

## Toroidal SRM의 최대토크 스위칭각 선정

차현록\*, 김현덕\*, 김광현\*, 임영철\*, 최유영\*\*, 최강식\*\*, 전흥기\*\*

\*전남대학교 전기공학과, \*\* (주)삼성광주전자

### Switching Angle Selection for Maximum Torque in Toroidal SRM

Hyun-Rok Cha\*, Hyun-Dug Kim\*, Kwang-Heon Kim\*, Young-Chol Lim\*,  
You-Young Choi\*\*, Kang-Shik Choi\*\*, Heong-Ki Chon\*\*

\*Chonnam National University, \*\*Samsung Kwang-ju Electric Co.

#### Abstract

This paper analysis magnetic circuit of toroidal SRM and simulate optimal switching angle. In this toroidal SRM, two of three phase are energized at an arbitrary instance while it is with only one phase in case of typical SRM. It has many advantages in the size of machine and power efficiency. Not only typically Known topologies of switched reluctance motors such as asymmetric converter but full bridge converter are safe to employ

은 전류로 토크와 속도를 낼 수 있다. 따라서 전류의 자속에 비례하는 권선의 손실이 적어진다[2]. 더불어 기존의 SRM컨버터 토폴로지 뿐만 아니라 범용 Full-bridge형의 컨버터가 적용이 가능하며 구동방식이 BLDCM과 비슷하므로 BLDCM의 컨트롤러를 직접 사용할 수 있는 여러 가지 장점을 지닌모터이다.

이 연구에서는 Toroidal SRM를 수식적으로 모델링하고 FEM 소프트웨어를 사용하여 모터의 초기값들을 추출하여 시뮬레이션을 실시하고 모터의 전압, 전류, 토크, 속도, 특성을 해석하였다. 뿐만 아니라 최대토크를 내는 값을 시뮬레이션을 통해서 찾아내었다.

#### I. 서론

기존의 SRM은 구조가 간단하고 견고하며 큰 견인력을 가지며 근래의 값싼 반도체와 고성능 마이크로 컨트롤러에 힘입어 무한한 가능성을 지닌 모터이다.

그런데, 기존의 SRM은 구조상 권선을 돌극 부위에만 감을 경우 공간활용율에 한계가 있으며 또한 실제 양산에 있어서 많은 부분 새로운 설비투자를 필요로 한다.

그러나 이 연구에서 연구대상으로 삼는 Toroidal SRM의 경우는 고정자의 요크 부분에 권선을 감으므로 권선의 공간 활용율이 매우 높다. 또한 기존의 유도기용 권선기를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 Toroidal SRM은 일반 SRM 모터에 비해 1회전당 필요한 스위칭 회수의 절반으로 1회전이 가능하므로 스위칭에 필요한 손실이 적다[1]. 또한 한 상을 여자하기 위해서 두 권선이 작용하므로 한 권선으로 한 상을 여자하는 일반 SRM보다 높지 않

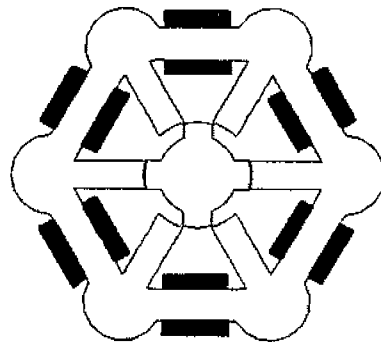


Fig. 1 Configuration of toroidal SRM

#### II. Toroidal SRM 기본 원리

##### 1. 구조

Toroidal SRM은 그림 1과 같이 일반적인 SRM과는 매우 달리 권선이 고정자의 요크부분에 감겨져 있는 형태이다. 즉 한 상을 여자하기 위해서는 기존의 한 상만 여자 하는 방식과는 달리 3상중 2상이 여자

되어야 한다. 그러므로, 스위칭 도통 각은 기존의 모터에 비해서 두 배가 된다. 이것은 BLDCM과 매우 유사하다[1].

