

Modular Multilevel Converter에서 영상분 전류주입에 의한 셀간 전압평형화 제어의 향상

김태형, 권병기
포스코 ICT 기술연구소

Enhancement of Cell Voltage Balancing Control by Zero Sequence Current Injection in a Modular Multilevel Converter

Tae Hyeong Kim, Byung Ki Kwon
POSCO ICT R&D Center

ABSTRACT

본 논문에서는 Δ 결선으로 구성된 Modular Multilevel Converter(MMC)에서 흐르는 전류가 매우 적은 경우 계통에 영향이 없이 셀 직류전압의 불평형을 제어할 수 있도록 영상분 전류를 주입하는 방법을 제안하였고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

계통망의 안정화를 위해 사용되는 STATCOM은 대용량화를 위한 방식으로 MMC 토폴로지가 많은 관심을 받고 있다. 여러 개의 셀로 이루어진 MMC 구조에서는 셀들의 직류단 전압이 분리되어야 하기 때문에 모든 셀의 직류단 전압이 균등한 크기를 갖도록 하는 평형제어가 이루어져야 한다. 본 논문에서는 계통전류에 영향을 미치지 않고 작은 전류에서 안정적으로 동작할 수 있는 영상분 전류주입 방법을 제안하고, 그 성능에 대해 시뮬레이션을 통해 입증한다.

2. MMC에서 셀간 평형화 제어기의 설계

그림 1과 같은 Δ 결선의 MMC에서 한 상에 직렬로 연결한 셀 인버터의 개수를 N이라 할 때 해당 상에서 출력하고자 하는 기준전압과 k 번째 셀 인버터의 기준전압은 아래와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 x는 a상 또는 b상, c상을 뜻하고, k는 1에서 N 사이의 값을 나타낸다.

$$v_{xk(ref)} = \frac{\sqrt{2} V_{x(ref)}}{N} \sin(\omega_c t), \left\{ \tilde{V}_{xk} = \frac{\tilde{V}_x}{N} \right\} \quad (1)$$

상내 전체 직류단전압의 합이 일정하게 유지되기 위해선 해당 상에 유입(유출)되는 유효전력(P_x)이 항상 영이 되어야 한다. 셀 인버터 직류단전압의 기준치($v_{DCxk(ref)}$)와 측정된 직류단전압(v_{DCxk})의 차로부터 셀 인버터의 교류측에서 유입(유출)되어야 하는 유효전력을 구할 수 있으며, 이는 셀간 평형화 제어기의 출력에 해당한다. (K : 제어기 비례상수)

$$\delta P_{xk} = K \{v_{DCxk(ref)} - v_{DCxk}\} \quad (2)$$

셀 인버터의 직류단전압 평형화를 위한 유효전력은 아래와 같이 전압과 전류의 내적으로 표현할 수 있다.

$$\delta P_{xk} = \delta \tilde{V}_{xk} \cdot \tilde{I}_x = \delta V_{xk} \cdot I_x \cos \theta_{\delta x} \quad (3)$$

여기서 증감전압($\delta \tilde{V}_{xk}$)의 위상을 전류(\tilde{I}_x)와 평행하게 하였을 때, 즉 동상이거나 180° 의 위상을 갖도록 하였을 때 평형화 제어기의 출력과 증감전압의 관계를 아래와 같이 선형적으로 나타낼 수 있다.

$$\delta V_{xk} = \frac{K}{I_x} \cdot \{v_{DCxk(ref)} - v_{DCxk}\} \quad (4)$$

위의 관계로부터 셀 인버터의 출력전압은 기준전압을 셀의 개수로 나눈 셀 기준전압(식(1))과 셀간 평형화제어기 출력전압(식(4))의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\tilde{V}_{xk} = \frac{\tilde{V}_x}{N} + \delta \tilde{V}_{xk} \quad (5)$$

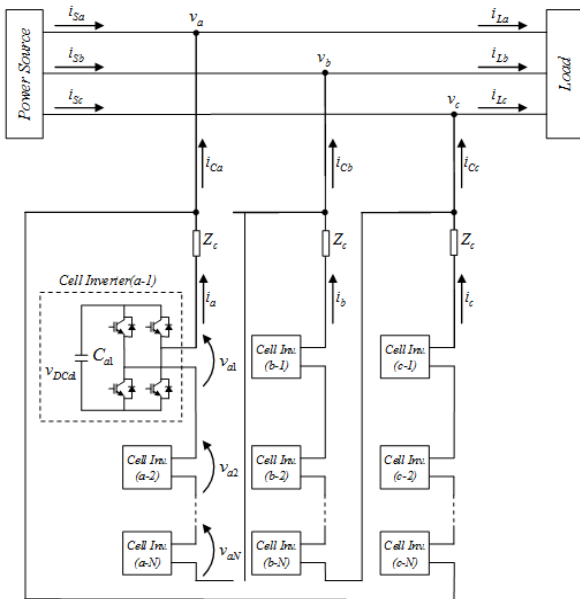


Fig. 1 Delta-connected Modular Multilevel Converter

3. 전류가 작을 때 셀 평형화 제어의 한계

셀 인버터가 출력할 수 있는 최대 전압은 아래와 같이 직류 단전압과 출력전압에서 구할 수 있으며 이로부터, 셀간 평형화 제어를 위해 출력 가능한 전압의 최대값이 정해진다.

$$\delta V_{xk(\max)} = \sqrt{\left(\frac{V_{DCxk}}{\sqrt{2}}\right)^2 - V_{xk(ref)}^2} \quad (6)$$

셀간 평형화제어기에서 직류단전압이 그 기준값을 추종하기 위해 요구되는 유효전력이 동일하다고 할 때 흐르는 전류의 크기가 큰 경우에는 비교적 작은 전압으로 원하는 유효전력을 발생하는 것이 가능하지만, 전류가 매우 작은 경우에는 상대적으로 큰 전압이 필요하다. 셀 인버터가 출력할 수 있는 최대 범위를 벗어나는 경우 셀간 평형화제어를 위한 유효전력을 유입(유출)하는 것이 어려워지게 되어 전체적인 셀들의 직류단전압이 불안정해진다.

