

스위칭 레귤레이터의 안정성과 이득대역폭적과의 관계

김희준 이인환  
한양대학교 전기공학과

The Relationship Between Stability and Gain Band-Width Product in the Switching Regulator

H.J. KIM I.H. LEE  
Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.

Abstract

In this paper, the relationship between stability and gain band-width product (GB) is cleared by evaluating the feedback gain in the buck-boost switching regulator.

Especially, considering the effect of the right-half-plane pole on the stability, we found available region of GB on the stability with the one pole compensation for the feedback circuit.

2. 승강압형 회로의 안정성

그림 1은 승강압형 DC-DC 컨버터의 기본회로를 나타낸다. 회로 동작을 살펴보면 스위치 Q가 ON 상태일 때 입력부프에 전류가 흐르고 2권선 리액터의 1차 권선에 의해 에너지가 축적된다. 또한 다이오드 D는 리액터 2차측에 유기되는 역전압에 의해 OFF가 된다. 스위치 Q가 OFF 상태일 때 리액터에 축적되었던 에너지는 2차 권선 및 다이오드 D를 통해 출력측에 전달된다.

스위치의 각 상태에서 구한 회로 방정식은 상태 평균화법에 의하여 다음과 같은 평균화된 회로 방정식을 구할 수 있다.<sup>2,3)</sup>

$$\frac{d \hat{i}}{dt} = - \frac{r^*}{L} \hat{i} - \frac{D'}{L} \hat{V}_o + \frac{nD}{L} V_i \quad (1)$$

$$\frac{d \hat{V}_o}{dt} = \frac{D'}{C} \hat{i} - \frac{1}{RC} \hat{V}_o \quad (2)$$

여기서 식 (1), (2)에 나타나는 변수 및 정수들을 다음과 같이 정의한다.

- i : 평균 리액터 전류, Vo : 평균 출력 전압
- r1 : 스위치 ON 상태일 때 권선저항
- r2 : 스위치 OFF 상태일 때 권선저항
- D : 스위치의 ON 시비율, D' : 1 - D
- r\* = n<sup>2</sup> D r1 + D' r2

1. 서론

전자기기의 직류안정화전원으로 폭넓게 이용되고 있는 스위칭 레귤레이터의 안정성은 기기전체의 신뢰성을 높이는 데 있어서 가장 기본적인 중요한 문제 중의 하나이다. 스위칭 레귤레이터는 크게 직류변환장치인 DC-DC 컨버터와 출력전압을 안정화시키는 데 필요한 귀환제어회로의 두 부분으로 나눌 수 있으며 또한 DC-DC 컨버터는 입력전압과 출력전압의 승압비에 의하여, 강압형(Buck type), 승압형(Boost type) 및 승강압형(Buck-boost type)의 기본회로로 구분할 수 있다. 이들 기본회로들에 의한 스위칭 레귤레이터들 중에서 승압형 및 승강압형 회로로 구성되는 스위칭 레귤레이터는 DC-DC 컨버터의 회로구조상 전달함수에 나타나는 우반면의 극점에 의하여 안정성에 영향을 받는 회로로서 알려져 있다. 한편 귀환제어회로는 출력전압의 오차를 증폭하는 오차증폭기 및 비교기로 구성되며, 이때 오차증폭기로 사용되는 연산증폭기는 통상 1차 위상 지연 특성으로 가정되며 이 또한 레귤레이터의 안정성에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 비교적 소용량의 직류안정 전원으로써 폭넓게 이용되고 있는 승강압형 DC-DC 컨버터의 스위칭 레귤레이터 회로에 있어서, 우반면에 존재하는 극점이 안정성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 또한 아직 자세히 규명되고 있지 않은 오차증폭기의 이득대역폭적(GB적)과 안정성과의 관계를 귀환용 이득을 통하여 명확히 하였다. 특히 이 관계를 이용하여, 귀환제어회로에 극점보상을 행하였을 경우 안정성이 향상되는 유효한 범위를 구하였다.

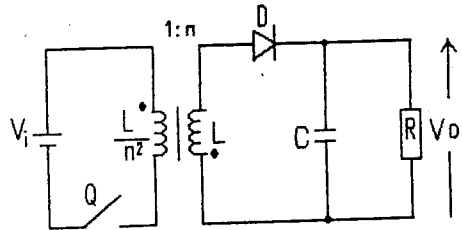


그림 1. 승강압형 컨버터의 기본회로  
Fig.1. Basic configuration of the buck-boost DC-DC converter

\* 본 연구는 1988년도 한국과학재단이 지원한 연구의 일부임.

