

### 3상 PWM Watkins-Johnson AC-AC 컨버터를 이용한 무효전력보상기

최남섭, Yulong Li  
전남대 전자통신전기공학부

#### Static Var Compensator Using a Three Phase PWM Watkins-Johnson AC-AC Converter

Nam-Sup Choi, Yulong Li  
Chonnam National University

**Abstract** - In this paper, a static var compensator using three phase PWM Watkins-Johnson AC-AC converter is presented. The PWM Watkins-Johnson AC-AC converter is modelled by using circuit DQ transformation whereby the basic DC characteristics equation is analytically obtained. Finally, the PSIM simulation shows the validity of the modelling and analysis.

#### 1. 서 론

PWM AC 초과, 즉 PWM AC-AC 컨버터에 대한 연구는 주로 Buck형, Boost형, Buck-Boost형을 중심으로 이루어져 왔다. 그런데, 기본적인 컨버터는 모두 출력측의 극성이 고정되어 있다는 단점을 갖는다<sup>[1-3]</sup>. 반면에, Watkins-Johnson 컨버터는 출력의 전압의 극성을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, Watkins-Johnson AC-AC 컨버터에 대한 연구는 매우 소외되어 왔으며 아직 여러 문헌에서 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 3상 PWM Watkins-Johnson 컨버터를 이용한 무효전력보상기를 제안한다. 제안된 무효전력보상기에 대하여 회로 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM Watkins-Johnson AC-AC 컨버터에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가모델을 제시하고, 이 모델로부터 무효전력과 같은 컨버터의 중요한 식들의 해석적인 표현을 유도할 수 있음을 보인다. 더불어, 동작 특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증할 것이다.

#### 2. 모델링 및 해석

##### 2.1 회로구성

그림 1은 PWM Watkins-Johnson AC-AC 컨버터를 사용한 무효전력보상기의 회로를 나타낸다. 그림 1에서 저항  $r$ 는 IGBT와 인덕터  $L$ 의 손실을 각각 포함한다. 또,  $d$ 는 스위치  $Q_1 \sim Q_6$ 의 duty ratio이다. 즉  $Q_1 \sim Q_6$ 는 동시에 온, 오프 스위칭하고, 동시에 온, 오프 스위칭하는  $Q_7 \sim Q_{12}$ 와는 상보적인 스위칭 동작을 한다. 그러므로,  $d$ 는 그림 1의 컨버터의 유일한 제어변수이다. 그림 2는 능동스위치 대신 변압기를 사용한 것으로 동작원리는 그림 1과 같다. 그림 1에서 3상 입력전원은,

$$v_{s,abc} = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_s \text{SIN}(\omega t) \quad (1)$$

이고,  $V_s$ 는 AC 전원측의 선간 실효전압을 나타내며,

$$\text{SIN}(\omega t) = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

##### 2.2 모델링

3상의  $L$ - $r$  세트에 대하여 각각 다음과 같은 관계식을 얻는다

$$v_{l,abc} - v_{p,abc} = L \frac{d}{dt} i_{l,abc} + r i_{l,abc} \quad (3)$$

이고, 3상의  $C$  세트에 대하여 다음과 같다.

$$C \frac{d}{dt} v_{o,abc} = i_{o,abc} \quad (4)$$

한편, 3상 노드전압  $v_{l,abc}$ 와  $v_{p,abc}$ 는 스위칭 상태에 따라 다음과 같이 정해진다.

$$v_{l,abc} = (1-d)v_{s,abc} \quad (5)$$

$$v_{p,abc} = dv_{s,abc} + (1-d)v_{o,abc} \quad (6)$$

마찬가지로, 전원측 입력전류  $i_{s,abc}$ 와 커패시터 전류  $i_{o,abc}$ 는 다음과 같다.

