

교류 철도 급전변전소의 모듈형 멀티레벨 컨버터 적용 모델링 연구

현병수\*, 신승권\*\*, 김형철\*\*, 장길수\*  
고려대학교\*, 한국철도기술연구원\*\*

A Study on Modular Multi-level Converter Applied to AC Electric Railroad Substation

Byungsoo Hyun\*, Seungkwon Shin\*\*, Hyungchul Kim\*\*, Gilsoo Jang\*  
Korea University\*, Korea Railroad Research Institute\*\*

**Abstract** - 전기철도차량은 매 순간마다 이동하는 대용량 단상부하로, 전력계통 측면에서 부하의 특성이나, 계통구성의 형태 및 제한현상이 일반 3상 전력계통과 상이한 특성을 지닌다. 이와 같이 3상 전력계통으로부터 단상 교류로 변환하여 전기차를 운행하는 경우에는 3상 전원측 PCC(Point of Common Coupling)에 불평형을 일으켜, 역상전류를 발생시킨다. 현재는 이를 최소화하기 위해서 종래부터 사용 되어온 스코트 결선 변압기를 사용하고 있다. 하지만 특성상 두 개의 단상 시스템에 걸리는 부하량 및 역율이 동일하지 않을 경우 여전히 3상 전압불평형이 발생된다. 이에 대한 근본적인 대책으로는 급전시스템 재구성 또는 전력설비 증설 및 보상장치의 적용을 들 수 있으나, 최근에는 전력전자 기술의 발달로 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 소자를 이용한 BTB(Back To Back) 방식의 컨버터를 활용한 사례가 연구되고 있다. 본 논문에서는 전력계통과 전기철도의 연계 목적으로 3상-단상 BTB 모듈형 멀티레벨 컨버터 (Modular Multi-level Converter, MMC)를 이용한 전기철도 급전 시스템의 기본구조를 제안하고, Mathworks 사의 MATLAB Simulink tool를 이용하여 시뮬레이션을 통해 MMC시스템을 검토하고자 한다.

니다. 각 암당 존재하는 암 인덕터는 레그의 상/하단 사이의 전압차를 제어하여 순환전류의 크기를 제어하고, 사고시 급격한 전류의 증가를 제한한다.

1. 서 론

교류 철도급전시스템에서는 고압 또는 초고압의 전력을 전원계통으로부터 수신하여 전력변환장치에 의해 3상 전력을 단상 전력으로 변환하고, 변환된 전력을 급전선, 전차선로의 방면별 또는 상하행선별로 급전, 전기철도차량에 전력을 공급하고 있다. 전기철도차량은 매 순간마다 이동하는 대용량 단상부하로써, 부하의 특성이나, 계통구성의 형태 및 제한현상이 일반 3상 전력계통과 상이한 특성을 가지고 있다. 이는 3상 전원계통 측에 전압 불평형이나 전압변동을 발생시켜 전원계통 뿐만 아니라 자체의 급전시스템의 전력품질을 저하시킬 수 있다. 현재는 이를 최소화하기 위해서 종래부터 사용 되어온 스코트 결선 변압기를 사용하고 있지만, 2차 측이 서로 다른 크기 및 위상의 단상부하일 경우, 여전히 불평형 문제를 완전하게 해소 시킬 수 없으며, 그 외에도 구분소 존재로 고속철도차량 속도 제한 등 여러 단점을 지닌다.[1,2]

이러한 문제를 해결하기 위하여 3상 교류전원을 단상 교류전원으로 전력변환이 가능하고, 독립적인 유/무효 전력제어가 가능한 3상/단상 BTB VSC(Voltage Sourced Converter)-HVDC를 전기철도 급전시스템에 적용하는 연구가 진행되고 있다.

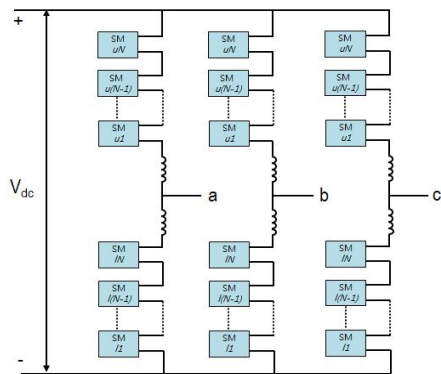
본 논문에서는 고전압/대용량 시스템인 전기철도 급전 시스템에 모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC)를 적용하기 위하여 각 상의 한 암(Arm)당 4개의 단위모듈(Sub-module)을 갖는 5-레벨 모듈형 멀티레벨 컨버터를 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 모델링하여 시스템을 검토하고자 한다.

2. 모듈형 멀티레벨 컨버터

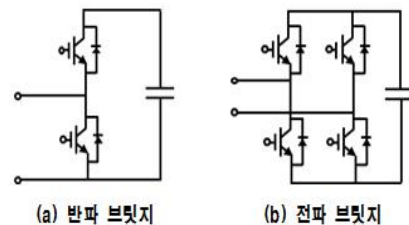
2.1 모듈형 멀티레벨 컨버터의 구성

<그림 1>은 N개의 단위모듈로 구성된 3상 모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC)의 기본 토폴로지를 나타내고 있다. 하나의 레그(Leg)에는 N개의 단위모듈로 구성된 2개의 암(Arm)과 두 개의 암 인덕터(Arm Inductor)로 구성된다.