## 2. 구동 토폴로지

한상을 여자하기 위해서 3권선중 2권선을 여자 하는 2상여자 방식을 취한다[4].

그림 2(a)에서 i) ( $0 \sim t_1$ ) 구간에서는 B상에 계속 전압이 인가되는 순간에 A에 전압이 인가되고 C상은 소호되는 구간이다. 이때 회전자는 자속의 경로에서 릴럭턴스가 최소로 되는 점으로 이동한다. 이 구간내에서 자속의 흐름은 그림 2(b)와 같다.

ii) ( $t_1 \sim t_2$ )인구간은 A상이 계속 여자 되어 있는 상태에서 B상은 소호되고 C상이 새롭게 여자 되는 구간이다. 이때 회전자의 위치와 자속경로는 그림 2(c)와 같이 반시계방향으로  $30^\circ$  이동됨을 알 수 있다.

iii) ( $t_2 \sim t_3$ )인구간에서는 C상은 그대로 여자되어 있고 A상이 소호되고 새롭게 B상이 여자되는 형태이다. 이때 회전자의 위치와 자속의 흐름은 그림 2(d)와 같다. 각각의 그림에서 보는 바와같이 권선을 여자 시키는 방향과 회전자가 이동하는 방향이 서로 반대이므로 회전자의 이동방향을 반대로 하고자 할 경우 역방향으로 여자 하면 된다.

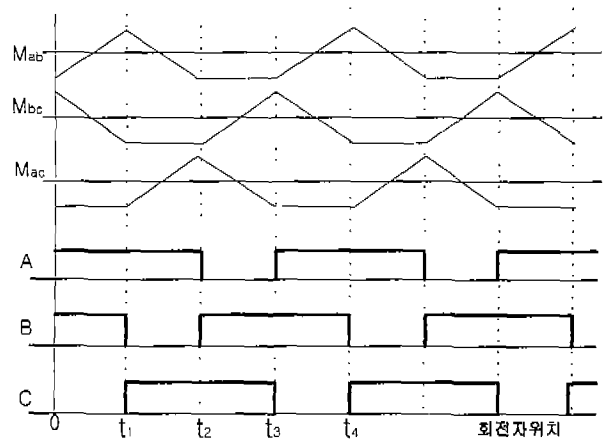
이때 자속의 흐름은 권선에 의한 자기 인덕턴스는 회전자의 위치와는 상관없이 거의 일정한 값이라고 볼 수 있다[2].

여기서 자속의 큰흐름은 두 권선에 의해서 생기는 상호인덕턴스로 ( $0 \sim t_1 \sim t_2 \sim t_3$ )인구간에서 자속의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

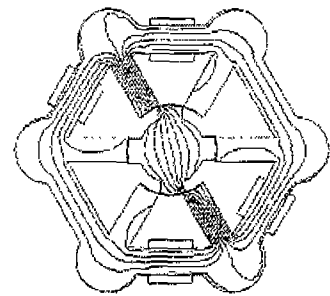
0 인 위치에서 상호인덕턴스는  $-M_{ab}$ 가 된다. 왜냐하면 이구간은 이미 여자 되어있는 B상에 의해서 큰 상호 인덕턴스를 형성하고 있으므로 A상을 기준으로 한  $M_{ab}$ 와 부만 다르고 크기가 같은 상호유도 인덕턴스가 형성될 것이다. 회전자의 위치가  $t_1$ 의 위치로 갈수록 릴럭턴스가 작아지므로 최대의  $M_{ab}$ 값이 된다.

$t_2$ 인 지점으로 갈수록 릴럭턴스가 점점 작아져 상호인덕턴스 또한 점점 작아지게됨을 알 수 있다. 회전자의 위치가  $t_3$ 인 지점까지 이동하는 동안에는 A상 소호구간으로 A상에 의한 상호 인덕턴스는 존재하지 않고 B상에 의한 상호 인덕턴스만 존재하므로 최소값으로 일정하게 변하게 된다.

