

## PWM 스위치 모델을 이용한 PV용 Boost Converter Modelling

김효진<sup>\*</sup>, 이기욱<sup>\*</sup>, 최주엽<sup>\*</sup>, 정영석<sup>\*\*</sup>, 유권중<sup>\*\*</sup>, 권종덕<sup>\*\*</sup>  
 광운대학교 전기공학과<sup>\*</sup>, 한국 에너지기술연구원 태양광연구팀<sup>\*\*</sup>, (주) 지우전자<sup>\*\*\*</sup>

### Boost Converter Modeling of Photovoltaic System Using PWM Switch Model

H. J. Kim<sup>\*</sup>, K. O. Lee<sup>\*</sup>, J. Y. Choi<sup>\*</sup>, Y. S. Jung<sup>\*\*</sup>, G. J. Yu<sup>\*\*</sup>, J.D. Kwon<sup>\*\*</sup>

Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon Univ<sup>\*</sup>

Photovoltaic Generation Team, Korea Institute of Energy Research<sup>\*\*</sup>, Ji-Woo Electronics<sup>\*\*\*</sup>

**Abstract** - Photovoltaic systems normally use a maximum power point tracking (MPPT) technique to continuously deliver the highest possible power to the load when variations in the insolation and temperature occur. A simple method of tracking the maximum power points (MPPs) and forcing the boost converter system to operate close to these points is presented through deriving small-signal model and transfer function of boost converter. This paper aims at modeling boost converter including equivalent series resistance of input reservoir capacitor by state-space-averaging method and PWM switch model. In the future, properly designed controller for compensation will be constructed in real system for maximum photovoltaic power tracking control.

#### 1. 서론

화석 에너지의 고갈로 인한 대체에너지원으로 햇빛발전, 풍력발전 등의 대체에너지원 연구개발이 활발해지고 있다. 그 중 햇빛발전은 빛을 직접 받아 전기를 발생시키는 태양전지를 이용한 방식으로 자원의 양이 무한정이며, 공해가 없으며, 생산가격이 낮은 에너지라는 장점들이 있다.

햇빛발전시스템은 태양전지를 직병렬로 연결한 태양전지 어레이와 전력변환장치(Converter)[2], 직교류변환장치(Inverter), 전력저장용 축전지(Battery) 등의 주변장치로 구성되어 있다. 햇빛발전시스템은 계통연계 여부에 따라서 계통연계형과 독립형으로 분리되고 구조적으로는 DC/DC 컨버터의 유무로 나누지만 이 논문에서는 컨버터가 있는 방식을 확인하고자 한다.

햇빛발전시스템에서의 주요 관련기술로서는 태양전지로부터 최대전력을 얻기 위한 제어 알고리즘과 계통 보호의 기능으로써 단독운전점출 기법의 알고리즘이 있고 전원품질 향상을 위한 능동전력필터가 있는데 특히 이는 급격한 기율을 갖는 고조파전류를 보상하는 전류를 출력할 수 있도록 직류단 전압을 충분히 높이기 위해서 태양전지를 여러개 연결하는 방법이 있으나 효율적인 면에서 낭비를 초래하므로 승압을 위한 Boost DC/DC 컨버터를 사용하

는 것이며 컨버터의 직류측 전압을 충분히 높은 전압을 유지하기 위한 컨버터의 출력측 전압을 일정하다고 놓았을 때 입력전압의 변동을 PWM[3],[4] 모델링과 상태평준화 방법[5]을 이용하여 어떠한 차이점이 있는지 고찰하고자 한다.

#### 2. 시스템의 구성 및 해석

계통연계형 햇빛발전시스템은 태양전지로부터 최대 전력을 얻기 위해 MPPT 알고리즘을 적용하는 DC/DC Converter와 양방향의 AC/DC Converter 및 태양전지로 구성되며 본 장에서는 햇빛발전시스템의 일부분인 DC/DC 컨버터의 내부저항을 고려한 해석을 하였다.

##### 2.1 이상적인 DC/DC Boost Converter

그림 1은 전체 시스템을 나타낸 그림이다

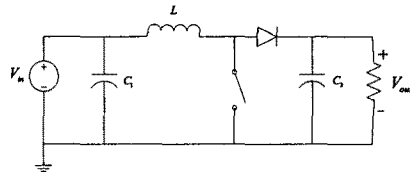


그림 1. 전체 시스템의 이상적 등가회로

위의 회로는 정상상태의 일반적인 Boost Converter에서 Inverter부 및 계통을 저항으로 등가화하였고 일정한 입력에 관하여 출력단 전압의 변동으로 나타나는 회로이다.

##### 2.2 구현하고자 하는 DC/DC Converter

그림 2는 구현하고자 하는 시스템의 이상적인 그림이다.