단위모듈의 구조는 <그림 2>와 같이 두가지로 나눌 수 있다. 반파 브릿지 단위모듈은 2개의 IGBT 소자와 1개의 커패시터로 이루어져 있으며, 출력전압( $v_o$ )은  $+v_c, 0$ 이며, 전파 브릿지 단위모듈은 4개의 IGBT 소자와 1개의 커패시터로 구성되어 있으며, 출력전압( $v_o$ )은  $+v_c, 0, -v_c$  를 갖는다. 반파 브릿지의 경우, 스위치 개수 측면에서 전파 브릿지에 비해 비용과 손실 면에서 장점을 지닌다. 전파 브릿지의 경우, 출력전압 측면에서 반파 브릿지에 비해 적은 고조파 특성을 갖는 장점을 지

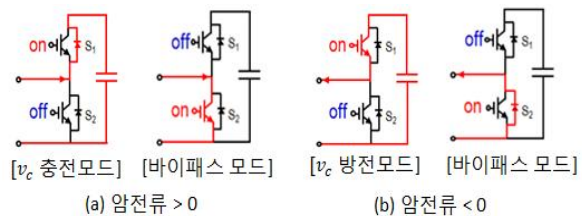


<그림 1> 3상 모듈형 멀티레벨 컨버터 토폴로지



<그림 2> 단위모듈 구조의 종류

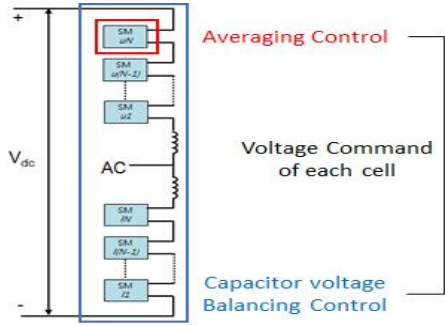
단위모듈의 출력전압은 스위칭 상태와 암 전류의 방향에 따라 충전, 방전, 바이패스 3가지 모드로 동작하며 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 암전류의 방향에 따른 단위 모듈 동작모드

2.2 모듈형 멀티레벨 컨버터의 제어

모듈형 멀티레벨 컨버터는 모듈화 된 각 단위모듈을 직렬로 연결하여 구성된 컨버터로 이상적인 출력전압/전류를 얻기 위해서는 각 단위모듈 내의 전압을 일정하게 제어해야한다. 일정하게 제어 위해서 하나의 레그에 커패시터의 평균전압을 제어하는 Averaging control과 각 단위모듈 내의 개별적인 전압을 제어하기 위한 Capacitor voltage balancing control 과 같이 크게 두 가지로 나누어 커패시터 전압을 제어한다. 이와 같은 모듈형 멀티레벨 컨버터의 제어 토폴로지는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 모듈형 멀티레벨 컨버터 제어 토폴로지

### 2.2.1 Averaging Control

Averaging control은 한 상(leg)의 커패시터 평균 전압을 제어하기 위하여 한 상의 순환전류를 이용하여 제어한다. 이때, 한 상의 평균전압은 식 (2.1)과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{v}_{cu} = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N v_{cju} \quad (2.1)$$

또한 한 상의 순환전류( $i_{Zu}$ )는 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있고,

$$\begin{aligned} i_{Zu} &= i_{Pu} - \frac{i_u}{2} = i_N + \frac{i_u}{2} \\ &= \frac{1}{2} (i_{Pu} + i_N) \end{aligned} \quad (2.2)$$

PI제어기를 이용한 averaging control은 수식 (2.3), (2.4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{Zu}^* = K_1 (v_c^* - \bar{v}_{cu}) + K_2 \int (v_c^* - \bar{v}_{cu}) dt \quad (2.3)$$

$$v_{Au}^* = K_3 (i_{Zu} - i_{Zu}^*) + K_4 \int (i_{Zu} - i_{Zu}^*) dt \quad (2.4)$$

커패시터의 전압 지령치와 평균치를 이용한 Voltage major loop에서  $i_{Zu}^*$ 를 생성하고, 생성된 지령치는 Current minor loop에 입력되어 커패시터의 평균 전압을 제어하게 된다. 수식을 통하여 한 상의 평균전압은 부하전류의 영향 없이 제어되는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2.2 Capacitor voltage balancing control

Balancing Control은 각 단위모듈 내의 커패시터 전압이 전압 지령치( $v_c^*$ )를 추정하도록 제어한다. Balancing Control은  $i_{Pu}, i_{Nu}$ 를 기반으로 하기 때문에  $v_{Bju}^*$ 의 극성은  $i_{Pu}, i_{Nu}$ 에 따라서 결정된다. 예를 들어 상위 암의 경우,  $v_c^* \geq v_{cju}$  ( $j: 1-4$ ) 일 경우, 각 셀의 커패시터에 전력을 공급해야 한다. 즉,  $i_{Pu}$ 가 +일 경우,  $v_{Bju}^*$ 도 양의 값이 되며,  $i_N$ 가 음의 값 일 경우  $v_{Bju}^*$ 도 음의 값을 갖게 된다. 이는 식 (2.5)와 (2.6)으로 나타낼 수 있다.

