

State-Space Averaging Method를 사용한 태양광 발전시스템에서의 벅 컨버터 모델링

정승환*, 최 익*, 임지훈**, 최주엽**, 안진웅***, 이동하***
 광운대학교 제어계측공학과*, 광운대학교 전기공학과**, 대구경북과학기술원***

Modelling of Buck Converter using State-Space Average Method in the Photovoltaic Power Conditioning System

Seung-Hwan Jung*, Ick Choy*, Ji-Hoon Im**, Ju-Yeop Choi**, Jinung An***, Dong-Ha Lee***

Department of Information and Control Engineering Kwangwoon University*
 Department of Electrical Engineering Kwangwoon University**
 Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology***

ABSTRACT

태양광발전 시스템에서 사용되는 컨버터는 기존의 입출력 관계로 모델링할 수 없다. 이는 태양광 전지를 컨버터의 입력단으로 사용하여, 모델의 입력 전류와 전압이 수시로 변동하기 때문이다. 이런 오류가 있는 방법으로 모델링하여 설계한 제어기가 좋은 성능을 내기는 어렵다.

본 논문에서는 기존의 입출력 관계를 반대로 한 벅 컨버터의 새로운 모델을 제시한다. 모델링은 상태공간평균화 방법(State-Space Averaging Method)을 사용하였다.

1. 서 론

신재생에너지는 다양한 자연에너지의 특성과 이용기술을 활용하여 기존의 화석연료와 원자력 에너지를 대체하는 재생 가능한 에너지이다. 화석에너지의 고갈문제와 환경문제에 대한 핵심 해결방안이라는 점에서 선진 각 국에서는 신재생에너지에 대한 과감한 연구개발과 보급정책 등을 추진하고 있으며, 국내에서도 2011년 총에너지의 5%를 신재생에너지로 보급한다는 장기적인 목표하에 신재생에너지기술개발 및 보급사업 등에 대한 지원을 강화하고 있는 실정이다.

그 중에서도 태양광발전(태양전지) 시스템은 국내에서 가장 발달한 신재생에너지 분야 중 하나로서, 세계적으로도 인정받고 있는 수준이다. 태양광발전 시스템에서는 전력변환장치(DC-DC컨버터)가 꼭 필요한데, 이는 일사량과 온도에 따라 태양 전지의 전압과 전류가 심하게 변동하기 때문이다. 이로 인하여 태양전지를 입력으로 하는 벅 컨버터는 일반적인 모델과는 맞지 않다. 또한, 이런 오류가 있는 방법으로 모델링하여 설계한 제어기가 좋은 성능을 내기는 어렵다.

본 논문에서는 먼저, 입력과 출력성분을 반대로 구성한 벅 컨버터의 모델을 제시한다. 상태공간평균화 방법을 이용하여 선형화하여 선형 방정식을 유도한다.^{[1][2]}

2. 벅 컨버터 모델

2.1 Concept

다음 그림 1은 일반적인 벅 컨버터의 회로이다. 컨버터의 입력단을 정전압원, 출력단을 저항으로 모델링하는 것이 일반

적이지만, 본 논문에서 목표로 하는 태양광발전 시스템과는 맞지 않기 때문에 벅 컨버터의 회로를 그림 2와 같이 수정하였다. 수정된 회로에서는 출력단을 정전압원으로 두고 거꾸로 입력단을 출력전류로 보고 있다. 또한 출력단을 정전압원으로 가정하고 있기 때문에 출력단의 커패시터를 제거하였으며, 전압과 전류의 변동이 있는 입력단에 커패시터를 추가하였다. 이와 같은 개념으로 벅 컨버터를 모델링을 하였으며, 회로의 다이오드와 스위치는 이상적인 동작을 하고 있다고 가정하였다.