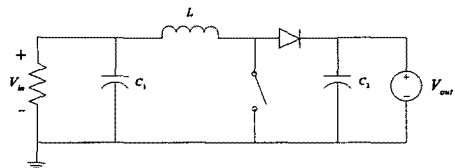


그림 2. 구현하고자 하는 이상적인 시스템회로

그림 2는 그림 1과 같은 시스템이나 그림 1은 일정한

전압원이 주어졌을 때 출력전압원을 제어하는 반면에 그림 2는 출력 전압을 일정하다고 놓았을 때에 MPPT[5] 추종에 따라 입력전압원이 어떻게 변하는 가를 나타내는 이상적인 회로이다. 그림 3은 그림 2의 회로에 기생 저항을 포함시킨 것이다.

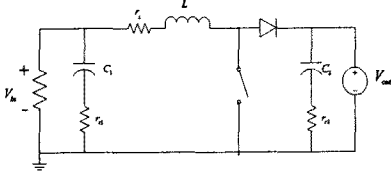


그림 3. 기생저항을 포함한 시스템 회로

그림 3은 커패시터에 포함되어 있는 기생 저항분까지 포함한 그림을 나타내고 있다.

### 3. 모델링 이론

위에서 보여진 회로들을 모델링하여  $\bar{v}_o/\bar{d}(s)$ 의  $\bar{v}_o$ 과  $\bar{d}$ 는 각각의 정상상태 직류동작값  $V_o$ 와  $D$ 를 중심으로 한 출력 전압  $v_o$ 와 스위치 듀티비  $d$ 의 미소 외란을 표시한다.  $\bar{v}_o/\bar{d}(s)$  전달함수를 구하는 방법에는 여러 가지들이 있으나 여기서는 상태평균화 방법과 PWM 방법을 사용하려고 한다. 이에 상태평균화 방법과 PWM 방법에 대하여 간략하게 설명하였다.[2],[3]

#### 3.1 상태평균화 기법

상태 평균화 방법은 구하고자 하는 회로를 연속 도통 모드에서 동작하는 변환기만으로 설명하는 방법이며 다음과 같은 순서를 따라야 한다. [2]

**step 1. 각 회로 상태에 대한 상태 변수를 기술한다.** 연속 도통 모드에서 동작하는 변환기에는 스위치가 on 상태일 때, off 상태 두 가지 상태가 존재한다. 각 회로 상태에서 선형 회로는 인덕터 전류와 커패시터 전압으로 구성된 상태 벡터  $x$ 로 기술하며 회로기술에 있어서 인덕터 저항과 커패시터 저항 등과 같은 기생 성분들이 존재한다.

$x = X + \bar{x}$  와 같이 직류분 값과 미소교류외란을 합한 변수를 포함한다. 따라서 각각의 회로에서 다음과 같이

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_1x + B_1v_d; & d \cdot T, \text{ 일 때,} \\ \dot{x} &= A_2x + B_2v_d; & (1-d) \cdot T, \text{ 이며} \end{aligned}$$

여기서  $A_1$ 과  $A_2$ 는 상태 행렬이며  $B_1$ 과  $B_2$ 는 벡터이다.

모든 변환기의 출력  $v_o$ 는 다음과 같이 하나로만 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} v_o &= C_1x; & d \cdot T, \text{ 일 때} \\ v_o &= C_2x; & (1-d) \cdot T, \text{ 로} \end{aligned}$$

나타내어 줄 수 있으며  $C_1$ 과  $C_2$ 는 전치 벡터이다.

**step 2. 듀티비를 이용한 상태 평균화를 기술한다.** 스위칭 주기에 대한 회로의 평균화를 하기 위해서 스위치가 on 되어 있을 때와 off 되어 있을 때를 서로 더해주면 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\dot{x} = [A_1d + A_2(1-d)]x + [B_1d + B_2(1-d)]v_d \quad (1)$$

$$v_o = [C_1d + C_2(1-d)]x \quad (2)$$

으로 나타내게 된다.

**step 3. 미소 교류 외란을 나타내고 교류 성분과 직류 성분을 분리해 낸다.** “~”로 표시되는 미소 교류 외란은 직류 정상 상태의 직류량에 포함된다. 따라서 다음과 같이 나타내어 줄 수 있다.

$$x = X + \bar{x} \quad (3)$$

$$v_o = V_o + \bar{v}_o \quad (4)$$

$$d = D + \bar{d} \quad (5)$$

일반적으로 입력전압에서  $\bar{v}_o = 0$  이라 하면  $v_d = V_d$ 가 된다. 정상 상태에서  $\dot{x} = 0$  이므로

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{v}_d + A\bar{x} + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_d]\bar{d} \quad (6)$$

로 나타내어 주며 미소교류외란 “~”이 서로 붙어 있는 것들은 무시되어 지므로  $\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_d]\bar{d}$  이다.

