

## 3상3준위NPC역변환기의 NPPB조종을 위한 2중변조파 PWM에서 절환주파수최적화

조승일, 유주명, 김성일

3상3준위NPC역변환기에서 직류모션콘덴사 중성점전위평형(NPPB)을 보장하는 문제는 체계전반의 동작성능과 안정성에 영향을 주는것으로 하여 역변환기조종에서 중요한 문제로 나서고있다.[1-3]

NPPB조종을 위한 선행연구들에서는 1개의 변조파를 리용한 결과 력률이 낮거나 변조율이 큰 경우 NPPB를 실현할수 없었다. 이러한 결함을 극복하기 위하여 2개의 변조파를 리용하는 2중변조파PWM이 제기되었는데 이 방법은 력률과 변조율에 관계없이 NPPB를 원만히 실현할수 있으나 변조파가 2개인것으로 하여 절환주파수가 커지는 결함이 있다.

본문에서는 2중변조파PWM방법에서 리용되는 2개의 변조파에 다시 령상전압을 삽입하여 얻은 2개 조의 2중변조파로 NPPB조종을 실현함으로써 출력소자의 절환주파수를 낮출수 있는 새로운 2중변조파PWM방법을 제기하고 모의를 통하여 그 성능을 확인하였다.

### 1. 새로운 2중변조파PWM실현방법

2중변조파PWM의 변조파에 령상전압을 삽입하여 변조파에서 반송파의 극값(1 또는 0, -1)을 가지는 구간의 폭을 늘이면 절환주파수를 낮출수 있다. 그러나 령상전압을 삽입하는 경우 일련의 문제가 제기된다.

2중변조파PWM의 두 변조파를  $u_{kp}$ ,  $u_{kn}$  ( $k=a, b, c$ )이라고 할 때 이것들이 만드는 평균중성점전류는 0으로 된다. 만일 여기에 령상전압을 삽입하면 매 상에서 0상태가 차지하는 충만비가 달라져 평균중성점전류가 0이 되지 않으며 중성점전위LFR를 없앨수 없다. 이 문제를 극복하기 위하여  $u_{kp}$ 와  $u_{kn}$ 에 두가지 령상전압을 삽입하여 크기가 같고 방향이 반대인 중성점전류를 만드는 2개 조의 2중변조파를 얻었다. 다음 이 변조파조들을 서로 절환하면서 중성점전위에 대한 조종을 실현하여 두 반송파주기마다 중성점전위가 0이 되게 하였다.

령상전압을 삽입할 때 다음의 세가지 조건을 만족시켜야 한다.

① 동일한 시각에 2개 조의 2중변조파가 만드는 중성점전류는 크기가 같고 방향이 반대이어야 한다.

② 임의의 시각에 2중변조파에 령상전압을 삽입하여 얻은  $u_{kp1}$ 과  $u_{kn1}$ (혹은  $u_{kp2}$ ,  $u_{kn2}$ )가운데서 적어도 하나는 반송파극값을 가져야 한다.

③ 새로 만든 변조파들은 부호요구를 만족시켜야 한다. 즉  $u_{kp1}$ (혹은  $u_{kp2}$ )은 정수,  $u_{kn1}$ (혹은  $u_{kn2}$ )은 부수이어야 한다.

조건 ①로부터 동일한 시각에 2개의 변조파조  $u_{kp1}$ ,  $u_{kn1}$ 과  $u_{kp2}$ ,  $u_{kn2}$ 가 만드는 평

균중성점전류는 크기가 같고 방향은 반대로 되어야 한다.

