

PWM 콘버터를 이용한 순시무효전력 보상장치의 동작해석

권기현^o 권순재 김철우 황영문
부산대학교 전기공학과

A Study on the Operation Characteristics of a Reactive Power Copensator using PWM Converter

Kwon Ki Hyun^o Kwon Soon Jae Kim Cheul U Whang Yong Moon

Dept. of Electrical Eng. Pusan National Univ.

Abstract

From the viewpoint of an effective energy use, many method for reactive power compensation has been developed. Among of the reactive power compensation, this paper describes the relation of operation interpretation, filter, hysteresis width and switching time of current controlled PWM converter which has excellent reactive power compensation. This current controlled PWM converter is excellent the view of reactive power compensation by current control method using hysteresis comparator method, but is required element of high response characteristics. Therefore this paper offers the series of data for system considering switching characteristics of switching element.

1. 서론

전기기기의 대용량화, 자동화로 인한 전력전자기기의 대용량화는 반도체소자 기술의 발달로, 전력전자기기의 사용과 함께 날로 증가추세에 놓이게 되었다. 이로 인해 교류 전력계통에는 무효전력성분이 증가하게 되고, 교류전력계통에 발생한 무효전력은 계통의 손실증가와 전력설비를 증가시킬 뿐만 아니라 계통전압의 변동을 일으켜 계통에 심각한 피해를 발생시킨다. 따라서 교류전력계통에서의 무효전력에 대한 대책은 전력의 효율적 이용이란 점에서 중요한 문제로 부각되었다.

종래 사용되어온 무효전력 보상장치도 신속하고 효과적으로 무효전력을 보상하기 위해 점차 무정점화되었다.¹⁾ 본 논문에서는 계통전압을 그대로 둔 채 전류를 제어하는 방식이며 속응성이 뛰어난 전류제어형 보상장치의 원리를 간략히 설명하고, 그 동작을 해석하였다. 그동안 여러가지 PWM 콘버터에 관한 연구가 진행되어 왔지만²⁾ 동작해석을 하기에는 수치적인 표현과 동작이 복잡하여 어려움이 많았다. 그래서 본 논문에서는 히스테리시스 콤퍼레이터 방식에 의한 무효전력 보상을 회로 모음으로 나누어 분석하고, 이를 수치화하여 시뮬레이션함으로써 새로운 PWM 콘버터를 설계하는 데 기초로 삼고자 한다.

2. 무효전력보상장치의 제어와 동작원리

2-1. 시스템의 제어원리

실제의 보상전류동작을 그림 1 와 같이 나타내었다. 이 때의 보상전류는 허전력이므로 의의 연산된 값을 보상전류의 지령치로 삼는다.³⁾

그림에서는 a 상만을 고려하여 전류지령치를 i^*_{ca} 로 표시하였다. 실제 보상전류 i_{ca} 는 히스테리시스 콤퍼레이터 방식에 의한 전류제어로 일정한 히스테리시스

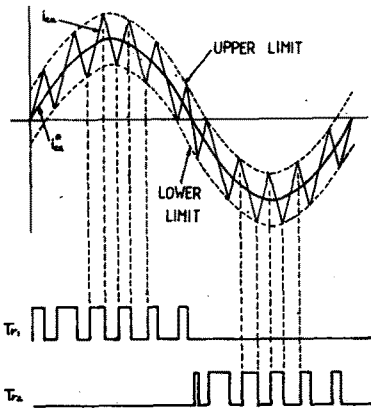


그림 1. 무효전력보상장치의 전류제어형태.

폭 ΔI 를 가지고 트랜지스터와 다이오드를 통해 전류 지령치를 추종해 간다. 즉 i^*_{ca} 가 정 (+)인 구간에서 실제전류가 감소하여서 하한치에 도달하면 Tr1 이 ON 되어 실제전류 i_{ca} 를 증가시킨다. i_{ca} 계속 증가하여 상한치에 도달하게 되면 Tr1 이 OFF 되고, 그 대신 다이오드가 ON 되어 실제전류 i_{ca} 는 감소되는 동작을 반복하게 된다. 그리고 i^*_{ca} 가 부 (-)인 구간에서도 마찬가지로 방법으로 실행된다. 이 경우에는 Tr2 가 ON, OFF 동작을 반복하여 수행한다.

2-2. 무효전력보상장치의 동작원리

보상기만을 추출하여 그림 3 과 같이 나타내었다. 이 때의 전류를 그림과 같이 i_u, i_v, i_w 으로 표시하였다.

