

전압형 컨버터를 이용한 무효/고조파 보상을 위한 선형 제어 방법  
 A SIMPLE REACTIVE/HARMONIC COMPENSATION METHOD  
 WITH VOLTAGE TYPE CONVERTER

김효진  
 서울대학교

정승기  
 광운대학교

최재호  
 충북대학교

박민호  
 서울대학교

Kim Hyo Jin  
 Dept. of Electrical Eng.

Jeong Seung-Gi  
 Dept. of Electrical Eng.

Choi Jae-Ho  
 Dept. of Electrical Eng.

Park Min-Ho.  
 Dept. of Electrical Eng.

Abstract

This paper presents a simple method to compensate reactive/harmonic current components in power lines, with voltage type current controlled converter. The method proposed differs from conventional methods in that it does not rely on explicit evaluation of active power. Instead, the closed-loop control of the dc link voltage of the compensator plays a major role in adjusting the compensation current. It is shown that the system can be modelled as a simple linear system, which facilitates the analytical approach to the system characteristics. The dynamic performances are examined through the digital simulation and some aspects on the controller design are discussed. Experimental results showed good agreement with the anticipate performance

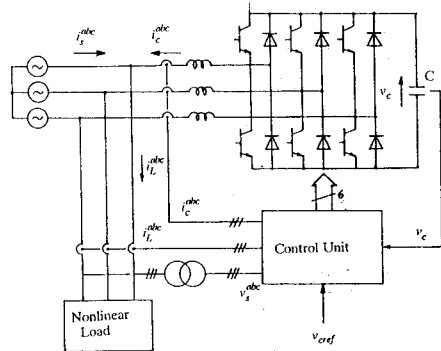


그림 1. 전압형 무효/고조파 보상 시스템

I. 도입

비선형 부하를 널리 사용하게됨에 따라 전력계통에 포함된고조파전류의 보상에 많은 관심이 쏠리고 있고 유효전력 필터에 대한 많은 연구가 진행 되고 있다. 그림1에서와 같은 전압형 전류제어 컨버터가 임의의 전류파형을 합성 하는데 뛰어난 동특성을 나타낸다. 이것은또한 VAR 제너레이터로써 사용될수 있으며 무효/고조파성분 보상에서 가장 유망한 되는 컨버터이다.

그림1은 일반적인 보상 시스템의 구조이다. 그림에 보이는 제어장치는 3가지의 주요기능을 행한다. 즉, 부하전류에 포함된 유효전력의 계산과 직류측 전압제어 그리고 보상기의 교류측 선전류를 제어하는 기능을 수행한다.

보상기가 부하전류의 무효/고조파성분을 제거해야 하기 때문에 유효전력 성분의 계산은 보상되어야할 성분들을 알아내는데 매우 중요하다. 일반적으로 유효전력측정은 1/2주기의 평균을 취하여 측정하거나 그에 상당하는 과정을 통하여 측정하였었다. 비록 평균하는 방법이 개념적으로는 간단하지만 그 방법은 최대 한주기의 시간지연이 있어 동특성이저하된다.

전압형컨버터가 전력보상기로서 사용될때 직류측 전압 제어는 컨버터의 안정한 동작을 위해 필수적이다. 비록 전압제어가 기존의 제어 방식을 사용하던 보상시스템에서는 전체적인 효율에 부수적인 영향을 미치지만 이 논문에서는 직류측전압이 부하전력 요구의 간접적 측정으로 사용될수 있다.

결과적으로 이논문에서 제안한 제어방법은 부하전류의 유효성분을 자세히 계산하지 않고 직류측 전압제어를 통해전원전류의 기본파를 직접제어하는 방식이다.

이 시스템은 간단한 선형시스템으로 만들어 지고 동적 특성은 디지털 시뮬레이션을 통해 조사된다.

II. 원리

그림 2는 기존의 제어방식과 새로 제안된 방법의 블럭도이다. abc 라고 붙은 접자들은 삼상의 변수들을 나타내며변수들은 접자가 붙은 차례대로 배열된 원소들을 가진 열벡터를 나타낸다. 전력을 계산하는 블럭은 유효전력 또는 부하전류의 유효성분을 계산하기 위해 전원 전압과 부하전류를 측정한다. 그리고 직류측전압을 일정하게 유지하기 위해 요구되는 증가분의 유효성분의 크기에 더해진다.

