

## AC 전원장치를 위한 대역 필터 특성의 전압조정장치 설계

김병진, 최재호  
충북대학교 전기공학과, 충북대학교 전기전자공학부

### Design of the Voltage Regulator of Band Pass Filter Characteristic for an AC Power Supply

Kim, Byoungjin, Choi, Jaeho  
Chungbuk National University

**Abstract** - This paper presents a voltage regulator for an AC power supply. It is designed to have the band pass filter characteristic for the system to be free from DC-offset or sub-frequency fluctuation in the output voltage wave.

#### 1. 서 론

UPS나 AVR등의 교류전원장치에서는 전기적 절연의 목적과 출력전압의 융통성을 위하여 변압기가 사용되는데, 변압기 코어의 자속 포화 혹은 편자전류 등이 발생하여 이로 인한 출력전압의 왜형, 혹은 저주파 진동 등이 야기된다. 이러한 원인은 시스템이 저역 필터의 특성을 가지고 있고 DC 오프셋이나 저차수 왜란이 존재하기 때문이다. 혹은 시스템이 기본 주파수 보다 낮은 고유진동수를 가지고 있을 수도 있다. 지금까지 제안된 대부분의 제어기들은 변압기를 고려하지 않거나 이상적인 변압기로 놓고 설계하였기 때문에 위에서 언급한 문제를 해결하기 위한 별도의 처리가 필요하였다.<sup>(1~4)</sup>

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 대역 필터(Band pass filter)의 특성을 가진 전압 조절기(VR: Voltage Regulator)를 제안한다. VR은 원하는 주파수대(60Hz)에서만 0[dB]의 크기와 0[°] 위상이 되게 하고 나머지 영역에서는 음의 크기 이득이 되게 하는 소위 좁은 대역 필터의 출력 특성을 갖게 하여 출력전압의 정상상태 오차 즉 DC 오프셋과 전압의 크기 및 주파수 등의 오차를 없앤다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 제어기와 플랜트

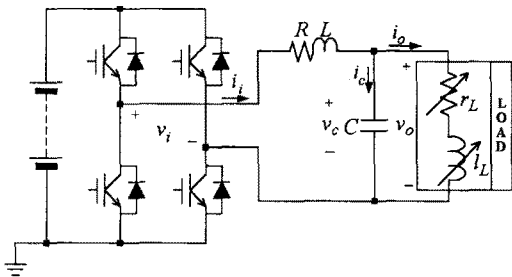


그림 1 AC전원장치를 위한 전압형 인버터.

그림 1은 AC전원장치를 위한 전압형 인버터의 회로도이다. 부하는 유도성 부하로 놓았다. 고려한 부하는 전압기나 전동류 같은 순수한 저항 부하, 모터 부하 그리고 정류기같은 비선형 부하들이다. 이러한 부하들은 전류의 기본파가 진상이 아니므로 유도성 부하로 놓을 수 있다. 표기를 소문자로 한 이유는 부하들은 늘 변하는 양이기 때문이다. 그림 2는 플랜트의 블럭도이다.

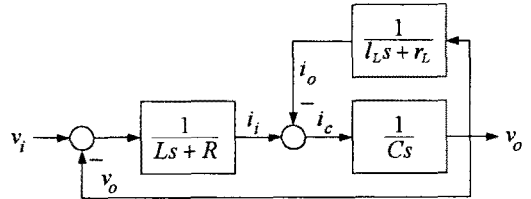


그림 2 플랜트 블럭도.

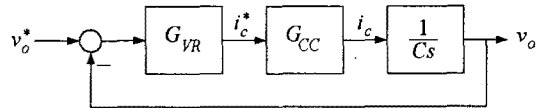


그림 3 제어 블럭도.

그림 3에 표현된 제어블럭도에서  $G_{VR}$ 은 제안하고자 하는 VR이고  $G_{CC}$  커패시터 전류 제어 루프이다.<sup>(5)</sup>

#### 2.2 Voltage Regulator의 설계

VR을 2차 시스템으로 놓고,

$$G_{VR} = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s^2 + as + b} \quad (1)$$

전체의 전달함수를 구하면,

$$\frac{v_o}{v_o^*} = \frac{(k_2 s^2 + k_1 s + k_0) G_{CC} \frac{1}{Cs}}{\left( (s^2 + as + b) + (k_2 s^2 + k_1 s + k_0) G_{CC} \frac{1}{Cs} \right)} \quad (2)$$

