# 단상 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터의 스위칭 상태 변화 횟수 저감 기법

박동환, 구남준, 김래영†
한양대학교

# A novel method for reducing the number of switching times in single phase flying capacitor multilevel inverter

Dong-Hwan Park, Nam-Joon Ku, and Rae-Young Kim†
Hanyang University

## ABSTRACT

본 논문은 단상 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터에서의 스위칭 상태 변화 횟수를 줄이는 새로운 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터가 갖는 Redundant state 특성을 이용하며, 플라잉 커패시터 전압이 제어되는 범위 내에서 각 스위치가 최대한 적게 온/오프 하도록 Redundant state를 선택한다. 이를 단상 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터에 적용하여 PSIM 시뮬레이션을 통해 유효성을 검증하였다.

## 1. 서 론

멀티레벨 인버터는 하드웨어 구성에 있어서 동일한 DC-링크 전압에 대하여 2-레벨 인버터보다 낮은 정격전압 스위치소자를 사용할 수 있고, 전압의 레벨이 증가함에 따라 정현파에 가까운 출력 전압 파형을 얻어 고조파 특성이 좋아지는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인하여 멀티레벨 인버터는 고압 대용량 시스템에서 주목받고 있다. 멀티레벨 인버터 토폴로지 중 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터는 NPC 멀티레벨 인버터와 다르게 클램프 다이오드가 아닌 커패시터가 추가된 형태로 구성된다. 플라잉 커패시터의 전압은 인버터의 출력 전압에 직접적인 영향을 미치므로 인버터의 정상적인 동작을 위하여 커패시터 전압 제어는 중요하다. 플라잉 커패시터의 전압 제어 방법 중에 같은 출력전압을 내는 여러 스위칭 상태 중 하나를 선택하는 Redundancy State Selection (RSS) 방법이 나와있다.[1] 하지만 기존의 제어 방법에서는 플라잉 커패시터 전압 제어 시 스위칭 상태 변화 횟수는 고려하지 않았다.

본 논문에서는 플라잉 커피시터 전압을 제어하며 스위칭 상태 변화 횟수를 줄일 수 있는 적절한 스위칭 상태를 결정하는 방법을 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 전압 제어를 위한 Redundant state 선택법

멀티레벨 인버터는 같은 출력 전압을 내는 여러 스위칭 상태가 존재한다. 이를 Redundant state라 표현하는데, 어떤 Redundant state를 선택하느냐에 따라 커패시터 전압의 충·방전이 결정된다.

기본적인 커패시터 전압 제어 방법은 충전이 필요한 상황에 커패시터에 흐르는 전류를 양의 방향으로 흘려주고, 방전이 필요한 상황에 전류를 음의 방향으로 흘려주는 것이다. 플라잉 커패시터 전압의 충·방전 필요 판단($Sign_V_{Cn}$)은 커패시터

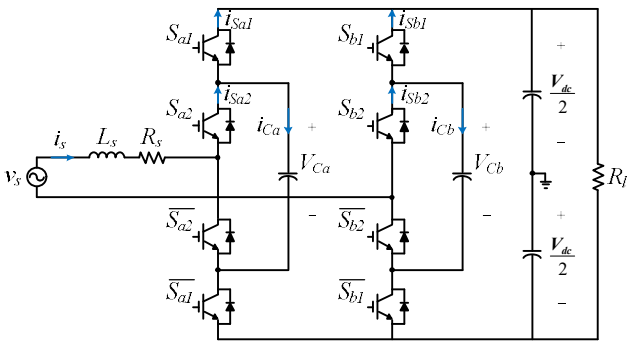



그림 1. 단상 3-레벨 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터

전압이 지령 전압 $V_{C_ref}$ 보다 낮으면 충전 필요 상태로 판단하고, 커패시터 전압이 지령 전압보다 높으면 방전 필요 상태로 판단한다. 충전 필요 상태를 1, 방전 필요 상태를 -1로 정의한다.