한편 해석을 간단히 하기 위하여 스위치 Q 및 다이오드 D는 이상적인 소자로 가정한다. 동특성을 구하기 위하여 입력전압, 부하저항 및 시비율에 미소변형 등분을 고려하여 선형근사 및 라플라스 변환을 행하면 큰버터의 전달함수로서 다음식을 구할 수 있다."

$$G_c(s) = \frac{G_{co} (1 - s/W_c)}{P(s)} \quad (3)$$

$$G_f(s) = \frac{G_{fo}}{P(s)} \quad (4)$$

$$G_r(s) = \frac{G_{ro} (1 + s/W_r)}{P(s)} \quad (5)$$

여기서,

$$P(s) = 1 + \frac{2\delta}{W_o} s + \frac{1}{W_o^2} s^2$$

$$W_o^2 = \frac{D'^2 R + r^*}{L C R}, \quad \delta = \frac{L + r^* C R}{2 W_o L C R}$$

$$G_{co} = \frac{V_o [1 - (D/D')^2 n^2 r_1/R + r_2/R]}{D D' [1 + (r^*/D'^2 R)]}$$

$$W_c = D' G_{co} (D'^2 R + r^*) / (L V_o) \quad (6)$$

$$G_{fo} = \frac{n D R}{D' R + (r^*/D'^2)}$$

$$G_{ro} = \frac{r^* V_o}{(D'^2 R + r^*) R}, \quad W_r = \frac{r^*}{L}$$

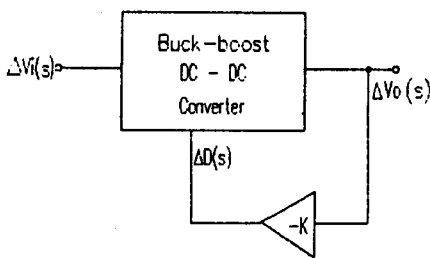
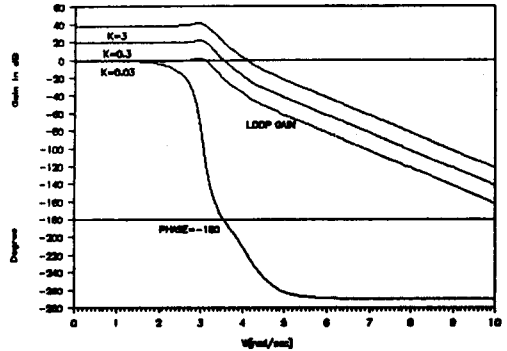


그림 2. 승강압형 스위칭 레귤레이터의 블록선도  
Fig. 2. The block diagram of the buck-boost switching regulator

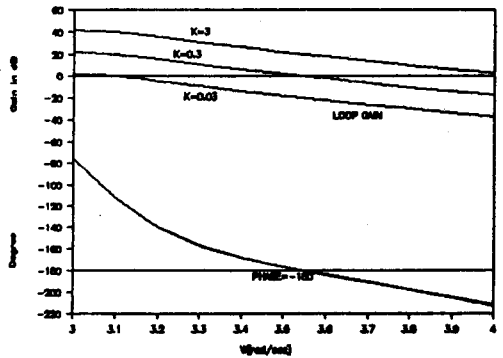
그림 2는 귀환제어회로를 고려한 승강압형 스위칭 레귤레이터의 블록선도를 나타낸다. 귀환이득 K를 가정했을 때 이 레귤레이터의 루프이득 T(s) 및 전달함수는 식 (3), (4) 및 그림 2로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T(s) = -K G_c(s) \quad (7)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{G_f(s)}{1 - T(s)} \quad (8)$$



(a)



(b)

그림 3. 루프이득의 주파수특성과 위상특성  
Fig. 3. The frequency response and phase characteristic of the loop gain

그림 3은 루프이득 T(s)의 주파수 및 위상특성을 나타낸다. 이 결과로부터 귀환이득 K가 커짐에 따라서 이 레귤레이터는 불안정하게 될 수 있으며 특히, 우반면의 극점 Wc에 의한 위상지연의 영향을 받고 있음을 알게 된다. 식 (8)로부터 특성방정식을 구하면 다음과 같이 된다.