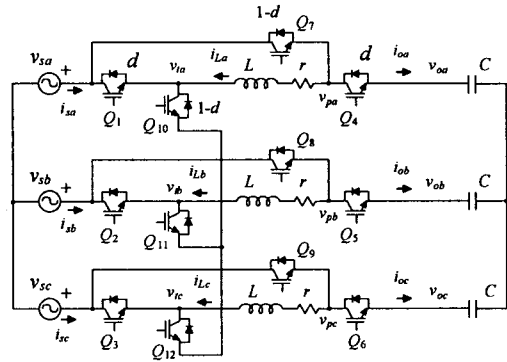
$$i_{s,abc} = d i_{l,abc} + (1-d)(-i_{l,abc}) = (2d-1)i_{l,abc} \quad (7)$$

$$i_{o,abc} = -(1-d)i_{l,abc} \quad (8)$$

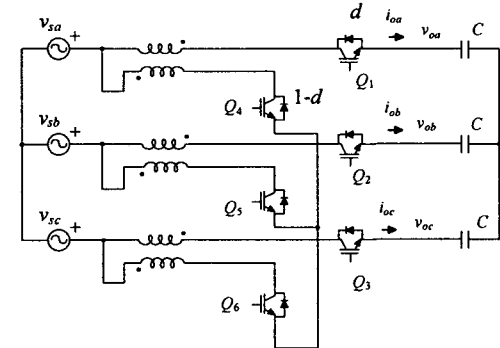
스위칭 주파수가 매우 높다면, 식 (5)~(8)은 순시적인 전압, 전류의 파형을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 다음과 같이 입력전원의 주파수와 위상에 동기되어 회전하는 DQ 변환을 정의한다<sup>[4]</sup>. 즉,

$$x_{qdo} = Kx_{abc}, \quad K^{-1} = K^T \quad (9)$$



〈그림 1〉 Watkins-Johnson AC-AC 컨버터를 이용한 무효전력보상기



〈그림 2〉 변압기형 Watkins-Johnson AC-AC 컨버터를 이용한 무효전력보상기

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\omega t) \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

입력 전원 전압 식 (1)을 DQ 변환하면 다음의 식을 얻는다.

$$v_{sq} = 0 \quad (11)$$

$$v_{sd} = V_s \quad (12)$$

또, 3상 인덕터-저항 세트에 관한 식 (3)을 DQ 변환하면,

$$v_{pq} - v_{iq} = \omega L i_{Lq} + L \frac{d}{dt} i_{Lq} + r i_{Lq} \quad (13)$$

$$v_{pd} - v_{id} = -\omega L i_{Lq} + L \frac{d}{dt} i_{Ld} + r i_{Ld} \quad (14)$$

이고, 3상 커패시터 세트에 대하여,

$$\omega C v_{od} + C \frac{d}{dt} v_{oq} = i_{oq} \quad (15)$$

$$-\omega C v_{oq} + C \frac{d}{dt} v_{od} = i_{od} \quad (16)$$

를 얻는다. 또한, 3상 전압, 전류의 식(5)~(8)을 DQ 변환하여 다음의 식을 얻는다.

$$v_{iq} = (1-d)v_{sq}, \quad v_{id} = (1-d)v_{sd} \quad (17)$$

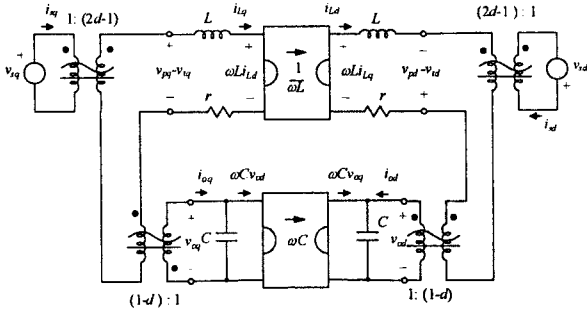
$$v_{pq} = dv_{sq} + (1-d)v_{oq}, \quad v_{pd} = dv_{sd} + (1-d)v_{od} \quad (18)$$

$$i_{sq} = (2d-1)i_{Lq}, \quad i_{sd} = (2d-1)i_{Ld} \quad (19)$$

$$i_{oq} = -(1-d)i_{Lq}, \quad i_{od} = -(1-d)i_{Ld} \quad (20)$$

그림 3은 식 (13)~(20)으로부터 얻어진 회로 DQ 변환된 등가회로를 나

타낸다. 회로 DQ 변환에 따라, 그림 1의 3상 회로를 그림 3과 같은 단상 회로로 표현할 수 있고, 제어변수  $d$ 는 변압기의 가변권선비로 표현됨을 분수 있다. 또한, 그림 3에는 시스템의 모든 제어정보가 포함되어 있음에 주목할 필요가 있다.



