

3레벨 NPC인버터 로봇 적용을 위한 오프셋 전압 주입 방식의 중성점 전압 제어기 Simulink 구현

송민철*, 홍지태**, 김홍주***
 한국전기연구원*, 한국전기연구원**, 한국전기연구원***

Simulink implementation of offset voltage injection method neutral point voltage controller for 3 level NPC inverter for robot application

Mincheol Song*, Ji-Tae Hong**, Hong-Ju Kim***
 Korea Electrotechnology Research Institute*, Korea Electrotechnology Research Institute**, Korea Electrotechnology Research Institute***

Abstract - A neutral point voltage balance controller using offset voltage injection method was designed for a 3-level inverter. In consideration of the current sensor noise, which is an implementation problem of the controller, a pole avoidance method is also proposed. The proposed method was validated through simulation.

1. 서 론

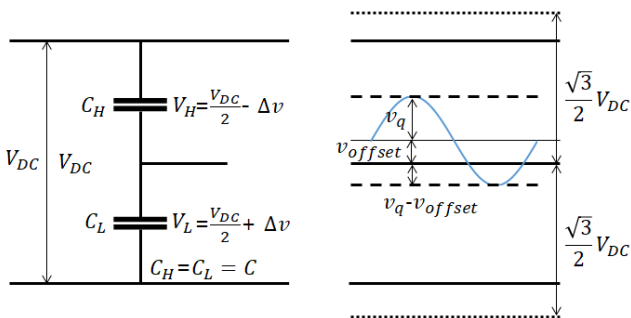
로봇 분야에서 멀티 레벨 인버터의 적용이 늘고 있다. 멀티 레벨 인버터의 중성점 전압 불균형을 일으키는 중성점 전류는 전력의 방향에 따라 달라지므로([1]) 로봇 팔의 중력 회생이나 모바일 로봇의 회생 제동을 생각할 때 로봇용 멀티 레벨 인버터에서의 중성점 전압 제어 문제는 더욱 중요하다고 할 수 있다.

이 연구에서는 [1]에서 연구된 오프셋 전압 주입 방식을 이용하여 로봇 적용을 위한 3레벨 인버터의 중성점 전압 불평형 보상 제어기를 설계하고, 구현상 문제점인 극점을 회피하는 방안을 제안하였다. 설계된 제어기는 시뮬레이션을 통해 유효성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 중성점 전압 불평형 보상

[1]에서 연구된 오프셋 전압 주입 방식을 바탕으로 3레벨 인버터의 중성점 전압 제어기를 설계하였다. 오프셋 전압을 통해 인버터에서 상하단 비대칭적으로 출력 또는 회생되는 전력을 구하고, 이로 인해 발생할 DC 링크의 상하단 캐패시터 에너지 차이가 기존의 중성점 전압을 상쇄하는 방향으로 발생하도록 관계식을 구하였다.



<그림 1> 중성점 전압 불균형 <그림 2> 상전압의 오프셋 전압

먼저 <그림 1>에서, 기존 불균형 상태의 중성점 전압 Δv에 의해 발생한 DC 링크 상단, 하단 캐패시터 CH, CL에 저장된 전압과 에너지, 각각 VH, VL, EH, EL은 다음과 같다.

$$V_H = \frac{V_{DC}}{2} - \Delta v \quad (1)$$

$$V_L = \frac{V_{DC}}{2} + \Delta v \quad (2)$$

$$E_H = \frac{1}{2} C \left(\frac{V_{DC}}{2} - \Delta v \right)^2 \quad (3)$$

$$E_L = \frac{1}{2} C \left(\frac{V_{DC}}{2} + \Delta v \right)^2 \quad (4)$$

CH, CL가 C로 동일하다 가정하면, CH, CL의 에너지 차이는 Δv ≥ 0일 때,

$$E_L - E_H = C \times V_{DC} \times \Delta v \quad (5)$$

이고, Δv < 0일 때는 다음과 같다.