$$1 - T(s) = 0 \quad (9)$$

이 식에 Routh-Hurwitz의 안정 판별법을 적용하여 안정과 불안정의 경계에서의 값 즉 Kc를 구하면 다음과 같다.

$$K_c = \frac{2\delta W_c}{W_o G_{co}} \quad (10)$$

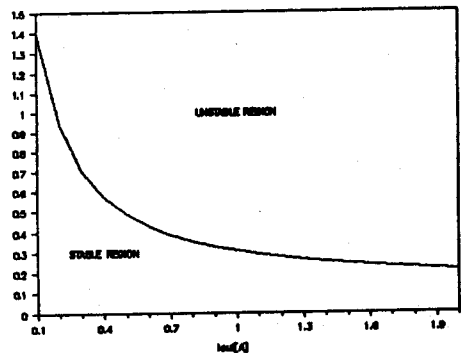


그림 4. 승강압형 스위칭 레귤레이터의 안정성  
Fig. 4. Stability of the buck-boost switching regulator

그림 4는 출력전류에 대한 Kc의 변화를 나타내고 있다. 곡선의 윗쪽은 불안정 영역, 아래쪽은 안정 영역을 나타내며 출력전류가 증가할수록 안정 영역이 좁아지고 있음을 알 수 있다.

3. 이득대역폭적과 안정성

그림 2의 귀환제어회로를 오차증폭기의 1차위상 지연을 고려하여 나타내면 그림 5와 같아진다. 따라서 이 그림으로부터 귀환이득 K(s)는 다음과 같이 구해진다.

$$K(s) = \frac{K}{1 + (1/W)S} \quad (11)$$

여기서,  $K = \frac{Afo}{P}$ ,  $Afo = \frac{R2}{R1}$

$W = \frac{2\pi GB}{Afo}$ , GB = 오차증폭기의 이득대역폭적

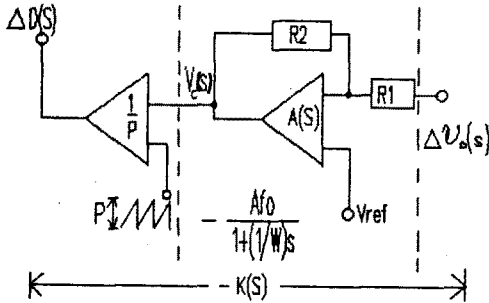


그림 5. 귀환회로 Fig.5. Feedback circuit

그림 2 및 그림 5로부터 루프이득을 구하면

$$T(s) = -K(s)Gc(s) \quad (12)$$

가 되고 특성방정식은

$$1 - T(s) = 1 + K(s)Gc(s) = 0 \quad (13)$$

으로 주어진다. 이득대역폭적(GB)과 안정성의 관계를 구하기 위하여 앞에서와 동일한 방법으로 식 (13)에 Routh-Hurwitz 판별법을 적용하면 다음과 같이 Kc에 관한 2차 방정식을 구할 수 있게 된다.

$$\left[ 2\delta W_0^3 \gamma^2 - Gc_0 \frac{2\delta W_0^3}{Wc} \gamma - Gc_0 W_0^2 \right] Kc^2 + \left[ 4\delta^2 W_0^2 \gamma - Gc_0 \frac{W_0^2}{Wc} \right] Kc + 2\delta W_0 = 0 \quad (14)$$

그림 6은 GB와 Kc의 관계를 나타내는 결과이며 1차위상지연을 고려하지 않았을 때의 결과도 함께 표시하고 있다. 이 결과로부터 GB가 작은 범위에서 안정범위가 좁아지고 있으며, GB가 약 1 MHz 이상인 범위에서는 1차위상지연을 고려하지 않았을 때와 거의 같아짐을 알 수 있게 된다. 따라서 승강압형 스위칭 레귤레이터의 안정성은 오차증폭기의 이득대역폭적(GB)가 큰 범위에서는, 전달함수의 우반면의 극점 Wc에 의해서, 또한 GB가 작은 범위에서는 바로 GB에 의해서 결정된다는 점을 알 수 있다.