표준화된 상전압을 곱함으로써 삼상의 기준전원전류로 변환할 수 있으며 이것에서 부하전류 I<sub>L</sub> 을 빼면 보상기 기준전류를 구할수 있다.

전류제어기는 보상기의 출력전류가 기준전류를 잘 추종하도록 스위칭 신호를 발생한다. 전류제어기를 구현하기 위해 여러 가지 방법을 쓰지만 여기서는 히스테리시스 전류제어기법을 사용하여 간편성과 뛰어난 동적특성을 얻도록 했다.

그림2(b)에서 보듯이 제안된 제어기법은 전원기준전류를 얻기위해 기존의 방법과 다른방법을 채용했다. 전압제어기의 출력으로 직접 기준전류의 크기 I<sub>s</sub>를 제어한다. 따라서 이 전압제어기는 기존의방법 그림.2(a)에서 부수적인 역할을 하지만 새로 제안된 방법에서는 전원전류를 제어하는데 핵심적인 역할을 한다. 근거는 다음과 같다.

전원에서 전류를 일정하게 공급하고 있는데 갑자기 부하의 유효전력이 증가하면, 즉, 부하가 증가하면 보상기는 부하의 요구전력과 전원에서 요구하는 전력과의 차이를 공급해야 하기때문에 직류측 전압의 감소를 초래한다. 한편 부하의 요구전력이 감소하면 순간적으로 유효전력을 흡수하기 때문에 직류측 전압이 증가한다. 따라서 직류측 전압측정은 부하의 유효전력요구를 측정하는 간접 수단이된다.

직류측 전압이 증감하면 전압제어기는 부하와 전원의 전류기본파 성분 크기가 같아지도록 제어한다.

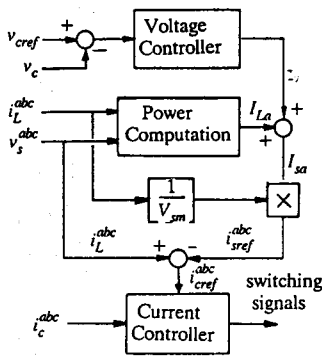
이때 역률을 1.0으로 유지하기 위해 전역전류가 전원 전압과 항상 동상이 되도록한다. 계시된 방법은 상상이 간단하지만 몇가지 문제를 안고 있다.

첫째 : 직류속 전압의 변동

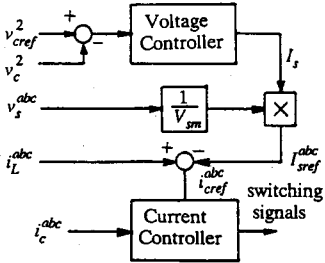
보상기는 과도상태에서 에너지를 흡수하거나 공급하기 때문에 부하의 변동은 직류속 전압의 변동을 가져온다. 전압형 컨버터에서 직류속 전압이 제어 불가능 범위에 들지 않도록 일정하게 유지해야 한다.

둘째 : 기본파에 포함된 고조파 성분

3상정류회로에는 기본파의 6배에 해당하는 고조파가 포함되어 있어서 전압제어기의 출력에 영향을 미친다. 전역 전류에는 어쩔 수없이 고조파성분이 포함되는데 이 문제는 기존의 제어방법에서도 나타나지만 특히 본 논문에서는 전압제어기의 역할이 중요한 만큼 시스템의 전체 특성에 큰 영향을 미친다. 그러나, 전압제어기의 이득을 크게하면 고조파성분을 줄일 수 있지만 동시에 고조파성분을 증폭시키므로 이에 대한 보완책이 있어야겠다.



(a) conventional



(b) proposed

그림 2. 보상방법의 비교

III. 해석 및 모델링

가정

1. 스위칭으로 인한 고조파가 시스템 수행능력에 미치는 효과는 무시할 수 있다.

2. 보상기의 전류제어 특성은 이상적이다. 즉, 출력보상전류는 기준전류를 정확히 추종한다.