식 (3) ~ (5)를 이용하면

$$V_o + \bar{v}_o = CX + C\bar{x} + [(C_1 + C_2)X]\bar{d} \quad (7)$$

$$C = C_1D + C_2(1-d) \quad (8)$$

이다 (7)번 식에 의해서 정상상태의 출력전압은

$$V_o = CX \text{ 이며} \quad (9)$$

$$\bar{v}_o = C\bar{x} + [(C_1 - C_2)X]\bar{d} \quad (10)$$

**step 4 전달함수의 해를 구하기 위해서 s - 영역으로의 교류 방정식 변환을 한다.**

식 (10)은 교류 외란으로 구성되므로 (6) 식에서 라플라스 변환을 이용하면

$$s\bar{x}(s) = A\bar{x}(s) + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_d]\bar{d}(s) \quad (11)$$

$$\bar{x}(s) = [sI - A]^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_d]\bar{d}(s) \quad (12)$$

이다. 여기서 I는 단위 행렬이다. 위의 (10) 식에 (12)식을 대입하여 준 후에  $\bar{d}(s)$ 항으로  $\bar{x}(s)$ 를 표현하는 전원단의 전달함수는

$$\bar{v}_o(s)/\bar{d}(s) = C[sI - A]^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_d] + (C_1 - C_2)X \quad (13)$$

으로 유도된다.

#### 3.2 PWM Switch Model

PWM switch model 방법은 스위치가 on, off 하는 비율 ratio로 하는 일정한 transformer로 생각하여 해석하는 방법이다. 스위치는 그림 4와 같이 나타내어 줄 수 있다.[3]

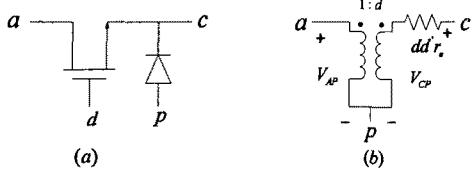


그림 4.(a)액티브 패시브 스위치(b) PWM 스위치

그림 4 (a)에서 보는 것과 같이 액티브 패시브 스위치가  $d$ (duty)에 의하여 나타낼 수 있는 것을 (b)에서 보는 것과 같이  $1:d$ 의 비의 transformer는 액티브 터미널  $a$ 와 패시브 터미널  $p$ , 커먼 터미널  $c$ ,  $c$ 와  $p$  사이의 저항  $dd' r_e$ 는  $a$ 와  $p$ 사이의 무한 주파수에서 생기는 저항값을 나타낸다. 그림 4의 (b)와 같은 스위치 모델을 사용하여 Buck Converter, Boost Converter, Buck-Boost Converter를 모델링할 수 있다.

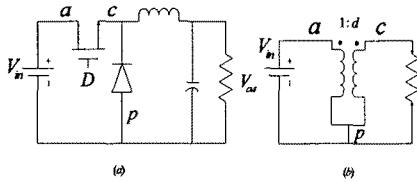


그림 5 Buck Converter

- (a)일반 스위치를 사용한 회로도
- (b)PWM 스위치를 사용한 회로도

그림 5는 Buck Converter를 reactive 소자를 제외한 후에 PWM 스위치로 모델링한 그림이다. 그림 6은 Boost Converter를 PWM 스위치를 이용하여 간략하게 나타내 준 회로이다.

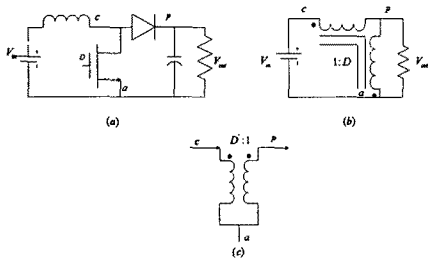


그림 6 Boost Converter (a)일반스위치를 사용한 회로도 (b)PWM 스위치를 사용한 회로도 (c)PWM transformer의 duty와 전류의 방향

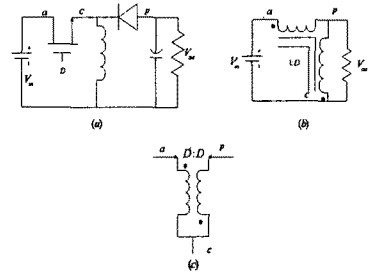


그림 7 Buck-Boost Converter

- (a)일반 스위치를 사용한 회로도
- (b)PWM 스위치를 사용한 회로도
- (c)PWM transformer의 duty 와 전류의 방향

Buck Converter에서는 그림 4(b)의 스위치를 그대로 쓸 수 있지만 Boost Converter나 Buck-Boost Converter에서는 그림 4(b)의 스위치를 그대로 쓸 수가 없다. 그 이유는 Buck Converter는 common terminal이 P인 반면에 Boost, Buck-Boost converter의 common terminal이 p가 아니기 때문에 그림 4(b)와 같이 쓸 수 없고 그림 6과 7처럼 적절하게 변형시켜 주어야만 모델링이 가능하다. 여기서  $D$ 는 한 주기 중에 스위치가 on이 되어 있는 상태이며  $D'$ 는 스위치가 off 되어 있는 동안을 나타낸다. 위의 PWM 모델을 이용하여 DC 해석이나 AC 해석 모두를 좀 더 간단히 해 줄 수가 있다.

