

3-레벨 AFE 정류기의 캐리어 기반 중성점 제어 기법

강경필, 김호성¹, 조진태², 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소, 한국전기연구원¹, 한전 전력연구원²

A carrier based neutral point balancing strategy for 3-level active-front-end rectifiers

Kyoung Pil Kang, Ho Sung Kim¹, Jintae Cho², Younghoon Cho
 Power Electronics Lab. Konkuk Univ. KERI¹, KEPRI²

ABSTRACT

In this paper is presented a pre charging sequence for single phase cascaded neutral point clamped(NPC) converters for capacitors voltage balancing. capacitor imbalance problem in pre charge sequence is caused in cascaded NPC converter by its topology. the DC link voltage at each NPC converter module can be balanced by the proposed switching method. the design and performance of the proposed sequence are verified by simulation and experimental results using prototype.

1. 서 론

최근 분산전원, 직류배전 시스템연계와 더불어 스마트 그리드에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이렇듯 전력시스템이 변화하는 과정에서 핵심적인 요소기술로 반도체 변압기(SST Solid State Transformer)에 관한 기술을 고려할 수 있다. 반도체 변압기는 기존의 무겁고 부피가 큰 전통적인 변압기를 전력 변환장치로 대체하여 종래의 변압기대비 가볍고 부피가 작으며 효율이 높은 장점이 있어 반도체 변압기에 대한 연구도 활발하게 진행 중이다. 반도체 변압기는 중전압 및 고전압을 정류하는 AFE (Active front end)정류기 모듈과 정류된 전압을 저전압으로 감압해 주는 컨버터, 출력에 따른 출력회로로 구성되어 있다. AFE 정류기는 높은 입력전압에 대응하기 위해 여러 대의 모듈을 적층시키는 형태로 구성되며, 일반적으로 AFE 정류기는 CHB(Cascaded H bridge)나 NPC의 회로 구조가 사용된다.

본 논문에서는 3 레벨 NPC회로에서 발생하는 커패시터 전압 불평형 현상을 해소하기 위해 AFE 정류기의 극전압 지령에 전압을 주입하여 중성점제어를 수행하였다. [1][3]

2. 3-레벨 AFE 정류기와 중성점 제어방법

AFE 정류기에 사용되는 회로 중 3 레벨 NPC의 회로구조는 그림 1과 같이 각 레그에 클램핑 다이오드가 연결되어 있고, 클램핑 다이오드는 DC 링크의 중성점과 연결되어 있다. 3 레벨 NPC 회로는 시스템의 확장성과 사용되는 스위칭 소자가 부담하는 스트레스가 적어 스위칭 손실이 작다. 또한 기존 PWM 모듈레이션 인버터와 비교하였을 때 출력전압의 고조파 성분이 적다는 장점이 있다. [1][3]

그러나 NPC회로는 시스템의 불완전성으로 인해 과도상태나 정상상태에서 중성점 전압변동이 발생하는 단점이 있다. 이러

한 중성점 전압의 변동을 개선하기 위해 캐리어 기반 PWM기법, Offset 전압 주입, Active balancer 등의 다양한 연구가 이루어져 왔다.

3. 제안하는 중성점 제어 기법

캐리어기반 모듈레이션은 모듈레이션 지령과 서로 다른 캐리어의 크기비교에 따라 레그의 스위칭 상태를 1, 0, 1로 결정할 수 있고, 그림 1의 단상 3 레벨 AFE 정류기의 극전압 V_{xo} ($x=A, B$)는 스위칭 상태에 따라 $+V_{c1}, 0, -V_{c2}$ 의 전압을 가질 수 있다. 모듈레이션 지령과 캐리어의 관계에 따라 펄스폭(τ_x)을 구하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\bar{\omega}_{x0}^* \geq v_{tr}^+, q_{x1} = 1 \quad (1)$$

