

3상3준위NPC역변환기에서 중성점전위조종의 한가지 방법

한명성, 김철준, 유주명

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구부문에서는 나라의 경제발전과 인민생활향상에서 전망적으로 풀어야 할 문제들과 현실에서 제기되는 과학기술적문제들을 풀고 첨단을 돌파하여 지식경제건설의 지름길을 열어놓아야 합니다.》

3준위NPC역변환기에서 중성점전위평형조종은 역변환기의 성능과 안정성에 영향을 주는 중요한 문제의 하나이다. 선행한 중성점전위조종방법들에서는 SVPWM이나 SPWM에 1개의 변조파를 도입한것으로 하여 력률이 낮거나 변조률이 높은 경우에는 중성점전위의 저주파요동(LFR)을 없앨수 없었다.[1-3]

본문에서는 2개의 변조파를 리용하여 조종자유도를 늘임으로써 임의의 력률과 변조률조건에서도 중성점전위의 불평형(저주파요동과 직류불평형)을 충분히 없앨수 있는 2중 변조파PWM방법을 제안하고 모의를 통하여 효과성을 검증하였다.

1. 중성점전위LFR를 없애기 위한 기본조건

3준위NPC역변환기에서 중성점전위불평형이 생기는 기본요인은 중성점전류 I_{np} 이다.[1, 2] 그림 1에 3상3준위NPC역변환기의 기본회로구성을 보여주었다.

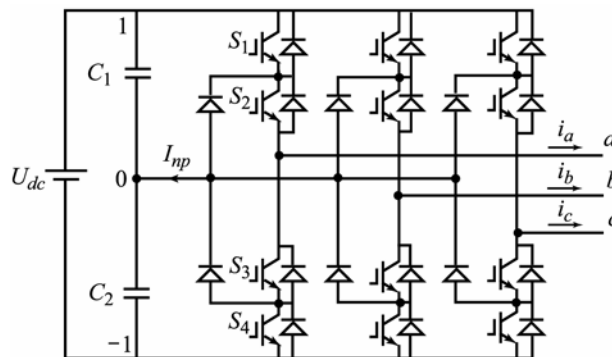


그림 1. 3상3준위NPC역변환기의 기본회로구성

3상3선체계에서 기준전압에 령상전압 δ_0 을 삽입하면 출구선전압에는 영향을 주지 않으면서 령상전류를 조종할수 있다. 령상전압을 삽입한 후 3상변조파는 다음과 같이 표시된다.

$$u_k = u_{\gamma k} + \delta_0 \quad (k = a, b, c)$$

여기서 $u_{\gamma k}$ 는 령상성분을 삽입하기 전의 기준시누스변조파이다. 3준위NPC역변환기에서 매 상은 세가지 상태를 가지는데 S_2 와 S_3 이 도통될 때 역변환기는 중성점에 령결되며 이때 출구는 0상태로 된다. d_{k0} ($k = a, b, c$)을 한 반송파주기내에서 k 상출구가 0상태로 되는 충만비라고 하면 선형변조구역내에서 d_{k0} 은 다음과 같이 표시된다.

$$d_{k0} = 1 - |u_k|$$

반송파주파수가 변조파주파수보다 충분히 높을 때 한 반송파주기내에서 i_a, i_b, i_c 가 일정하다고 볼수 있다. 출구가 0상태일 때 중성점에 들어오는 평균상전류는 $d_{k0}i_k$ 이다. 따라서 3개 상에 대하여 평균중성점전류는 한 반송파주기내에서 다음과 같다.

$$I_{np} = d_{a0}i_a + d_{b0}i_b + d_{c0}i_c$$

평균중성점전류는 직류모션콘덴서를 통하여 적분되어 중성점전위를 형성한다. 모션 용량을 $C_1 = C_2 = C$ 라고 하면 중성점전위와 평균중성점전류의 관계는 다음과 같다.