#### 4. 상태 평균화 기법을 이용한 Boost Converter Modeling

##### 4.1 이상적인 Boost Converter Modeling

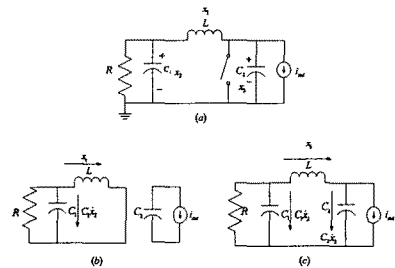


그림 8 이상적인 Boost-Converter

- (a) 일반적인 회로도 (b) 스위치가 on 상태일 때 회로도 (c) 스위치가 off 상태일 때 회로도

3.1절에서 언급한 상태 평균화 방법 순서를 이용하여 문제를 해결해 주면 그림 8(b)에서 스위치가 on이 되었을 때의 시스템 함수  $R(x_1 + C_1 \dot{x}_2) = x_2, x_2 = L \dot{x}_1, C_2 \dot{x}_3 = i_{out}$ 의 식에서 다음과 같은 행렬을 만들어 줄 수가 있다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1/L & 0 \\ -1/C_1 & 1/RC_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/C_2 \end{pmatrix}$$

$$C_1 = (0 \ 1 \ 0)$$

가 된다.

그림 8(c)에서와 같이 스위치가 off되었을 시에  $R(x_1 + C_1 \dot{x}_2) = x_2$ ,  $x_2 - L\dot{x}_1 - x_3 = 0$ ,  $x_1 = i_{out} + C_2 \dot{x}_3$  로 하여 행렬식으로 나타내면 아래와 같다.

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1/L & -1/L \\ -1/C_1 & 1/RC_1 & 0 \\ 1/C_2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/C_2 \end{pmatrix}$$

$$C_2 = (0 \ 1 \ 0)$$

위의 두 부분의 행렬로

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1/L & -(1-D)/L \\ -1/C_1 & 1/RC_1 & 0 \\ (1-D)/C_2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/C_2 \end{pmatrix}$$

$$C = (0 \ 1 \ 0)$$

로 나타내어 줄 수 있고 식 (13)에 대입하여 주면

$$[sI - A]^{-1} =$$

$$\frac{1}{\det} \begin{pmatrix} s^2 + \frac{s}{RC_1} & \frac{s}{L} & -\frac{(1-D)s + (1-D)}{RC_1 L} \\ -\frac{s}{C} & s^2 + \frac{(1-D)^2}{C_2 L} & -\frac{(1-D)}{C_2 L} \\ -\frac{(1-D)s + (1-D)}{C_2} & -\frac{(1-D)}{C_2 L} & s^2 - \frac{s}{RC_1} + \frac{1}{LC_1} \end{pmatrix}$$

과 같은 행렬식으로 나타나게 되며 나머지 행렬들을 식 (13)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\bar{v}(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{RC_1(1-D)x_3s + R(1-D)x_1}{RLC_1C_2s^3 - LC_2s^2 + (RC_1(1-D)^2 + RC_2)s - (1-D)^2}$$

#### 4.2 이상적인 Boost Converter의 Bode Plot

Boost Converter의 주파수 응답특성을 그리기 위하여  $I_{out}$ ,  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$  의 세 가지 성분으로 나타낼 수 있고 소자의 값은  $D = 0.5$ ,  $C_1 = 2,400\mu F$ ,  $C_2 = 500\mu FL = 2mH$ ,  $R = 0.0005 \Omega$  으로 계산하였으며 이 값은 (주)삼화 전기의 RX Series의 값을 이용하였다.

4.1절의 전달함수에 대한 bode plot은 다음과 같다.

