

스위치드 리랙턴스전동기의 특성 해석

정 환, 장도현
호서대학교 전기공학과

Characteristic analysis of SRM drives

Jeong, Hwan, Jang, Do-Hyun
Dept. of Electrical eng. Hoseo University

Abstract - SRM converter is divided into active power converter and passive power converter. Current and torque characteristics for representative active and passive converter are analyzed. Through simulation and experiments, several characteristics are confirmed and compared with each other.

1. 서 론

각종 산업의 발전과 더불어 전동기의 가변속 구동에 대한 연구와 관심이 최근 들어와서 점진적으로 증가하고 있다. 리랙턴스 토크를 동력으로 하는 전동 기구 중 스위치드 리랙턴스 전동기(이하, SRM이라 칭함.)는 구조가 간단하고 제작이 용이하며, 광범위한 속도 제어가 가능하여 서보 기기, 전기 자동차, 제트 엔진의 스타트 발전기 등과 같이 고기능을 요구하는 응용 분야에서 관심의 주 대상이 되고 있다[1][2].

따라서 본 논문에서는 SRM에서 기본적으로 사용되는 토폴로지인 비대칭 브리지 컨버터와 저항 덤프 컨버터의 특성을 해석하였다. 또한 두 컨버터의 구동 회로를 제작하여 턴 오프 시점을 가변 하면서 각 각의 시점에 대한 전류 파형과 전동기 회전수를 검출하였다. 특히 저항 덤프 컨버터 토폴로지 구동 회로에서는 덤프 저항기 R_d 의 값을 가변 하였을 때 변화되는 전류의 파형과 전동기 회전수를 검출하여 R_d 값이 회로에 미치는 영향 등을 확인하였다.

2. 전압형 컨버터의 기본동작

전압형 컨버터 토폴로지는 크게 수동형 컨버터와 능동형 컨버터로 분류된다. 수동형 컨버터는 턴 오프시점에서 권선에 저장된 에너지를 기계적 전원으로 변화시킴으로 에너지 회생이 불가능하여 효율의 저하를 단점으로 들 수 있으나, 저장 에너지를 급속히 방출할 수 있으므로 역 토크를 방지하여 전체 토크가 향상됨을 장점으로 들 수 있다. 수동형 컨버터의 예로는 R-덤프 컨버터, $(n+2)$ 스위치 컨

버터, 캐패시터 덤프 컨버터, 수정형 R-덤프 컨버터 등이 있다.

능동형 컨버터는 턴 오프시점에서 권선에 저장된 에너지를 다시 전원으로 회생 시킬 수 있으므로 효율이 증가함을 알 수 있으며 예로는 비대칭 브리지 컨버터, 양권선형 컨버터, $(q+1)$ 스위치드 컨버터등을 들 수 있다[3-4].

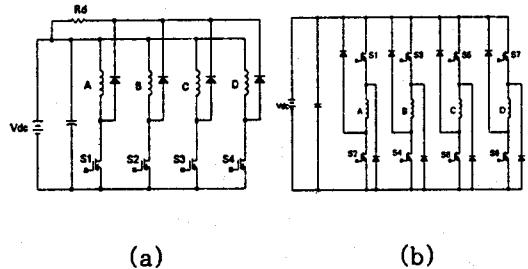


그림 1 (a)저항 덤프 컨버터 (b) 비대칭 브리지 컨버터
Fig. 1 (a)R-dimp converter (b)Asymmetric bridge converter

2.1 수동형 컨버터의 기본동작

수동형 컨버터의 대표적 토폴로지로서 본 연구에서는 그림 1(a)의 저항 덤프 컨버터를 모델로 하였다. 저항 덤프 컨버터의 운전방식은 그림 2과 같이 2가지 모드로 분류된다.