$$u_{np} = \frac{1}{2C} \int I_{np} dt$$

중성점전위LFR를 없애기 위해서는 평균중성점전류가 매 반송파주기내에서 0이 되어야 한다. 3상3선체계에서 3개 상전류의 합이 항상 0이므로 중성점전류가 0이 되자면 매 상의 0상태충만비가 같아야 한다. 즉

$$\left. \begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= 0 \\ d_{a0} &= d_{b0} = d_{c0} \end{aligned} \right\}$$

$$I_{np} = d_{a0}i_a + d_{b0}i_b + d_{c0}i_c = d_{a0}(i_a + i_b + i_c) = 0$$

이 식이 바로 중성점전위LFR를 완전히 없애기 위한 기본조건식으로 된다. 1개의 변조파를 리용한 선행방법들에서는 위의 식이 성립될수 없으므로 중성점전류가 0이 될수 없다. 그러나 2개의 변조파를 리용하여 매 상의 0상태충만비를 같게 하면 중성점전류가 0이 되어 중성점전위LFR를 없앨수 있다.

2. 2중변조파PWM실행방법

1) 절환함수의 구성

매 상의 기본3상변조파를 $u_{\gamma|a}, u_{\gamma|b}, u_{\gamma|c}$ 라고 하자. 이것들을 크기관계에 따라 $u_{\text{최대}}, u_{\text{중간}}, u_{\text{최소}}$ 로 표시하고 매 상에 대하여 변조파 u_k 를 다음과 같이 구성한다.(그림 2)

$$\left. \begin{aligned} u_{kp} &= (u_{\gamma|k} - u_{\text{최소}}) / 2 \\ u_{kn} &= (u_{\gamma|k} - u_{\text{최대}}) / 2 \\ u_k &= u_{kp} + u_{kn} \end{aligned} \right\}$$

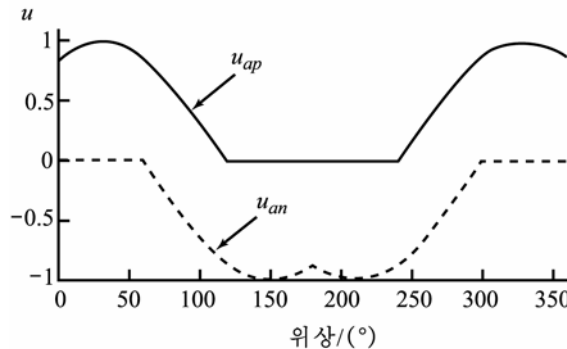


그림 2. 변조파 u_{ap} 와 u_{an} 의 파형(변조률 $m=1$)

이때 0상태충만비는 $d_{k0} = 1 - |u_{kp}| - |u_{kn}| = 1 - \frac{u_{\text{최대}} - u_{\text{최소}}}{2}$ 로서 매 상에서 모두 같다. 평균중성점전류는 항상 0으로 되며 령상성분만을 삽입하였기때문에 3상출구전압에서는 변화가 없다.

u_{kp} 와 u_{kn} 을 3각반송파와 비교하여 얻은 절환함수 S_{kp} 와 S_{kn} 은 다음과 같이 된다.

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

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

여기서 1, 0, -1은 출구준위가 각각 1, 0, -1인 상태를 나타낸다. 그리고 $u_{\text{반송1}}$ 로는 정3각반송파([1 0 1])를, $u_{\text{반송2}}$ 로는 부3각반송파([0 -1 0])를 리용한다. 이때 그것들의 위상은 같다.

2중변조파PWM의 절환함수 S_k 는 다음과 같이 표시된다.

$$S_k = S_{kp} + S_{kn}$$

면적등가원리에 의하여 선형조절구역내에서 우의 방법으로 얻은 변조파는 본래의 3상시누스변조파와 출구선전압의 견지에서 등가이다. 또한 중성점전류가 0으로 되기때문에 중성점전위LFR가 없어진다.

2) 중성점전위직류평형실험

2중변조파PWM의 기본출발점은 2개의 변조파를 리용하여 매 반송파주기내에서의 평균중성점전류가 0으로 되게 하여 중성점전위LFR를 없앨수 있다는것이다. 그러나 반송파주파수가 변조파주파수보다 훨씬 크다고 하여도 반송파주기내에서 전류가 일정하지 않으므로 정확히 중성점전류가 0으로 되지 않으며 이것이 오랜 시간동안 루적되면 중성점전위직류불평형이 산생된다. 또한 중성점전위가 초기에 평형이 아니거나 역변환기장치정수들이 PWM과 비대칭으로 되는 등의 원인으로 하여 중성점전위직류불평형이 발생한다. 앞에서 제기한 방법으로는 직류불평형문제를 해결할수 없으므로 중성점전위에 대한 반결합조종을 진행하여 LFR와 직류성분을 모두 없애야 한다.