$$\bar{\omega}_{x0}^* \leq v_{tr}^-, q_{x2} = 1 \quad (2)$$

$$\tau_x = \left| \omega_{xo}^* \right| T_c \quad (3)$$

이 때 펄스폭은 모듈레이션 지령과 스위칭 주기로 표현되고, 평균 극전압 \bar{V}_{xo} 는 $\bar{\omega}_{xo}^*$ 의 극성에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$\bar{V}_{xo} = \begin{cases} \frac{\tau_x}{T_c} V_{c1}, \bar{\omega}_{xo}^* \geq 0 \\ -\frac{\tau_x}{T_c} V_{c2}, \bar{\omega}_{xo}^* \leq 0 \end{cases} \quad \bar{\omega}_{xo}^* = \begin{cases} \frac{V_{xo}^*}{V_{c1}}, V_{xo}^* \geq 0 \\ \frac{V_{xo}^*}{V_{c2}}, V_{xo}^* \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{\omega}_{xo}^* = \frac{2V_{xo}^*}{V_c} \quad (5)$$

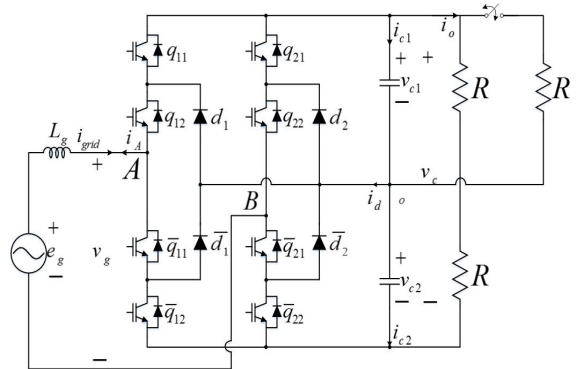


그림 1 단상 3-레벨 AFE 정류기 회로도
 Fig. 1 Single-phase three-level AFE rectifier

커패시터 전압 V_{c1}, V_{c2} 가 DC링크 전압의 절반과 같다고 할 때, 모듈레이션 지령은 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

선형영역에서 모듈레이션 지령은 1에서 1사이의 값을 가지게 되고, 이 때 극전압 지령은 $0.5V_c$ 에서 $0.5V_c$ 의 범위에 속해 있음을 식 (5)를 통해 알 수 있다.

극전압 지령 V_{A0}^* 와 V_{B0}^* 는 다음 수식 (6)과 같이 상전압 v_g^* 와 미지의 전압 V_h^* 의 합으로 표현할 수 있고, 극전압 지령은 선형 영역 범위를 만족해야 하므로 V_h^* 는 식 (7)의 범위에 존재하게 된다. 그림 2는 식 (7)을 나타낸 것으로 주입되는 전압 V_h^* 는 실선 V_{h-max} 와 점선 V_{h-min} 사이에 존재해야 한다.

$$V_{A0}^* = \frac{1}{2}v_g^* + V_h^*, \quad V_{B0}^* = -\frac{1}{2}v_g^* + V_h^* \quad (6)$$

$$-\frac{1}{2}V_c - \min(v_g^*, 0) \leq V_h^* \leq \frac{1}{2}V_c - \max(v_g^*, 0) \quad (7)$$

식(7)을 만족시키도록 V_h^* 를 다음 수식 (8)과 같이 DC링크 전압과 상전압 지령의 크기로 정할 수 있다. 여기에서 K는 전압변조비와 커패시터 전압차이로부터 유도된 중성점 평균 전류 I_d 에 관한 변수이다.

$$V_h^* = \frac{1}{2}K(V_c - |v_g^*|) \quad (8)$$

중성점에 흐르는 전류 $i_d(t)$ 는 스위칭 상태에 따라 변하는 시변 함수이다. 중성점 전류의 한주기 동안의 평균값은 모듈레이션 지령과 상전류의 곱으로 표현할 수 있고, 이는 식 (5)를 통하여 극전압지령으로 표현할 수 있다. 식 (9)와 같이 표현된 평균 중성점 전류는 또한 DC링크 커패시터 V_{c1}, V_{c2} 의 관계 식 (10), (11)으로부터 구할 수 있으며 식 (9),(10),(11)을 이용하여 K 값을 구할 수 있다.

