

고속 구동용 단상 FRM(Flux-Reversal Machine)의 제어 특성에 관한 연구

장재완^o, 김명진, 장기봉, 소종석, 이 주
한양대학교

Control of Single-Phase Flux-Reversal Machine Drives for High-Speed Applications

Jae-Wan Jang^o, Myung-Jin Kim, Ki-Bong Jang, Jong-Suk Soh, Ju Lee
Hanyang Univ.

Abstract- The flux-reversal machine(FRM) is a new brushless doubly-salient permanent-magnet machine combining the advantages of the switched-reluctance machine(SRM) and the permanent-magnet machine(PMM) into one machine. FRM has a naturally low inductance, therefore, a low electrical time constant.

This feature, combined with its simple construction and low rotor inertia appear to make the FRM attractive as a low-cost high-speed machine.

For high-speed applications, two alternative commutation strategies are studied, one using the phase commutation advancing technique and another using the conducting pulse-width control.

This paper describes the techniques and reports the corresponding simulated and experimented performance

1. 서 론

Switched reluctance motor(SRM)는 구조가 간단하며 기계적 강도와 효율이 높아 산업 응용에 널리 이용되는 전동기이다. 그러나 SRM은 제어가 복잡하고 소음과 진동이 발생한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 회전자 구조는 SRM과 같고 고정자의 back-iron에 영구자석이 부착된 형태의 Doubly-salient permanent-magnet motor(DSPMM)가 개발되었다.[1]

Flux-reversal motor(FRM)는 새로운 DSPMM으로 SRM과 같은 돌극형 회전자를 가지며 고정자 치에 영구자석을 부착하여 PMM의 장점을 얻는 구조로서 이러한 구조적 특징으로 인해 인덕턴스와 전기적 시정수가 낮고 회전자 관성이 작아 고속용 기기로서의 이용가치가 높다는 장점이 있다. 그러나 일반적인 제어 방식에 의한 고속구동에서는 권선 인덕턴스의 영향으로 전류와 역기전력 파형이 동상에서 벗어나게 되어 부토크가 발생하고 이로 인해 전체 토크가 감소하게 된다.[2]

따라서 본 연구에서는 고속 구동시 전력 밀도를 최대화하고 피크 상전류를 최소화하며 스위칭 소자 정격을 줄이기 위한 제어 방안으로 선행스위칭 각도제어와 펄스폭 제어 방식을 적용하였다. 또한 MATLAB SIMULINK를 이용한 기기의 모델링 및 제어를 제시하였으며 시뮬레이션과 구동 실험을 통해 모델링의 타당성과 적용한 제어방식의 적절함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 연구 모델

그림 1은 본 연구에서 사용한 단상 FRM의 단면도이다. 고정자는 2극 구조로서 서로 다른 극성의 영구자석이 각 고정자 치에 부착되어 있고 회전자는 3극의 돌극형 구조로 되어있다.

단상 전동기의 토크 파형에는 제로 점(null point)이 존재하며 이로 인해 전동기 초기 기동이 어렵게 된다. 따라서 공극이 점차 줄어드는 형태의 Tapered airgap 방식을 사용하여 일정방향의 자기동이 가능하도록 설계하였다.

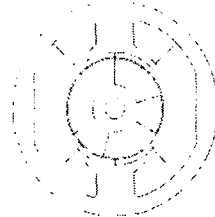


그림 1. 단상 2/3 FRM

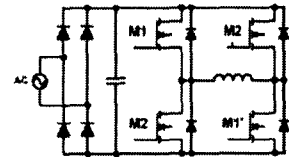


그림 2. H bridge 인버터

그림 2는 본 연구에서 적용한 H-bridge 인버터를 나타낸다.

2.2 동작 원리

그림 3은 전기적으로 한 주기 동안의 등포텐셜 분포를 보여준다. 회전자 치가 그림 3(a)위치에 있을 때 영구자석에 의한 자속은 고정자 극과 회전자 극에서만 순환하므로 권선에는 쇄교자속이 존재하지 않게 된다. 그러나 회전자 치가 반시계 방향으로 회전하면 자속은 점차 고정자 요크를 통해 흐르게 되므로 권선의 쇄교자속은 음의 방향으로 증가하며 그림 3(b)와 같이 영구자석의 한쪽 극과 회전자 극이 일치하게 되면 쇄교자속은 최대가 된다. 이때 회전자가 다시 반시계 방향으로 회전하면 쇄교자속의 양은 감소하고 그림 3(c)의 위치에 이르면 0으로 된다. 회전이 더 진행됨에 따라 자속의 극성은 바뀌고 그림 3(d)의 위치에 이르면 최대값을 갖는다. 처음의 위치인 그림 3(a)의 위치에 이르면 권선의 쇄교자속은 다시 0으로 된다. 따라서 영구자석이 회전하지 않아도 권선의 쇄교자속과 역기전력 극성이 바뀌게 되므로, 영구자석형 기기와 동일한 방식으로 구동이 가능하다.