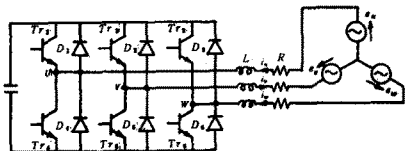


그림 2. 교류전원이 접속된 무효전력보상장치의 회로도.

그림에서와 같이 화살표 방향을 전류흐름의 점 (+) 방향으로 정의한다. 반일 트랜지스터와 다이오드의 통전상태가 같다고 하면 동작적으로 turn-on 저항을

가진 스위치로 볼 수 있다. 그러므로 각각의 통전상태는 스위칭소자가 turn-on 상태를 유지하고 있을 때를 스위치 ON, turn-off 상태를 유지하고 있을 때를 스위치 OFF로 볼 수 있다. 그림 4는 이와 같은 가정하에 등가적으로 표현한 PWM 콘버터 회로도이다.

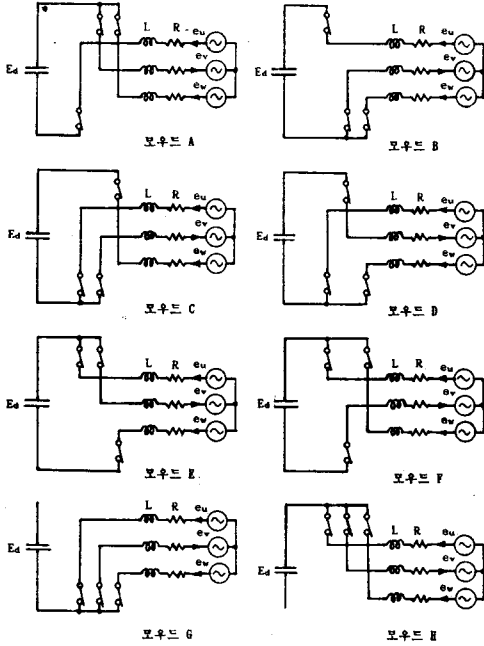


그림 3. PWM 콘버터 회로의 등가모우드.

그림에서는 스위치 OFF 상태를 단선으로 처리해 놓았다. 서로 다른 8가지의 회로를 각 모우드라고 정의한다. 그리고 스위칭 소자의 turn-on 상태를 표 1과 같이 분류하였다.

표 1. 스위칭 소자의 상태에 따른 분류표.

| | i_u | i_v | i_w |
|-----|---------------|-------|-------|
| (1) | D4, Tr2, | D3 | |
| (2) | Tr1, D5, Tr6 | | |
| (3) | D4, D5, D3 | | |
| (4) | D4, Tr2, Tr6 | | |
| (5) | Tr1, Tr2, Tr6 | | |
| (6) | Tr1, D5, D3 | | |
| (7) | D4, D5, Tr6 | | |
| (8) | Tr1, Tr2, D3 | | |

그림 3에서의 모우드 순서와 표 1에서의 순서는 일치한다. 예를 들어 표 1의 (1)과 같은 상태에서는 모우드 A가 되고, 먼저 i_u 가 감소하여 하한치에 도달하면 D4가 OFF되고 Tr1이 ON되어 (8)과 같은 상태가 된다. 그때는 모우드 H상태와 같음을 알 수 있을 것이다.

참고로 전류의 흐름 상태가 다르다 할 지라도 8가지 모우드에 전부 적용된다.

그림 3에서 모우드 A의 경우에 대해서 풀기로 한다. 이 때의 전류는 시간함수로 표시되며 각각을 $i_u(t), i_v(t), i_w(t)$ 라고 하면 회로방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 2LP+2R+1/CP & 0 & -LP-R \\ -1 & 1 & 1 \\ -LP-R & 0 & 2LP+2R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u(t) \\ i_v(t) \\ i_w(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_v - e_u + E_d \\ 0 \\ e_w - e_v \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 L과 R, C는 회로상의 인덕턴스, 저항, 커패시턴스를 의미하고 P는 미분연산자, 즉 d/dt 를 뜻한다.

윗 식을 시간에 대해서 풀면 $i_u(t), i_v(t), i_w(t)$ 에 대한 식이 얻어진다. 그때의 전류증가율은 R과 L에 밀접한 관계를 가진다.

3. 무효전력보상장치의 시뮬레이션

스위칭 시간에 영향을 주는 인자는 리액터와 저항 성분의 크기와 히스테리시스 폭이다. 이는 전류증가율과 차전류의 크기에 의해 좌우되며, R과 L에 의해 결정된다. 보상기에서의 손실을 줄이기 위해 될 수 있는 한 보상기측 저항은 작게 정하는 것이 좋다.

