

지령전압 변조를 활용한 3상 NPC 컨버터 전압 밸런싱 알고리즘 연구

김지수, 이은수

한양대학교 ERICA 전자공학부

Voltage Balancing Algorithm for Three-Phase NPC Converter Using Reference Voltage Modulation

Ji S. Kim, Eun S. Lee

Hanyang University, ERICA, Electrical Engineering

ABSTRACT

본 논문에서는 3-레벨 NPC(Neutral Point Clamped) 컨버터의 중성점 전압 제어를 개선하기 위한 새로운 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 밸런싱 알고리즘은 DC 링크의 상단 전압 V_t 와 하단 전압 V_b 의 비율을 기반으로 중성점 전압을 제어하는 방식을 적용하였다. 즉, 상단 전압과 하단 전압의 비율이 1로 추종하도록 설정함으로써, 상단 및 하단 전압 간의 불균형을 최소화하고 안정적인 전압 제어를 달성할 수 있도록 하였다. 제안하는 밸런싱 제어 알고리즘은 상단 전압과 하단 전압의 비율 에러를 계산하고, 이를 PI 제어기를 통해 도출된 듀티 지령 신호를 출력전압 제어 듀티 신호에 더하여 전압 밸런싱 제어를 수행한다. 본 연구는 PLECS 시뮬레이션을 통해 제안된 제어 알고리즘의 성능을 검증한다.

1. 서론

전력 변환 시스템의 발전에 따라 멀티레벨 컨버터의 중요성은 점차 강조되고 있으며, 다양한 응용 분야에서 그 필요성이 대두되고 있다. 특히, 3상 NPC(Neutral Point Clamped) 컨버터는 2-레벨 컨버터에 비해 전압 스트레스를 줄이고, 고조파 성분을 감소시키는 이점이 있어, 대전력 시스템에서 널리 활용되고 있다. 그러나 3상 NPC 컨버터는 DC 링크에서 상단과 하단의 커패시터가 직렬 연결된 구조적 특성으로 인해 중성점 전압의 불균형이 발생할 수 있으며, 이는 시스템의 신뢰성과 출력 전류의 품질에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 전압 불균형을 제어하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 기존에는 PI 제어기를 통해 전압 불균형을 보정해왔으나, PI 제어기는 응답속도가 느리고, 전압 불균형을 빠르게 해소하는 데 한계가 있다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 DC 링크의 V_t 와 V_b 의 비율을 제어함으로써 V_t 와 V_b 의 비율이 1에 가까워지도록 조정하여 중성점 전압 불균형을 최소화하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 기존 PI 제어기보다 더 빠르고 효율적으로 전압 불균형을 보정할 수 있으며, 고조파 성분 억제에도 효과적임을 확인하였다. 제안된 알고리즘은 PLECS 시뮬레이션을 통해 기존 방식과의 성능을 비교하여 그 우수성을 입증하였다.

2. NPC 컨버터 전압 밸런싱 제어 알고리즘

그림 1은 본 논문에서 사용한 3상 NPC 컨버터이다. DC 링크는 두 개의 커패시터로 구성되어 있으며, 이 커패시터들은 V_t 와 V_b 를 분리함으로써 중성점 전압을 형성한다.

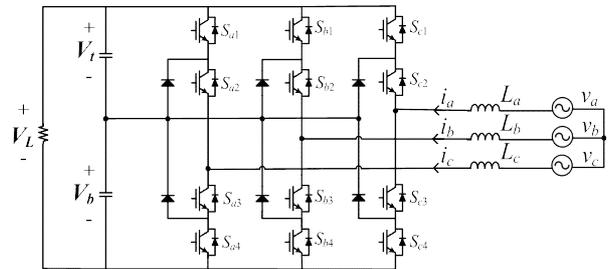
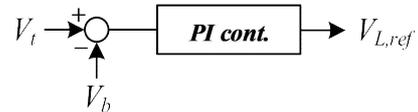
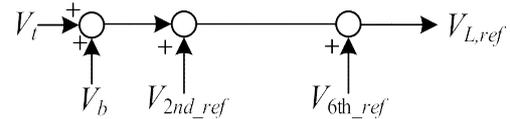


그림 1 3상 NPC 컨버터 토폴로지



(a) 상하단 커패시터 전압차 PI 제어기 활용 밸런싱 제어기 구조 [1].



(b) 2차 및 6차 고조파 활용 밸런싱 제어기 구조 [2].