$u_{kp1}$ ,  $u_{kn1}$  과  $u_{kp2}$ ,  $u_{kn2}$  에서 0상태가 차지하는 충만비  $d_{k10}$  과  $d_{k20}$  은 다음의 식으로 표시된다.

$$d_{k10} = 1 - |u_{kp1} - u_{kn1}|$$

$$d_{k20} = 1 - |u_{kp2} - u_{kn2}|$$

2중변조파PWM과의 충만비차를 구하면

$$\Delta d_{k10} = (u_{kp1} - u_{kn1}) - (u_{kp} - u_{kn})$$

$$\Delta d_{k20} = (u_{kp2} - u_{kn2}) - (u_{kp} - u_{kn})$$

으로 된다. 2중변조파PWM에서는 평균중성점전류가 0으로 되므로 2개 조의 2중변조파가 만드는 평균중성점전류는 다음과 같이 표시된다.

$$I_{np1} = \Delta d_{a10}i_a + \Delta d_{b10}i_b + \Delta d_{c10}i_c$$

$$I_{np2} = \Delta d_{a20}i_a + \Delta d_{b20}i_b + \Delta d_{c20}i_c$$

이때  $I_{np1} = -I_{np2}$  이여야 하므로  $\Delta d_{k21} = -\Delta d_{k20}$  이 성립한다. 따라서 2중변조파에 같은 령상전압  $u_0$  을 첫번째 조에는 더하고 두번째 조에는 더는 방법으로  $u_{kp1}$ ,  $u_{kn1}$  과  $u_{kp2}$ ,  $u_{kn2}$  를 얻어야 한다는것을 알수 있다.

다음으로 조건 ②로부터 령상전압  $u_0$  과  $-u_0$  을 삽입한 후 비반송파극값이 반송파극값으로 되어야 하므로 3개 상의 2중변조파가운데서 최대값  $u_{\text{최대}}$  를 구하고 그것과  $1 - u_{\text{최대}}$  가운데서 작은 값을  $u_0$  으로 설정한다. 즉

$$u_{\text{최대}} = \max(u_{ap}, u_{bp}, u_{cp})$$

$$u_0 = \min(u_{\text{최대}}, 1 - u_{\text{최대}})$$

또한 2중변조파에 대한 부호요구(조건 ③)로부터  $u_{kp1} \geq 0$ ,  $u_{kp2} \geq 0$ ,  $u_{kn1} \leq 0$ ,  $u_{kn2} \leq 0$  이여야 하므로 령상전압을 삽입할 때 정 및 부의 변조파에 령상전압을 합리적으로 분배 하여야 한다. 이로부터 령상전압상태합을 다음과 같이 정의하고 2개 조의 2중변조파식을 얻는다.

$$Y(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

$$Z(x) = \begin{cases} 0, & x > 0 \\ 1, & x \leq 0 \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} u_{kp1} &= u_{kp} + Y(u_{\gamma|k})u_0 + Y(u_{kn} + Z(u_{\gamma|k})u_0)(u_{kn} + Z(u_{\gamma|k})u_0) \\ u_{kn1} &= Z(u_{kn} + Z(u_{\gamma|k})u_0)(u_{kn} + Z(u_{\gamma|k})u_0) - Z(u_{kp} - Y(u_{\gamma|k})u_0)(u_{kp} - Y(u_{\gamma|k})u_0) \\ u_{kp2} &= Y(u_{kp} - Y(u_{\gamma|k})u_0)(u_{kp} - Y(u_{\gamma|k})u_0) - Y(u_{kn} + Z(u_{\gamma|k})u_0)(u_{kn} + Z(u_{\gamma|k})u_0) \\ u_{kn2} &= u_{kn} - Z(u_{\gamma|k})u_0 + Z(u_{kp} - Y(u_{\gamma|k})u_0)(u_{kp} - Y(u_{\gamma|k})u_0) + \\ &\quad + Y(u_{kn} + Z(u_{\gamma|k})u_0)(u_{kn} + Z(u_{\gamma|k})u_0) \end{aligned} \right\}$$

여기서  $u_{kp}$ ,  $u_{kn}$  은 2중변조파PWM의 변조파이고  $u_{\gamma|k}$  는 3상기준시누스변조파이다.

위의 방법으로 얻은 2개 조의 2중변조파들에서는 중성점전류가 0이 되지 않으므로 매 반송파주기마다 합당한 2중변조파조를 다음과 같이 선택한다.

