

비대칭 컨버터와 변형된 C-dump 컨버터의 동특성 비교

김 규 동, 신 두 진, 허 욱 열  
인하대학교 전기공학과

Dynamic characteristics comparison with Asymmetric Bridge converter and Modified C-dump converter

Kyu-Dong Kim Doo-Jin Shin and Uk-Youl Huh

Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea  
Tel : +82-32-860-7394 Fax : +82-32-863-5822 E-mail: g20011104@inhavision.inha.ac.kr

**Abstract** - Switched Reluctance Motor(SRM) Drive 회로의 경제성과 효율성을 감안하여 본 논문에서는 범용적으로 많이 쓰이는 비대칭 컨버터와 변형된 C-dump 컨버터를 비교 분석하였으며 산업용 저전압 SRM에 각각 적용하였을 때의 특성들을 기술하였다. 고속도 영역과 저속도 영역에서의 Advance angle과 Firing angle 제어를 하였을 때의 토크특성과 전류특성을 비교하였다. 또한, PWM 을 이용하여 토크리플을 감소한 적절한 on-off 각을 제시하여 그에 따른 저속도 영역에서의 특성들을 기술하였다.

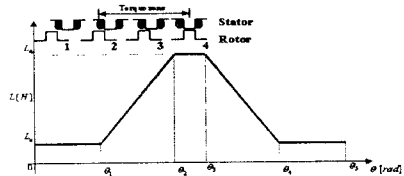


그림 1 로터의 위치에 따른 인덕턴스 파형

진상각 제어법을 쓰게 된다. 토크는 식(1)에 의해 결정된다.

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 \frac{dL_j}{d\theta} i_j^2 \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

그러므로 가능하면 peak 전류값을 크게 하고 그 유지 시간을 가능하면 최대로 하는 것이 유리하다. 그러나 적절한 on-off 스위칭 각을 주지 못한다면 회전자가 고정자를 지나서도 고정자가 계속 여자상태를 유지하게 되어 역토크를 발생하게 된다. 이런 역토크는 토크리플은 물론 진동소음을 유발하게 된다. 또한 저속영역에서는 PWM과 같은 방법으로 전류 초핑이 필수적이다. 전류 초핑은 토크리플을 저감시키게된다. 그래서 저속영역에서는 진상각제어방식과 적절한 전류 초핑이 복합적으로 사용되어 토크리플 저감과 최대토크를 유도할 수 있다.

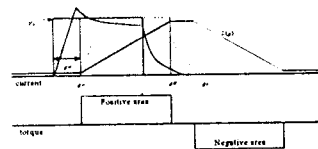


그림 2 진상각의 정의

1. 서 론

SRM Converter는 토크가 전류방향에 무관하므로, 한 상에 한 개의 스위칭 소자만으로 충분하다고 알려져 있다. 그러나, 실제로 상당 한 개의 스위칭 소자만으로 구성하는데는 SRM의 유도성 회로(Inductive circuit) 특성 때문에 다소의 문제점들이 있다. 권선 전류를 제어하기 위해 스위치를 OFF할 때는 전류가 완전히 소멸될 때까지 연속성을 유지하기 위한 회로가 구성되어져야 한다. 그렇지 못하면 스위칭 소자에 큰 전압의 스트레스를 주어 결국은 소자가 손상을 입게 된다. SRM의 고정자 권선의 단방향 전류를 제어하기 위해 많은 컨버터 Topology가 제안되어 사용되는데 컨버터의 비용절감과 성능 향상화를 두 전제로 한다. 그런데, 이 두 전제는 상당부분 컨버터선택에 있어서 서로 상충되는 양면이 있다. 즉, 한 상에 한 개의 스위칭 소자를 가지는 컨버터들은 주로 소자나 부품서의 최소화를 목적으로 하여 주로 저 성능을 요구하는 곳에 사용되며, 상당 두 개의 소자를 가지는 컨버터는 다른 컨버터에 비해 제어성능이 뛰어나므로 비용증가에도 불구하고 많이 사용되는 Topology이다.[1] 그래서 본 논문에서는 상수보다 하나 많은 스위칭 소자를 사용하는 C-dump 컨버터를 가지고 제어면에서 유리한 비대칭 컨버터와 그 성능을 비교하고자 한다.