상 권선의 회전자 위치에 따른 자속의 변화와 MMF를 그림 4에 나타내었다.

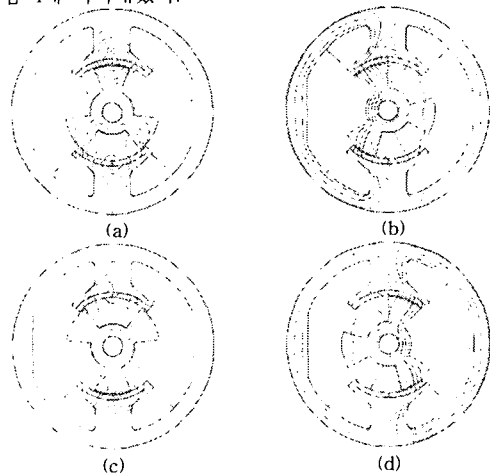


그림 3. 단상 FRM의 동작원리

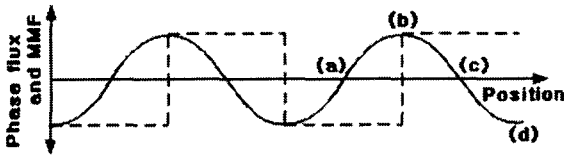


그림 4. 상 자속(실선)과 MMF(점선) 변동

2.3 전동기 모델링

FRM 공극자속은 식(1)과 같이 고정자의 PM자속과 회전자 위치에 따른 자기 인덕턴스의 합으로 나타낸다.

$$\lambda(\theta) = \lambda_{PM} + L(\theta)i \quad (1)$$

여기서

$$L(\theta) = L_1 - L_2 \cos(\theta) \quad (2)$$

이며, 상 에너지는

$$W = \int \lambda \cdot di = \int \lambda_{PM} \cdot di + \int Li \cdot di = \lambda_{PM}(\theta)i + \frac{1}{2} Li^2 \quad (3)$$

로 표현된다. 코-에너지로부터 토크 식을 얻을 수 있고

$$T = i \frac{d\lambda_{PM}}{d\theta} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (4)$$

식(2), (4)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$T = i \frac{d\lambda_{PM}}{d\theta} + \frac{1}{2} i^2 L_2 \sin \theta \quad (5)$$

패러데이 법칙에 의한 전압 식은 다음과 같고

$$V = Ri + \omega \frac{d\lambda}{d\theta} = \omega \frac{d\lambda_{PM}}{d\theta} + \left(R + \omega \frac{dL}{d\theta} \right) i + L\omega \frac{di}{d\theta} = E + Ri + L\omega \frac{di}{d\theta} \quad (6)$$

상태공간 평균화법을 적용하여 식(6)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{\omega L} \left(-R - \omega \frac{dL}{d\theta} \right) i + \frac{1}{\omega L} \left(V - \omega \frac{d\lambda_{PM}}{d\theta} \right) \quad (7)$$

또한, 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_{EM} - T_L = B\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (8)$$

위 식들을 적용하여 그림 4에 전동기 모델을 제시하였으며 L과 emf수치는 FEM 해석에 의한 값을 적용하였다.

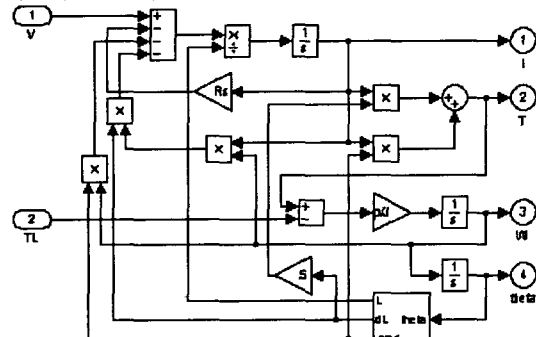


그림 5. 단상 FRM의 시뮬레이션 모델

2.3 제안한 제어방식

본 연구에서 제시한 전동기는 30,000rpm 이상의 속도가 요구되는 고속용 전동기이다. 그러나 고속 구동시 권선 인덕턴스는 전류 파형의 상 지연을 초래하여 전류와 역기전력 파형은 동상에서 벗어나게 되고 이로 인해 부토크가 발생되어 전체 토크가 감소하게 된다. 그림 6(a)는 전류 제어시 역기전력과 전류의 상대적인 위치를 나타내었다. 전류 파형은 속도에 따라 변하며 저속에서는 PWM를 통한 전류 제한으로 거의 직사각형의 형태로 나타난다.