4. 제안하는 영상분 전류 주입 알고리즘

△결선으로 구성된 MMC의 경우, 계통으로 유입되는 보상 전류에 영향을 미치지 않는 영상분전류를 중첩하는 방식을 고려해 볼 수 있다. 영상분 전류는 크기와 위상각에 따라 세 상에 다른 유효전력을 발생시키며, 이는 상간 평형화제어기의 동작과 충돌하는 문제를 일으킨다.

본 논문에서는 영상분 전류의 크기를 교번시킴으로써 상별 직류단전압의 평균값을 안정적으로 유지할 수 있을 뿐 아니라, 그 교번하는 주파수를 상간 평형화제어기의 응답주파수(ω_{pk})보다 최소 10배 이상 빠르게 설정하여 상간 평형화제어기와의 충돌을 회피하였다. 그림 2는 전류의 크기가 매우 작을 때, 안정적인 셀간 평형화제어를 위해 영상분 전류를 주입하는 방식을 나타낸다.

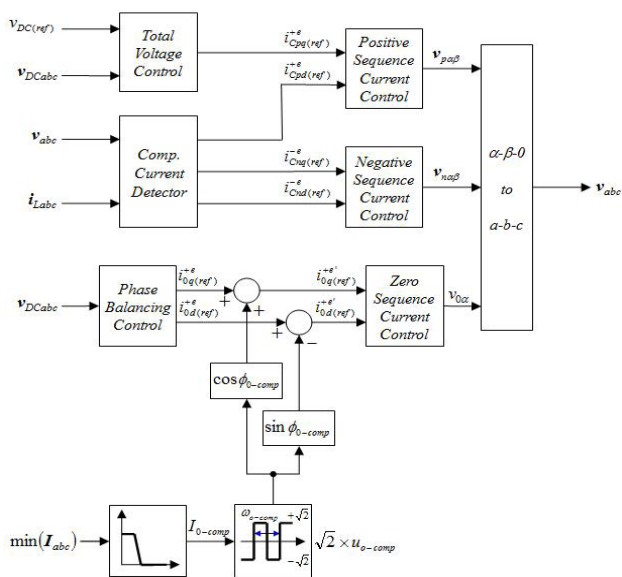


Fig. 2 Zero sequence current injection for cell balancing control

5. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 영상분 전류 주입 알고리즘을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 △결선의 MMC에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

셀간 직류단전압 평형화제어기의 특성을 고찰하기 위해 a상 첫 번째 셀 인버터에 정격용량의 0.2 %에 해당하는 손실저항을 병렬로 연결하였다. 흐르는 전류가 매우 작을 때 제안한 알고리즘의 성능을 고찰하기 위해 약 10 % 크기의 영상분 전류를 중첩하였으며, 상간 평형화제어기의 차단주파수(5 rad/s)를 고려하여 교번 주파수를 63 rad/sec(10 Hz)로 설정하였다. 시뮬레이션 결과(그림 3)와 같이 각 상과, 각 셀 인버터의 직류단전압은 10 Hz의 주기로 변동하지만 변동 크기는 5%이하로 나타나고, 셀 인버터 간의 편차는 거의 없음을 확인하였다. 또한 계통측 전류에는 영상분 전류의 주입으로 인한 성능저하가 전혀 발생하지 않음을 알 수 있다.

Table 1 System parameters of a Modular Multilevel Converter

system parameters	values
rated power	30 kVA
rated voltage	440 V
dc side voltage of each phase	800 V
cell inv. numbers of each phase(N)	2
switching frequency of each cell inv.	960 Hz
pulse width modulation	phase shifted

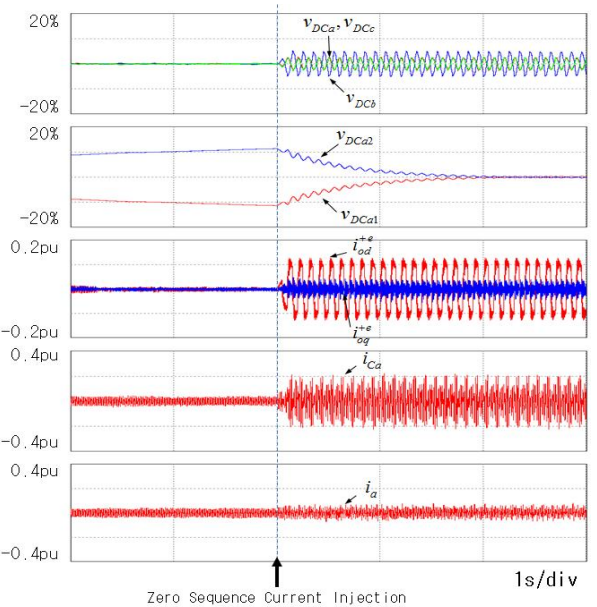


Fig. 3 The operation of cell balancing controllers imposed with zero sequence current

4. 결론

본 논문은 전류가 작은 영역에서 셀 평형화 제어를 위해 교번하는 영상분 전류를 주입하는 방법을 제안하였고, 시뮬레이션을 통해 전력계통에 영향 없이 안정적으로 셀간 평형화 동작을 수행하는 것을 확인하였다.