2중변조파 u_{kp} 와 u_{kn} 을 반대방향으로 같은 거리만큼 평행이동시키면 령상전압값과 변조파값은 달라지지 않지만 0상태의 충만비 d_{k0} 이 변화되므로 평균중성점전류 I_{np} 와 중성점전위 u_{np} 를 변화시킬수 있다. 여기서 $u_{\text{중간}}$ 성분만이 우와 아래의 두 방향으로 평행이동가능하므로 중간전압2중변조파에 조절량 Δu 를 적용하여 새로운 중간전압2중변조파를 만든다. 즉

$$\begin{cases} u'_{\text{중간}p} = u_{\text{중간}p} + \Delta u \\ u'_{\text{중간}n} = u_{\text{중간}n} - \Delta u \end{cases}$$

원래의 2중변조파와 비교하면 0상태충만비변화량은 조절량의 2배로 된다. 즉

$$\Delta d_{\text{중간}0} = -2\Delta u$$

새로운 2중변조파의 작용에 의하여 평균중성점전류는 0으로부터 다음과 같이 변화된다.

$$I_{np} = \Delta d_{\text{중간}0} i_{\text{중간}}$$

여기서 $i_{\text{중간}}$ 은 $u_{\text{중간}}$ 의 상전류이다.

반송파주기 T_c 내에 중성점에 들어오는 전하량은 다음과 같다.

$$\Delta Q = I_{np} T_c$$

직류모션콘덴사들의 용량을 $C_1 = C_2 = C$ 라고 하면 중성점에 남아있는 전하량은 $Q_{np} = 2Cu_{np}$ 로 된다. 여기서 u_{np} 는 중성점전위이다. 중성점전위가 평형이 되자면

$$Q_{np} + \Delta Q_{np} = 0$$

$$\Delta u = \frac{Cu_{np}}{i_{\text{중간}} T_c}$$

이어야 한다. 여기서 Δu 는 일정한 제한조건을 가진다. $\Delta u < 0$ 일 때 Δu 는 $u_{\text{중간}}$ 의 부호 특성을 변화시키지 말아야 하므로 $u'_{\text{중간}p} - u'_{\text{중간}n} < 1$ 이어야 한다. 즉

$$\Delta u \geq \frac{|u_{\text{중간}}| - u_{\text{최대}}}{2}$$

$\Delta u > 0$ 일 때 $u_{\text{중간}}$ 값이 $[-1, 1]$ 범위를 넘지 말아야 하므로 Δu 에 대한 제한조건은 다음과 같이 된다.

$$\Delta u \leq \frac{1 - u_{\text{최대}}}{2}$$

이 방법에서 중성점전위LFR의 진폭은 반송파주파수에 반비례한다. 다시말하여 반송파주파수가 커질수록 중성점전위의 요동이 보다 작아진다.

3. 모의결과 및 분석

모의는 MATLAB/Simulink에서 진행하였다. 설정한 역변환기파라미터값들은 다음과 같다.

직류모션전압 — 직류 700V, 모션콘덴사용량 — 2 200 μ F, 부하용량 — 20kVA, 반송파주파수 — 5kHz, 조종주기 — 200 μ s (주파수 5kHz)

출구상전압파형과 중성점전위파형을 각각 그림 3과 그림 4에 보여주었다.(변조률 $m=0.99$)