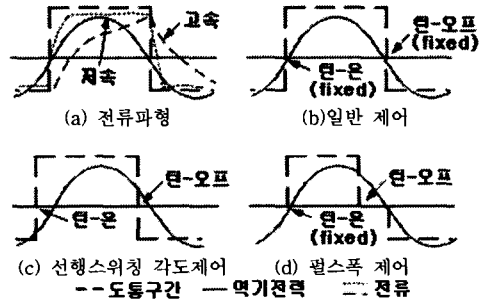


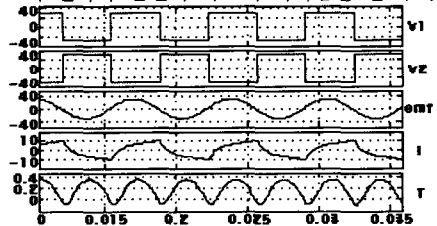
그림 6. 제안한 제어방식

본 연구에서는 두 가지 제어방식을 적용하였으며 그림 6(c)와 (d)에 나타내었다. 그림 6(c)의 선행스위칭 각도 제어는 도통구간이 유지되는 동안 스위칭 각을 선행시키는 제어방식으로 역기전력의 온-오프 주기보다 일정한 각도를 선행시켜 오프시의 전류 리플을 줄이고 따라서 토크 리플도 감소하여 전체 효율이 상승하게 된다.

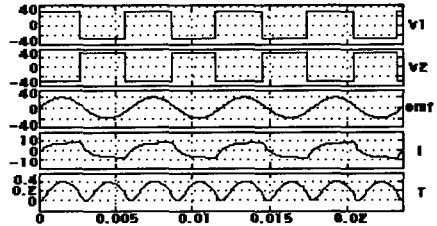
그림 6(d)의 펄스폭 제어는 도통구간동안 펄스폭을 변화시켜 제어하는 방식으로 턴-온 시점은 고정되어 있지만 턴-오프 각을 일정하게 변화시켜 역기전력의 극성이 변하기 전에 전류 값이 0에 도달하며 이로 인해 저속이나 고속에서도 부토크가 발생하지 않게 된다.

2.4 시뮬레이션

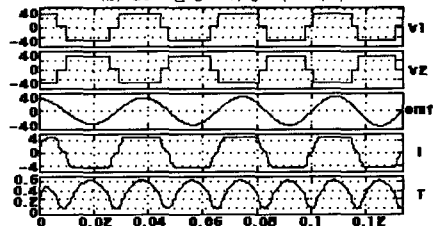
그림 7과 그림 8은 저속과 고속인 경우에 각각의 제어 방식에 따른 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션을 통해 적절한 선행스위칭 각도(10°)와 펄스폭(100°)을 알 수 있었으며 이 값으로 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 그림으로부터 제어방식과 구동 속도에 따른 전류와 토크에 변화가 완전히 다르게 나타남을 알 수 있다.



(a) 일반 제어



(b) 10° 선행스위칭 각도제어



(c) 100° 펄스폭 제어

그림 7. 단자전압, 기전력, 전류, 토크: 5000rpm, 30V

그림 7(a)에서 저속 구동시 일반적인 방식의 제어에 의한 전류 파형은 거의 직사각형 형태로 나타나며 토크의

변화도 일정하여 이상적인 모습을 보여준다. 그러나 그림 8(a)의 고속 구동시에는 부토크 발생에 의해 전체 토크가 다소 감소하는 것을 알 수 있다.

선행스위칭 각도제어시 최선의 스위칭 각도는 권선 인덕턴스와 구동 속도에 의해 결정된다. 주로 저가의 응용에 사용되며 그림 8(b)의 고속 구동시에는 전동기 성능을 향상시키지만 그림 7(b)의 저속 구동시에는 기전력 파형이 전류 파형에 중속되고 부토크가 발생되어 전동기 성능을 저하시키게 된다.

