

불평형 계통 조건하에 LCL 필터를 사용한 계통 연계형

3레벨 NPC 인버터의 모델링 및 제어.

유용호, 구남준, 현동석

한양대학교

Modeling and Control of Three-Level Neutral-Point-Clamped Inverter with a LCL Filter Under Unbalanced Three-Phase Voltage Supply Conditions.

Yong-ho Yoo, Nam-Joon Koo, Dong-Seok Hyun

Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract

본 논문은 불평형 계통 조건하에 LCL 필터를 사용한 3레벨 NPC 인버터의 모델링과 정지 좌표계에서 전류의 정상분과 역상분을 동시에 제어하여 인버터 시스템을 안정적으로 동작시키는 방법을 제안한다. 또한 본 논문은 NPC 인버터가 가지는 태생적인 문제점인 중성점 전압 밸런싱 문제를 간단히 계산된 윗셋전압을 이용하여 해결한다. 제안된 방법은 시뮬레이션 결과를 통하여 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 에너지 수요의 증가와 지구 온난화와 온실 가스에 대한 제한으로 인하여 신재생 에너지의 사용이 증가하고 있다[1]. 신재생 에너지원을 계통에 연결하기 위해서는 전력 변환 장치가 필요하다. 전력 변환 장치는 PWM 동작에 의해 스위칭 주파수 대역에서 스위칭 고조파 성분이 발생한다. 고조파는 멀티레벨 인버터와 LCL 필터를 사용함으로써 저감시킬 수 있다. 경제적인 관점에서 LCL 필터는 같은 용량의 L 필터와 비교하여 효율이 좋으며, 멀티레벨 토폴로지는 기존의 2-레벨 인버터와 비교하여 더 많은 출력을 제공할 수 있다. 결과적으로 전압과 전류의 파형에 낮은 고조파가 생성된다. 멀티레벨 중 3L-NPC 인버터는 가장 널리 사용된다.

인버터의 성능은 불평형 계통 전압이 인가되었을 때 전압의 역상분으로 인하여 직류 단 전압과 입력 전류에 고조파 성분이 생겨 악화될 수 있다. 그 동안 이 문제를 해결하기 위해 기존의 2-레벨 인버터에서 연구되어 왔다[2]. 그러나 3L-NPC 인버터의 사용이 증가함에 따라 불평형 계통 조건하에서의 3L-NPC 인버터에 대한 연구가 필요하다.

본 논문은 불평형 계통 조건하에서 3L-NPC 인버터가 안정하게 동작함을 보이고, NPC가 가지고 있는 태생적인 문제점인 중성점 전압 변동에 대한 문제도 해결한다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 통해서 본 논문의 타당성을 입증한다.

2. 본론

2.1 불평형 조건하에서 3L-NPC 인버터 모델링 및 제어.

불평형 계통 전압이 인가되면 3상 시스템의 입력

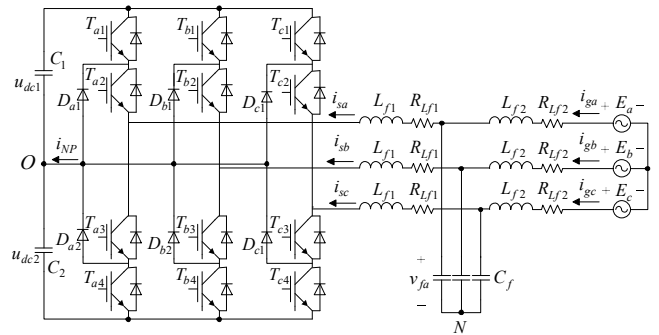


그림 1 LCL 필터를 사용한 3L-NPC 인버터 토폴로지

전압과 전류는 영상성분을 무시하였다 가정하면 정상성분과 역상성분의 합으로 나타낼 수 있다. 또한 abc 좌표계의 입력 전압을 dq0 좌표 변환을 통해서 나타내면 다음과 같다.

$$E_{dq} = e^{j\omega t} E_{dq}^+ + e^{-j\omega t} E_{dq}^- = \frac{2}{3} (E_a + aE_b + a^2E_c) \quad (1)$$

입력 전류 또한 같은 방법으로 나타낼 수 있다.