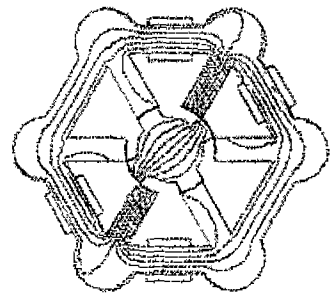
그림 2의 위부분에 상호 인덕턴스의 회전자 위치에 따른 변화를 나타내었다.



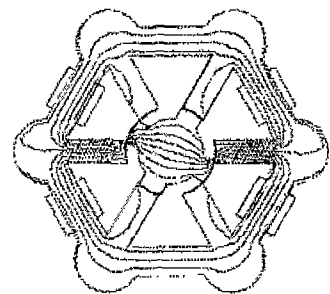
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2 Converter topology and magnetic circuits; (a) Gating sequence of the 3 phase toroidal switched reluctance motor (b) flux map at 0 rotor position (c) flux map at  $t_1$  rotor position (d) flux map at  $t_2$  rotor position.

### 3. 인버터 회로의 구성

Toroidal SRM는 기존 Asymmetric half bridge inverter 그림 3.(a) 뿐만 아니라 범용 유도기용으로 사용되는 Three phase bridge inverter 그림 3.(b) 까지 사용될 수 있다[4].

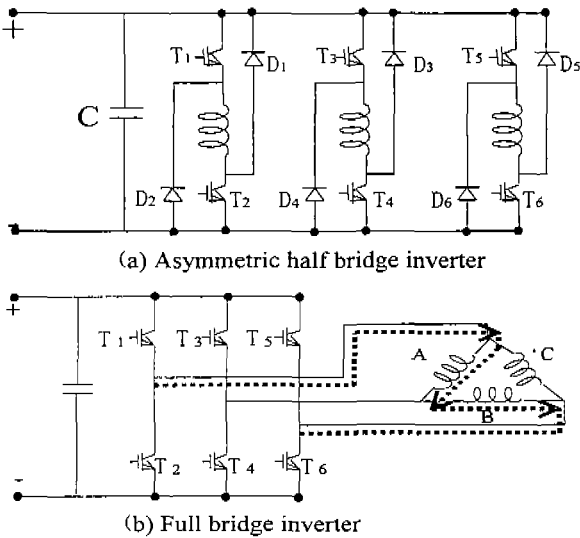


Fig. 3 Inverter circuit

Three phase bridge inverter의 동작모드를 살펴보면 그림 2 와 같은 Gating Sequence를 형성하기 위해서는  $0 \sim t_1$  구간에서 그림 3.(b)의 스위치들의 패턴을 살펴보면 T1, T4 스위치를 on 하고 나머지 스위치들을 모두 off하면 그림 3.(b)의 점선과 같은 방향으로 전류를 여자 한다. 각 구간에서 스위칭 패턴은 표1과 같다.

Table 1. Switching table for three phase inverter

스위치 구간	T1	T2	T3	T4	T5	T6
$0 \sim t_1$	on	off	off	off	off	on
$t_1 \sim t_2$	off	off	off	on	on	off
$t_2 \sim t_3$	off	on	on	off	off	off

### III. 모델링 및 시뮬레이션

Toroidal SRM 을 모델링하기 위해 그림 4 와 같이 SRM의 스위칭시의 회로를 등가화 하였다.[5] 사용된 모터의 정격 사양은 표2와 같다.