그림 2 기존 커패시터 전압 밸런싱 알고리즘 구조의 예

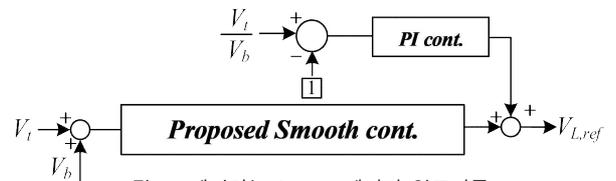


그림 3 제안하는 Smooth 제어기 알고리즘

그림 2는 상하단 커패시터 전압차 PI 제어기 활용 밸런싱 구조와 2차 및 6차 고조파 활용 밸런싱 구조를 나타내고 있다. 그림 3은 본 논문에서 제안하는 비율 제어기 알고리즘을 나타내고 있다. 전압 불균형 상황에서 비율 제어 방식을 직접 적용할 경우, 전압에 급격한 변화가 발생하며, 이는 컨버터 시스템이 손상될 수 있는 위험이 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해 Smooth 비율 제어기 구조를 제안한다. Smooth 제어 방식은 지령 전압을 식 (1)과 같이 점진적으로 0.5초부터 3초까지 주입함으로써 전압 비율을 점진적으로 조정한다. 이를 통해 전압 불균형 상태에서도 안정적인 제어 성능을 유지할 수 있으며 급격한 전류 변동으로 인한 컨버터의 위험을 최소화한다.

$$V_L(t) = V_{L[n-1]} + \alpha \left(\frac{t-t_s}{t_f-t_s} \cdot V_{L,ref} - V_{L[n-1]} \right) \quad (0.5 < t < 3.0) \quad (1)$$

식(1)에서 $V_L(t)$ 는 시간 t 에서의 전압값, $V_{L(n-1)}$ 은 이전 스텝에서의 전압값을 의미한다. α 는 Smooth 계수로, 전압 변화의 속도 조절을 담당한다. t_s 와 t_f 는 각각 제어 시작시간과 제어 종료 시간을 의미한다. 본 논문에서는 DC 링크의 총 전압을 1,200V로 설정하고, 상단 전압과 하단 전압이 각각 600V에 도달하는 과정을 시뮬레이션을 통해 분석했다.

3. 시뮬레이션 결과

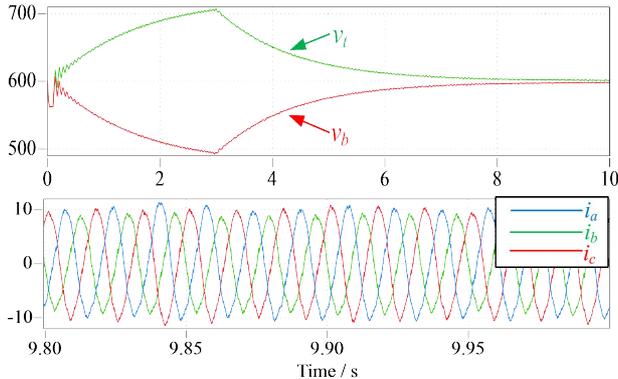


그림 4 기존 PI제어기 전압 및 전류 파형

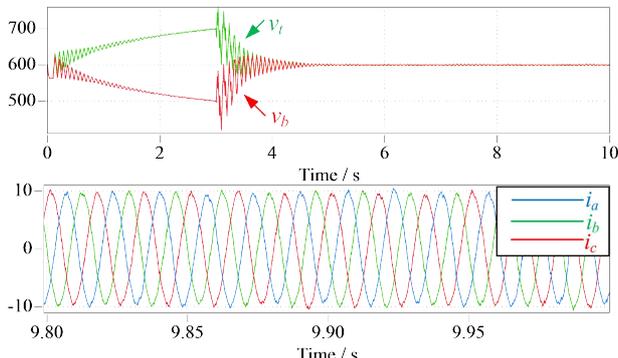


그림 5 기존 2차 및 6차 고조파 제어기 전압 및 전류 파형

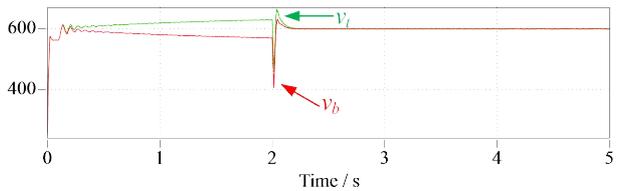


그림 6 Smooth 제어 투입 전 비율 제어기 전압 파형

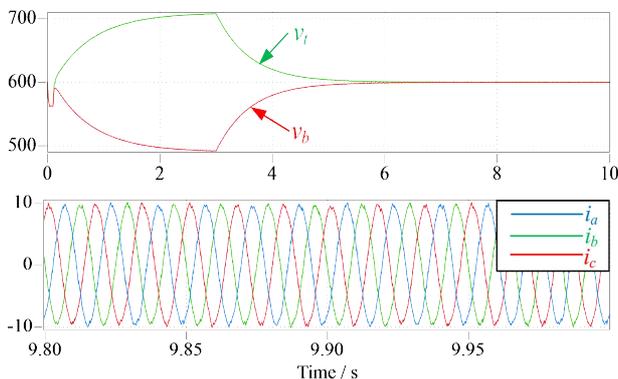


그림 7 제안하는 비율 제어기 전압 및 전류 파형

본 논문에서 제안하는 비율 제어 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행했다. 시뮬레이션에서는 DC 링크 상단 전압과 하단 전압의 불균형을 제어하는 과정을 확인하고,