3-1. 콘덴서 용량 산정방법

콘덴서는 스위칭 형태에 따라서 충전되기도, 방전되기도 한다. 이러한 충,방전 에너지는 콘덴서에 저장되어 있는 에너지를 맥동시키는 원인이 되고 이로 인해 콘덴서의 전압을 맥동시킨다.

콘덴서 Cd의 지류평균전압을 E_d 라 하고, 그 평균저장 에너지를 W_d 라 하면, W_d 는 다음 식으로 표시된다.

$$W_d = C_d \times E_d^2 / 2 \quad (2)$$

콘덴서의 에너지 맥동에 따른 지류전압 E_d 의 맥동에 대하여 허용할 수 있는 최대전압을 E_{dmax} 라 하고, 그 맥동율을 β 라 하면 맥동율은 다음과 같이 정의한다.

$$\beta = (E_{dmax} - E_d) / E_d \quad (3)$$

여기에서 콘덴서의 맥동 에너지 순시치 w_d 와 순시지류전압 e_d 와의 관계식을 구하면 다음 식이 얻어진다.

$$w_d = C_d (e_d^2 - E_d^2) / 2 \quad (4)$$

콘덴서 용량 C_d 의 산정은 콘덴서 맥동 에너지의 최대치 W_{dmax} 가 중요하다. 콘덴서 맥동 에너지의 최대치는 보상기에 흐르는 전류와 리액터 용량에 의해서도, 또한 좌우된다. 즉 리액터의 맥동 에너지는 콘덴서의 맥동 에너지를 유발시키며, 그 반대로 마찬가지이다. 보상전류가 최고치에 이르렀을 때의 전류를 i_{max} 라 하고, t 시간 후의 전류를 i 라 하면, 그때의 에너지 맥동은 최대가 된다.

$$W_{dmax} = L (i_{max}^2 - i^2) / 2 \quad (5)$$

콘덴서 용량 산정은 지류평균전압과 맥동에너지의 최대치에 의해 다음 식과 같이 변환된다.

$$C_d = 2 \times W_d / (\beta + 2\beta) \times E_d \quad (6)$$

무효전력만의 순시보상에 있어서 무효저너맥동에 수반되는 리액터 중의 에너지 맥동의 최대치 W_{dmax} 를 고려하여 식 (6)과 같이 콘덴서 용량을 산정하면 좋다.

3-1. 리액터 크기 변화인 경우

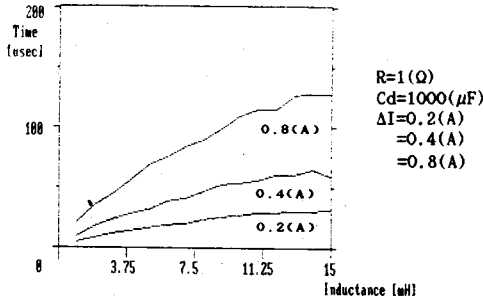
보상기에서의 콘덴서와 리액터는 에너지를 수수한다. 이러한 에너지흐름으로 인해 콘덴서에 걸리는 전압은 3상브릿지 정류때의 전압보다 조금 높게 확립되었다. 여기서는 3상 브릿지 정류때의 전압을 콘덴서 전압으로 설정하고 계산하였다. 그리고 콘덴서 용량은 콘덴서 산정방법에 의하여 충분히 큰 용량을 선택하였다.

시뮬레이션에서의 전류는 20(A)일 때와 40(A)일 때의 결과이다.

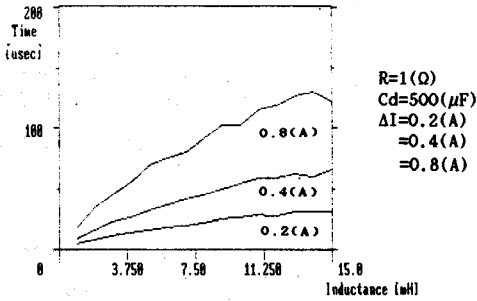
이 때의 회로 조건은 그림에 표시되어있다. 세로축에는 평균 스위칭시간을 표시하였고, 한 주기를 기준으로 한다면 평균 스위칭시간은 한 소자의 스위칭시간에 대한 평균이므로