만일  $n$  번째 반송파주기에서의 중성점전위를  $u_n(u_{dc}/2$ 를 0전위로 본 경우)이라고 할 때  $u_n u_{n-1} < 0$  이면  $n+1$  번째 반송파주기에 다른 조의 2중변조파로 절환한다. ( $u_{dc}$  - 직류모선전압) 한편  $u_n u_{n-1} > 0$  일 때에는  $(u_n - u_{n-1})u_n > 0$  이면 다른 조로 절환하고  $(u_n - u_{n-1})u_n < 0$  이면 절환을 진행하지 않는다.

중성점전위조종을 위하여 2중변조파조사이의 절환을 진행하는 경우 2중변조파PWM에서와 같은 절환함수를 쓰면 두 변조파조사이의 절환시에 절환주파수가 증가하며 결과적으로 2개 조의 변조파를 리용한 2중변조파PWM에서의 절환주파수감쇠효과가 없어진다.

따라서 2중변조파에 대하여 먼저 일정한 변환을 진행하고 3각반송파와 비교하여 절환함수를 얻은 다음 이 함수를 다시 역변환하여 완전한 절환함수를 얻는 방법을 도입한다.

$u_{kp}$ ,  $u_{kn}$ 을 새로운 2중변조파PWM에서 최종적으로 출구할 변조파라고 하자. 이때 절환함수를 얻는 과정은 다음과 같다.

① 다음의 변조파변환을 진행한다.

$$\begin{bmatrix} u_{kpT} \\ u_{knT} \end{bmatrix} = A + B \begin{bmatrix} u_{kpx} \\ u_{knx} \end{bmatrix} \quad (x=1, 2)$$

이 변환식에서  $A, B$ 는 령상전압  $u_0$  과 기준전압  $u_{기k}$ 에 관계되는 변환행렬로서 다음의 세 가지 경우에 따라 서로 다르게 설정한다.

$u_0 = 1 - u_{최대}$  이면서  $u_{기k} \geq 0$  일 때

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$u_0 = 1 - u_{최대}$  이면서  $u_{기k} \leq 0$  일 때

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$u_0 = u_{최대}$  일 때

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

② 반송파비교를 진행한다.

2중변조파PWM에서와 같은 방법으로 절환함수를 얻는다. 즉

$$S_{kp} = \begin{cases} 1, & u_{kp} > u_{반송1} \\ \text{이전 값}, & u_{kp} = u_{반송1} \\ 0, & u_{kp} < u_{반송1} \end{cases}$$

$$S_{kn} = \begin{cases} 0, & u_{kn} > u_{반송2} \\ \text{이전 값}, & u_{kn} = u_{반송2} \\ -1, & u_{kn} < u_{반송2} \end{cases}$$

여기서 1, 0, -1은 출구준위가 각각 1, 0, -1인 상태를 나타낸다.  $u_{반송1}$ 은 정3각반송파([1 0 1]),  $u_{반송2}$ 는 부3각반송파([0 -1 0])로서 그것들의 위상은 서로 같다.

그림 1에 변조율이  $m=1$ 일 때  $u_{kpT}$ ,  $u_{knT}$ 와 반송파사이의 비교관계를 보여주었다.

3각반송파극값이 새 2중변조파가 절환되는 곳에 놓이므로 절환으로 인한 변조파변화

는 변조파와 반송파사이의 비교에 아무런 영향도 주지 않는다. 즉 변조파절환이 새로운 절환주파수를 만들지 않는다.

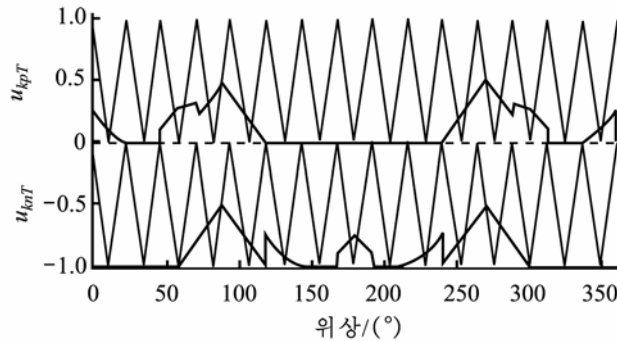


그림 1. 변조율이  $m=1$  일 때  $u_{kpT}$ ,  $u_{knT}$  와 반송파사이의 비교관계

③ 절환함수의 역변환을 진행한다.

$$\begin{bmatrix} S_{kpx} \\ S_{knx} \end{bmatrix} = A + B \begin{bmatrix} S_{kpT} \\ S_{knT} \end{bmatrix}$$

최종적으로 출구할 절환함수  $S_k$  는 다음과 같다.

$$S_k = S_{kpx} + S_{knx}$$

## 2. 모의결과 및 분석

모의는 MATLAB/Simulink에서 진행하였다.

