

H-브릿지 멀티레벨 인버터 Power Cell 고장시의 3상 불평형 제어

박영민*, 이세현*, 유지윤**

*현대중공업, **고려대학교

3-Phase Unbalance Control for H-Bridge Multilevel Inverter with Faulty Power Cells

Young-Min Park*, Se-Hyun Lee* and Ji-Yoon Yoo**

*Hyundai Heavy Industries Company, **Korea University

ABSTRACT

본 논문은 H-브릿지 멀티레벨 인버터 Power Cell 고장시의 3상 불평형 제어 방법을 제안하였다. 전동기 구동용 인버터 시스템에서 3상 출력 선간 전압이 평형이면 운전이 가능하다. 따라서 고장이 발생한 Power Cell만 Bypass 시키고 불평형 상전압 위상을 변경하여 3상 출력 선간 전압을 평형으로 유지하면 출력 전압 감소를 최소화하면서 운전하는 것이 가능하다. 제안된 방법은 육상 전압을 이용한 전압 변조 개념을 3상 불평형 제어에 확대 적용한 것으로, Power Cell의 고장 위치와 수량에 관계없이 상전압의 실시간 불평형 제어를 이용한 인버터의 최대 출력 전압을 이용할 수 있다는 장점이 있으며, 13레벨로 구성된 H-브릿지 멀티레벨 인버터 시험을 통해 제안된 방법의 타당성과 신뢰성을 입증하였다.

1. 서론

H-브릿지 멀티레벨 인버터 시스템의 각 상은 직렬 접속된 여러 개의 Power Cell로 구성된다. 각각의 Power Cell은 독립된 단상 인버터 구조이며 여러 개의 Power Cell을 직렬로 연결함으로써 저전압 Power Cell, 즉 저전압 전력용 반도체를 사용하여 고전압을 얻을 수 있고, 또한 Power Cell의 수에 따라 출력 전압 level의 수가 증가하여 정현파에 가까운 전압 파형을 얻을 수 있다. 입력측 변압기는 2차측 탭간에 위상차를 두어 Multi-pulse 방식의 정류기형 컨버터를 구성함으로써 기존의 6-pulse 정류 방식에 비하여 아주 낮은 입력단 THD(Total Harmonic Distortion) 특성이 있다. 인버터 최종 출력 전압은 Power Cell의 개수를 조정함으로써 대응이 가능하다.^{[1][2][3]}

본 논문에서 제안하는 H-브릿지 멀티레벨 인버터 Power Cell 고장시의 3상 불평형 제어의 기본개념은 인버터 시스템에서 출력 상 전압이 불평형 일지라도 3상 출력 선간 전압이 평형이면 운전이 가능하다는 것이다.^{[4][5]} 따라서 고장이 발생한 Power Cell만 Bypass 시키고 상 전압의 위상을 변경하여 3상 출력 선간 전압의 평형을 유지하면 출력전압 감소를 최소화하면서 운전하는 것이 가능하다. 또한 Power Cell의 Bypass 회로 구성을 위해 Power Cell의 출력측에 부착되는 보조 스위치는 부하 전류가 양방향이므로 Magnetic Contactor(2단자, 3단자)나 전력용 반도체 스위치(SCR, IGBT)를 양방향으로 배치하여 구성할 수 있다.

2. H-브릿지 멀티레벨 인버터의 3상 불평형 제어

2.1 제안된 3상 불평형 제어 기본 개념

고장이 발생한 Power Cell만 Bypass 시키고 상 전압의 위상을 변경하여 3상 출력 선간 전압의 평형 제어를 한다. 13레벨로 구성된 H-브릿지 멀티레벨 인버터 B상의 B2와 C상의 C3 Power Cell에서 고장이 발생하였을 때 3상 불평형 제어를 위한 벡터도를 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 각 상에서 고장이 발생한 Power Cell을 Bypass 회로를 동작시켜 전기적으로 회로가 연결되게 하고, 정상적인 Power Cell은 Bypass 회로를 동작시키지 않는다. 고장이 발생한 Power Cell만 동작하고 상 전압의 위상을 변경하지 않을 경우 그림 1의 벡터도와 같이 3상 불평형 선간 전압이 발생하기 때문에 그림 2의 벡터도와 같이 출력 선간 전압의 평형을 위해 각 상의 출력 전압의 위상을 변경하여 부하인 전동기 측면에서의 선간 전압이 평형이 되도록 한다.

