta_r$  조합에서 유효한 전기적인 변수( $\theta_{on}$ 과  $\theta_{off}$ )를 나타내고 있다. 턴온 각의 조건은 상승 인덕턴스의 시작점( $\theta_s$ )에서 평활 전류가 반드시 흘러야만 한다. 턴오프 각의 조건은 하강 인덕턴스의 시작점( $\theta_r$ )에서부터 전류가 소호 되어  $\theta$  지점에서 영(零)이 되어야만 한다.

평활 전류에 대한 두 극호와 스위칭 각을 구하기 위해 그림 1(b)에 보인 상전압과 상전류를 고려해 보자.

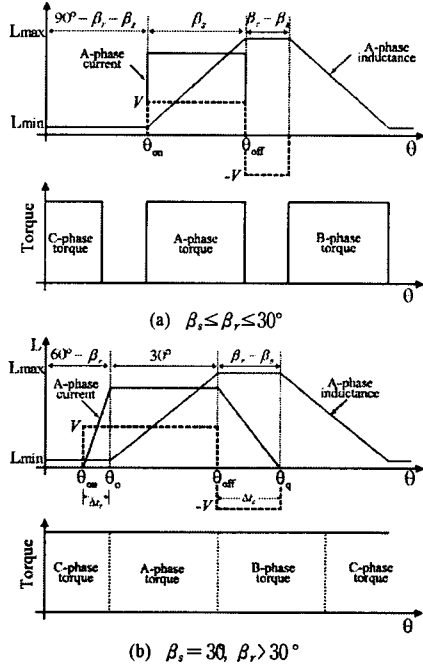


그림 1. 다양한 극호 조합에 따른 토크 발생 원리

### 2.1.1 최소 인덕턴스 구간, $60^\circ - \beta_r; \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_0$

일반적으로 한 상에 대한 SRM의 전압식은

$$V = R_m i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 전압,  $R_m$ 은 상 저항,  $L$ 은 상 인덕턴스,  $\omega$ 는 각속도이다.

만약에 이 최소 인덕턴스 구간에서 자기 포화를 무시한다면 식 (1)을 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$V = R_m i + L_{min} \frac{di}{dt} \quad (2)$$

여기서,  $L_{min}$ 은 비정렬 상태에서의 인덕턴스의 최소 값이다.

전류는 고정자 극과 회전자 극이 일치하기 전까지 상승하여  $\theta_0$ 위치에서 평활 전류의 값에 도달한다. 식 (2)로부터  $\theta_0$ 위치에서의 평활 전류는 다음과 같다.

$$i(\theta_0) = V/R_m (1 + e^{\theta_0 / (\omega \cdot \tau)}) \quad (3)$$

여기서,  $\tau$ 는 시정수( $\tau = L(\theta, i)/R_m$ )이다.

### 2.1.2 상승 인덕턴스 구간, $30^\circ: \theta_0 \leq \theta \leq \theta_{off}$

만약 토크 발생 구간에서 자기 포화를 무시한다면 평활 전류를 표현하기 위해 적용된 전압방정식은 식 (1)로부터 다음과 표현된다.

$$V = R_m i + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (4)$$

상승 인덕턴스의 시작점  $\theta_0$ 위치에서 평활 전류는 식 (4)로부터 얻을 수 있다.

$$i(\theta_0) = V \left( R_m + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \right) \quad (5)$$

$\theta_{on}$ 에서  $\theta_0$ 까지 평활 전류를 만들기 위한 요구시간 ( $\Delta t_r$ )은 식 (3)과 식 (4)로부터 유도된다.

$$\Delta t_r = \frac{\theta_0 - \theta_{on}}{\omega} = - \frac{L_{min}}{R} \ln \left( 1 - \frac{R}{R + (dL/d\theta) \cdot \omega} \right) \quad (6)$$

턴은 작은 다음 식에 의해서 계산되어진다.

$$\theta_{on} = \theta_0 + \omega \cdot \frac{L_{min}}{R} \ln \left( 1 - \frac{R}{R + (dL/d\theta) \cdot \omega} \right) \quad (7)$$

### 2.1.3 최대 인덕턴스 구간, $\beta_r - \beta_s; \theta_{off} \leq \theta \leq \theta_q$

고정자 극호( $\beta_s$ )가 회전자 극호( $\beta_r$ )와 다를 경우 그림 1(b)에서 보인 것처럼 정렬 상태에서 최대 인덕턴스 구간이 존재한다. 만약 자기 포화를 무시한다면 평활 전류를 소호 시키기 위한 전압 방정식은 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$-V = R_m i + L_{max} \frac{di}{dt} \quad (8)$$

여기서,  $L_{max}$ 는 정렬 상태에서의 최대 인덕턴스 값이다. 식 (5)와 식 (8)을 이용하여  $\theta_{off}$ 위치에서의 평활 전류는 다음과 같이 유도된다.