2. 본 문

SRM은 구동시 높은 포화 상태에서 구동되므로 많은 비선형 요소를 포함하고 있지만, 제어를 간단히 하기 위해 다음과 같은 가정을 통해 선형적으로 모델링 할 수 있다.[2]

- 1) 상 사이의 Coupling에 의해 나타나는 상호 인덕턴스는 무시할 수 있다.
- 2)상 인덕턴스의 전류에 의해 생성되는 마그네트의 포화는 무시한다.

SRM은 상여자시점과 전류를 유지하는 시점 그리고 감자시켜주는 것에 따라 토크특성에 큰 영향을 준다. 그림 2에서 보여 주는 것과 같이 고속으로 회전시에는 회전자와 고정자가 겹치기 전에 미리 상을 여자 시키는

2.1 비대칭 컨버터

그림 5는 상당 두 개의 스위칭과 다이오드를 가지는 비대칭 컨버터로서 크게 3단계의 동작모드를 가진다.

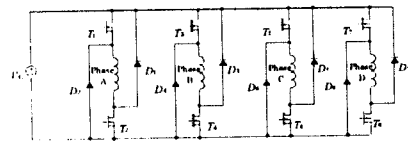


그림 3 비대칭 컨버터

- 1) Mode 1 : T1, T2 on  
여자상태로 DC전원 전압을 권선에 인가하여 전류를 흐르게 한다.

$$V_{\alpha} = i_{\alpha}R + \frac{dL(Qi)}{dt} \cdot i_{\alpha}$$

$$= i_{\alpha}R + L(Qi) \frac{di_{\alpha}}{dt} + i_{\alpha} \cdot \frac{dL(Qi)}{d\theta} \cdot \omega_m \quad (2)$$

2) Mode 2 :  $T_1$  off  $T_2$  on

$$0 = i_{\alpha}R + L(Qi) \frac{di_{\alpha}}{dt} + i_{\alpha} \cdot \frac{dL(Qi)}{d\theta} \cdot \omega_m \quad (3)$$

초평 모드로서 한 개 또는 두 개의 스위치를 turn-off 하여 전류가 한 개의 다이오드와 스위치 및 권선을 순환하게 하거나, 두 스위치를 모두 turn-off 하여 권선전류가 다이오드를 통해서 전원 측으로 에너지를 환원시키는 방법으로 전류가 감소되도록 한다.

3) Mode 3 :  $T_1, T_2$  off and  $T_3, T_4$  on

$$-V_{\alpha} = i_{\alpha}R + L(Qi) \frac{di_{\alpha}}{dt} + i_{\alpha} \cdot \frac{dL(Qi)}{d\theta} \cdot \omega_m \quad (4)$$

전류 모드로서 두 스위치를 동시에 turn-off 하여 전류(commutate)시키게 되는데, 해당 상의 인덕턴스가 음의 기울기를 가지기 전에 전류(current)를 완전히 소멸시키거나 아주 적은 양이 되도록 해야 한다.

## 2.2 변형된 C-dump 컨버터

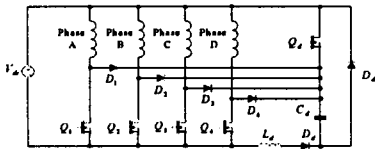


그림 4 변형된 C-dump 컨버터

변형된 C-dump 컨버터는 그림 4와 같이 다이오드 하나를 더 추가하여 해당하는 상의 감자시 전원의 전압이상에 걸리지 않도록 한 것으로 동작모드는 스위치의 동작에 따라 4단계로 나눌 수 있다. [3]

1) Mode 1 :  $Q_1$  on  $Q_d$  off

$$V_{\alpha} = i_{\alpha}R + \frac{dL(Qi)}{dt} \cdot i_{\alpha}$$

$$= i_{\alpha}R + L(Qi) \frac{di_{\alpha}}{dt} + i_{\alpha} \cdot \frac{dL(Qi)}{d\theta} \cdot \omega_m \quad (5)$$

$$i_{\alpha}(t) = i(0) \exp\left(-\frac{R+K\alpha\omega_m}{L(Qi)} \cdot t\right) + \frac{V_{dc}}{R+K\alpha\omega_m} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R+K\alpha\omega_m}{L(Qi)} \cdot t\right) \right\} \quad (6)$$

K: 인덕턴스 변화율, R: 인덕턴스 저항,  $\omega_m$ : 각속도

상이 여자되는 단계로서 전원으로부터의 DC전압이 상에 걸리게 되어 상이 자화 된다.