$$E_H - E_L = C \times V_{DC} \times \Delta v \quad (6)$$

다음으로 <그림 2>에 인버터에서 상전압에 오프셋 전압 voffset을 주입했을 때, 인버터 상단과 하단의 전력 PH, PL을 나타내었다. 이 때, DC 링크의 CH, CL에서 Δv는 VDC에 비해 매우 작다고 가정하였고 또 인버터 d-q 좌표계에서 id와 vd는 모두 0이라 가정하였다.

$$P_H = \frac{v_q + v_{offset}}{2v_q} \times (P_H + P_L) \quad (7)$$

$$P_L = \frac{v_q - v_{offset}}{2v_q} \times (P_H + P_L) \quad (8)$$

$$P_H + P_L = v_q \times i_q \quad (9)$$

Δv ≥ 0인 경우 DC 링크의 Δv를 0으로 만들기 위해서는 (PH + PL) > 0일 때 즉 전력을 소모할 때,

$$E_L - E_H = \int (P_L - P_H) dt \quad (10)$$

(PH + PL) < 0일 때 즉 전력이 회생될 때,

$$E_L - E_H = - \int (P_L - P_H) dt \quad (11)$$

이 되어야 한다.

(10)과 (11) 좌변에 (5)를 대입하고, 우변에 (7), (8) 그리고 (9)를 대입하면 (10)과 (11)은 각각 (12)와 (13)이 된다. (PH + PL) > 0일 때,

$$C \times V_{DC} \times \Delta v = - \int \frac{v_{offset}}{v_q} \times (v_q \times i_q) dt \quad (12)$$

$(P_H + P_L) < 0$ 일 때,

$$C \times V_{DC} \times \Delta v = \int \frac{v_{offset}}{v_q} \times (v_q + i_q) dt \quad (13)$$

PWM 한 주기 $T_{PWM} = 1/f_{PWM}$ 내에서 v_q 와 i_q 가 일정하다고 가정하면 (12)와 (13)은 (14)와 (15)가 된다.

$(P_H + P_L) > 0$ 일 때,

$$C \times V_{DC} \times \Delta v = \frac{v_{offset}}{v_q} \times v_q \times i_q \times T_{PWM} \quad (14)$$

$(P_H + P_L) < 0$ 일 때,

$$C \times V_{DC} \times \Delta v = - \frac{v_{offset}}{v_q} \times v_q \times i_q \times T_{PWM} \quad (15)$$

$sign(v_q)$ 함수를 이용하면 $(P_H + P_L)$ 의 부호와 관계없이 (14)와 (15)를 (16)과 같이 하나의 식으로 표현할 수 있다.

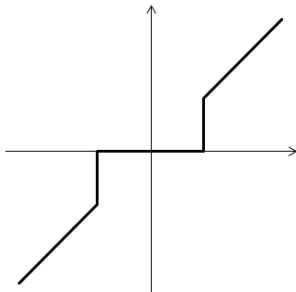
$$C \times V_{DC} \times \Delta v = sign(v_q) \times \frac{v_{offset}}{v_q} \times v_q \times i_q \times T_{PWM} \quad (16)$$

v_{offset} 에 관하여 정리하면,

$$v_{offset} = sign(v_q) \times \frac{f_{PWM} \times C \times V_{DC}}{i_q} \times \Delta v \quad (17)$$

과 같고 $\Delta v < 0$ 인 경우에 대해서도 마찬가지로 방법으로 (17)과 동일하게 정리될 수 있다.

설계된 제어기는, 오프셋 전압이 상전압의 최대, 최소값을 넘지 않는다는 기본 조건 외에도 (17)에서 i_q 가 0인 경우 발생하는 극점 문제를 회피하기 위한 제한 수단이 필요하다. 본 연구에서는 전류센서 노이즈를 고려하여 i_q 입력단에 <그림 3>과 같은 데드 밴드를 적용하고, 데드 밴드의 출력이 0인 경우에는 (17)에 i_q 값 대신 매우 큰 수를 입력하여 제어기 출력을 0으로 강제하였다. 이 때 사용된 데드 밴드의 폭은 사용 예정인 전류센서의 최대 오차값으로 설정하였다.