그림 1은 LCL 필터를 사용한 3-NPC 인버터 토폴로지를 나타내며 회로 방정식은 다음과 같다.

$$E_{dq}^+ = V_{dq}^+ + L_{f1} \frac{d}{dt} I_{sdq}^+ + j\omega L_{f1} I_{sdq}^+ + R_{Lf1} I_{sdq}^+ + L_{f2} \frac{d}{dt} I_{gdq}^+ + j\omega L_{f2} I_{gdq}^+ + R_{Lf2} I_{gdq}^+ \quad (2)$$

$$E_{dq}^- = V_{dq}^- + L_{f1} \frac{d}{dt} I_{sdq}^- - j\omega L_{f1} I_{sdq}^- + R_{Lf1} I_{sdq}^- + L_{f2} \frac{d}{dt} I_{gdq}^- - j\omega L_{f2} I_{gdq}^- + R_{Lf2} I_{gdq}^- \quad (3)$$

또한, 인버터의 입력 복소 전력은 다음과 같다.

$$S_{in} = E_{dq} I_{gdq} = P_o^in + P_c^in \cos(2\omega t) + P_{s2}^in \sin(2\omega t) + j(Q_o^in + Q_c^in \cos(2\omega t) + Q_{s2}^in \sin(2\omega t)) \quad (4)$$

유효전력은 직류 전압 단으로 전달되고 직류 전압 레벨을 결정한다. 그러나 불평형 계통 조건하에서는 직류 전압 단에 120Hz 리플 성분이 포함되고 무효전력이 나타난다. 따라서 직류 단 전압을 일정하게 유지하기 위해서 120Hz 리플 성분을 제거해야 한다. 그리고 역률을 1로 제어하기 위하여 무효 전력성분도 제거되어야 한다.

따라서 120Hz 리플 성분을 제거하고 무효 전력을 제거하기 위한 지령 전류는 다음과 같이 선택된다.

$$\begin{bmatrix} I_{gd}^+ \\ I_{gq}^+ \\ I_{gd}^- \\ I_{gq}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d^+ & E_q^+ & E_d^- & E_q^- \\ E_q^+ & -E_d^+ & E_q^- & -E_d^- \\ E_d^- & E_q^- & E_d^+ & E_q^+ \\ E_q^- & -E_d^- & -E_q^+ & E_d^+ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} P_o^{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

구해진 지령 전류와 3L-NPC 인버터의 회로 방정식을 통하여 전류 제어를 설계할 수 있으며 전체 제어 시스템의 블록도는 그림 2와 같이 나타낸다. 이 제어 시스템은 전류 제어 블록, 직류 단 전압 제어 블록, 그리고 중성점 전압 제어 블록으로 구성되어 있다. 정상분 전류 제어기와 역상분 제어기가 각각 존재하며 병렬로 연결되어있고, 서로 디커플링 되어있다. 또한 정상 성분에 포함되어 있는 역상 성분의 120Hz 리플 성분을 제거하기 위해서 120Hz 대역 저지 필터를 사용한다. 마찬가지로 역상 성분에 포함되어 있는 정상 성분의 120Hz 리플 성분을 제거한다.

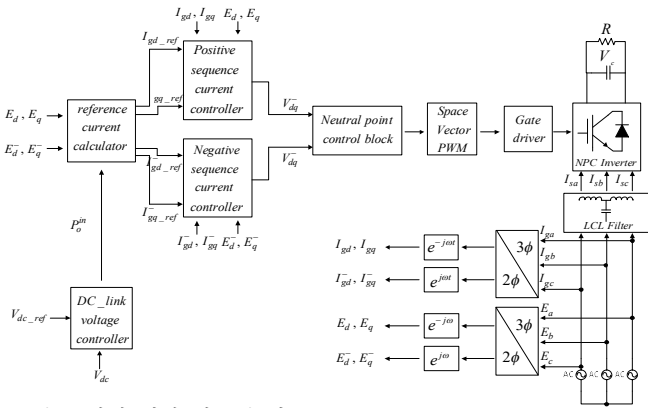


그림 2 전체 제어 시스템 블록도

2.1 불평형 조건하에서 3L-NPC 인버터 모델링 및 제어.