$$I_d = \frac{2}{V_c} (|\bar{V}_{B0}^*| - |\bar{V}_{A0}^*|) i_1 \quad (9)$$

$$C \frac{d\epsilon_{vc}}{dt} = i_d \quad (10)$$

$$\epsilon_{vc} = V_{c1} - V_{c2} \quad (11)$$

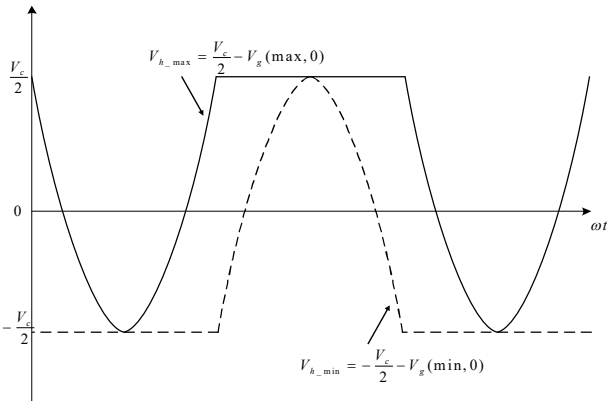


그림 2 주입전압의 제한영역
Fig. 2 Restriction range diagram of injection voltage V_h

표 1 모의실험에 사용한 회로 및 제어 변수
Table 1 Circuit and control parameter for simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
e_g	220 Vrms	R	500 Ω
L_g	14 mH	$V_{DC,ref}$	370 V
C	250 μ F	$V_{c1,c2}$	185 V

4. 모의실험 및 결과

제안하는 중성점 제어기법의 효과를 확인하기 위해 그림 1과 같이 회로를 구성하여 모의실험을 실시하였다. 모의실험은 t=0.02초부터 t=0.4초까지 커패시터 전압이 불균형이 발생하도록 강제하였으며, t=0.4초부터 중성점 제어를 수행하였다. 모의 실험에서 사용된 조건은 표 1과 같다.

모의실험 결과 그림 3과 같이 초기 발생된 커패시터 불균형 현상이 제어를 통하여 해소되었고, DC링크 전압 지령을 따라 일정하게 유지되는 것을 확인하였다.

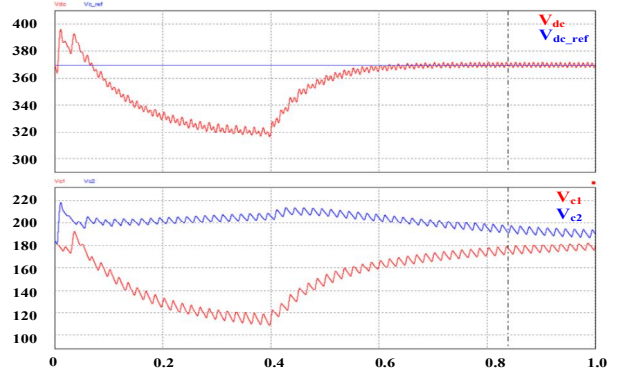


그림 3 커패시터 전압 밸런싱 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation result of capacitor voltage balancing

5. 결론

본 논문에서는 모듈형 3 레벨 AFE 정류기의 중성점 제어 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 AFE 정류기의 모듈레이션 지령을 극전압 지령으로 나타내고, 제한영역 안에 존재하는 전압 V_h^* 를 주입하여 커패시터 전압 불평형이 줄어들을 모의실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원 받아 수행된 것임. [과제번호 R15XA03 34]

본 연구는 한국전력공사 전력연구원에서 수행중인 "저압 직류배전망 독립성 실증 연구" 과제의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(D3080)

참고 문헌

- [1] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A New Neutral Point Clamped PWM Inverter.", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA 17, No. 5, pp. 518 523, 1981, Sept.
- [2] Isaac S. F., " A Carrier Based PWM Technique for Capacitor Voltage Balancing of Single Phase Three Level Neutral Point Clamped Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.51, No.4, pp.3227 3235, 2015. July Aug.
- [3] Wensheng Song, "A Carrier Based PWM Strategy With the Offset Voltage Injection for Single Phase Three Level Neutral Point Clamped Converters.", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 3, pp. 1083 1095, 2013, March.