2) Mode 2 :  $Q_1$  off  $Q_d$  on

초평 단계로서 SRM이 저속으로 운전 될 때 전류 상승을 제한할 때 쓰이는 모드이다. Mode 1과 Mode 2가 반복하면서 상승전류를 제한하게 된다. 전압방정식은 Mode 1에서 전원전압을 0으로 한 것과 같다.

3) Mode 3 :  $Q_1$  on  $Q_d$  on

$$V_{\alpha} = i_{\alpha}R + L \frac{di_{\alpha}}{dt} + \frac{1}{C_d} \int i_{\alpha} dt \quad (7)$$

Dump 콘덴서에 저장되어 있던 에너지를 전원측에 돌려주는 mode로서 상승전류  $V_{dc}$ ,  $L_d$ ,  $Q_d$ 를 통하여

흐르게 되며 Mode 1의 연장선상에 있다. 특히  $L_d$ 는 dump capacitor로 전류가 흘러들어 올 때 감자스런 전류 증가를 방지하기 위해서 사용되었다.

$$i_{\alpha}(t) = \exp(-\alpha t) \left( \frac{V_{\alpha} - E - i(0)R/2}{\sqrt{\frac{Ld}{Cd} - \left(\frac{R}{2}\right)^2}} \sin(\sqrt{\alpha^2 - \alpha} \cdot t) + i(0) \cos(\sqrt{\alpha^2 - \alpha} \cdot t) \right) \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC_d}}$$

4) Mode 4 :  $Q_1$  off  $Q_d$  off

$$0 = i_{\alpha} + L(Qi) \frac{di_{\alpha}}{dt} + \frac{1}{Cd} \int i_{\alpha} dt \quad (9)$$

$$i_{\alpha}(t) = e^{-\alpha t} \left\{ \frac{-E - i(0)R/2}{\sqrt{LC - (R/2)^2}} \sin \sqrt{\alpha^2 - \alpha} t + i(0) \cos \sqrt{\alpha^2 - \alpha} t \right\} \quad (10)$$

$$R_{\alpha} = R + k\omega_m$$

전류(commutation) 모드로서 감자되는 상은 전원 측과 분리되고 상권선에 저장되어 있던 에너지는 dump 콘덴서에 충전되면서 상전류는 감소하게 된다. 한 상의 감자와 동시에 다음 상은 전원 전압과 dump 콘덴서 전압에 의해 여자를 시작하게 된다.

## 2.3 Dump 콘덴서 용량결정

변형된 C-dump 컨버터에서는 적절한 Dump 콘덴서의 선정은 회로의 효율면에서 그리고 상권선의 빠른 감자 등에 큰 영향을 미친다. 앞의 4개의 모드 중 Mode 4의 식을 이용한다. 식(7)에서 인가 전압은 0이 되고, 인덕턴스의 변화율 k는 곧 회전자와 고정자가 align위치로 가게 되므로 역시 0으로 둘 수 있고, 저항 역시 아주 작은 값이므로 무시를 하면 식(10)은 다음과 같이 단순화된다.

$$i_{\alpha}(t) = E \sqrt{\frac{C_d}{L}} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC_d}}\right) + i(0) \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC_d}}\right) \quad (11)$$

식(11)로 부터 다시 Cd가 방전하는 시간을 구하면

$$T_d = \sqrt{LC_d} \tan^{-1} \left( \frac{i(0) \sqrt{\frac{L}{C_d}}}{E} \right) \quad (12)$$

식(12)으로부터 Cd에 충전되는 전압방정식을 세우면 다음과 같이 적절한 Cd값을 구할 수 있다. [3]

$$\Delta V_c = \frac{1}{C_d} \int_0^{T_d} i_{\alpha}(t) dt$$

$$C_d = \frac{i(0)L_{\max}}{(\Delta V_c + E)^2 - E^2} \quad (13)$$

## 2.4 소호시간 비교

비대칭 컨버터와 변형된 C-dump 컨버터의 전류소호시간을 비교하기 위해 비대칭 컨버터의 전류소호방정식과 변형된 C-dump 컨버터의 전류소호 방정식으로부터 소호시간을 구하면, 즉,

$$i(t) = 0 \quad (14)$$

을 만족하는 시간을 비대칭 컨버터는 Mode 3에서 변형된 C-dump 컨버터는 Mode 4에서 각각 구하였다. 먼저 비대칭 컨버터의 소호시간은 식 (15)와 같다.