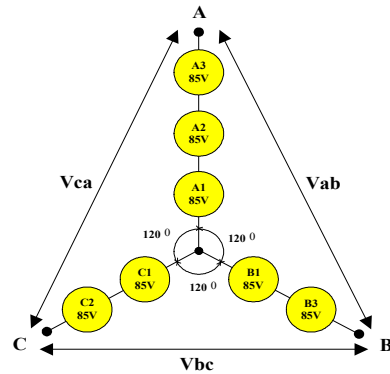


그림 1. 3상 불평형 제어 적용 前 벡터도

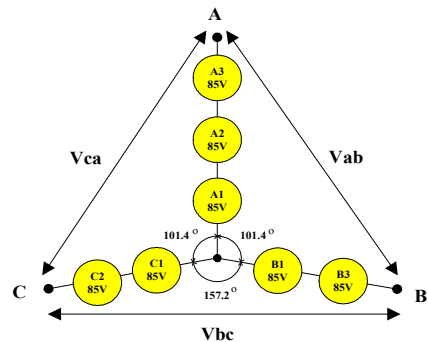


그림 2. 3상 불평형 제어 적용 後 벡터도

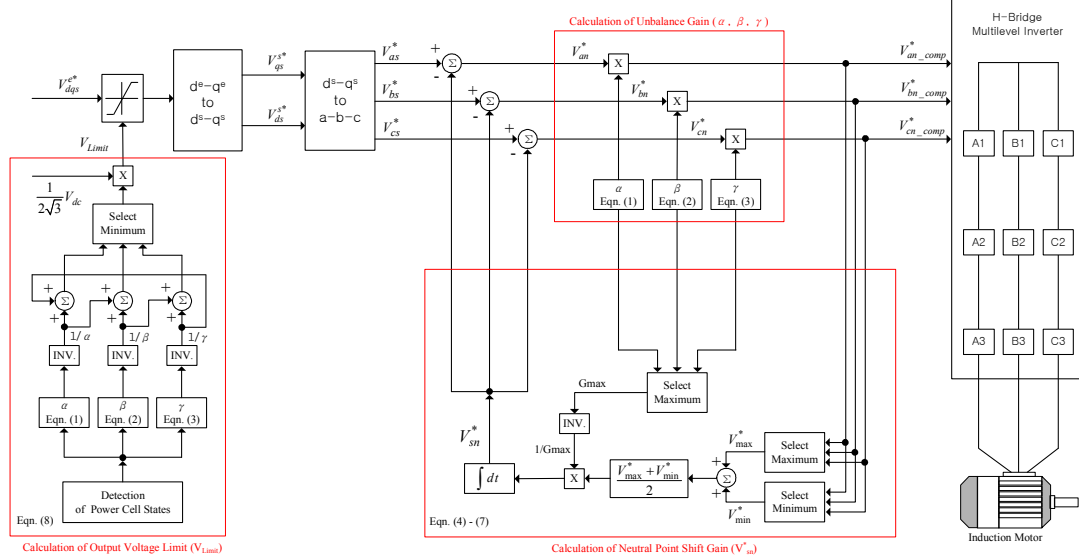


그림 3. 제안된 3상 불평형 제어 블록도

2.2 제안된 3상 불평형 제어 구현 방법

3상 불평형 제어의 구현 방법은 윗셋 전압을 이용한 3상 평형 전압 변조를 불평형 전압 변조 조건으로 확대한 방법이다. 그림 3의 제안된 제어 블록도는 크게 3 가지로 구분되어 있다. 상 불평형에서 출력전압의 계인을 설정하는 부분(Calculation of Unbalance Gain : α, β, γ), 순간 출력전압을 3상 평형으로 제어하기 위해 윗셋 전압을 사용해서 중성점 전압을 변경하는 부분(Calculation of Neutral Point Shift Gain : V_{sn}^*), 그리고 최대 출력 전압값을 계산하는 부분(Calculation of Output Voltage Limit : V_{Limit}) 이다.