$$\text{평균 스위칭시간} = 1/\text{한 주기의 주파수} \times \text{스위칭 횟수} \quad (7)$$

가 된다. 이와 같이 평균 스위칭시간을 설정하였으므로



(a) 콘덴서 용량이 1000 μF 인 경우

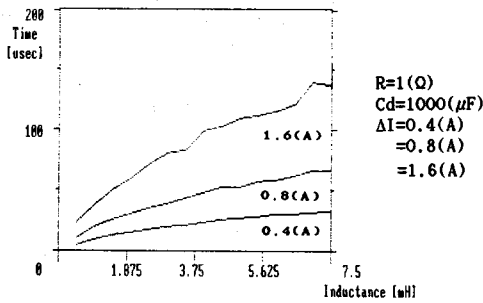


(b) 콘덴서 용량이 500 μF 인 경우

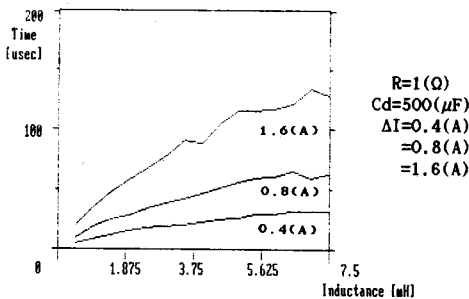
그림 4. 전류가 20(A) 인 경우.

실제 스위칭소자를 고려한다면 평균 스위칭시간의 1/2 - 1/4 정도의 실제 요구되는 시간으로 설정하는 것이 좋다.

그림 5 는 전류가 40(A) 일 때의 시뮬레이션 결과이고, 그 때의 회로상태는 그림과 같다.



(a) 콘덴서 용량이 1000 μF 인 경우



(b) 콘덴서 용량이 500 μF 인 경우

그림 5. 전류가 40(A)인 경우.

두 그림에서 볼 수 있듯이 히스테리시스 폭과 리액터의 크기에 따라 스위칭시간에 많은 변화를 미친다.

3-3. 콘덴서 용량변화인 경우

콘덴서 용량을 변수로 하여 그림 6과 그림 7과 같이 나타내었다. 그 때의 회로 조건도 그림에 표시되어있다.

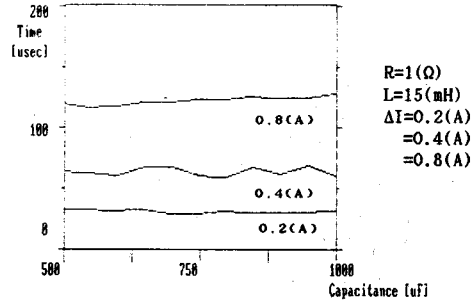


그림 6. 전류가 20(A)인 경우

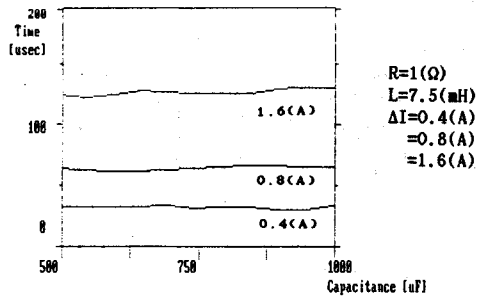


그림 7. 전류가 40(A)인 경우

그림에서와 같이 콘덴서 용량변화에도 불구하고 스위칭시간 변화는 거의 없었다. 이는 식 (4)의 전류증가와 밀접한 관계를 가진다는 것을 입증하였다. 그것은 전류증가를 결정하는 변수인 R과 L에 관계있음을 알 수 있다.

4. 결 론

PWM 콘버터는 스위칭 형태를 각 상을 기준으로 일의적으로 해석할 수 없기 때문에 해석에 어려움이 많았다. 본 논문에서는 48가지의 스위칭 동작을 증가적인 8개의 모우드로 나누어 실 시스템에 한층 접근하여 컴퓨터를 이용해 해석하였고 전압확립요소로서의 콘덴서 용량산정방법을 예 내지 때문에 입각하여 해석하였다.

계산결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 스위칭시간에 영향을 미치는 성분은 리액터와 히스테리시스 폭, 그리고 부가적으로 저항성분이고 콘덴서의 용량은 전압확립요소로서 스위칭시간과는 무관함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Laszlo Gyugi, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-15, Sept/Oct 1979
- (2) V. R. Stephanovic, "Power Factor Improvement with a Modified Phase-Controlled Converter", IEEE Trans Ind. Appl. Vol. Ia-15, No.2, Mar 1979
- (3) Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa and Koetsu Fujita, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power and its Application", Trans. JIEE, Vol-1. 103, No. 7, 1983
- (4) 김철우, 권순재, 김광태 "전류형 PWM 콘버터에 의한 정지형 무효전력 보상장치에 관한 연구(1)", 전력전자학회 논문집, No. 6, pp.100-102, 1988
- (5) 金澤喜平, 難波江章 "電壓形PWM變換を用いた瞬時無効電力補償装置の動作解析と設計法" 日本電氣學會論文 B 39 昭和 61 - 4