설정 한 역변환기 파라미터값들은 다음과 같다.

직류모션전압 700V, 모션콘덴사용량 2 200 $\mu$ F, 부하용량 20kVA, 반송파주파수 5kHz, 조종주기 200 $\mu$ s (주파수 5kHz)

각이한 력률과 변조률조건에서 콘덴사중성점전위파형과 변조파파형을 모의하여 최대 중성점전위맥동과 절환주파수들을 얻었다. 그림 2에 변조율이 1일 때의 중성점전위파형을 주었다.(력률  $\cos\phi=1$ ) 이때 중성점전위는 매 반송파주파수마다 0으로 되어 중성점전위의 LFR(저주파요동)가 없어지고 그 최대맥동값도 1.1V로서 역변환기의 요구를 만족시켰다.

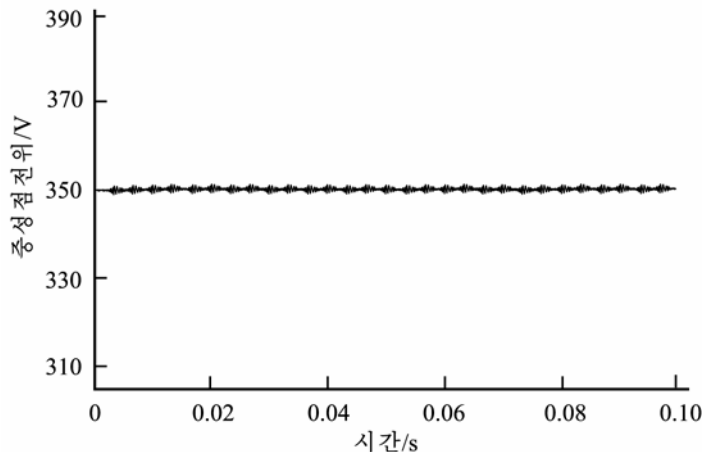


그림 2. 변조율이 1일 때의 중성점전위파형

모의를 통하여 제안된 새로운 2중변조파PWM방법으로 중성점전위평형조종을 진행하면 임의의 력률과 변조률조건에서도 중성점전위평형을 원만히 실현할수 있을뿐아니라 이전의 2중변조파PWM방법보다 절환주파수를  $1/4 \sim 1/2$ 배로 현저히 줄일수 있다는것이 확증되었다.

## 맺 는 말

두조의 2중변조파PWM을 리용하면 하나의 2중변조파PWM을 리용할 때보다 출력소자의 절환주파수를 변조률에 따라  $1/4 \sim 1/2$ 배로 낮출수 있다. 동시에 임의의 력률과 변조률조건에서도 중성점전위평형을 원만히 보장할수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. Gong et al.; International Review of Electrical Engineering, 7, 4, 4663, 2012.
- [2] J. Chivite-Zabalza et al.; The 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 1, 2011.
- [3] C. Bharatiraja et al.; International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 79, 1, 285, 2014.

주체109(2020)년 6월 5일 원고접수

## On Switching Frequency Optimization of Double Modulation PWM for NPPB Control in Three-Phase Three-Level NPC Inverter

*Jo Sung Il, Yu Ju Myong and Kim Song Il*

This paper constructed a new modulation wave using in NPPB control of 3-phase 3-level NPC inverter, and stabilized neutral point potential in any situation and decreased switching frequency of power devices. The effectiveness of proposed NPPB control method is verified by MATLAB simulation.

Keywords: NPC inverter, NPPB control