Mode[1] (자화구간) : 그림 2(a)와 같이 상 스위치 S1을 턴 온할 때 직류전원이 상권선에 인가

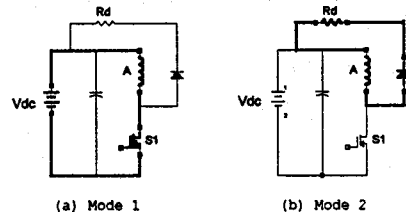


그림 2 저항 덤프 컨버터의 동작
Fig. 2 Operation of R-dump converter

된다. 이 구간의 전압방정식은 식(1)와 같다.

$$V_{dc} = i_a R_a + \omega_m \left[L_a(\theta) \frac{di_a}{d\theta} + i_a \frac{dL_a}{d\theta} \right] \quad (1)$$

여기서 ω_m 은 전동기의 각속도이며 R_a 와 L_a 는 권선저항 및 인덕턴스이다. 식(1)을 풀면 턴, 온 시간동안의 상전류를 구할 수 있다.

$$i_a(\theta) = \frac{V_{dc}}{R_{el}} \left[1 - \exp\left(\frac{-\theta}{\omega_m \tau_1}\right) \right] \quad (2)$$

여기서 $R_{el} = R_a + \omega_m \frac{dL_a}{d\theta}$, $\tau_1 = \frac{L_a(\theta)}{R_{el}}$

Mode(II) (방출구간) : 그림 2(b)에서와 같이 상 스위치 S1을 턴 오프하면 상전류는 권선, 다이오드, 덤프 저항으로 형성된 환류회로가 형성될 것이다. 에너지는 덤프저항 R_d 에 의해 급히 방출되어 역토크 발생을 억제한다. 방출구간 동안의 전압 방정식은 식(3)과 같다.

$$0 = i_r (R_a + R_d) + \omega_m \left[L_a(\theta) \frac{di_r}{d\theta} + i_r \frac{dL_a}{d\theta} \right] \quad (3)$$

식(3)을 풀면 방출전류 i_d 를 구할 수 있다.

$$i_d(\theta) = I_2 \exp\left(\frac{-\theta}{\omega_m \tau_2}\right) \quad (4)$$

여기서 $I_2 = i_a(\theta) |_{\theta = OFF2}$, $\tau_2 = \frac{L_a(\theta)}{R_a + R_d + \omega_m \frac{dL_a}{d\theta}}$

2.2 능동형 컨버터의 기본동작

전압형 컨버터는 대부분 능동형 컨버터로써 턴 오프 후 에너지를 회생시킬수 있다. 본 연구에서는 대표적 능동 컨버터로써 비대칭 브리지 컨버터. 그림 1(b)를 모델로 사용 하였다.

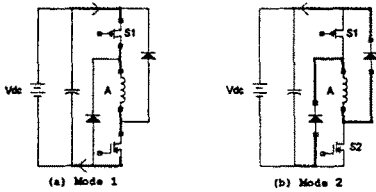


그림 3 비대칭 브리지컨버터의 동작
Fig. 3 Operation of asymmetric bridge converter

Mode(I) (자화구간) : 그림 3(a)의 동작으로 능동형 컨버터의 자화구간에서 전압 방정식과 상 전류는 수동형 컨버터의 자화구간과 같다.

Mode(II) (회생구간) : 상 스위치 S1, S2를 턴 오프하면 그림 3(b)와 같이 에너지는 다이오드와 전동기를 통하여 전원으로 되돌려 진다. 회생구간 동안의 전압방정식은 식(5)와 같다.

$$-V_{dc} = i_r R_a + \omega_m \left[L_a(\theta) \frac{di_r}{d\theta} + i_r \frac{dL_a}{d\theta} \right] \quad (5)$$

위 식에서 환류전류 i_r 를 구하면 다음과 같다.

$$i_r(\theta) = I_1 - \frac{V_{dc}}{R_{el}} \left[1 - \exp\left(\frac{-\theta}{\omega_m \tau_1}\right) \right] \quad (6)$$

여기서 $I_1 = i_a(\theta) |_{\theta = OFF1}$, $R_{el} = R_a + \omega_m \frac{dL_a}{d\theta}$

3. 시뮬레이션

본 장에서는 비대칭브리지 컨버터와 저항 덤프 컨버터에서 턴 오프 시점을 가변 하면서 최대의 전류를 얻는 시점과 최소의 역토크 갖는 시점에서 전류 파형과 토크 파형을 구하였다. 시뮬레이션에 사용된 전동기의 사양과 조건은 다음과 같다.