$$t_s = -\frac{t}{R} \ln\left(\frac{-V}{i(0)+V}\right) \quad (15)$$

그리고 변형된 C-dump 컨버터의 소호시간은 식(16)과 같이 표현된다.

$$t_s = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 - \alpha^2}} \tan^{-1} \left( \frac{i(0) \sqrt{\frac{L}{C_d} - \left(\frac{R}{2}\right)^2}}{E + i(0) \frac{R}{2}} \right) \quad (16)$$

두 컨버터의 전류소호시간의 차를 구하면 식 (18)과 같다.

$$t_A - t_M > 0 \quad (17)$$

$$\frac{L}{R} \ln \left( \frac{V}{i(0) + V} \right) - \frac{1}{\sqrt{\omega^2 - \alpha^2}} \tan^{-1} \left( i(0) \frac{\sqrt{\frac{L}{C} - \left(\frac{R}{2}\right)^2}}{E + i(0) \frac{R}{2}} \right) > 0 \quad (18)$$

여기서 항상 변형된 C-dump 컨버터의 소호시간이 비대칭 컨버터보다 짧게 하는 dump 콘덴서의 용량의 범위를 구하면

$$0 < C < 0.00713 \quad [F]$$

와 같다. 그런데 식 (13)에서 구한 적절한 콘덴서의 용량은 약 900 [ $\mu F$ ] 인데 그 보다 작으므로 변형된 C-dump 컨버터의 전류소호속도가 비대칭 컨버터보다 빠름을 보여 준다.

## 2.5 시뮬레이션 결과

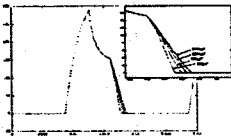


그림 4 Dump C의 용량에 따른 전류 하강기울기

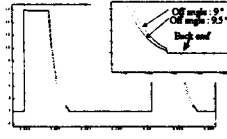


그림 5 비대칭 컨버터의 off각 한계

변형된 C-dump 컨버터에서 dump 콘덴서는 감자시 상전선의 에너지를 받아 저장하는 기능을 하게 된다. 이 때 dump 콘덴서의 값이 크면 많은 에너지를 저장할 수 있지만 그림 4에서 보여 주는 것과 같이 상전류를 0으로 떨어뜨리는데 걸리는 시간이 많이 걸리게 되어 dump 콘덴서의 값이 너무 작으면 상전류는 빨리 떨어뜨릴 수는 있지만 dump 콘덴서양단에 걸리는 전압이 크게 되어 스위칭 소자에 스트레스를 줄 수 있다. 이처럼 변형된 C-dump 컨버터에서는 dump 콘덴서의 용량에 따라 전류 특성에 많은 영향을 주게 된다. 특히 dump 콘덴서는 감쇄 전류의 기울기를 결정하게 된다. 이와 대조적으로 비대칭 컨버터는 감쇄 전류의 기울기는 R-L 시정수에 의해 미리 결정되어 버린다. 그림 5에서 보여 주듯이 전류하강 기울기가 off각 9도와 9.5도 사이에서 결정되어 버린다. 그림 6은 저속도 영역에서의 전류에 따른 토크특성 시뮬레이션 결과이다. 속도를 300(rpm)으로 유지하여 PWM으로 전류를 150[A] 근처로 제한시키고 진상각 제어로 최적의 토크특성을 나타내는 on-off 각을 결정하였다. 변형된 C-dump 컨버터의 경우는 on 각은 1.1도이고 off 각은 6.3도였다. 비대칭 컨버터의 경우는 on 각이 0.7도 off 각이 6.1도였다. 우선 평균 토크를 보면 변형된 C-dump 컨버터의 경우 77.3612[Nm]이고 비대칭 컨버터 경우는 80.1404[Nm]로 변형된 C-dump 컨버터보다 큰 토크를 나타내었다. 그리고 토크리플을 알아보기 위하여 컨버터 토크 값의 STD (standard deviation)을 구해 비교해 본 결과 변형된 C-dump 컨버터의 경우 9.1465이고 비대칭 컨버터의 경우는 5.5402였다. 저속도 영역에서는 비대칭 컨버터가 변형된 C-dump 컨버터보다 평균 토크가 크고 토크리플 정도가 낮은 것으로 나왔다. 이번에는 고속도 영역에서 chopping을 하지 않고 on-off 각 제어만으로 두 컨버터의 성능을 비교하여 보았다. SRM의 속도를 1200(rpm)을 유지하고 최적의 on-off 각을 시뮬레이션을 통해 구하였다. 두 converter의 소호속도가 컨버터의 성능에 큰 영향을 미치므로 최적의 on 각을 구하여 고정시키고 off 각을 조정하여 최적의 토크특성을 보이는 각을 구한 다음 모의실험한 파형이 그림 7 이다. on 각의 최적 조건인 3.8도에 고정시키고 off 각을 조정한 결과 변형된 C-dump 컨버터는 8.5도 이고 비대칭 컨버터는 9.5도로 약 1도 정도 변형된 C-dump 컨버터가 더 오래 최대 전류를 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