출력전압의 계인을 설정하는 부분은 A, B, C 3상에 대하여 개별적으로 계산이 이루어진다. 식(1), (2), (3)에서 Total layer number는 정상 상태에서 각 상당 직렬로 연결되어 있는 Power Cell의 개수를 의미하며, Total remained number는 Power Cell 고장발생시 각 상당 정상적으로 동작하는 Power Cell 개수를 나타낸다. 따라서 각 상의 Power Cell이 모두 정상적인 경우에 α, β, γ 는 1이며, Power Cell에 고장이 발생하면 1 보다 큰 값을 갖게 된다. 출력전압을 3상 평형으로 제어하기 위해 윗셋 전압을 계산하는 부분인 식(7)은 식(1), (2), (3)에서 계산된 α, β, γ 의 최대값인 식(4)와 출력 전압의 지령값인 $V_{an_comp}^*, V_{bn_comp}^*, V_{cn_comp}^*$ 의 최대값인 식(5), 최소값인 식(6)을 사용해서 중성점 이동을 위한 윗셋 전압(V_{sn}^*)을 계산한다. 최대 출력 전압값을 계산하는 부분인 식(8)은 α, β, γ 와 인버터의 DC Link 전압이용률인 v_{dc} 을 이용하여 불평형 제어시 인버터의 출력 가능한 최대 전압을 계산한다.

$$\alpha = \frac{\text{Total layer number}}{\text{Total remained number A}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\text{Total layer number}}{\text{Total remained number B}} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\text{Total layer number}}{\text{Total remained number C}} \quad (3)$$

$$G_{\max} = \max(\alpha, \beta, \gamma) \quad (4)$$

$$V_{\max}^* = \max(V_{an_comp}^*, V_{bn_comp}^*, V_{cn_comp}^*) \quad (5)$$

$$V_{\min}^* = \min(V_{an_comp}^*, V_{bn_comp}^*, V_{cn_comp}^*) \quad (6)$$

$$V_{sn}^* = \int \left(\frac{V_{\max}^* + V_{\min}^*}{2 \times G_{\max}} \right) dt \quad (7)$$

$$V_{Limit} = \left(\min \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta}, \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\gamma}, \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\alpha} \right) \right) \times \frac{1}{2} \times \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

3. 시스템 구성 및 실험 결과

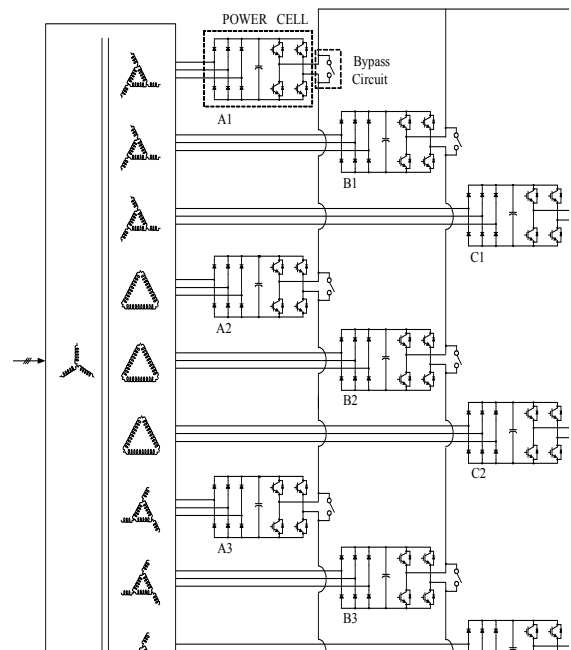


그림 4. 13레벨로 구성된 H-브릿지 멀티레벨 인버터 전력회로

그림 4는 13레벨로 구성된 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 전력회로이고, 그림 5는 실험에 적용된 인버터로써 전체 용량은 3상 440[V] 45[KVA]이며 개별 Power Cell의 용량은 85[V] 5[KVA]이다. 그림 6은 B상의 B2와 C상의 C3 Power Cell이 Bypass 된 조건에서 불평형 제어를 적용한 것이다. 15[Hz]에서 제안된 3상 불평형 제어 방법 적용 전 / 후의 특성을 비교한 실험 파형으로 불평형 제어 적용 전에는 3상 전류가 불평형으로 발생하지만, 불평형 제어 적용 후에는 전류가 3상 평형을 나타내고 있다. 그림 7은 불평형 상태 최대 운전 주파수인 40[Hz]에서 3상 불평형 제어를 적용하였을 경우의 출력 선간 전압과 출력 전류를 나타낸다. 출력 전압과 전류가 3상 평형을 이루고 있음을 알 수 있다.