위의 가정에 의해  $i_{Lm}^{abc} = i_{Lm}^{abc}$  라고 할 수 있다. 따라서 그림 2(b)의 기준전류값은 실제전류와 같다고 할 수 있다.

직류속 전압  $V_c$  대신  $V_c^2$  이 주어진다 것을 주목할 필요가 있다. 이와같이 변수를 변환하여 시스템을 선형적으로 구성하면 해석을 용이하게 할 수 있다.

보상전류와 직류속 전압과의 관계를 알기위해 보상기에 의해 공급되는 순시전력을 살펴보면 다음과 같다.

$$p = (v_s^{abc})^t i_c^{abc} \tag{1}$$

$$\text{단, } i_c^{abc} = [i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}]^t \quad v_s^{abc} = [v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}]^t$$

따라서 커패시터에 저장되는 에너지는

$$\frac{1}{2} C v_{co}^2 = \frac{1}{2} C v_{co0}^2 - \int p dt \tag{2}$$

단,  $V_{co}$ 는 초기충전전압임

식 (1), (2)로부터 시스템은 그림 3과 같이 표현될 수 있다.

< 관계식의 유도 >

그림 3에서 변수들 사이의 관계를 살펴보기로 한다. 보상기가 고조파전류를 공급함에 따라 직류링크 전압은 기본파의 3차수배 주파수로 맥동한다. 그 결과로 전압제어기의 출력  $I_s$ 는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$I_s = I_{sm} + I_{sm}(3k) \cos 3k\theta + I_{sr}(3k) \sin 3k\theta \tag{3}$$

단,  $I_{sa}$ 는 직류성분

$$i_s^{abc} = a I_s Q \tag{4}$$

그림 3에서  $i_s^{abc} = a I_s Q$

dq 축에서는

$$i_{s,q} = Q_s^t i_s^{abc} = a I_s \tag{5}$$

$$i_{s,d} = D^t i_s^{abc} = 0$$

$$a = \sqrt{3}/2$$

$$Q_n = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos n\theta \\ \cos n(\theta - \gamma) \\ \cos n(\theta + \gamma) \end{bmatrix}$$

(6)

$$D_n = \begin{bmatrix} \sin n\theta \\ \sin n(\theta - \gamma) \\ \sin n(\theta + \gamma) \end{bmatrix}$$

$$D = D_1 \quad Q = Q_1$$

'a'상의 부하전류가 다음과 같다고 가정하자.

$$i_{Lm} = I_{Lm} \cos \theta + I_{Lr} \sin \theta \tag{7}$$

$$+ I_{Lm(3k-1)} \cos(3k-1)\theta + I_{Lr(3k-1)} \sin(3k-1)\theta$$

$$+ I_{Lm(3k+1)} \cos(3k+1)\theta + I_{Lr(3k+1)} \sin(3k+1)\theta$$

'b', 'c' 상전류는  $\theta$  대신  $\theta - \gamma$  과  $\theta + \gamma$  로 대체하여 얻는다.

식 (3)에서는  $3x(x=1, 2, \dots)$  번째의 고조파만 고려되었는데  $3x \pm 1$  번째 고조파는 식 (7)에 포함되어 있다.

식 (6)을 사용하여 부하전류를 다음과 같이 표현한다.

$$i_L^{abc} = a I_{Lm} Q + a I_{Lr} D + a (I_{Lm(3k-1)} Q_{3k-1} \tag{8}$$

$$+ I_{Lr(3k-1)} D_{3k-1} + I_{Lm(3k+1)} Q_{3k+1} + I_{Lr(3k+1)} D_{3k+1})$$

부하전류를 dq변환하면

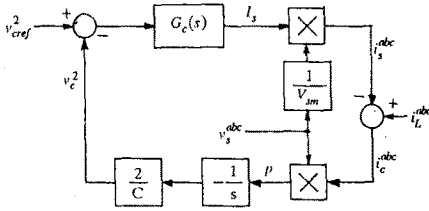


그림 3. 시스템구조의 근사 모델 1

$$i_{Lq} = aI_{Lm} + I_{Lqm(3k)} \cos 3k\theta + I_{Lqr(3k)} \sin 3k\theta \quad (9)$$