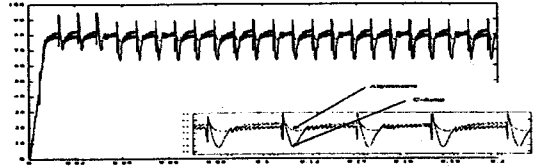


그림 6 저속도 영역에서의 토크파형 (300 RPM)

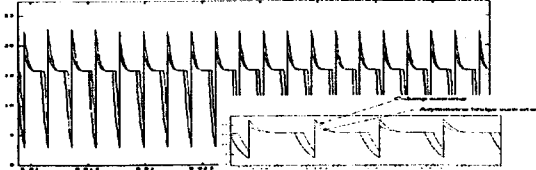


그림 7 고속도영역에서의 토크파형 (1200RPM)

소호속도가 비대칭 컨버터보다 빠르므로 늦게 turn off 하여도 그만큼 여유가 있는 것이다. 즉, 변형된 C-dump 컨버터는 dump 콘덴서에 의해 전류 감쇄 속도가 결정되기 때문에 위와 같은 특성을 보인다. 평균 토크는 변형된 C-dump 컨버터가 15.7981[Nm]이고 비대칭 컨버터는 12.726[Nm]로 변형된 C-dump 컨버터가 약 3[Nm] 더 큰 것으로 나타났다. STD에 의한 토크리플 정도도 변형된 C-dump 컨버터의 경우는 4.2787 이고 비대칭 컨버터의 경우는 5.6286으로 나타나 변형된 C-dump 컨버터가 고속도 영역에서는 오히려 비대칭 컨버터보다 더 나은 특성을 나타내었다.

## 3.결 론

비대칭 컨버터와 변형된 C-dump 컨버터를 저속도영역과 고속도 영역에서의 평균토크와 토크리플을 비교하여 그 특성을 살펴 본 결과 저속도 영역에서는 비대칭 컨버터가 변형된 C-dump 컨버터에 비해 좋은 성능을 보였으나 실제로 SRM이 구동되어 사용되어지는 고속영역에서는 변형된 C-dump 컨버터가 더 좋은 성능을 보였다. 변형된 C-dump 컨버터는 dump 콘덴서의 영향으로 전류 하강이 비대칭 컨버터보다 빠르기 때문에 적절한 각제어만으로도 비대칭 컨버터와 동등하거나 오히려 더 좋은 특성을 보임을 시뮬레이션을 통해 볼 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T. J. E Miller, "switched reluctance motor and their control", Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993
- [2] P. J. Lawrenson et al., "Variable speed switched reluctance motor," Proc. Inst. Elec. Eng., July1980, pp.253-265
- [3] Sayeed Mir, "Energy efficient C-dump Converters for Switched reluctance Motors IEEE Transaction on Power Electronics", Vol.12, No.5 1997 PP.912-921
- [4] A. Hava, V. Blasko, and T. A. Lipo, "A modified C-dump converter for variable reluctance machines", IEEE Trans. Ind. applicat., vol. 28, Sept./Oct. 1992.