$$i(\theta_{off}) = - \frac{V}{R} + \left( \frac{V}{R + (dL/d\theta) \cdot \omega} + \frac{V}{R} \right) e^{-\frac{R}{L_{max}} \cdot \frac{\theta_{off}}{\omega}} \quad (9)$$

$\theta_{off}$ 에서  $\theta_q$ 까지의 평활 전류를 소호 시키기 위해 필요한 시간 ( $\Delta t_c$ )은 식 (9)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\Delta t_c = \frac{\theta_q - \theta_{off}}{\omega} = - \frac{L_{max}}{R} \ln \left( \frac{R + (dL/d\theta) \cdot \omega}{2R + (dL/d\theta) \cdot \omega} \right) \quad (10)$$

턴오프 각은 그림 1(b)의 하강 인덕턴스의 시작점( $\theta_q$ )에서 전류가 0이어야 한다. 그러므로 턴오프 각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{off} = \theta_q + \omega \cdot \frac{L_{max}}{R} \ln \left( \frac{R + (dL/d\theta) \cdot \omega}{2R + (dL/d\theta) \cdot \omega} \right) \quad (11)$$

### 2.1.4 기하학적인 변수( $\beta_s$ 와 $\beta_r$ )의 설계 범위

고 효율의 SRM을 설계하기 위해서는 많은 경우의 수의  $\beta_s$ 와  $\beta_r$  조합을 시험하는 것은 필수적이다. 그러나 본 논문에서는  $\theta_{on}$ 과  $\theta_{off}$  함수로서의  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 에 제한 범위를 두어서 기하학적 변수인  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 의 조합으로 나올 수 있는 경우의 수를 줄였다.

그림 1(b)에서 보인 것처럼  $\beta_s = 30^\circ$ 이고  $\beta_r > 30^\circ$ 인 경우에서 식 (6)과 식 (10)에서부터  $\Delta \theta_r = \Delta t_r \cdot \omega = \theta_0 - \theta_{on}$ 이고  $\Delta \theta_c = \Delta t_c \cdot \omega = \theta_q - \theta_{off}$  두자. 그러면 극호들의 제한 범위는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_s = 30^\circ, (\Delta \theta_c + 30^\circ) < \beta_r < (60^\circ - \Delta \theta_r) \quad (12)$$

표 1은 식 (12)를 이용하여 얻어진 다양한 속도에서 극호의 제한 범위를 나타내고 있다. 속도가 증가하면  $\beta_r$ 는 좁아진다. 토크 리플을 줄이고 평균 토크를 증가시키기 위해  $\beta_s$ 는  $30^\circ$ 로 제한하였으며,  $\beta_r$ 의 최대 각이  $60^\circ$ 로 제한됨으로서 최소 인덕턴스 구간( $L_{min}$ )이 존재한다.

표 1. 속도에 따른 극호 제한 범위

속도	고정자 극호	회전자 극호
300 rpm	$\beta_s = 30^\circ$	$41.6 \leq \beta_r < 54.5$
500 rpm	$\beta_s = 30^\circ$	$45.9 \leq \beta_r < 54.6$
1000 rpm	$\beta_s = 30^\circ$	$50.0 \leq \beta_r < 54.7$
2000 rpm	$\beta_s = 30^\circ$	$50.5 \leq \beta_r < 54.9$

## 2.2 유한 요소 정식화

자기 벡터 포텐셜과 전류 밀도가 z축 성분만 존재하고 모든 물리적인 양이 z축에 대하여 일정하다고 가정하면 SRM에 대한 지배방정식은 자기 벡터 포텐셜 A를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J_z = 0, \quad (13)$$

여기서,  $\mu$ 는 투자율(Permeability)이고 A는 자기 벡터 포텐셜이고  $J_z$ 는 입력 전류밀도이다.

식 (13)에 Galerkin 방법을 적용한 후, 전압 방정식(1)을 결합하고 시간 차분법을 이용하면 다음과 같은 계행 방정식을 얻을 수 있다.

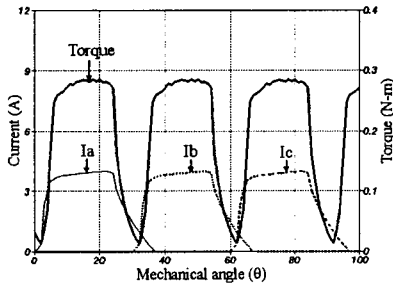
$$\begin{bmatrix} [s] & [Q] \\ [F]/\Delta t & [R_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{t+\Delta t} \\ I_m^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ [F]/\Delta t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^t \\ I_m^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ V^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,  $[s]$ 는 요소 행렬이고  $[Q]$ 는 고정자 권선 행렬이고  $[F]$ 는 역기전력 행렬이며  $[R_m]$ 은 상 저항 행렬이다. 동특성 해석을 수행하기 위해 이동라인 기법이 도입되었다.