〈그림 3〉 등가회로

### 2.3 해석

정상상태에서 그림 3의 모든 전압, 전류의 변수는 직류값을 가지므로 대문자를 사용하여 표기하며, 해석과 설계의 편의를 위하여 다음과 같은 양들을 정의한다.

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad \eta = \frac{r}{z_o}, \quad \mu = \frac{\omega}{\omega_o}$$

그림 3의 등가 회로에서 다음과 같은 정상상태 값들을 구할 수 있다.

$$I_{Lq} = \frac{-\mu(\mu^2 - D_1^2)(2D-1)}{\mu^4 - (2D_1^2 + \eta^2)\mu^2 + D_1^4} \cdot \frac{V_s}{z_o} \quad (21)$$

$$I_{Ld} = \frac{\eta\mu^2(2D-1)}{\mu^4 - (2D_1^2 + \eta^2)\mu^2 + D_1^4} \cdot \frac{V_s}{z_o} \quad (22)$$

$$V_{oq} = \frac{\eta\mu D_1(2D-1)}{\mu^4 - (2D_1^2 + \eta^2)\mu^2 + D_1^4} \cdot V_s \quad (23)$$

$$V_{od} = \frac{(\mu^2 - D_1^2)D_1(2D-1)}{\mu^4 - (2D_1^2 + \eta^2)\mu^2 + D_1^4} \cdot V_s \quad (24)$$

전원측 3상 전압원에서 PWM Watkins-Johnson AC-AC 컨버터로 공급되는 유효전력  $P_s$ 와 무효전력  $Q_s$ 는  $V_{sq}=0$ ,  $V_{sd}=V_s$ 을 고려할 때 다음과 같다.

$$P_s = V_{sq}I_{sq} + V_{sd}I_{sd} = V_s I_{sd} = V_s(2D-1)I_{Ld} \quad (25)$$

$$Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} = -V_s I_{sq} = -V_s(2D-1)I_{Lq} \quad (26)$$

따라서,

$$P_s = \frac{\eta\mu^2}{\mu^4 - (2D_1^2 + \eta^2)\mu^2 + D_1^4} \cdot \frac{(2D-1)^2 V_s^2}{z_o} \quad (27)$$

$$Q_s = \frac{\mu(\mu^2 - D_1^2)}{\mu^4 - (2D_1^2 + \eta^2)\mu^2 + D_1^4} \cdot \frac{(2D-1)^2 V_s^2}{z_o} \quad (28)$$

식 (28)에서  $Q_s$ 의 극성은  $\mu$ 와  $D_1$ 의 크기에 따라 정해짐을 알 수 있다. 즉 제한된 무효전력보상기는 용량성 및 유도성 보상이 모두 가능함을 알 수 있다. 즉, 용량성과 유도성 특성이 변이되는 지점의 듀티값  $D_0$ 는

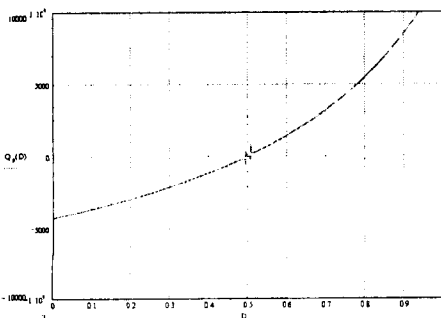
$$D_0 = 1 - \mu \quad (29)$$

한편, 식 (28)에서 무효전력이 무한대가 되는 점이 존재하는데, 그 때의 듀티값  $D_\infty$ 은 분모를 0으로 만드는 방정식의 해가 된다. 그러한 해는 4개가 존재하지만 1보다 작은 값을 유의미한 값으로 취하면,

$$D_\infty = 1 - \sqrt{\mu^2 \pm \mu\eta} \quad (30)$$

가 된다.

그림 4는  $D$ 에 따른 무효전력의 변화를 나타내는데, 무효전력이 0인 지점과 무한대인 지점이 나타내져 있다.