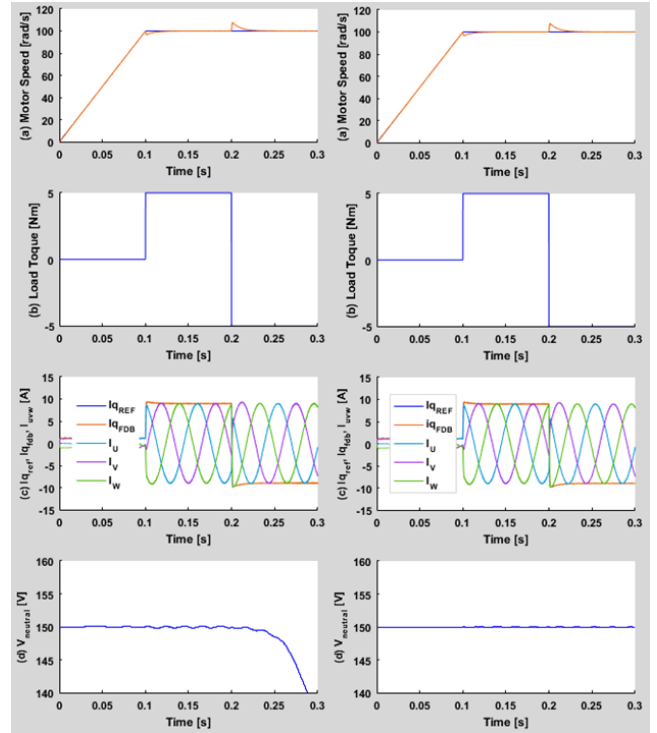


<그림 3> 중성점 전압 제어기의 q축 전류값 입력단에 적용한 데드 밴드

2.2 시뮬레이션

Simulink에서 3레벨 인버터 및 중성점 전압 불평형 보상 제어기를 구현하고 보상 전/후 비교 시뮬레이션을 수행하였다. 속도 제어기를 통해 0.1초까지 무부하 가속 후, 0.2초까지 정방향 부

하를 통해 전력 소모 상태에서의 제어기를 시뮬레이션하고 마지막으로 0.3초까지 역방향 부하를 통해 전력 회생 상태에서의 제어기 성능을 시뮬레이션하였다. <그림 4> (d) 좌측에 나타난 무부하 시의 중성점 전압 불균형이 우측, 보상 제어기 적용 후에는 해소되었다.



<그림 4> 중성점 전압 제어기 적용 전(좌), 후(우)
(a)속도 제어기 지령 및 응답
(b)부하 토크
(c)q축 전류 지령/응답, UVW 상전류
(d)중성점 전압(공칭값 150V)

3. 결 론

오프셋 전압 주입 방식을 이용한 3레벨 인버터의 중성점 전압 불평형 보상 제어기를 설계하였다. 실제 구현의 편의성을 위하여 오프셋 전압과 중성점 전압 간의 관계식을 최대한 간단히 모델링하였다. 또한 전류 입력단에 데드 밴드를 사용하여 실제 전류 센서의 노이즈 등 불확실성으로 인한 제어기의 극점을 제거하였다. 설계된 제어기는 시뮬레이션을 통해 유효성을 검증하였다.

감사의 글

이 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본사업임(No. 22A01056)

[참 고 문 헌]

[1] L. Sejal; L. A. C. Lopes; M. Amar; S. S. Williamson, "Neutral-point voltage balancing of three-level EV traction inverter using modified carrier-based SVM and THD comparison with a two-level inverter", 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 1-7, 2013