그림 5. 실험 장치

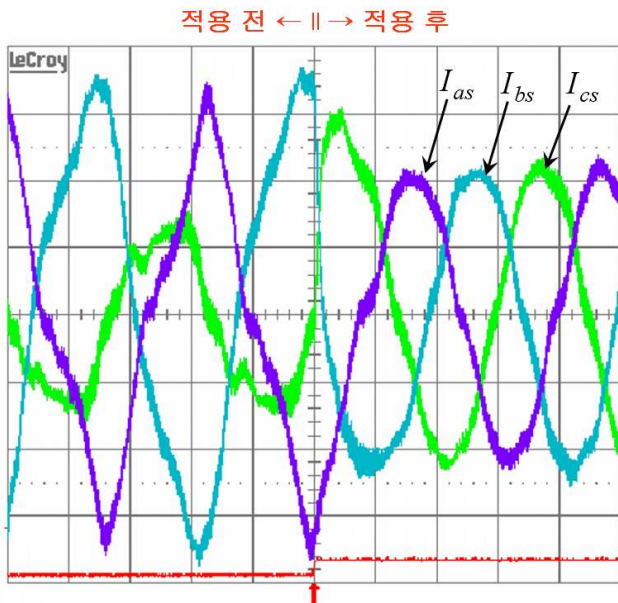


그림 6. 불평형 제어 적용 전/후의 출력 3상 전류, 15[Hz] 운전
(X axis: 20ms/div., Y axis: 5A/div.)

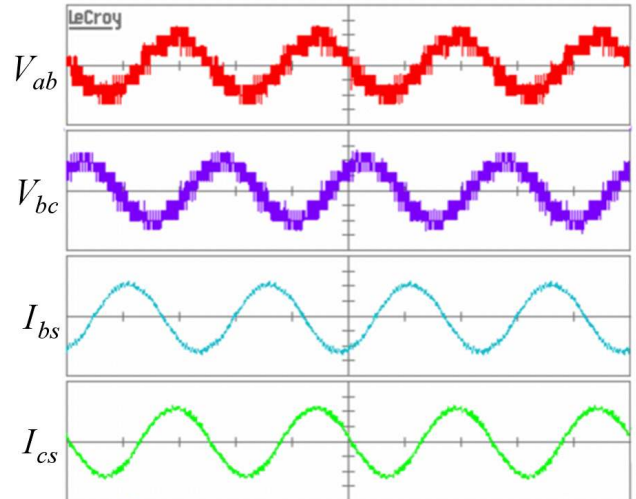


그림 7. 불평형 제어시의 출력 선간 전압 및 전류, 40[Hz] 운전
출력 선간 전압 (X axis: 10ms/div., Y axis: 200V/div.)
출력 전류 (X axis: 10ms/div., Y axis: 5A/div.)

4. 결론

본 논문에서는 3상 불평형 제어 방법을 제안하였다. 제안된 제어 방법은 H-브릿지 멀티레벨 인버터 Power Cell 고장 발생 시 전체 인버터 시스템을 정지 시키지 않고 고장이 발생한 Power Cell을 시스템에서 제거하여 고장 수리 기간 동안 시스템을 정지하지 않으면서 효율적으로 정격 전압을 감소하여 운전이 가능하다는 장점이 있다.

제안된 제어 방법의 특징은 다음과 같다.

- 불평형 상전압의 위상을 변경하여 선간 전압 평형 제어
- 육상 전압 변조의 개념을 3상 불평형 조건으로 확대
- Power Cell의 고장 위치와 수량에 관계없이 적용 가능
- Look-up Table 형태가 아닌 온라인 실시간 제어
- 상전압 불평형 조건에서 효율적인 정격감소 운전 가능

참고 문헌

- [1] D. Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, "Pulse Width Modulation for Power Converters: Principle and Practice", A John Wiley & Sons, 2003
- [2] Bin Wu, "High-Power Converters and AC Drives", A John Wiley & Sons, 2006
- [3] B.S. Suh, G. Sinha, M.D. Manjrekar and T.A. Lipo, "Multilevel power conversion—an overview of topologies and modulation strategies", International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Vol.2, 1998, pp.AD11-AD24.
- [4] Sanmin Wei, Bin Wu, Fahai Li and Xudong Sun, "Control method for cascaded H-bridge multilevel inverter with faulty power cells", Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), 9-13 Feb. 2003, pp.261-267 vol.1
- [5] Eaton, D., Rama, J. and Hammond, P., "Neutral shift: five years of continuous operation with adjustable frequency drives", Industry Applications Magazine, IEEE, Volume 9, Issue 6, Nov.-Dec. 2003, pp.40-49