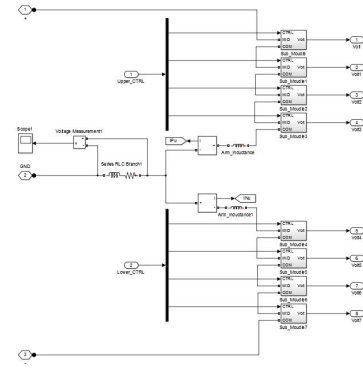
$$v_{Bju}^* = \begin{cases} K_5 (v_c^* - v_{cju}) & i_{Pu} > 0 \\ -K_5 (v_c^* - v_{cju}) & i_{Pu} < 0 \end{cases} \quad (j=1-4) \quad (2.5)$$

$$v_{Bju}^* = \begin{cases} K_5 (v_c^* - v_{cju}) & i_N > 0 \\ -K_5 (v_c^* - v_{cju}) & i_N < 0 \end{cases} \quad (j=5-8) \quad (2.6)$$

### 3. 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 단상 MMC를 모델링하였고, Averaging control과 Balancing control에 의하여 각각의 단위모듈의 커패시터 전압제어 성능과 단위모듈 개수에 따른 출력 전압과 전류를 검토하였다.

단상 모듈형 멀티레벨 컨버터는 상단 암과 하단 암에 각각 4개의 반파 브릿지 단위모듈을 이용하여 5-레벨 모듈형 멀티레벨 컨버터를 구성하였다. 이는 그림 <그림 5>와 같이 모델링하였고, 모델의 파라미터는 <표 1>과 같다.

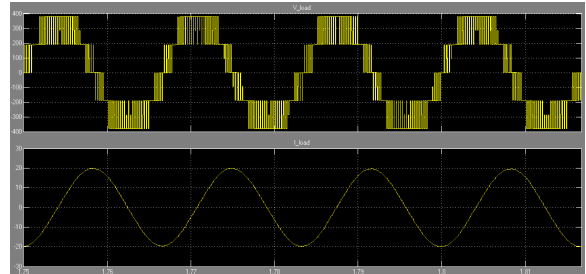


<그림 5> 5레벨 모듈형 멀티레벨 컨버터 시스템 시뮬레이션 구성 회로

<표 1> 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
암당 단위모듈 수	4 [개]
DC 입력전압(E)	800 [V]
AC 출력전압 최대값	400 [V]
셀 전압	800/4 [V]
스위칭 주파수	1 [kHz]
셀 커패시터	8e-3 [F]
암 인덕터	6e-3 [H]

모듈형 멀티레벨 컨버터는 DC 800[V]를 인가하여 AC 출력전압 최대값 400[V]를 출력하도록 하였다. 암당 단위 모듈이 4개로 하여, 5레벨의 출력전압값을 얻었다. 셀 전압은 200[V]이고, 스위칭 주파수는 1 [kHz], 셀 커패시터는 8[mF], 암 인덕터는 6[mH]로 하였다. 이때의 출력전압 및 출력전류 파형은 <그림 6>과 같다. 출력전압은 400[V], 200[V], 0[V], -200[V], -400[V] 로써, 5-레벨의 전압을 확인하였다.



<그림 6> 5레벨 모듈형 멀티레벨 컨버터 시스템 출력전압(위) 및 출력전류(아래)

## 4. 결 론

본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 5-레벨 모듈형 멀티레벨 컨버터를 모델링하고, 모듈형 멀티레벨 컨버터 제어를 위하여 필요한 Averaging control과 Balancing control 제어와 전류제어를 통해 AC 전압을 검토하였다. 추후 연구에서는 단위모듈의 수를 늘려 더 정현적인 출력값을 얻을 수 있도록 하고, MMC 시스템을 이용한 BTB 컨버터 시스템을 적용하여 유/무효전력 제어 성능을 확인하고자 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 손국현, 최규형, 김성일, 정효성 “전기철도 급전시스템에서 SVC를 이용한 전압불평형 보상에 관한 연구” 한국철도학회 추계학술대회, pp. 3124-3132, 2011.10.
- [2] 장상훈, 오광해 “전기철도 급전시스템의 신뢰성 향상 기술” 철도기술정보 18호
- [3] Amirmaser Yazdani, Reza Iravani, “Voltage-sourced converters in power systems”, IEEE & WILEY
- [4] R. Marquardt, “Modular Multilevel Converter topologies with DC-Short circuit current limitation”, ICPE&ECCE, vol. 24, pp. 1737-1746, July 2009.
- [5] Harikrishna K, Rinku scaria, “MMC Based HVDC System”, IJEIT, vol. 3, Issue 2, August 2013