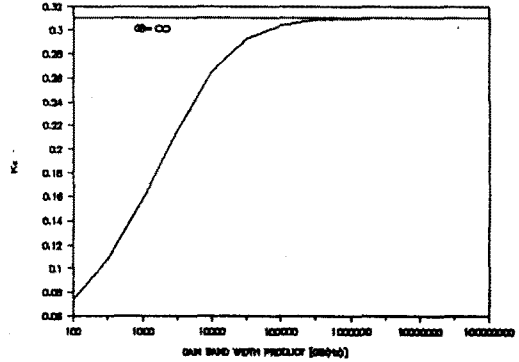


그림 6. 이득대역폭적(GB)과 안정성의 관계 Fig.6. Relationship between gain bandwidth product(GB) and stability

극점 보상을 통하여 안정성을 개선하기 위하여 오차증폭기에 그림 7과 같은 회로를 적용할 수 있으며 전달함수는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$A(s) = \frac{Vc(s)}{Vo(s)} = - \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + S C R2} \quad (15)$$

또 GB는

$$GB = \frac{1}{2\pi R1 C} \quad (16)$$

가 된다. 따라서 오차증폭기로 그림 7의 회로를 사용하였을 때 앞서의 방법으로 Kc를 구할 수 있으며, 이때 Kc와 GB의 관계를 구하면 그림 8과 같이 된다.

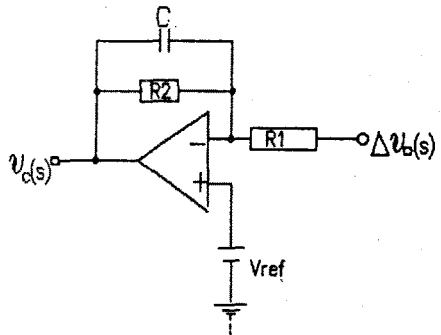
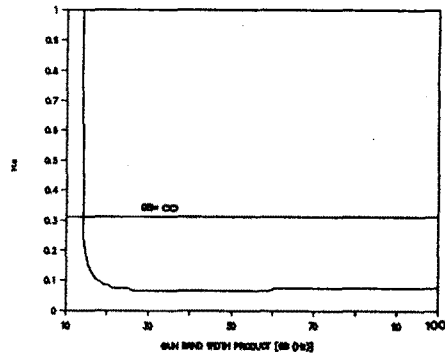
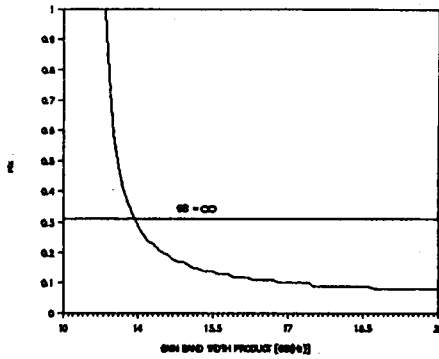


그림 7. 보상회로 Fig.7. Compensating circuit



a) GB : 10Hz ~ 100Hz



b) GB : 10Hz ~ 20Hz

그림 8. 보상회로에 의한 안정성  
Fig. 8. Stability by the compensating circuit

이 결과로부터 GB가 13.9 Hz이하의 영역에서, 1차 위상지연을 가정하지 않았을때보다 안정성이 향상되고 있음을 알 수가 있으며, 극점보상을 행할때 유효한 GB의 범위는 바로 이 영역이 됨이 명백해진다.

#### 4. 결론

이상의 결과로부터, 승강압형 스위칭 레귤레이터의 안전성은 오차증폭기의 이득대역폭적 (GB)가 큰 범위에서는, 전달함수의 우반면의 극점  $\omega_c$ 에 의해서, 또한 GB가 작은 범위에서는 바로 GB에 의해서 결정된다는 점을 알 수 있었다. 또한, 안정성을 향상시키기 위하여 귀환제어 회로에 극점보상을 행할때 유효한 GB의 범위를 명백히 하였다.

#### REFERENCES

- (1) H.J.Kim and K.Harada, " A high frequency switching and circuit configuration", JTC-CAS '87 Proceeding, pp.35-39 July 1987
- (2) R.D.Middlebrook and S.Cuk, " A general unified approach to modelling switching converter power stage ", IEEE PESC'76 Record, pp.18-34 June 1976
- (3) 김희준, " DC-DC 컨버터의 소형화와 안정성 ", 전기학회 논문지, pp.528-533 1988년 8월