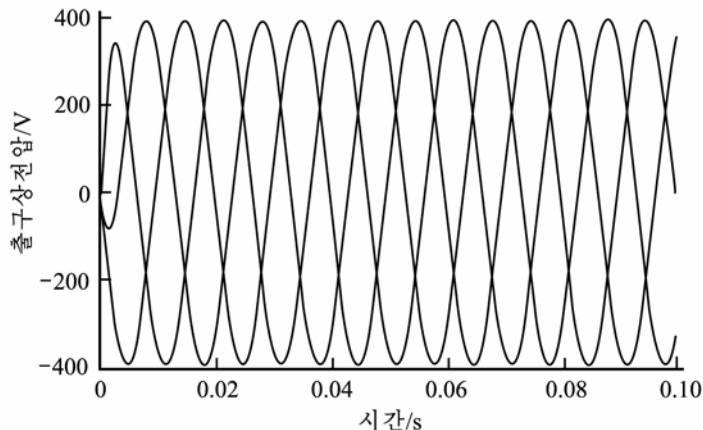


그림 3. 출구상전압파형

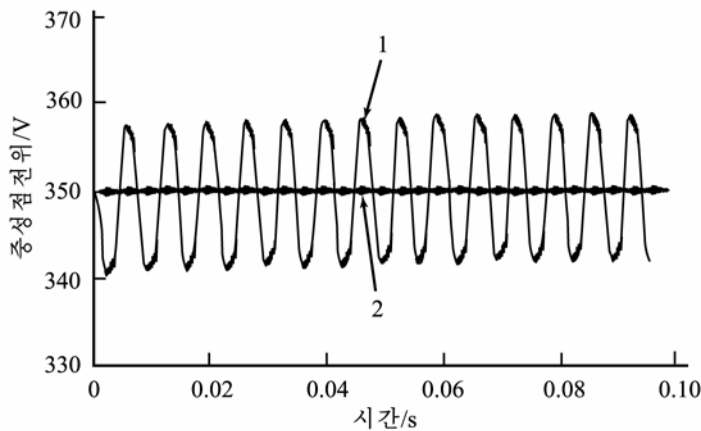


그림 4. 중성점전위파형

1—1개의 변조파를 리용하여 중성점전위평형조종을 진행하였을 때,
2—2개의 변조파를 리용하여 중성점전위평형조종을 진행하였을 때

각이한 력률과 변조률에 따르는 출구전압THD와 중성점전압맥동값을 각각 표 1과 2에 주었다. 여기서는 중성점전위에서 350V를 더한 차의 절대값의 최대값을 중성점전압맥동값으로 보았다.

표 1. 각이한 력률에 따르는 출구전압THD와
중성점전압맥동값(변조률 $m = 0.99$)

력률	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
THD/%	1.21	0.83	0.39	0.16	0.08
$U_{\text{맥동}}/V$	0.442	0.440	0.466	0.466	0.474

표 2. 각이한 변조률에 따르는 출구전압THD와 중성점전압맥동값(력률 $\cos \varphi = 0.99$)

변조률	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
THD/%	0.57	0.42	0.31	0.20	0.12	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08
$U_{\text{맥동}}/V$	0.088	0.094	0.122	0.285	0.384	0.429	0.452	0.466	0.470	0.474

그림 4를 통하여 알수 있는것처럼 중성점전위평형조종을 진행하면 3고조파의 저주파요동이 없어지고 매 조종주기마다 중성점전위가 평형점에 도달하며 그 맥동의 진폭도 작아진다.

모의를 통하여 제안된 2중변조파PWM방법으로 중성점전위평형조종을 진행하면 임의의 력률과 변조률조건에서도 중성점전위평형을 원만히 실현할수 있다는것을 알수 있다.

맺는 말

론문에서는 3준위NPC역변환기에서 2개의 변조파를 리용하여 PWM변조를 실현함으로써 임의의 력률과 변조률조건에서도 중성점전위평형문제를 원만히 해결할수 있는 2중

변조파PWM방법을 제시하였다. MATLAB모의를 통하여 제안된 중성점전위평형조종방법의 효과성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Rodriguez et al.; IEEE Trans on Industry Electronics, 57, 7, 2219, 2010.
- [2] B. Fan et al.; 2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 150, 2012.
- [3] Y. Deng et al.; IEEE Trans on Power Electronics, 30, 6, 2962, 2015.

주체109(2020)년 6월 5일 원고접수

An NPPB Control Method in Three-Phase Three-Level NPC Inverter

Han Myong Song, Kim Chol Jun and Yu Ju Myong

In this paper we proposed double-modulation wave PWM method, which perfectly solved neutral point potential balancing problem in any power factor and modulation rate of three-level NPC inverter. The effectiveness of proposed neutral point potential balancing control method is verified by MATLAB simulation.

Keywords: LFR, NPPB