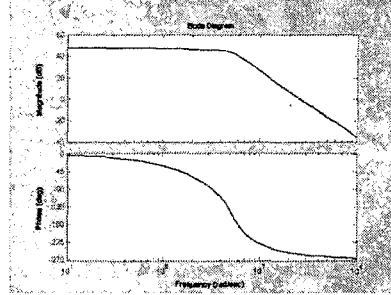


그림 9. 상태 평균화 방법을 이용한 이상적인 Boost Converter의 Bode Plot

#### 4.3 기생저항을 삽입한 Boost Converter Modeling

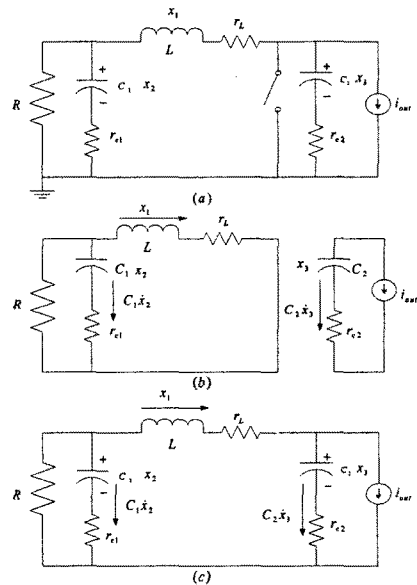


그림 10. 기생저항을 삽입한 Boost Converter (a) 일반적인 회로도 (b) 스위치가 on 되었을 때의 회로도 (c) 스위치가 off 되었을 때의 회로도

기생저항을 포함한 Boost Converter에서도 상태 평균화 방법을 이용하는 방법은 동일하다. 그림 10(b)에서 각 변수에 대한 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(X_1 + C_1 \dot{x}_2) &= x_2 + C_1 \dot{x}_2 r_d \\ x_2 + C_1 \dot{x}_2 r_d &= L\dot{x}_1 + x_1 r_L \\ C_2 \dot{x}_3 &= -i_{out} \end{aligned}$$

으로 나타나며 행렬로 나타내면,

$$A_1 = \begin{pmatrix} \frac{-Rr_L + r_L r_d - Rr_d}{L(R - r_d)} & \frac{R}{L(R - r_d)} & 0 \\ \frac{-R}{(R - r_d)C_1} & \frac{1}{(R - r_d)C_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{C_2} \end{pmatrix} i_{out}$$

$$C_1 = (-r_{cl} \ 1 \ 0)$$

으로 나타내어 줄 수 있으며 그림 10(c) 스위치가 off 되어 있는 상태에서는

$$R(x_1 + C_1 \dot{x}_2) = x_2 + c_1 \dot{x}_2 r_{cl}$$

$$x_2 + c_1 \dot{x}_2 r_{cl} = L \dot{x}_1 + r_l x_1 + x_3 + c_2 \dot{x}_3 r_{cl}$$

$$x_1 - i_{out} = c_2 \dot{x}_3$$

으로 나타내어 줄 수 있다.

행렬

$$A_2 = \begin{pmatrix} \frac{-Rr_l - Rr_{cl} + r_{cl}r_{cl} + r_{cl}r_l - Rr_{cl}}{L(R-r_{cl})} & \frac{R}{L(R-r_{cl})} & -\frac{1}{L} \\ \frac{-R}{C_1(R-r_{cl})} & \frac{1}{C_1(R-r_{cl})} & 0 \\ \frac{1}{C_2} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} \frac{r_{cl}}{L} \\ 0 \\ -\frac{1}{C_2} \end{pmatrix}, \quad C_2 = (-r_{cl} \ 1 \ 0) \text{ 이 되어진다.}$$

위의 행렬들을 수식 (13)에 대입하여 정리하면

$$\frac{\tilde{v}_i(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{as^2 + bs + c}{ds^3 + es^2 + fs + g} \text{ 이고,}$$

$$a = \frac{-r_l r_{cl} r_{cl} - r_{cl}^2 r_l}{L(R-r_{cl})} x_1 + \frac{r_{cl}}{L} x_3 - \frac{r_{cl} r_{cl}}{L} i_{out}$$

$$b = \frac{r_l r_{cl} r_{cl} + r_{cl}^2 r_l}{LC_1(R-r_{cl})^2} x_1 - \frac{r_{cl} x_3}{LC_1(R-r_{cl})} + \frac{r_{cl} r_{cl}}{LC_1(R-r_{cl})} i_{out} \\ + \frac{-r_{cl}(1-D)}{LC_1(R-r_{cl})} x_1 - \frac{Rr_l r_{cl} + Rr_l r_{cl}}{LC_1(R-r_{cl})^2} x_1 + \frac{r_{cl}}{LC_1(R-r_{cl})} i_{out} \\ + \frac{Rr_l}{LC_1(R-r_{cl})}$$

$$c = \frac{r_{cl}(1-D)x_1 - (1-D)Rr_l}{LC_1 C_2 (R-r_{cl})}$$

$$d = 1$$

$$e = \frac{Rr_l - r_{cl}r_l + Rr_{cl} + DRr_{cl} + Dr_{cl}r_{cl}}{L(R-r_{cl})} - \frac{1}{C_1(R-r_{cl})^2}$$

$$f = \frac{Rr_l - r_l r_{cl} + Rr_{cl} + DRr_{cl} + Dr_{cl}r_{cl}}{LC_1(R-r_{cl})^2} + \frac{(1-D)^2}{LC_2} + \frac{R^2}{LC_1(R-r_{cl})^2}$$

$$g = -\frac{(1-D)^2}{LC_1 C_2 (R-r_{cl})}$$

의 계수를 갖는  $\frac{2차}{3차}$ 의 전달함수의 꼴로 나타나게 된다.