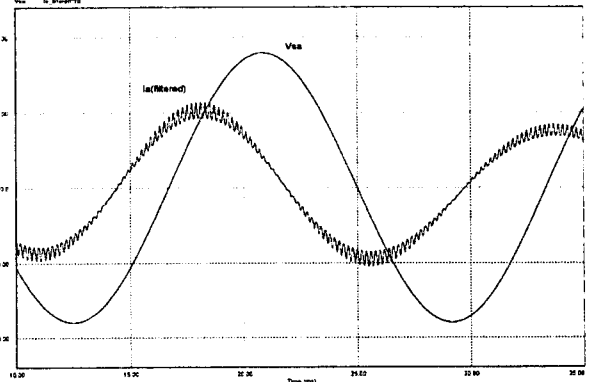


〈그림 4〉 D에 따른 무효전력의 변화

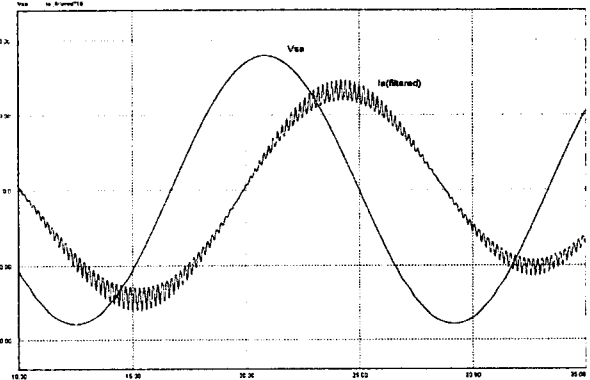
### 3. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 전원전압  $V_s = 220$  V, 전원주파수  $f = 60$  Hz,  $L = 10$  mH,  $r = 0.1$   $\Omega$ ,  $C = 176$   $\mu$ F 이다. 또한 스위칭 주파수는 5 kHz이다. 따라서,  $D_0=0.5$  이고, duty ratio  $D=0.5$ 를 중심으로 유도성 또는 용량성 전류가 발생한다.

그림 5는  $D=0.7$  일 때, 그림 6은  $D=0.3$  일 때 전원전압과 전류의 파형을 각각 나타낸다. 그림 5에서 컨버터 입력전류는 입력전원에 대하여 위상이  $90^\circ$ 앞선 진상전류가 흐르므로 컨버터는 커패시터처럼 동작함을 볼 수 있다. 그리고, 그림 6에서 컨버터의 입력전류는 유도성 전류가 되며, 따라서 제안된 컨버터는 무효전력보상기로 동작할 수 있음을 확인할 수 있다.



〈그림 5〉 D=0.7일 때 전원전압과 전류



〈그림 6〉 D=0.3일 때 전원전압과 전류

### 4. 결 론

본 논문에서는 3상 PWM Watkins-Johnson 컨버터를 이용한 무효전력보상기를 제안하였다. 또 제안된 무효전력보상기에 대하여 DQ 변환 기법을 활용하여 3상 PWM Watkins-Johnson AC-AC 컨버터에 대한 완전한 정보를 포함하는 등가모델을 제시하고, 무효전력과 같은 컨버터의 정적 특성의 해석적인 표현을 유도하였다. 또, 이러한 동작특성 해석에 대한 결과는 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

### [참고 문헌]

- [1] H. Mehta, "Recent Development: EPRI's custom power concept", *Proceedings of Power Quality '93 Conference*, pp 794-795, October 1993.
- [2] Shank Srinivasan and Giri Venkataramanan, "Versatile PWM converters for three phase AC power conditioning", *PCIM Conference Record*, 1994.
- [3] Zbigniew Fedyczak, Ryszard Strzelecki and Krzysztof Skorski, "Three-phase PWM AC line conditioner based on the Cuk converter topology: study of the basic energetic properties", *CD on EPE Conf. Record*, 1999.
- [4] Soo-Bin Han, G. H. Cho, B. M. Jung and S. H. Choi, "Vector-transformation circuit theory and application to converter modeling/ analysis", *Power Electronics Specialist Conference Record*, pp.538-544, 1998.