$$i_{Ld} = aI_{Lr} + I_{Ldm(3k)} \cos 3k\theta + I_{Ldr(3k)} \sin 3k\theta$$

단,

$$I_{Lqm(3k)} = a(I_{Lm(3k-1)} + I_{Lm(3k+1)}) \quad (10)$$

$$I_{Lqr(3k)} = a(I_{Lr(3k-1)} + I_{Lr(3k+1)})$$

$$I_{Ldm(3k)} = a(-I_{Lr(3k-1)} + I_{Lr(3k+1)})$$

$$I_{Ldr(3k)} = a(I_{Lm(3k-1)} - I_{Lm(3k+1)})$$

그림 3으로부터 보상전류의 dq축 성분은

$$i_{oq} = i_{Lq} - i_{sq} \quad (11)$$

$$i_{od} = i_{Ld} - i_{sd}$$

보상기에서 공급하는 순시전력은

$$p = v_{oq} i_{oq} + v_{od} i_{od} = aV_{sm} (i_{Lq} - i_{sq}) \quad (12)$$

$$p = aV_{sm} (I_{Lm} - I_{sm}) + P_{m(3k)} \cos 3k\theta + P_{r(3k)} \sin 3k\theta \quad (13)$$

$$P_{m(3k)} = aV_{sm} (I_{Lqm(3k)} - aI_{sm(3k)}) \quad (14)$$

$$P_{r(3k)} = aV_{sm} (I_{Lqr(3k)} - aI_{sr(3k)})$$

$$p = P_{Lm} - P_{sm} + P_{3k} \quad (15)$$

간단히 쓰면

$$p = P_L - P_a + \sum_{k=1}^{\infty} P_{3k} \quad (16)$$

$P_{La}, P_{sa}$ 는 각각 부하에 공급되는, 전원에서 공급하는 기본파에 대한 유효전력이다.  $P_{3k}$ 는 부하전류의  $3k \pm 1$ 번짜의 고조파때문에 생기는 성분이다. 뒷식에서 알 수 있듯이 보상기에서는 전력  $p$ 는 부하에서 요구하는 전력과 전원에서 공급하는 전력의 차이, 고조파 성분을 공급함을 알 수 있다.

#### IV 동적특성

지금까지의 논의에서 이 시스템의 수학적 모델이 유도되었다. 그림 4에 그 블록도를 나타내었다.

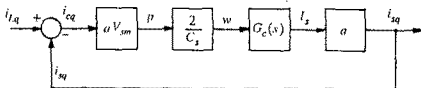


그림 4. 시스템구조의 근사 모델 2

이 그림에서 부하전류의 q축 성분  $I_{Lq}$ 는 기준입력으로 제시되었는데 반면에 전원전류의 q축 성분  $I_{sq}$ 는 기준 입력의 변화에 따라 제어되어야 하는 시스템출력으로 간주되어진다.

전압제어기의 입력변수  $w$ 는 직류속 양단전압의 제곱의 변화를 나타낸다. 주의해야 할것은 모델이 전류의 q축 성분에만 관계한다는 것이다. 왜냐하면 부하전류의 d축 성분은 식(12)에서 알 수있듯이 보상기의 직류링크에까지 침투하지 않는다.

시스템의 동적수행특성은  $G_c(s)$ 에의해 제한된다. 그 설계는 제한된 시스템의 실현에 아주 중요하다. 고려되는 제어기의 두가지 모형은 비례 제어기와 비례 적분제어기이다.

각각의 경우에 시스템의 동적수행특성은 다음과 같이 특징지어진다.

1. 직류속의 최대전압변화
2. 부하변화에 대한 전원전류의 추종특성
3. 전원전류에 잔류하는 고조파의 양

시스템의 동적수행특성을 검사하기위해 표 1에 주어진 자료를 참조하여 컴퓨터 시뮬레이션을 한다. 보상기의 직류속전압은 제어한계, 즉, 전원의 최대선간 전압보다 15%이상 높다고 가정한다. 전체 시뮬레이션과정을 통해 R-L 부하를 공급하는 3상 제어정류기를 무효/고조파전류의 발생원인으로 가정한다.

