

개선된 4-Level 컨버터를 이용한 고속 SRM의 운전성능 개선

이종현, 김현곤, 안진우, 이동희  
경성대학교

Improve Operating Performance of the High Speed SRM using Advanced 4-Level Converter

Jong-Heon Lee, Heon-Kon Kim, Jin-Woo Ahn, Dong-Hee Lee  
KyungSung University

**Abstract** - 본 논문은 고속 SRM의 운전 개선을 위한 4-Level 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 비대칭 컨버터에 비하여 고속에서의 운전 성능을 개선하고, 추가적인 전원장치 없이 환류 구간에서 환류 되는 에너지를 부스트 커패시터에 충전하여 이를 감자 구간에 활용함으로써 감자 구간에서 감자 시간을 줄여 여자 되지 않는 상에서 발생하는 Tail 전류가 여자 되는 상에 미치는 영향을 최소화 하였다. 또한 각 동작 모드에 따른 전류제어 모드를 선택함으로써, 4-Level 컨버터에 적합한 전류제어기를 제안하였다.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)는 구조의 단순성으로 인한 기계적인 견고성으로 인하여, 산업용 및 가전용 전동력 응용 시스템의 적용에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

SRM을 구동하기 위해서는 회전자 위에 적합한 여자 전원을 인가하기 위한 전력 변환장치가 요구된다. 보다 효율적인 구동을 위한 다양한 형태의 컨버터가 연구되었으나, 각 상의 독립적인 제어성 및 높은 신뢰성으로 인하여 비대칭 컨버터가 가장 널리 적용되고 있다.

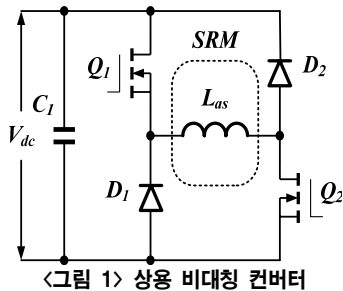
본 논문은 비대칭 컨버터에 비하여 고속에서의 운전 성능을 높이기 위한 4-Level 컨버터에 적합한 전류 제어기를 제안한다. 제안되는 컨버터는 기존의 비대칭 컨버터의 여자모드, 환류모드 외 감자모드와 부스트 환류 모드를 추가하여 SRM이 고속에서 운전 시에 다른 상의 Tail 전류가 여자 되는 상의 토크 발생에 영향을 미치는 것을 최소화 하였다.

2. 본 론

2.1 상용 고속 SRM 컨버터 구동 회로 및 특성

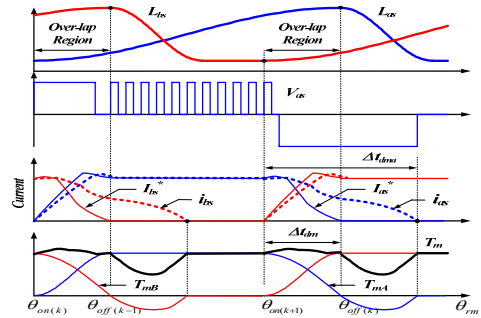
SRM의 구동을 위하여 다양한 형태의 전력변환 장치들이 연구되었다. 하지만 4-상한 구동 특성을 가지면서, 각 상의 독립성 과 신뢰성이 높은 비대칭 컨버터가 가장 널리 적용되고 있다.

<그림 1>은 상용 비대칭형 컨버터를 나타낸다. 여기서  $C_1$ 은 dc-link 커패시터 이며  $Q_1, Q_2$ 그리고  $D_1, D_2$ 는 각각 전력스위치와 환류다이오드이다. 스위치 상태에 따라 상 전압은  $V_{dc}, 0$  그리고  $-V_{dc}$ 로 정의된다.



<그림 1> 상용 비대칭 컨버터

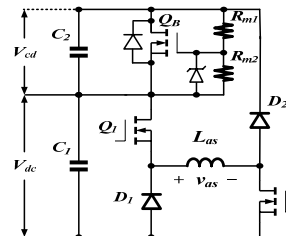
<그림 2>는 비대칭형 컨버터의 고속에서의 상전류와 토크를 나타내고 있다. SRM이 고속에서 운전될 시 짧은 여자시간과 인덕턴스로 인해 여자되지 않는 상권선에 남아 있는 에너지가 다음상이 여자되기 전 까지 소거되지 못하면 여자 되는 상에 음의 토크를 발생 시킨다. 이는 결론적으로 전체 토크 리플을 증가시키고 이에 따라 속도 리플이 증가하여 제어 성능이 떨어지게 된다. 동일한 SRM에서 이러한 감자 시간을 줄이기 위해서는 높은 dc-link 전압이 요구된다. 하지만 dc-link 전압은 입력 전원에 의해 결정된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 추가적인 입력 전원 없이 높은 음의 전압을 가지는 개선된 4-Level 컨버터 및 이에 따른 전류 제어 방법을 제안한다.