- 모델 전동기 : 8/6 SRM
- 상 인덕턴스의 최대값 : 27.4 [mH]
- 상 인덕턴스의 최소값 : 3.6 [mH]
- 고정자 권선 저항 : 0.8[Ω]
- 회전수 : 1,200 [rpm]
- 컨버터 전원 : 13.8[V]
- R- 덤프 컨버터에서 덤프저항 : 1 [Ω]

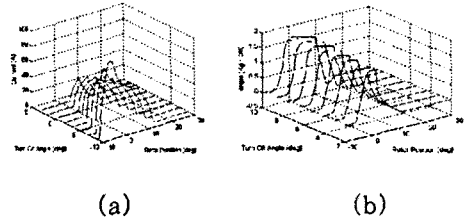


그림 4 비대칭 브리지 컨버터
(a)전류 파형, (b)토크 파형
Fig. 4 Asymmetric bridge converter

그림 4, 5은 비대칭 브리지 컨버터와 저항 덤프 컨버터의 턴 오프시점을 가변 하였을때 전류의 파형과 토크 파형을 나타내었다. 턴 온각을 -6.5° 로 고정하고 회전수를 1,200(rpm)으로 가정후 턴 오프각을 2.1° 에서 9.8° 까지 1.1° 간격으로 가변하여 얻은 그림이다. 전류의 피크치는 회전자의 위치가 -3° 일 때 모두 일치 하지만 턴 오프각

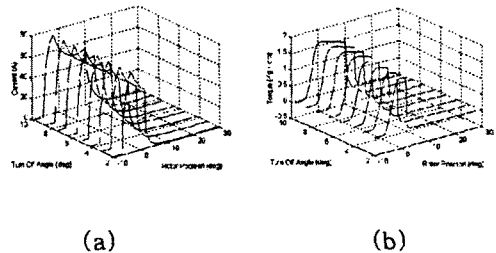


그림 5 저항 덤프 컨버터의 시뮬레이션
(a) 전류 파형(b) 토크 파형
Fig. 5 R-dump converter

에 따라 전류의 피크가 변화되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 덤프 저항의 R_d 의 값을 크게 할수록 전류 피크가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 실험 및 결과

본 장에서는 능동형 컨버터의 대표적 토폴로지인 비대칭브리지 컨버터와 수동형 컨버터의 대표적 토폴

폴로지인 저항 덤프 컨버터를 구성하여 실험 하였다. 그림 6(a),(b)는 비대칭 브리지 컨버터와 저항 덤프컨버터에서 턴 온각을 -4° 로 고정하고 턴 오프각을 7.5° 로 하였을때 케이트 파형과 전류 파형으로 이때 전동기의 회전수는 각각 728(rpm), 935(rpm)이었다. 그림 6(c),(d)는 턴 오프각을 3.5° 에서 10.5° 까지 1° 간격으로 가변하면서 전동기의 회전수를 측정하여 그래프로 나타내고 있다. 그림 6(c)에서 전동기 회전수는 턴 오프각이 7.5° 에서 최고치를 가지며 좌우로 갈수록 회전수가 떨어짐을 알 수 있었고, 그림 6(d)에서는 덤프 저항을 $1[\Omega]$, $4.7[\Omega]$, $10[\Omega]$, $20[\Omega]$ 으로 가변한 경우로 덤프 저항의 저항값에 따라 전동기의 회전수 다르며, 회전수가 최고에 도달하는 턴 오프각도 변화됨을 알 수 있었다.