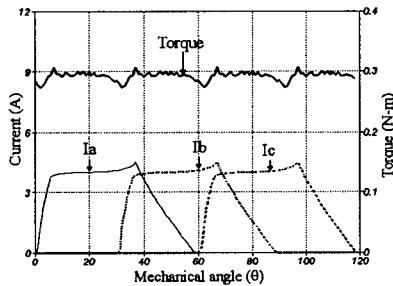
### 2.3 실험 및 해석 결과에 대한 고찰

실험과 유한 요소 해석을 이용하여 제안된 설계 방안들을 검증하기 위해 실험을 위한 전동기들( $\beta_s=30^\circ$ ,  $\beta_r=30^\circ$  와  $\beta_s=30^\circ$ ,  $\beta_r=50^\circ$ )가 제작되었다.

그림 2와 그림 3은 각각 유한요소해석과 실험에 의한 토크 특성 결과를 보여주고 있다. 그림 3에서 보인 토크 파형은 토크 미터의 저역 통과 필터 전에서 측정되었으며 유한 요소 해석과 실험 모두 500rpm에서 수행되었다. 유한 요소 해석 결과로부터 평균 토크는 각각 약 0.21[Nm]와 0.3[Nm]이고 토크 리플은 약 139.4[%]와 12.4[%]이다. 실험 결과로부터 평균 토크는 각각 약 0.18[Nm]와 0.28[Nm]이고 토크 리플은 약 150[%]와 14[%]이다. 그림 2(b)와 그림 3(b)는 토크 리플 특성이 고려된 좋은 성능을 가진  $\beta_s=30^\circ$ ,  $\beta_r=50^\circ$  모델의 토크 파형과 전류 파형을 보여주고 있으며 제안된 설계 방법은 실험 및 유한요소해석 결과와 잘 부합됨을 알 수 있다.

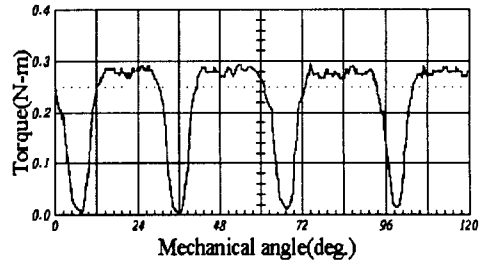


(a)  $\beta_s=30^\circ$ ,  $\beta_r=30^\circ$  model

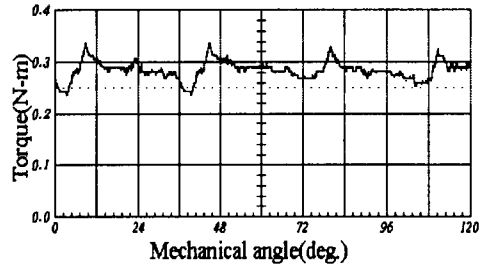


(b)  $\beta_s=30^\circ$ ,  $\beta_r=50^\circ$  model

그림 2. 유한 요소 해석 결과 ( 500rpm )



(a)  $\beta_s=30^\circ$ ,  $\beta_r=30^\circ$  model



(b)  $\beta_s=30^\circ$ ,  $\beta_r=50^\circ$  model

그림 3. 실험 측정 결과 ( 500rpm )

### 3. 결론

본 논문에서는 기하학적 변수와 전기적인 변수를 이용하여 SRM의 토크 특성을 향상시킬 수 있는 새로운 설계 방안들을 시도하였다. 구동 회로와 스위칭 조건을 고려한 유한 요소 해석이 효율적으로 적용되었다. 스위칭 드 릴럭턴스 전동기의 토크 리플과 평균 토크는 고정자와 회전자 극호의 조합과 스위칭 조건에 따라 그 특성이 지배적이기 때문에 이에 초점을 두고 자세하게 연구하였다. 토크리플을 최소화하려는 설계 목적의 관점에서 본 논문에서 제시한 사양에 대한 극호 조합에 따른 토크 특성 결과를 보면 고정자 극호를 증가시키면 점적율과 자력이 작아지므로 토오크 밀도를 높이고 토크 리플을 줄이기 위해서는 기본적으로  $\beta_s=30^\circ$ 가 가장 적합하며  $\beta_s=30^\circ$ 일때 회전자 극호를 넓히는 것이 매우 효과적이다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 기술표준원의 표준화기술개발사업에 의한 지원으로 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] T. J. E. Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford University Press, London, 1993.
- [2] Y. Ohdachi and Y. Kawase, "Optimum Design of Switched Reluctance Motors using Dynamic Finite Element Analysis", IEEE Transaction on Magnetics, 33 (1997) 2033-2036.
- [3] S. Brisset and P. Brochet, "Optimization of Switched Reluctance Motors using Deterministic Methods with Static and Dynamic Finite Element Simulation", IEEE Transaction on Magnetics, 34 (1998) 2853-2856.