< 비례제어기 >

만일 그림 4에서 제어기로 비례제어기가 채택된다면  $G_c(s) = K_p$ 이며 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$G_1(s) = \frac{I_{sq}(s)}{I_{Lq}(s)} = \frac{K_1}{s + K_1} \quad (17)$$

$$G_2(s) = \frac{W(s)}{I_{Lq}(s)} = -\frac{1}{aK_p} \frac{K_1}{s + K_1} \quad (18)$$

단,

$$K_1 = 2a^2 \frac{V_{sm}}{C} K_p = \frac{3V_{sm}}{C} K_p \quad (19)$$

$G_1(s)$ 와  $G_2(s)$ 는 부하전류에 포함된 유효분의 변화에 대한 전원전류응답과 직류속 전압의 변화이다. 이 식들은 시상수를  $1/K_p$ 로 갖는 1차 지연함수이다. 따라서 이득이 커질수록 응답은 빨라진다고 할 수 있다.

부하전류의 계단과 입력에 대한 전원전류의 시간응답은

$$i_{sq} = (1 - e^{-K_1 t}) I_{Lq} \quad (t \geq 0) \quad (20)$$

그림 5는 본 시스템의 부하전류를 증가, 감소했을 경우에 대한 시뮬레이션 응답이다. 예상했던것처럼 1차지연응답을 얻을 수 있다.

< 비례적분 제어기 >

비례적분 제어기의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (21)$$

따라서 그림 4의 시스템에서 페루프 전달함수는 다음과 같이 요약된다.

$$G_1(s) = \frac{I_{sq}(s)}{I_{Lq}(s)} = \frac{K_1 s + K_2}{s^2 + K_1 s + K_2} \quad ( )$$

$$G_2(s) = \frac{W(s)}{I_{Lq}(s)} = -\frac{1}{aK_p} \frac{K_1 s}{s^2 + K_1 s + K_2} \quad (12)$$

단,

$$K_1 = \frac{3V_{sm}}{C} K_p \quad \text{and} \quad K_2 = \frac{3V_{sm}}{C} K_i \quad (13)$$

그림. 6 에서는 부하전류가 증가, 감소할 때 전원 전류와 직류측 양단 전압의 추이를 보면 비례적분 제어를 채용할 때에 시스템은 2차지연을 갖음을 확인할 수 있다.

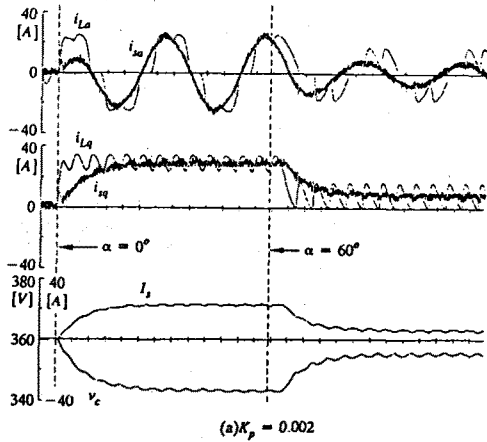


그림. 5. 비례 제어기의 과도 특성

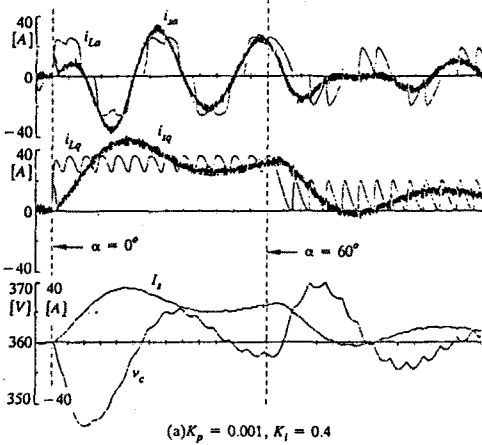
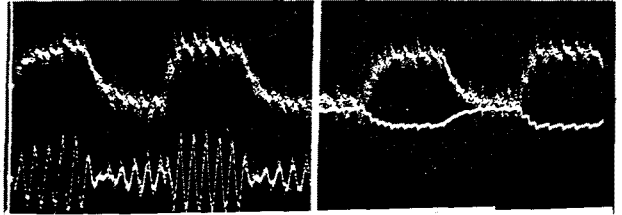