#### 4.4 기생저항을 삽입한 Boost Converter의 Bode Plot

4.3절의 전달함수에 다음과 같은 소자 값을 대입하여 Bode Plot을 그려보았다.

$$D=0.6, \quad C_1=2,400\mu F, \quad r_{cl}=0.07 \ \Omega, \quad C_2=500\mu F$$

$$r_{cl}=0.2 \ \Omega, \quad L=2mH, \quad r_l=0.05 \ \Omega, \quad R=1 \ \Omega$$

$i_{out}=30A, \quad I_L=10A, \quad V_{cl}=247V, \quad V_{cl}=300V$ 의 값을 대입하여 Bode Plot을 그리면 다음과 같다.

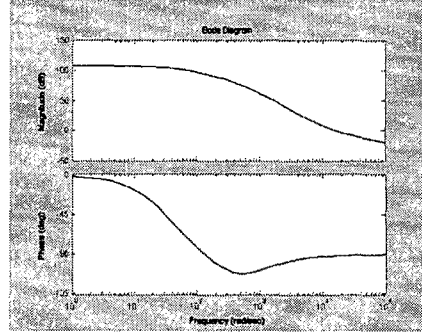


그림 11. 상태 평균화 방법을 이용한 기생저항을 고려한 Boost Converter Bode Plot

#### 5. PWM Modeling을 이용한 Boost Converter의 해석

##### 5.1 이상적인 Boost Converter Modeling

3-2절에서 일반 스위치를 PWM 스위치로 변형시킬 수 있음을 밝혔다. 일반적인 Boost 회로를 PWM 스위치로 바꾸어 주면 그림 12와 같다.

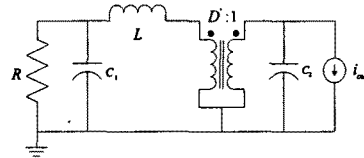


그림 12. PWM 스위치를 이용한 Boost Converter 회로도

여기서 구하고자 하는 부분은 소신호모델링 부분이므로  $I_{out}$  부분은 0으로 놓고 보아도 무관하다. 소신호 모델링에 필요한 스위치의 소신호 전류에 대해 다시 그려주면 그림 13과 같이 나타내어 줄 수 있다

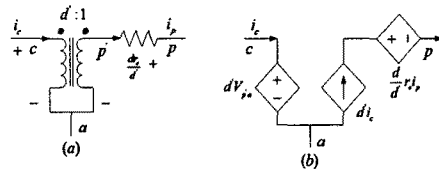


그림 13. 소신호 전류에 대한 PWM 스위치 변환

정상 상태에서  $x = X + \hat{x} \approx X$ 는 dc 값에 해당되고 소신호에서는  $d + d' = \hat{d} + \hat{d}' = 0 \Rightarrow \hat{d}' = -\hat{d}$ 로 나타내어 줄 수 있다. 이 식으로 그림 13(b)의 스위치를 그림 14와 같이 나타내어 줄 수 있다.

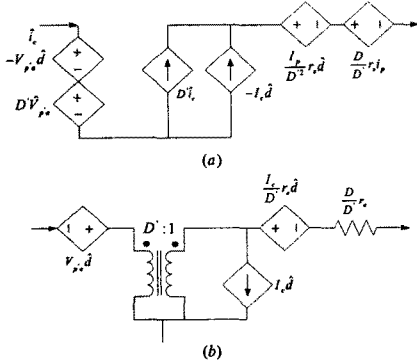


그림 14. PWM 스위치의 소신호 모델 변환

그림 14(b)에서 위의 스위치는 PWM Transformer와 같으므로 중속 전압원을 2차측으로 옮겨서 하나의 전압원으로 만들어 주고 2차 측에 있는 소자들을 1차 측으로 옮기면 2차 측에는 소신호 전류와 전압원만 그림 15와 같이 변환할 수 있다.