이 된다. 주파수가  $\omega_0$ 에서 전달함수가 1이 되기 위해서는 식 (2)에서 다음을 만족해야 한다.

$$(j\omega_0)^2 + aj\omega_0 + b = 0 \quad (3)$$

위의 식을 만족하는 제어기의 계수는

$$a = 0, \quad b = \omega_0^2 \quad (4)$$

이다. VR을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$G_{VR} = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s^2 + \omega_0^2} \quad (5)$$

$k_2, k_1, k_0$ 들은 식(3)의 조건을 만족시키는데 아무런 기여도 하지 못한다. 그것들은 시스템의 안정도를 확보하는데 사용된다.

##### 2.2.1 VR의 안정도 해석

내부의 전류제어루프가 제대로 동작된다고 하면 커패시터 전류는 그 기준치를 적당한 시간 안에 추종한다. 추종 시간(settling time)을  $\tau_i$ 라고 하면 전류제어루프는

$$G_{CC} = \frac{i_c}{i_c^*} = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (6)$$

이 될 수 있고, 전체 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{v_o}{v_o^*} = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (7)$$

여기서, 각 계수는

$$\begin{aligned} a_0 &= C \tau_i \\ a_1 &= C \\ a_2 &= C \tau_i \omega_0^2 + k_2 \\ a_3 &= C \omega_0^2 + k_1 \\ a_4 &= k_0 \end{aligned} \quad (8)$$

이다. 그리고 Routh의 안정조건을 만족하는 VR의 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k_0 &\geq 0 \\ k_1 &> -C \omega^2 \\ k_2 &> \tau_i k_1 \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.2.2 밴드-패스 필터 특성의 VR

다음의 특별하게 선택된 계인들은 Routh의 안정도 판별식을 만족한다.

$$\begin{aligned} k_0 &= 0 \\ k_1 &= 0 \\ k_2 &> 0 \end{aligned} \quad (10)$$

이 경우 시스템의 전달함수는

$$\frac{v_o}{v_o^*} = \frac{k_2 s^2}{s \left( C \tau_i s^3 + C s^2 + (C \tau_i \omega_0^2 + k_2) s + C \omega_0^2 \right)} \quad (11)$$

이다.

이 시스템은 대역통과 필터의 특성을 가지고 있다. 통과 주파수 대역은  $\omega_0$  부근이고 이 시스템의 계단 응답은 0에 수렴한다. 제안된 제어기의 계인은 다음의 몇가지 장점을 가지고 있다.

- 하나의 제어기 계인으로 구성된다. 제어기의 계인이 적을 수록 제어기를 동조시키기 쉽다.
- 출력전압의 DC오프셋이 없다. 밴드 패스 필터의 특성을 가지므로 고조파도 제거되지만, 기본파 보다 낮은 주파수로 인한 출력전압의 출력거림을 없앨 수 있고 DC의 오프셋이 제거된다.

$k_2$ 는 출력전압이 정상상태까지 걸리는 시간과, DC 오프셋을 제거하는데까지의 시간을 결정해 준다. 그 관계를 알아보기 위해 그림 4에 근 궤적도를 보였다.

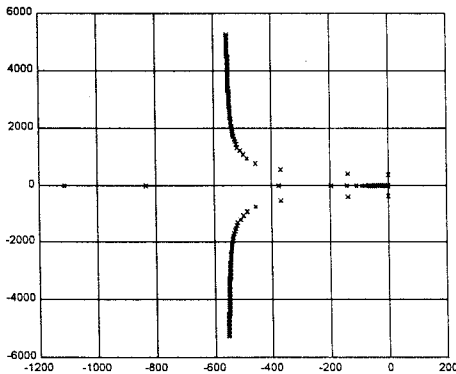


그림 4  $k_2$ 의 변화에 따른 시스템의 root locus.

극점이 총 4개 존재한다.  $x_1$ 은 실수축 음의 어떤값에서 원점으로 수렴하고  $x_2$ 와  $x_3$ 는 서로 켈레근으로 허수축에

서( $\omega = 377$ )  $-\infty$ 쪽으로 멀어진다.  $x_4$ 는 원점에 고정되어 있다. 그러므로  $k_2$ 가 클 수록 DC 오프셋을 제거하는데까지 걸리는 시간이 길고, AC성분의 회복시간이 짧아진다.