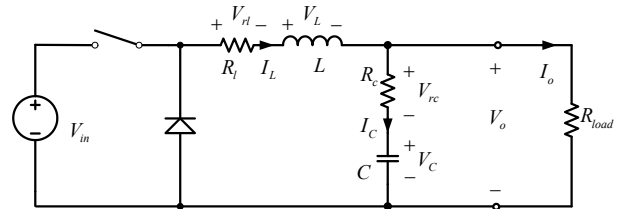


그림 1 벅 컨버터의 기본 회로
 Fig. 1 The basic circuit of buck converter

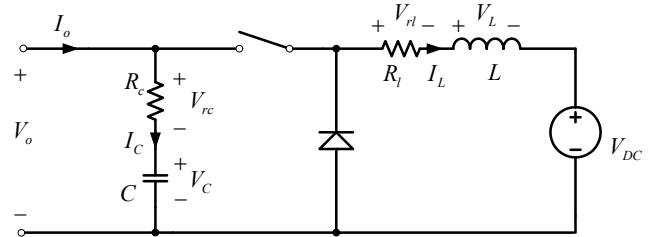


그림 2 벅 컨버터의 수정한 회로
 Fig. 2 The modified circuit of buck converter

2.2 모델링

컨버터의 모델은 일반적으로 스위치 동작에 의하여 비선형 특성의 방정식이 유도된다. 유도한 방정식을 선형화하기 위하여 상태공간평균화 방법을 사용하였다.

먼저, 수식 (1)과 같이 상태변수 및 파라미터를 설정하였다.

$$\begin{cases} x' = Ax + Bu \\ y = Mx + Nu \end{cases}, x = \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix}, y = v_o \quad (1)$$

상태공간평균화 방법을 사용하기 위하여 스위치의 상태에

다른 상태/출력 방정식을 유도하였다. 스위치가 On 상태일 때의 수식은 (2), (3)이며, Off 상태일 때의 수식은 (4), (5)이다.

- On state of switch

$$\begin{bmatrix} v_c' \\ i_L' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_L+R_c}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & \frac{R_c}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$v_o = [1 \quad -R_c] \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + [0 \quad R_c] \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

- Off state of switch

$$\begin{bmatrix} v_c' \\ i_L' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$v_o = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + [0 \quad R_c] \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 상태공간평균화 방법

상태공간평균화 방법을 사용한 일반적인 상태/출력방정식은 (6)과 같다. 수식 (6')은 (6)을 라플라스 변환하여 정리한 것이다. 또한 상태변수와 평균화 모델의 계수는 (7)과 같이 정의한다.^{[1][2]}

$$\begin{cases} \dot{x}' = \hat{A}x' + \hat{B}u' + [(A_1 - A_2)\bar{X} + (B_1 - B_2)\bar{U}] \hat{d} \\ \hat{y} = \hat{M}x' + \hat{N}u' + [(M_1 - M_2)\bar{X} + (N_1 - N_2)\bar{U}] \hat{d} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \hat{x}(s) = (sI - \hat{A})^{-1} \hat{B}u(s) \\ \quad + (sI - \hat{A})^{-1} [(A_1 - A_2)\bar{X} - (B_1 - B_2)\bar{U}] \hat{d}(s) \\ \hat{y}(s) = \hat{M}\hat{x}(s) + \hat{N}u(s) \\ \quad + [(M_1 - M_2)\bar{X} + (N_1 - N_2)\bar{U}] \hat{d}(s) \end{cases} \quad (6')$$

$$x = \bar{X} + \hat{x}, u = \bar{U} + \hat{u}, d = \bar{D} + \hat{d}, i_o = \bar{I}_o + \hat{i}_o \quad (7)$$

\bar{X} : DC component of x , \hat{x} : AC component of x

$$\begin{aligned} \hat{A} &= A_1d + A_2(1-d) & X_1 &: \text{Coefficient of On state} \\ \hat{B} &= B_1d + B_2(1-d) & X_2 &: \text{Coefficient of Off state} \\ \hat{M} &= M_1d + M_2(1-d) & \bar{X} &: \text{Coefficient of} \\ \hat{N} &= N_1d + N_2(1-d) & & \text{State Space Average Model} \end{aligned}$$

스위치 상태에 따라 구한 수식의 계수를 수식 (7)에 적용하여 정리하면 수식 (8)과 같다. 각 행렬에는 파라미터들의 DC값이 포함되어 있는데, 이 DC값들을 정의하기 위하여 컨버터는 태양전지의 MPP(Maximum Power Point)에 동작하고 있음을 가정한다.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\bar{D}}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_L+R_c\bar{D}}{L} \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & \frac{R_c\bar{D}}{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\hat{M} = [1 \quad -R_c\bar{D}], \hat{N} = [0 \quad R_c]$$