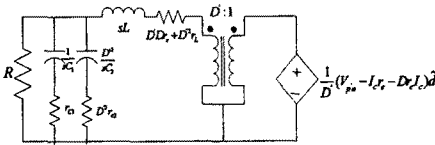


그림 15. PWM 소신호모델링 회로도

2차 측의 전압원을 1차측으로 옮겨 전압 분배 법칙을 이

용하면 구하고자 하는  $\frac{\hat{v}_i(s)}{\hat{d}(s)}$  를 구할 수 있다. 결과식은

$$\frac{\hat{v}_i}{\hat{d}} = \frac{a}{bs^2 + cs + d} \text{의 형태로 나타나게 된다.}$$

$$a = D^2 R * (V_{gs} - I_c r_c - D r_s I_L)$$

$$b = D^2 R L (C_1 + C_2)$$

$$c = D^2 (L + D' D R C_1 r_c + d' D R C_2 r_c)$$

$$d = D^2 (R + D' D r_s)$$

### 5.2 이상적인 Boost Converter 의 Bode Plot

5.1절의 전달함수에 위에 4.3절에 열거된 소자의 값들을 대입시켜 Bode Plot을 그리면 다음과 같다.

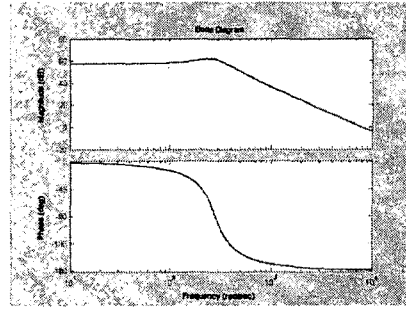


그림 16 PWM 스위치를 이용한 Boost Converter Bode Plot

### 5.3 PWM Switch를 이용하여 기생저항이 포함된 Boost Converter의 소신호 모델링

PWM 스위치를 이용하여 기생저항을 포함하는 Boost Converter의 소신호 모델링하는 방법도 5.1절에서 설명했던 방법대로 하면 그림 17과 같은 그림이 된다.

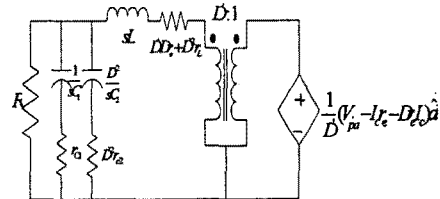


그림 17. PWM 스위칭을 이용한 기생저항을 포함한 Boost Converter

2차측의 전압원을 1차 측으로 옮긴 후에 전압분배법칙을

이용하여  $\frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)}$  를 구하면 다음의 형태로 나타낸다.

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{as^2 + bs + c}{ds^2 + es^2 + fs + g} * (V_{gs} - I_c r_c - D r_s I_L) \quad (14)$$

$$a = RC_1 C_2 r_{c1} r_{c2}$$

$$b = RC_1 r_{c1} + RC_2 r_{c2}$$

$$c = R$$

$$d = LC_1 C_2 r_{c1} r_{c2} + RLC_1 C_2 r_{c2} + RLC_1 C_2 r_{c1}$$

$$e = LC_1 r_{c1} + LC_2 r_{c2} + RLC_1 + RLC_2 + D' D r_s C_1 C_2 r_{c1} r_{c2}$$

$$+ D' D r_s R C_1 C_2 r_{c2} + D' D r_s R C_2 r_{c1}$$

$$f = L + D' D r_s C_1 r_{c1} + D' D r_s C_2 r_{c2} + D' D r_s R C_1 + D' D r_s R C_2$$

$$g = D' D r_s$$

### 5.4 PWM Switch를 이용한 Boost Converter의 Bode Plot

식 (14)에 위 4.3절에 열거된 소자의 값들을 대입시켜 bode plot을 그리면 다음과 같다.

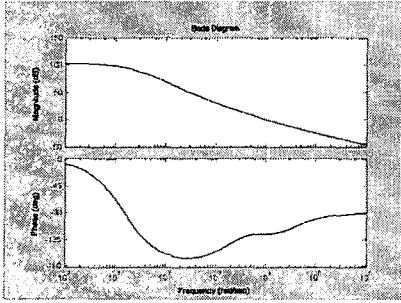


그림 18 PWM 스위칭을 이용한 기생 저항을 포함한 Boost Converter Bode Plot

### 6. Type 2 제어기 추가

위에 제시되어 있는 시스템의 Bode Plot을 보면 Phase margin 과 Gain margin을 보았을 때 그대로 시스템을 사용할 수 있지만 좀 더 안정성을 갖기 위해서 제어기를 넣어 Phase margin과 Gain margin을 증가시킬 수 있다. 제어기의 형태는 그림 19와 같이 만들어 줄 수 있다.

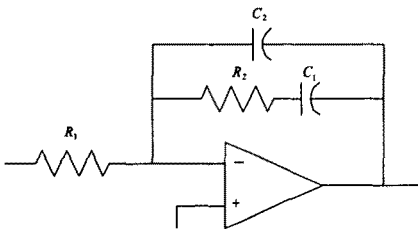


그림 19. Boost Converter에 들어갈 제어기

제어기의 전달함수  $T_c(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_c(s) = \frac{s + \omega_z}{s(s + \omega_p)}, \quad \omega_z = \frac{1}{R_2 C_1}, \quad \omega_p = \frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2}$$

로 계산하여 만들어 줄 수 있다.  $\omega_z = \frac{\omega_{cross}}{K}$ ,  $\omega_p = K\omega_{cross}$ 이며  $K = \tan(45^\circ + \frac{boost}{2})$ 로 대입하면 된다. 위와 같은 식으로 보상된 Boost Converter의 모델링 방법별 보상된 Bode Plot은 다음과 같다.