Table 2. 시험용 전동기의 정수

고정자극수	6 [개]	고정자 극호각	30 [deg]
회전자극수	4 [개]	회전자 극호각	31.5 [deg]
전압	12 [V]	상호인덕턴스	51.2 [mH]
전류	5 [A]	인덕턴스	14 [mH]
출력	60 [W]	최대속도	20000 [rpm]

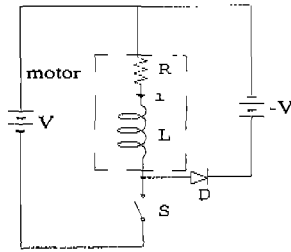


Fig. 4 Equivalent circuit

Toroidal SRM의 한 상의 권선 저항 R과 자속 쇄교에 관한 전압방정식은 다음과 같다.

$$\lambda_a = L_{aa}(\theta_p, I_a) I_a + M_{ab}(\theta_p, I_a, I_b) I_b$$

$$\lambda_b = L_{bb}(\theta_p, I_b) I_b + M_{ab}(\theta_p, I_a, I_b) I_a$$

$$V_a = R_a I_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a I_a + \frac{d}{dt} [L_{aa}(\theta_p, I_a) I_a + M_{ab}(\theta_p, I_a, I_b) I_b]$$

일반적으로 발생 토오크는 coenergy 수식에서 다음과 같이 구할 수 있다[5].

$$W_c = \lambda_a I_a + \lambda_b I_b - W_f$$

$$T = \frac{d[W_c(I_a, I_b, \theta)]}{d\theta} = \frac{1}{2} I_a I_b \frac{dL}{dt} + \frac{1}{2} I_b I_c \frac{dL}{dt} + \frac{1}{2} I_c I_a \frac{dL}{dt} + I_a I_b \frac{dM_{ab}}{dt} + I_b I_c \frac{dM_{bc}}{dt} + I_c I_a \frac{dM_{ca}}{dt}$$

위 모델링 중에서  $dL = 0$  라 가정하고 시뮬레이션을 하였을 때 그림5와 같은 이상적인 토크값을 그리고 그림 6과 같은 전압 전류값을 얻을 수 있었다.

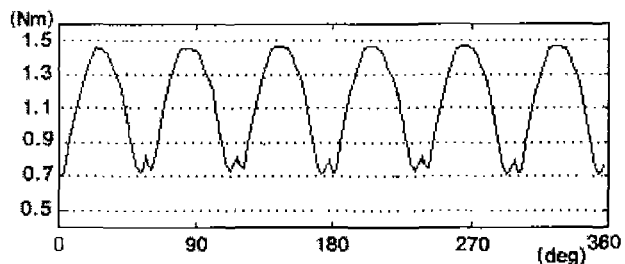


Fig. 5 Torque waveform

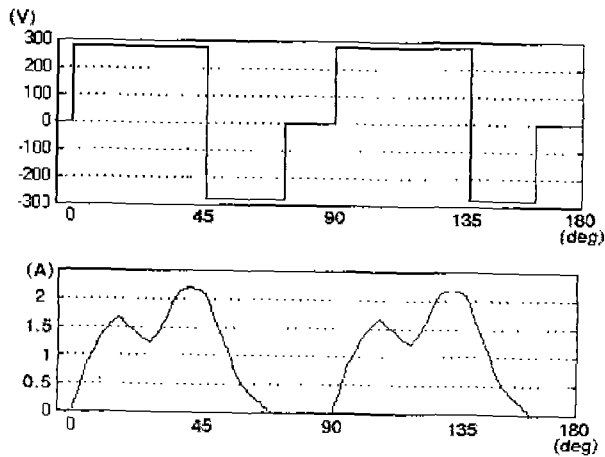


Fig. 6 Voltage and current waveform  
( Turn on 0° , Turn off 45° )

#### IV. 최대토크각 선정

Toroidal SRM도 기존의 SRM과 마찬가지로 스위칭 각에 따라 매우 비선형적으로 변하는 전류 파형이 변함을 그림 6을 통해서 알 수 있다. 그림 6에서 보는바와 같이 Turn on 각을 Advance 시킬수록 초기 전류치가 상승하고 평활한 전류를 얻기 위해서는 적정, ON/OFF각을 결정하는 것이 필요하다.