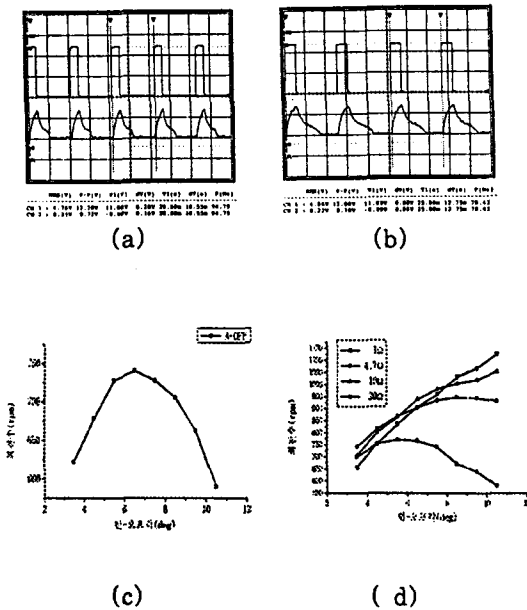


그림 6 턴 오프각 가변 실험결과
 Fig. 6 Result for the variation of turn off angle
 (a) 비대칭 브리지컨버터, 728(rpm)
 (b) 저항덤프 컨버터, 935(rpm)
 (c) 비대칭 브리지 컨버터의 전동기 회전수
 (d) R-덤프 컨버터의 전동기 회전수

그림 7은 저항 덤프 컨버터에서 턴 온각과 턴 오프각을 고정하고 덤프저항 R_d 의 값을 가변하였을 때 R_d 에 따른 전동기 회전수를 나타내었다. 그림 7에서 R_d 의 값이 증가함과 더불어 일정구간까지는 전동기 회전수가 증가 하지만 어느 순간 부터는 회전수가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 R_d 의 값이 크면 환류회로에서 전류꼬리를 제거하여 역토크 발생을 억제하였으나, R_d 의 값이 점차 증가하면 정토크 영역에서 R_d 에 의해 전류가 방출되므로 전동기의 회전수가 감소함을 알 수 있었다.

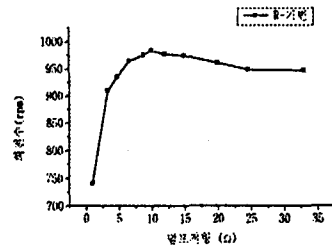


그림 7 덤프 저항 가변 실험결과
 Fig. 8 Result for the variation of R_d

5. 결 론

단일 펄스 구동 방식으로 SRM 컨버터를 구동할 때 나타나는 대표적인 특징은 토크 발생에 필요한 전류를 확보하기 위해 턴 온각을 정렬된 지점에서 비 정렬위치로 앞당겨야 하며, 턴 오프각은 전류 꼬리에 의한 역토크를 최소화시키기 위해 인덕턴스 최대지점에서 앞당겨야 한다.

또한 저항 덤프 컨버터에서는 덤프 저항 R_d 가 작으면 환류전류의 꼬리가 길어지며 이로 인하여 인덕턴스감소 영역에서 역 토크가 발생하여 전동기의 효율이 감소된다. R_d 가 크면 환류 전류는 빨리 감쇄되어 역토크의 발생은 제거할 수 있으나, 정토크가 감소되어 전동기의 회전수가 감소함을 알 수 있었다.

따라서 전동기 운전시 속도와 토크 및 효율 향상을 도모하기 위하여 역 토크 발생을 제거하기 위해서는 턴 오프각을 제어해야 하는 것을 확인 하였다.

참 고 문 헌

- [1] T.J Lawrenson, J.M Stenphenson, P.T Blenkinsop, J.Corda and N.N. Fulton. "Variable Speed Switched Reluctance Motor". Proc.of IEEE, vol.127, pp.253-256, July 1980.
- [2] H.Mogbelli, G.E.Adams, R.G.Hoft "Performance of a 10-Horsepower Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motor" IEEE, LA-27, no.3, pp.531-538, 1991.
- [3] D.-H.Jang, I.Husain, and M.Ehsain, "Efficiency and performance analysis of dual-decay converter for switched reluctance motor drives" IEEE-IAS Conf.Rec, pp.658-664, 1994.
- [4] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motor and Their Control". Oxford University press, 1993.