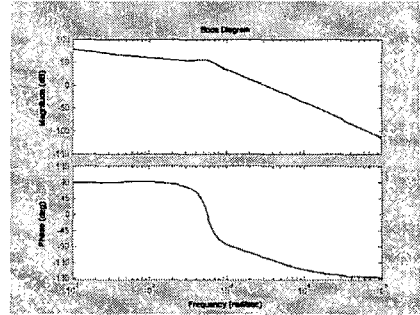


그림 20. 상태 평균화 방법을 이용한 이상적인 Boost Converter의 Phase를 보상한 Bode Plot

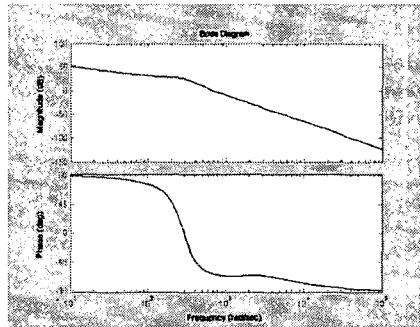


그림 21. PWM 스위칭을 이용한 이상적인 Boost Converter의 Phase 보상을 한 Bode Plot

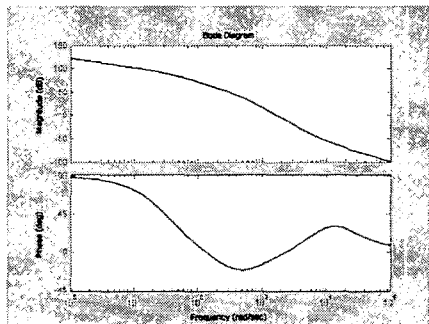


그림 22. 상태 평균화 방정식을 이용한 기생 저항을 포함한 Boost Converter Phase를 보상한 Bode Plot

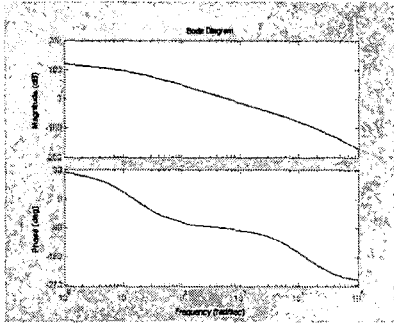


그림 23 PWM 기생저항을 포함한 Boost Converter의 Phase를 보상한 Bode Plot

## 7. 결 론

이 논문에서는 햇빛발전을 하기 위해 필요한 Boost DC/DC Converter에 대하여 상태평균화 방식과 PWM 모델링 방식을 이용하여 일정한 출력전압을 갖을 때 MPPT 추종에 의해 입력전압이 어떻게 변화하는지에 대하여 고찰하였다.

앞에서도 언급 되었지만 상태 평균화 방정식을 이용하면 그 과정에 있어서 복잡한 수식들을 전개하여야 한다. 하지만 PWM 모델링 방식을 사용하면 간단한 transformer 이론만을 알고 있다면 쉽게 시스템에 대한 전달함수를 구할 수 있다.

또한 상태평균화 방식과 PWM 방식의 전달함수의 Bode Plot에서 보았듯이 시스템 응답이 크게 다르지 않다는 것을 보임으로서 굳이 복잡한 상태평균화 방법을 쓰지 않고도 PWM 모델링 방법을 이용하면 간단히 나타 낼 수 있음을 보았으며 시스템의 안정성을 기하기 위하여 제어를 달아주면 안정성이 증가함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-00313-0-2002)지원으로 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] 최주엽, 유권중, 이동기, 이기옥, 정영석, 김기현, "커패시터스 내부 저항을 고려한 태양광용 Boost 컨버터에 대한 MPPT 제어 알고리즘 고찰" 2001 추계 전력전자학회지, pp 109-114
- [2] Ned Mohan, Tore M. Undekand, W.P. Robbins, "Power Electronics: Converter, Application, and Design" John Wiley, pp 323-331
- [3] KHAI D.T. NGO, "Alternate Forms of PWM Switch Mode l, Proceedings of the IEE Vol.35, NO.4 OCTOBER 1999
- [4] Ediwin van Dijk, Herman J.N Spruijt, "PWM-Switch Modeling od DC-DC Converter" preceeding of IEEE 1995
- [5] Daniel W. H Art, "Introduction to Power Electronics", Prentice Hall, pp 408-420