그림 11은 턴 온/ 턴 오프각을 변화시킬 때 최대토크의 경로를 나타낸 그림이다.

속도가 증가 할수록 Turn on/ Turn off각이 일정한 범위를 가지고 선행됨을 알 수 있다. 또한, 속도가 증가할수록 전류의 상승에 따라 처음에는 지수적으로 선행각이 증가하다가 높은 속도에서는 일정한 스위칭각을 유지함을 알 수 있었다.

최대토크각은 반복시행을 통해서 최대의 토크를 갖는 값을 찾았다.

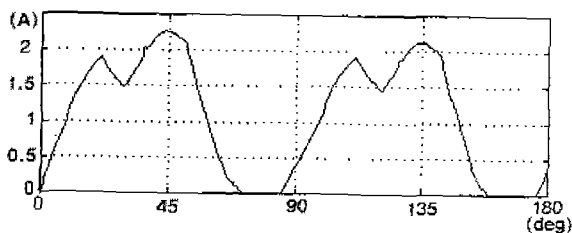


Fig. 7 Current advanced turn on angle

#### V. 결 론

Toroidal SRM의 자기 회로 해석을 통한 자속의 흐름을 이해하고 이를 기초로 하여 FEM 소프트웨어를 이용하여 상호 인덕턴스의 흐름을 구하여 시뮬레

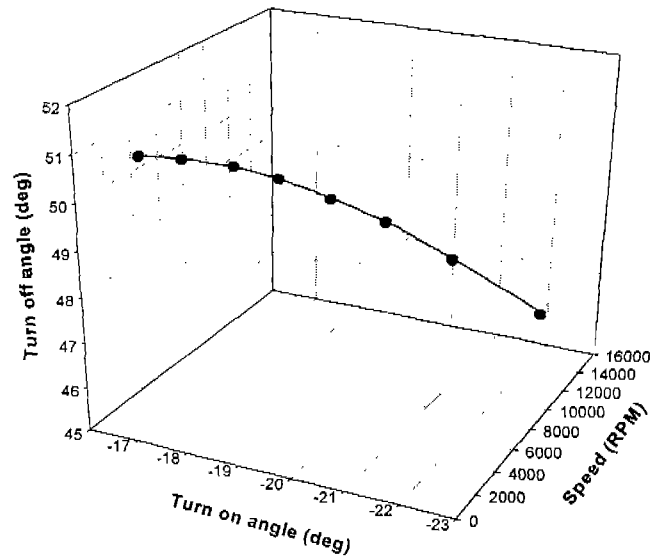


Fig. 8 Maxium torque switching angles

이션을 실시하였다. Toroidal SRM은 기존의 SRM과 같이 advance각의 영향에 비선형적인 출력을 보이므로 최적각을 선정하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 전류파형과 구동토폴로지를 만드는데 있어서 BLDCM과 매우 비슷하므로 쉽게 제작이 가능함을 알 수 있었다. 본 연구에서 찾은 일정속도에서 최적 스위칭각과 BLDCM의 드라이버를 이용한다면 향후 실제 양산체제에 있어서 최적 성능과 저가격의 모터 양산을 할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] Ki-Bong Kim, " Toroidal Switched Reluctance Motor part 1. fundamentals" korea-germany symposium 11.1998. pp.135-141
- [2] Barrie C. Mecrow " New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines" IEEE transactions on industry applications, Vol. 32 No 6 November 1996, pp. 1348-1356
- [3] B. C. Mecrow "Drive Configurations For Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Machines" Industrial Application Society, Oct. 1998. pp.563-570
- [4] A. C. Clothier, B. C. Mecrow "Inverter Topologies and Current Sensing Methods for Short Pitched and Fully Pitched Winding SR motor" 1999 IEEE
- [5] TJE. Miller. "Switched Reluctance Motors and Their Control" Clarendon Press. 1993