그림. 6. 비례적분 제어기의 과도 특성

실험 결과

그림. 7 은 부하전류가 그림 8(a)의 아래그림처럼 변동할 때 전압제어기의 출력  $I_s$  와 기준전류  $I_{sref}$  이며 (b)의 아래 그림은 커패시터의 전압 파형이다. 3상 제어정류기를 부하로 동작할 때 부하의 변동에 대한 시스템의 반응을 얻은 것이다. 그림 7.에서 부하가 증가 감소할 때 선형적인 제어의 특성을 관찰할 수 있다. 그림 8은 기준전류가 일정하도록 장치를 구성하였을 때 (a)는 전원전류(위) 부하전류의 변동 (b). 기준전류(위) 전원전류인데 전류제어가 잘됨을 볼 수 있다. 부하의 크기가 변동하는 과도상태에서도 필터로서의 역할을 잘 수행하고 있음



(a)  $I_s$ (위)  $I_{sref}$ (아래) (b)  $I_s$ (위)  $V_{dc}$

그림. 7 비례 제어기의 과도 특성

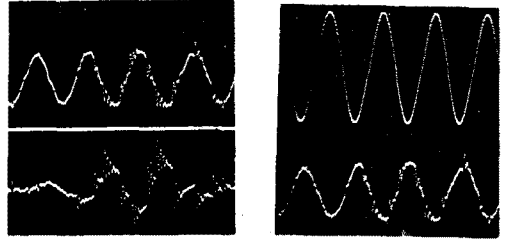


그림. 8. Isref 를 일정, 부하변동시의 비례 제어기의 전류추종특성

을 볼 수 있으며 이 결과로 컨버터를 선형적으로 모델화하여 제어할 수 있음이 증명되었다.

V 결론

이 논문에서 무효/고조파보상을 위한 간단한 제어방법이 제시되었다. 직류측 전압의 제곱(이것은 커패시터에 저장된 에너지에 비례한다.)을 사용하여 전반적인 시스템은 선형시스템으로 모델링되었다. 변수의 dq변환을 통해 단순화하여 q 축성분만 얻었고 그 단순화된 모델에 근거하여 시스템특성들에 분석적인 접근이 수행되었다. 비록 제한된 시스템은 정확히 전력을 계산하지 않지만 그 응답은 시뮬레이션 결과에서 보여주듯이 아주 잘 얻을 수 있었다. 실험을 통해 시스템을 선형제어할 수 있음을 보였다.

< References >

[1] G.H.Choe and M.H.Park, "A New Injection Method for ac Harmonic Elimination by Active Power Filter," 1985 IECON Conf. Rec, pp.666-671.  
 [2] F.Harashima, H.Inaba and K.Tsuboi, "A Closed Loop Control System for the Reduction of Reactive Power Required by Electronic Converters," IEEE Trans. on Industrial Electronic and Control Instruments vol. IECI-23, no. 2, pp.162-166, 1979  
 [3] Steeper and P.Stratford, Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power System Using Thyristor Converters," IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-12, no. 3, pp232-253, 1979.  
 [4] H.Akagi, Y.Kanajawa and A.Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components." IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-20, no. 3, pp.625-645, 1984  
 [5] H.Akagi, A.Nabae and S.Atoh, "Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-22, no. 3, pp.460-465, 1986.  
 [6] J.H.R.Enslin and J.D.Van Wyk, "A New Control Philosophy for Power Electronic Converters as Fictitious Power Compensators," IEEE PESC'88 Record, pp. 1188-1196. 1988.

- [7] I. Takahashi. "Analysis of Instantaneous Current and Power Using Space Switching Function," IEEE PESC'88 Record, pp. 42-49, 1988.
- [8] B. T. Ooi, J. C. Salmon, J. W. Dixon and A. B. Kulkarni. "A 3-Phase Controlled Current PWM Converter with Leading Power Factor," Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 1008-1014, 1985