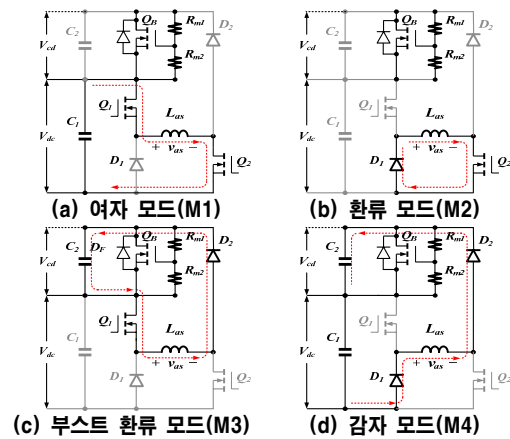
<그림 2> 고속에서의 상전류와 토크

2.2 제안된 4-Level 컨버터

<그림 3>은 제안된 4-Level 컨버터를 나타낸다. 제안된 컨버터는 추가적인 부스트 커패시터  $C_2$ 와 부스트 전압 제한을 위한 전력스위치  $Q_B$ 가 추가되었다. 부스트 커패시터  $C_2$ 는 환류 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 를 통해 흐르는 감자전류를 이용하여 충전된다.



<그림 3> 제안된 4-Level 컨버터



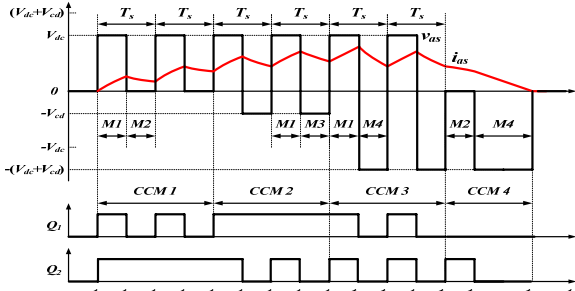
<그림 4> 제안된 4-Level 컨버터의 동작 모드

<그림 4>는 제안된 컨버터의 동작모드를 나타내고 있다. <그림 4>의 (a)와 (b)는 각각 여자 모드와 환류 모드로서 기존의 상용 비대칭 컨버터와 동일하다. 그리고 이러한 모드들은 상 권선에  $V_{dc}$  와 0 전압을 인가할 수 있다. (c)는 부스트 환류 모드를 나타낸다. 부스트 환류모드는 상전류가 환류 되어 부스트 커패시터에 저장된다. (d)는 감자모드로서 상 권선에 남아있는 전류가 부스트 커패시터에 저장된 에너지에 의해

빠르게 소거된다.

### 2.3 제안된 전류 제어 방식

<그림 5>는 상 전압과 스위치 상태에 따른 제어 모드를 나타낸다. CCM1에서는 여자 모드(M1)와 환류 모드(M2)가 적용된다. 이 모드는 상권선에 전류를 인가하기 위해 사용 된다 이때 상 전압은 수식(1)과 같다, CCM2에서는 여자 모드와 부스트 환류 모드가 적용되어 환류 되는 에너지를 부스트 커패시터에 충전시킨다, 이때 상 전압은 수식(2)와 같다. CCM3와 CCM4는 상 권선에 남아 있는 에너지를 빠르게 소거하기 위해 적용된다. 이때 상 권선에 인가되는 전압은 각각 수식(3)과 수식(4)와 같다.



<그림 5> 제어 모드에 따른 전압 레벨과 스위치 상태

$$V_{as} = V_{dc} \cdot \frac{t_{on}}{T_s} \quad (1)$$

$$V_{as} = (V_{dc} + V_{cd}) \cdot \frac{t_{on}}{T_s} - V_{cd} \quad (2)$$

$$V_{as} = (2V_{dc} + V_{cd}) \cdot \frac{t_{on}}{T_s} - (V_{dc} + V_{cd}) \quad (3)$$

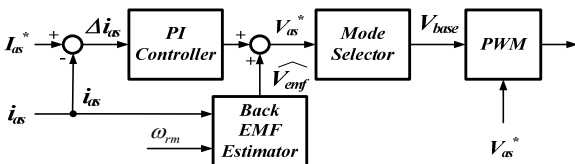
$$V_{as} = -(V_{dc} + V_{cd}) \cdot \frac{t_{on}}{T_s} \quad (4)$$

<그림 6>은 제안된 전류 제어 방식을 나타낸다. <그림 6>에 나타난 바와 같이, 간단한 PI제어기와 역기전력 추정기가 적용되어 있다. 본 논문에서 역기전력의 추정은 인덕턴스 비선형 함수를 사용하며 이는 아래의 수식(5)와 같다.