여기서 최적의  $k_2$ 를 찾아내기 위하여 근 배치법을 이용하였다. 원점에 존재하는 근은 영점과 상쇄되므로 고려하지 않고 하나의 실근과 두개의 복소근이  $x_1, x_2, x_3$ 라고 하자. 우선 근과 시스템 특성식의 계수와의 관계를 보면,

$$\left. \begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &= -\frac{1}{\tau_i} \\ x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_3 x_1 &= \omega_0^2 + \frac{k_2}{C \tau_i} \\ x_1 x_2 x_3 &= -\frac{\omega_0^2}{\tau_i} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

이 된다. 다음, 1개의 실근이 2개의 공액복소근의 실수부와 같은 값을 가지도록 근을 배치한다. 이러한 방법은 DC성분의 제거 시간과 AC성분의 회복시간을 같게 하므로 2개의 사양을 공평하게 대우하여 합리적이라 할 수 있다. 3개의 근은 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_{Re} \\ x_2 &= x_{Re} + j x_{Im} \\ x_3 &= x_{Re} - j x_{Im} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

위의 두 식으로부터  $k_2$ 는 다음과 같다.

$$k_2 = (3 x_{Re}^2 + x_{Im}^2 - \omega_0^2) C \tau_i \quad (14)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} x_{Re} &= -\frac{1}{3 \tau_i} \\ x_{Im} &= -\sqrt{\frac{\omega_0^2}{\tau_i} + x_{Re}^3} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

이다.

### 2.2.3 내부전류제어모델의 불일치

우리가 VR을 디자인할 때 내부의 전류제어루프를 식(6)과 같이 설정하였다. 그러나 실제의 전류제어루프는 이와 다르다. 그것은 식(9)나 식(10)을 보장하지 못한 다. 실제로 식(10)의  $k_2$ 는 어떤 축소된 범위 안에 존재하게 된다. 그러므로 대역필터의 특성과  $k_2$ 의 범위는 VR이 모델링한 내부 전류제어루프와 실제가 얼마나 유사한가에 따라 결정된다.

### 2.3.4 제안된 VR의 디지털화 구현

아날로그로 설계된 제어기를 디지털로 변환하는 간단한 방법중에 하나는 Tustin법을 이용하는 것이다. 제안된 VR은 s-도메인에서 다음과 같다.

$$G_{VR}(s) = \frac{k_2 s^2}{s^2 + \omega_0^2} \quad (16)$$

Tustin법을 적용하면, VR은 다음과 같다.

$$G_{VR}(z) = \frac{a_0 z^2 + a_1 z^1 + a_2}{\beta_0 z^2 + \beta_1 z^1 + \beta_2} \quad (17)$$

여기서

$$\begin{aligned} a_0 &= 4 k_2 \\ a_1 &= -8 k_2 \\ a_2 &= 4 k_2 \\ \beta_0 &= 4 + T_s^2 \omega_0^2 \\ \beta_1 &= 2 T_s^2 \omega_0^2 - 8 \\ \beta_2 &= 4 + T_s^2 \omega_0^2 \end{aligned}$$

이고  $T_s$ 는 샘플링 타임이다.

### Bode Diagrams

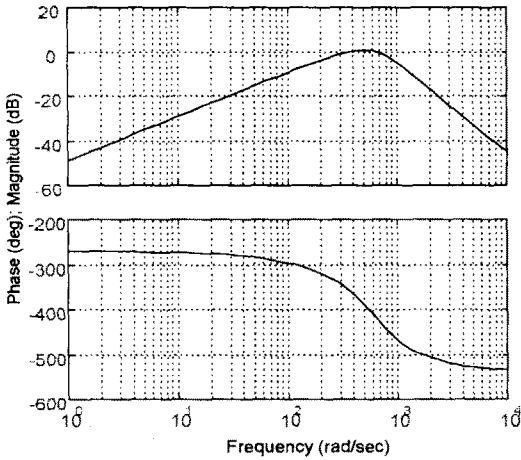


그림 5 제안된 VR의 보드 선도.