플라잉 커패시터에 흐르는 전류는 스위칭 상태와 상 전류 방향에 의해 결정되므로, 플라잉 커패시터에 흐르는 전류방향($Sign_i_{Cn}$)은 상 전류 방향과 스위칭 상태를 이용해 판단한다. 상 전류의 부호는 상 전류가 양의 방향일 때를 1, 음의 방향일 때를 -1로 정의한다. 식(1)은 플라잉 커패시터 전압의 충·방전 필요 판단 변수다.

$$Sign_v_{Cn} = \begin{cases} 1 & (V_{C_ref} \geq V_{Cn}) \\ -1 & (V_{C_ref} < V_{Cn}) \end{cases} \quad (1)$$

플라잉 커패시터 전압의 충·방전 필요상태($Sign_V_{Cn}$)와 플라잉 커패시터에 흐르는 전류방향($Sign_i_{Cn}$)을 곱한 결과로 선택한 스위칭 상태가 플라잉 커패시터에 필요한 상태와 그에 맞게 전류가 흐르는지를 판단할 수 있다. 두 변수를 곱한 값이 1이면, 커패시터 전압의 충전이 필요할 때 전류가 충전되는 방향으로 흐르고 커패시터 전압의 방전이 필요할 때 전류가 방전되는 방향으로 흐른다는 것을 의미한다. 두 변수를 곱한 값이 -1이면, 보상이 필요한 방향과 반대 방향으로 전류가 흐른다는 것을 의미한다.

그림 1은 단상 3-레벨 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터이고, 플라잉 커패시터는 A-leg와 B-leg에 각각 하나씩, 총 두 개로 구성된다. 각 플라잉 커패시터의 $Sign_V_{Cn}$와 $Sign_i_{Cn}$의 곱을 더하여 커패시터 전압 보상 지표를 나타내는 변수 Goodness factor라 정의한다.

$$G = Sign_v_{Ca} \cdot Sign_i_{Ca} + Sign_v_{Cb} \cdot Sign_i_{Cb} \quad (2)$$

표 1. 시뮬레이션에 사용한 파라미터 값

| 항목 | 값 | 단위 |
|---|---|---|
| Input peak voltage | 380 | [V] |
| Line frequency | 60 | [Hz] |
| DC-link voltage | 1000 | [V] |
| Input inductance | 50 | [mH] |
| Flying capacitance | 300 | [uF] |
| Carrier frequency | 10 | [kHz] |
| Sampling frequency | 20 | [kHz] |

이 값이 클수록 플라잉 커패시터의 전압 제어가 잘된다고 할 수 있다. 따라서 Goodness factor를 가장 큰 값이 되게 하는 Redundant state를 선택하여 제어한다.

### 2.2. 제안한 Redundant state 선택법

제안한 방법에서는 IGBT 스위칭 횟수를 저감시키기 위하여 스위칭 상태의 변화를 나타내는 변수 Change factor를 정의한다.

$$C = C_{Sa1} + C_{Sa2} + C_{Sb1} + C_{Sb2} \quad (3)$$

$C_{San}$은 스위치 $S_{an}$의 Change factor이며 현재 스위칭 상태와 다음 스위칭 상태가 같다면 1, 다르면 0 이다. 총 Change factor가 높은 값일수록 스위칭 상태 변화 횟수가 적다는 것을 의미한다. 출력 전압 지령이 $V_{dc}/2$인 예를 들면, 현재 A-leg와 B-leg의 스위칭 상태가 $\{S_{a1},S_{a2},S_{b1},S_{b2}\} = \{0,1,1,0\}$이고 다음 스위칭 상태가 $\{S_{a1},S_{a2},S_{b1},S_{b2}\} = \{0,1,0,0\}$라면, 총 Change factor는 3의 값을 가진다.

제안한 Redundant state 선택 방법은 Goodness factor와 Change factor의 합이 가장 높은 Redundant state를 다음 스위칭 상태로 선택하는 것이다. 커패시터 전압 제어시에 Goodness factor와 Change factor를 함께 고려하면 스위칭 상태 변화 횟수도 줄일 수 있다. 또한 플라잉 커패시터 전압오차가 지령 전압의 2% 이상이 될 경우, Goodness factor가 가장 높은 값을 나타내는 Redundant state를 선택하여 커패시터 전압 제어를 우선적으로 고려한다.