전류 동작의 안정성도 분석하였다. 그림 4에서 기존 PI 제어기의 전압 및 전류를 확인했다. 이를 통해, 응답속도가 느리고, 전압 불균형을 해소하는 데 시간이 다소 소모되는 것과 전류 동적 특성이 불안정하다는 것을 확인했다. 그림 5에서 기존 고조파 삽입 제어기의 전압 파형과 전류 파형을 나타낸다. 초기 전압 불균형 상태에서 V_L 와 V_b 간 변동 폭이 크게 나타났으며, 균형을 이루기까지 진동이 발생하는 것을 확인했다. 그림 6은 Smooth 제어 방식이 투입되기 전의 전압 파형을 확인했다. 그림 7은 제안된 비율 제어기 알고리즘의 성능을 확인할 수 있다. 그림 6과 비교하여 제어가 투입되었을 때 안정적으로 동작함을 확인했다. 3초에 제어 알고리즘이 투입되자 전압 비율이 1로 수렴하였으며, 6.4초에 V_L 와 V_b 의 전압 밸런싱이 이루어졌다. 또한, 제안된 알고리즘을 적용한 후에는 급격한 전류 변동 없이 안정적인 전류 흐름을 유지하는 것을 확인했다.

표 1 제어기 성능 비교

| 구 분 | 밸런싱 전압 도달 시간(s) | 제어기 투입 이후 커패시터 전압 차이 V_{diff} | THD(%) |
|-------------------|-----------------|---------------------------------|--------|
| 기존 PI 제어기 [1] | 9.8 | 48.1 | 14.3 |
| 기존 고조파 삽입 제어기 [2] | 5.4 | 19.2 | 11.2 |
| 제안하는 비율 제어기 | 6.4 | 18.2 | 4.17 |

표 1은 각 제어기의 성능을 비교한 결과를 제시한다. V_L 와 V_b 간 동일한 전압 차를 기준으로 성능을 비교하였으며, 제어는 3초부터 일괄적으로 투입되었으며 전압 차는 220V로 설정했다. 평가 항목으로는 밸런싱 전압 도달 시간, 제어기 투입 이후 커패시터 전압 차이 V_{diff} 그리고 총 고조파 왜곡률 (Total Harmonic Distortion, THD)를 성능지표로 적용하였다. 제어 도달 시간 측면에서는 기존 고조파 삽입 제어기가 가장 빠르게 균형을 이루었으나, 제안된 비율 제어기의 고조파 왜곡률은 약 7% 더 낮은 수치를 기록하였다. 3초부터 커패시터 전압간 값의 차이를 비교한 결과, 제안된 비율 제어기가 우수한 성능을 보였으며, 전압 불균형을 보다 효과적으로 해소할 수 있음을 확인하였다. 결론적으로, 제안된 비율 제어기는 기존 PI 제어기와 비교해 더 빠르고 안정적인 전압 제어 성능을 제공하며, 전류 동적 특성 또한 크게 개선되었다. 고조파 성능 측면에서도 기존 고조파 삽입 제어기와 비교해 우수한 성능을 검증하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 3상 NPC 컨버터의 중성점 전압 불균형을 해결하기 위해 비율 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법을 통해 전압 밸런싱을 효과적으로 실행할 수 있으며, 급격한 전류 변동을 방지하기 위해 지령 전압을 천천히 주입하는 Smooth 비율 제어 방식을 도입하였다. 이를 통해 안정적인 전압 제어와 전류 동적 특성의 개선을 동시에 달성할 수 있었다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 기존 PI 제어기에 비해 빠르고 안정적인 성능을 제공함을 확인하였으며, 고조파 성분도 효과적으로 억제할 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 이봉규 외 4명 "PI 제어를 이용한 3-Level NPC Inverter의 DC link 불평형 제어," 2014 한국조명·전기설비학회 춘계 학술대회 pp. 27-28.
- [2] 강경필 외 4명 "고조파 주입을 통한 단상 3레벨 NPC컨버터 중성점 전압 밸런싱 연구," 2018 전력전자학술대회 pp.316-317.