### Simulation of the Voltage Regulator

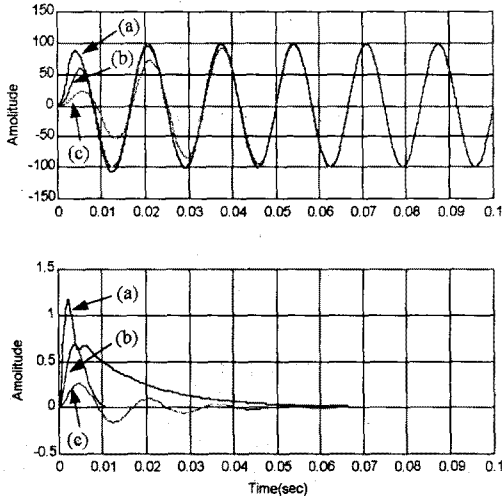


그림 6 제안된 VR의 아날로그 시뮬레이션 결과.

### Simulation of the Voltage Regulator

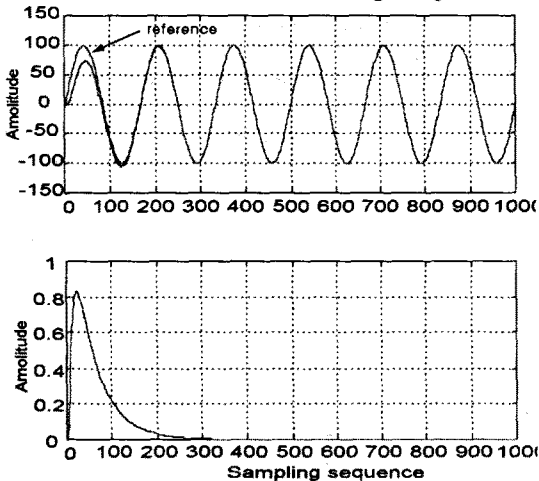


그림 7 제안된 VR의 디지털 시뮬레이션 결과.

### 2.3 시뮬레이션 및 결과

그림 5는 제안된 VR을 가진 시스템의 보드 선도이다. 여기서  $\tau_r$ 는 900( $\mu$ s),  $\omega_0$ 는 377(rad.sec),  $C$ 는 600( $\mu$ F)가 사용되었다.  $\omega$ 가 337 부근에서 통과 대역이 형성되었다.

그림 6은 그 경우의 아날로그 시뮬레이션 결과이다. 상부의 파형에서 시스템의 응답이 60(Hz)의 사인파 기준 신호를 잘 추종함을 볼 수 있다. 하부의 파형은 시스템의 스텝 응답이다. 모두 0에 수렴한다. 이것은 DC 오프셋이 소거됨을 의미한다. 여기서 (b)는  $k_2$ 가 제안된 방법에 의해 계산되었으며 (a)는  $k_2$ 가 그 값의 4배에 해당하는 값이고 (b)는  $k_2$ 가 그 값의 1/4배에 해당하는 값이다.  $k_2$ 의 값이 클 수록 AC 수렴속도는 빠르지만 DC 수렴속도는 늦다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 제안된 VR을 실제적인 내부전류제어루프 상태에서 디지털 시뮬레이션 실행한 결과이다. 이론적인 경우와 거의 동일한 결과가 나타났다.

### 3. 결론

본 논문에서는 대역 필터의 특성을 가지는 전압조절기를 제안하였다. 이는 AC 전원장치의 출력전압에 DC 오프셋을 없애고 크기 및 위상의 정상상태 오차를 없앴다. 그리고 절연변압기의 편자전류에서 기인하는 출력전압의 왜형이나 낮은 주파수의 출력거름을 없앨 수 있다.

### (참고 문헌)

- [1] M.Boost and P.D.Ziogas, "State of the Art Carrier PWM Techniques: a Critical Evaluation", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 24, no. 2, pp. 271-280, 1988
- [2] B.J.Kim, J.H.Choi, J.S.Kim, C.H.Choi, "Digital Control Scheme of UPS Inverter to Improve the Dynamic Response", in Conf. Rec. CCECE'96, pp. 318-321, 1996
- [3] 김병진, 최재호, "동특성 개선을 위한 UPS용 인버터의 전디지털화 이중제어기", 대한전기학회논문지, 46권 5호, pp705-712, 1997
- [4] 김병진 외7인, "낮은 THD를 가지는 3상 UPS용 인버터의 이중제어기법", 대한전기학회논문지, 47권 8호, pp. 1176-1182, 1998
- [5] 김병진, 최재호, "AC 전원장치의 출력 THD저감을 위한 반복제어기 설계", 99 학계 전력전자학술대회 논문집, 발간예정