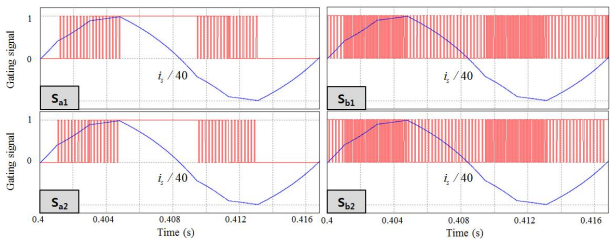
## 3. 시뮬레이션 결과

제안한 방법의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 구현하였고, 시뮬레이션 툴은 PSIM 9.0을 사용했다. 표 1은 시뮬레이션에 사용한 파라미터 값을 나타낸다.

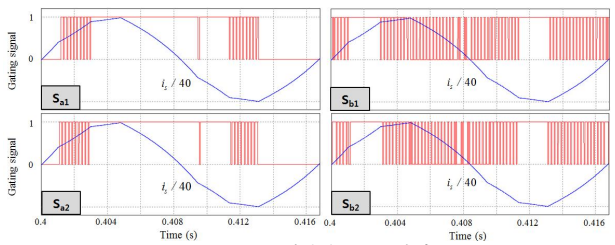
그림 2는 상 전류 한 주기 동안의 스위칭 상태 변화 횟수를 나타낸다. 그림 2-(a)는 Goodness factor만을 고려한 기존 RSS 방법의 결과이고, 그림 2-(b)는 Goodness factor와 Change factor를 함께 고려한 제안한 RSS 방법의 결과다. 제안한 방법 적용 시 기존 방법에 비해 스위칭 상태 변화 횟수가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 A-leg와 B-leg의 플라잉 커패시터 전압을 나타낸다. 제안한 방법이 기존 방법보다 플라잉 커패시터 전압 제어 성능은 다소 저하되지만, 전압오차는 지령전압의 2%내로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 기존 RSS 방법과 제안한 RSS 방법의 상 전류 파형을 나타낸다. 두 방법의 전류 THD 특성은 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

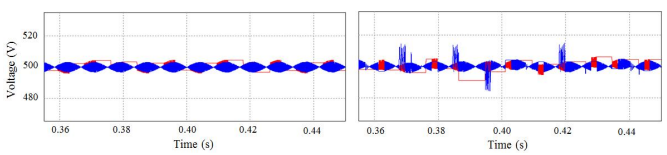



(a) 기존 RSS 방법



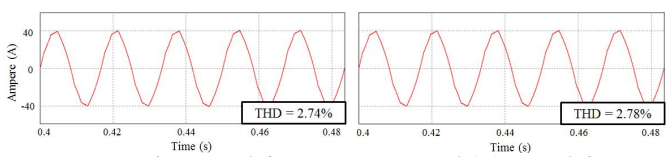

(b) 제안한 RSS 방법

그림 2. 상 전류 한 주기 동안의 스위칭 상태 변화 횟수 비교




(a) 기존 RSS 방법 (b) 제안한 RSS 방법

그림 3. 플라잉 커패시터 전압 파형 비교




(a) 기존 RSS 방법 (b) 제안한 RSS 방법

그림 4. 출력 전류 파형 및 THD 비교

## 4. 결 론

본 논문은 단상 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터의 스위칭 상태 변화 횟수를 줄이며 커패시터 전압을 제어하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 Goodness factor와 Change factor의 합이 가장 높은 Redundant state로 선택하여 스위칭 상태 변화 횟수를 저감하였다. 또한 제안한 RSS 방법은 기존 RSS 방법의 커패시터 전압 제어 성능보다 다소 저하되지만 전압오차를 2%내로 제어하며, 출력 전류의 품질도 양호하다. 시뮬레이션 결과를 통해 단상 3-레벨 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터에서 제안한 방법의 유효성을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

[1] M. Khazraei, H. Sepahvand, K. Corzine, and M. Ferdowsi, "Active Capacitor Voltage Balancing in Single-phase Flying-Capacitor Multilevel Power Converters", IEEE Industrial Electronics, Vol. 59, No. 2, pp. 769-778, Feb 2012.