$$\widehat{V}_{emf} = f_{dl}(\theta, i_{as}) \cdot \omega \cdot i_{as} \quad (5)$$

여기서  $f_{dl}(\theta, i_{as})$ 은 회전자 위치와 상전류에 따른 인덕턴스 변화 함수이다. 따라서 전압 지령치는 아래의 수식과 같이 계산된다.

$$V_m^* = K_{pcc} \cdot \Delta i_m K_{icc} \cdot \int \Delta i_m \cdot dt + \widehat{V}_{emf} \quad (6)$$



<그림 6> 제안된 전류 제어 방식

#### <표 1> 제어 모드 선택 조건

조건	제어 모드	기준 전압
$V_m^* > (V_{dc} - V_{cd})$	CCM1	$V_{dc}$
$(V_{dc} - V_{cd}) \geq V_m^* \geq 0$	CCM2	$V_{dc} - V_{cd}$
$0 > V_m^* \geq (-V_{cd})$	CCM3	$-V_{cd}$
$V_m^* < (-V_{cd})$	CCM4	$-(V_{dc} + V_{cd})$

제안된 전류 제어 방식에서, 스위칭 전압 레벨은 전류 제어 모드에 따라 달라진다. 따라서 제어 모드의 선택이 매우 중요시 된다. 본 논문에서 전류 제어 모드는 기준 지령 전압  $V_m^*$ 에 의해 선택된

다. 요구되는 지령 전압이 상전류를 양으로 유지할 때 전류 제어 모드는 CCM1 또는 CCM2가 선택된다. 그러나 지령 전압이 음일 경우 지령 전압에 따라 CCM3 또는 CCM4가 선택 된다.

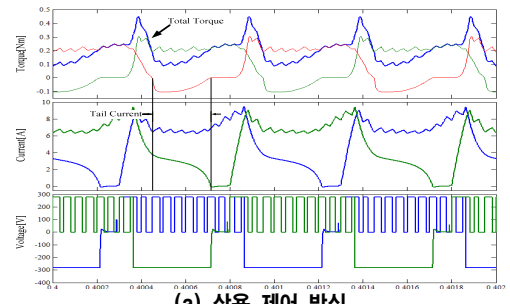
<표 1>은 이러한 제어 모드 선택의 조건을 나타내고 있다.

### 2.4 Simulink 시뮬레이션 결과

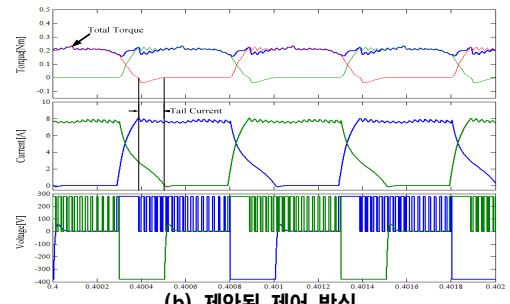
제안된 컨버터와 전류 제어 모드는 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 상용 전류 제어 방식과 비교 하였다.

시뮬레이션 모델은 MATLAB Simulink를 사용하여 수행되었으며 본 시뮬레이션에서 상 전압은 280[V] 그리고 스위칭 주파수 40[KHz]에서 수행되었다.

<그림 7>은 MATLAB Simulink 시뮬레이션 결과를 나타낸다. <그림 7>의 (a)는 상용 제어 방식을 나타내며 (b)제안된 제어 방식 결과를 나타낸다. 실험결과에 따라 제안된 4-Level 컨버터는 상용 비대칭형 컨버터에 비해 감자시간이 감소되어 전체 토크에 리플이 감소한 것을 알 수 있다.



(a) 상용 제어 방식



(b) 제안된 제어 방식

<그림 7> 30000[RPM]에서 시뮬레이션 비교 결과

#### <표 2> 상용 제어 방식과 제안된 방식의 토크 발생량 비교 결과

매개변수	상용 제어방식	제안된 제어방식
평균토크[Nm]	0.2198	0.2012
토크리플[%]	166.06	39.16

### 3. 결 론

본 논문에서는 고속에서 SRM의 여자성능을 개선한 4-Level 컨버터와 이의 전류제어 방식이 제안되었다. 제안된 컨버터는 상권선이 감자될 때 높은 음의 전압을 인가하기 위한 부스트 전압을 제어할 수 있으며 또한 높은 음의 전압은 감자시간을 단축시켜 고속 운전에서 여자되지 않는 상의 Tail전류에 의해 발생하는 토크를 최소화 시켜 전체 토크 리플을 감소시킬 수 있다.

제안된 컨버터와 전류제어방식은 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 검증되었다.

이 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 2009T100100654)

#### [참 고 문 헌]

[1] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Application", CRC Press, 2001  
[2] N. Bianchi, S. Bolognani, F. Luise, "High speed drives using a slotless PPM",