(8)의 계수를 (6')에 대입하여 구한 최종 수식은 (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_c(s) \\ \hat{i}_L(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \bar{D} & Ls + R_L + R_c\bar{D} - R_c\bar{D}^2 \\ -Cs & \bar{D}(1 + R_cCs) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{dc}(s) \\ \hat{i}_o(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$+ \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} -(\bar{I}_L Ls + \bar{I}_L R_L + \bar{D}\bar{V}_c + \bar{D}\bar{I}_o R_c) \\ C(\bar{V}_c + R_c\bar{I}_o - R_c\bar{I}_L)s - \bar{D}\bar{I}_L \end{bmatrix} \hat{d}(s)$$

$$\hat{v}_o(s) = [1 \quad -\bar{D}R_c] \begin{bmatrix} \hat{v}_c(s) \\ \hat{i}_L(s) \end{bmatrix} + [0 \quad R_c] \begin{bmatrix} \hat{v}_{dc}(s) \\ \hat{i}_o(s) \end{bmatrix} - \bar{I}_L R_c \hat{d}(s)$$

$$\Delta = \frac{1}{LCs^2 + C(\bar{D}R_c + R_L)s + \bar{D}^2}$$

2.4 블록 다이어그램

수식 (9)의 상태/출력 방정식으로 전달함수의 블록다이어그램으로 표현한 것이 그림 3이다. 각각의 전달함수는 따로 표현하지 않았다.

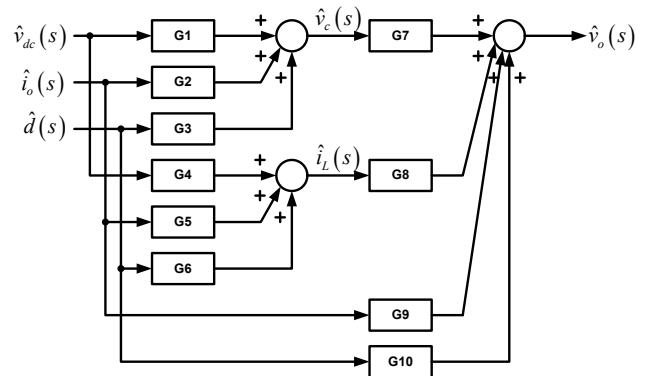


그림 3 벡 컨버터 모델의 기본 블록다이어그램
Fig. 3 The basic block diagram of buck converter model

아래 그림 4와 같이 벡 컨버터의 입력단으로 태양전지와 연결할 경우에 i_o 에 피드백 성분이 더해지게 된다. 입력단의 표시한 부분은 태양 전지를 등가적으로 표현한 것으로서 R_s 는 태양전지의 저항값이다.^[3]

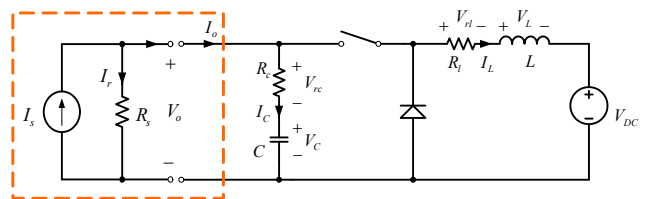


그림 4 태양전지를 고려한 벡 컨버터 회로
Fig. 4 The buck converter circuit considering a solar cell

입력단의 태양전지 등가회로를 추가함으로써 그림 5와 같이 피드백성분이 추가 되게 되고, 전류원 I_s 는 미소성분의 변화없이 일정하다고 가정하면, $i_o = -i_r$ 이 성립하게 된다. 이는 기존의 입력 $i_o(s)$ 에 출력 $v_o(s)$ 와 $-\frac{1}{R_s}$ 의 피드백 성분이 더해짐을 의미한다.

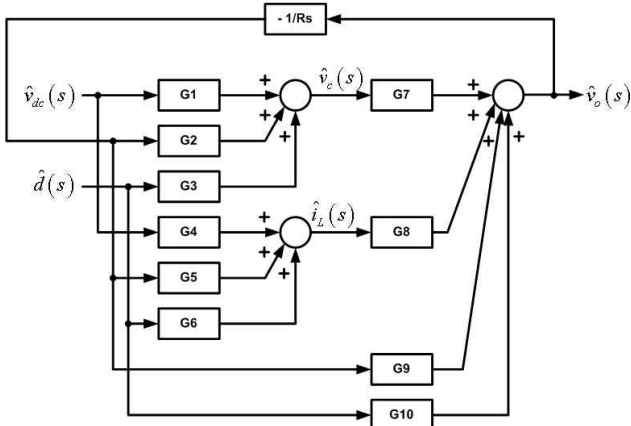


그림 5 태양전지를 포함한 벅 컨버터 모델의 블록다이어그램

Fig. 5 The block diagram of buck converter model with solar cell

기존의 블록다이어그램에 피드백 루프를 더하고, 간략화 하면 다음 그림 6과 같은 블록다이어그램을 새롭게 구할 수 있다. 블록다이어그램의 각 전달함수는 수식 (10)과 같이 정리된다.