NPC 인버터로 불평형 전압이 인가되면 중성점 전압 변동의 문제는 더욱 악화된다. 따라서 중성점 전압 변동의 문제는 해결되어야 한다. 중성점 전압 불평형은 중성점에 흐르는 전류에 의해 발생하며, 중성점에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타낸다.

$$i_{NP} = i_a + i_b + i_c \quad (6)$$

중성점 전압 균형을 위해 중성점에 흐르는 전류를 제어해야 하며 본 논문에서는 공간 벡터 전압 변조 방식을 사용하여 중성점 전류를 제어한다. 이 방법은 기존 지령 전압 벡터에 읍셋 전압을 더하여 새로운 지령 전압을 정의한다[3]. 인버터의 출력의 크기는 변하지 않으며, 복잡한 계산이 필요하지 않다. 읍셋 전압의 범위는 다음과 같이 나타낸다.

$$-\frac{V_{dc}}{2} - V_{min} \leq V_{off} \leq \frac{V_{dc}}{2} - V_{max} \quad (7)$$

파라미터 K_{NP} 는 중성점 전압 변동 상수를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$K_{NP} = \frac{(V_{dc}/2) - V_{dc2}}{V_{dc}/2} = 1 - \frac{2V_{dc2}}{V_{dc}} \quad (8)$$

마지막으로 읍셋 전압은 다음과 같이 나타낸다.

$$V_{NVC} = |K_{NP}| \cdot \text{sign}(i_{ph_max}) \quad (9)$$

여기서 $\text{sign}(i_{ph_max})$ 는 최대 전류의 극성을 나타내며 그림 3은 중성점 전압 컨트롤 알고리즘을 구현해 놓았다

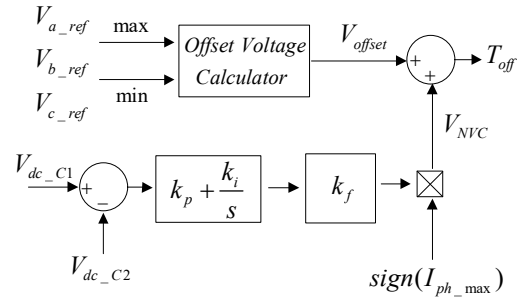


그림 3 중성점 전압 제어 블록도

3. 시뮬레이션 결과

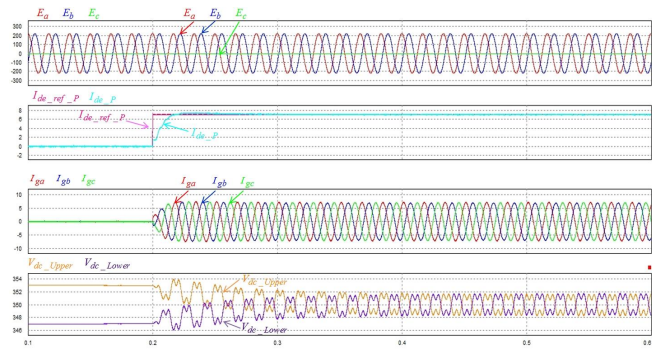


그림 4 시뮬레이션 결과

제안된 전류제어방법과 중성점 전압 균형을 타당성을 입증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 사용하여 수행하였다. 그림 4은 계통 3상 전압, d축 지령전류와 전류, 3상 전류, 상,하 직류 단 커패시터 전압을 각각 나타낸다. 계통 전압은 한 상을 오픈한 상태로 시뮬레이션을 수행하였으며, 불평형 전압이 인가된 상태에서도 지령전류를 안정적으로 추종함을 보인다. 또한 제안된 중성점 전압 균형 방법 또한 정상적으로 동작함을 보였다.

4. 결론

본 논문은 불평형 전압 조건하에서 LCL필터를 사용한 3L-NPC 인버터의 모델링 및 제어방법을 제안하였다. 제안된 방법은 간단하고 효과적으로 정상분, 역상분의 전류를 설계된 제어기를 통하여 안정적으로 제어하였으며 또한 NPC 인버터가 가지고 있는 태생적인 문제점인 중성점 전압 변동 문제도 해결하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방법의 타당성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1184-1194, Sep. 2004.
- [2] H. S. Song. and K. H. Nam, "Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 953-959, Oct 1999.
- [3] D.W. Jung, J.S. Kim, S.K. Sul, "Unified voltage modulation technique for real-time three-phase power conversion," IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 34, no.2, pp.374-380, Mar. 1998.