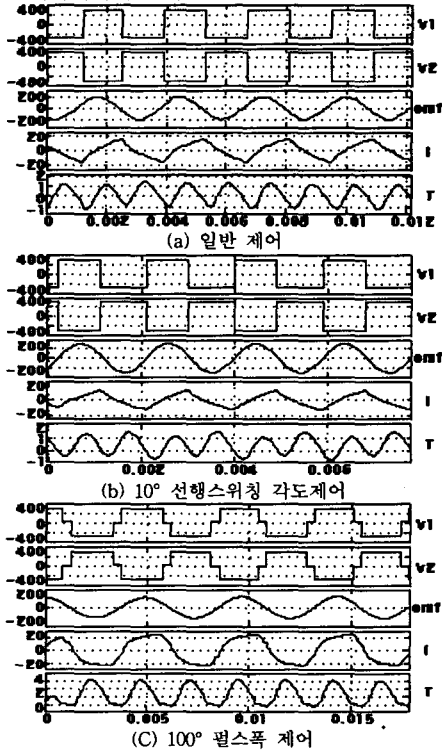


그림 8. 단자전압, 기전력, 전류, 토크: 20,000rpm 300V

그림 7(c)와 그림 8(c)의 펄스폭 제어에서도 권선 인덕턴스와 구동 속도에 의해 최상의 펄스폭이 결정된다. 펄스폭을 작게 선정하면 불연속적인 전류가 발생하고 토크도 불연속적으로 변하게 된다. 그러나 속도에 따른 최상의 펄스폭 선정은 연속적인 전류를 발생시키며 토크 또한 저속, 고속 구동시 정토크로 나타난다.

2.4 실험 결과

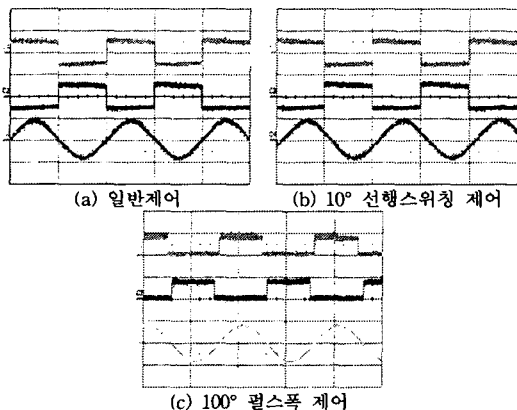


그림 9. 게이트 신호, 역기전력(C1, C2: 5V/div, C3:10V/div)

그림 9는 제어방식에 따른 게이트 신호와 역기전력 실험파형을 나타내었다. 펄스폭 제어는 두 개의 홀 신호를 사용하여 20° 간격의 신호로 구현하였으며 100°의 펄스폭으로 실험하였다.

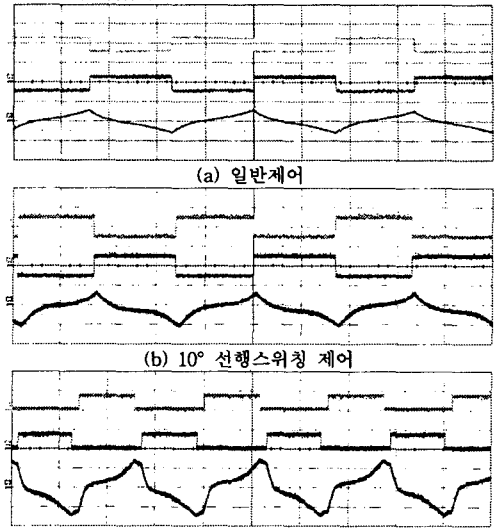


그림 10. 게이트 신호, 전류: 5,000rpm, 30V (C1,C2:5V/div, C3:20A/div)

그림 10은 5,000rpm 저속 구동시 각 제어방식에 따른 전류 파형을 나타내고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 고속 구동에 적합한 단상 FRM의 제어방안에 대하여 제시하였다. 선행스위칭 각도제어와 펄스폭 제어를 제안하였으며 속도에 따른 전류와 토크 특성을 MATLAB SIMULINK의 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다. 그리고 기존의 일반적인 제어 방식과 비교하여 선행스위칭 각도제어 방식이 고속 구동, 고전력 그리고 저가의 응용에 적합하다는 것을 확인하였다.

또한 구동 실험을 통해 제시한 모델링과 시뮬레이션의 타당성을 확인하였으며 향후에는 20,000rpm 이상의 고속 구동 실험을 통해 제시한 제어 방안의 타당성을 검증하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 중점추진 과제인 신·재생에너지 발전의 계통연계 기초기술개발연구 (과제번호: R-2004-B-125)의 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Deodhar, S. Anderson, I. Boldea, T.J.E. Miller "The flux-reversal machine: a new brushless doubly-salient permanent magnet machine", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, No.4, pp925-pp934, 1997
- [2] Congxiao Wang, Syed A. Nasar, Ion Boldea, "High speed control scheme of flux reversal machine." Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD '99, 9-12 May1999
- [3] Z. Q. Zhu, S. Bentouati, and D. Howe, "Control of single-phase permanent magnet brushless dc drives for high-speed applications", IEE Power Electronics and Variable Speed Drives, 18-19 September 2000
- [4] Kenjo, T., and Nagamori, S., "Permanent magnet and brushless DC motors", Clarendon Press, Oxford, 1985.
- [5] T.J.E. Miller "Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives", Oxford science publications, 1989