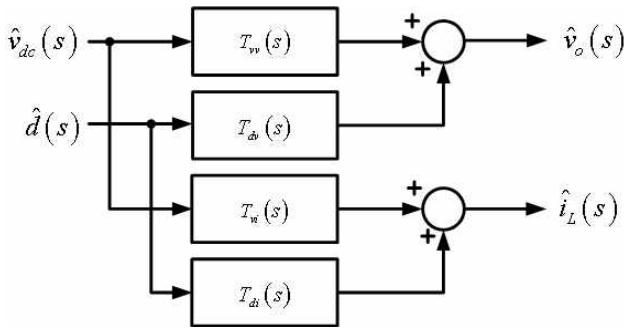


그림 6 벅 컨버터 모델의 간략화한 블록다이어그램

Fig. 6 The simple block diagram of buck converter model

$$T_{vv} = \frac{Den_{vv}}{Num}, T_{dv} = \frac{Den_{dv}}{Num}, T_{vi} = \frac{Den_{vi}}{Num}, T_{di} = \frac{Den_{di}}{Num} \quad (10)$$

$$Num = (R_s + R_c)LCs^2 + (R_c R_s \overline{CD} + R_L R_s C + R_c^2 \overline{CD} + R_c R_L C + L - R_c^2 \overline{CD}^2)s + (R_L + R_s \overline{D}^2 - R_c \overline{D}^2 + R_c \overline{D})$$

$$den_{vv} = R_s \overline{D}(1 + R_c Cs)$$

$$den_{dv} = -R_s (R_c L \overline{C} \overline{I}_L s^2 + (\overline{L} \overline{I}_L + R_c \overline{CD} \overline{V}_c + R_c^2 \overline{CD} \overline{V}_c + R_c R_L \overline{C} \overline{I}_L)s + R_L \overline{I}_L + \overline{D} \overline{V}_c + R_c \overline{D} \overline{I}_o)$$

$$den_{vi} = -(R_s Cs + R_c Cs + 1)$$

$$den_{di} = C \{ \overline{V}_c (R_c + R_s) + R_c \overline{I}_o (R_c + R_s) - R_c \overline{I}_L ((1 - \overline{D}) R_c + R_s) \} s + \overline{I}_L \overline{D} (R_c - R_s) + R_c (\overline{I}_o - \overline{I}_L) + \overline{V}_c$$

3. 결론

본 논문에서는 태양광발전 시스템에서 사용되는 벅 컨버터의 새로운 모델을 제시하고, 이를 상태평균화 방법으로 모델링하여 선형화하였다. 추후 그림 7과 같은 진류 및 전압 제어를 추가하여 복합 제어를 설계하고, 시뮬레이션 및 실험을 통한 검증이 이루어져야 하겠다.

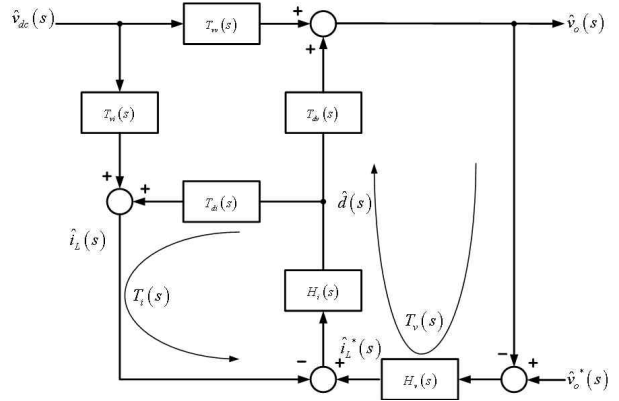


그림 7 제어기를 포함한 블록다이어그램

Fig. 7 The block diagram with controller block

본 연구는 교육과학기술부의 대구경북과학기술원 일반사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics : Converters, Applications, and Design", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. pp. 161-172, pp. 322 -337, 2003.
- [2] Moussa, W.M, Morris, J.E., "Comparison between state space averaging and PWM switch for switch mode power supply analysis", Southern Tier Technical Conference, 1990., 25 April 1990, pp.15-21
- [3] Enslin, J.H.R., Wolf, M.S., Snyman, D.B., Swiegers, W., "Integrated photovoltaic maximum power pointtracking converter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 44 Issue: 6, pp. 769 -773, npr 1997