

다상화 dc/dc converter의 모델링 및 해석

김 양 모⁰
충남대학교

A Modeling and Analysis of Poly-phase dc/dc Converter

Kim Yang-Mo
Chung-nam National University

ABSTRACT

The advantages of poly-phase converter are to be able to reduce the ripple current and to lessen the weight of power inductors.

This paper is derived the equivalent circuit, dc and ac modeling circuit of a 3-phase multiple buck converter by using state space representation and averaging techniche. Futhermore, it is represented the equivalent circuits according to the duty cycle.

1. 서 론

스윗칭컨버터는 비선형, 불연속이고 시변함수이다. 스윗칭 컨버터의 동작은 상태변수(state variable)의 주기적 변화로 나타낼 수 있고 dc-dc컨버터에 대한 모델링은 평균기법이나 불연속 샘플링기법에 의해 수행되어 왔다.

이중 평균기법은 스윗칭컨버터를 단일화한 회로로 취급가능함으로 간단한 회로해석이 가능하고 모델링 및 수학적 기법으로 더욱 간편하게 사용할 수 있으므로 많은 응용에서 자주 적용되어 왔고 모델링의 정확성도 추구되어 왔다.

한편, 컨버터 스윗칭소자의 전류제한을 극복하기 위하여 스윗칭소자를 다중으로 사용하는 경우가 있는데 이 때 각 소자를 다상화하면 전류제한을 극복한다는 것 외에 여러가지 잇점을 얻을 수 있다. 그 중 대표적인 것이 출력전류의 리플저감과 power inductor의 경량화, 입력전류맥동의 저감및 필터효과증대에 따른 유도장해의 격감등을 들 수 있다.

여기에서는 이러한 다상화 dc-dc컨버터에 대하여 회로해석

및 등가회로를 구하여 보고 평균기법을 이용하여 dc 및 ac 모델을 유도하여 해석하여 보았다.

2. 평균기법

평균기법을 적용하기 위하여 한 사이클중 스윗칭소자가 on, off되는 각 기간에 대하여 상태변수로 나타낸다. 일반적으로 on시간동안은

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_1 x + b_1 v_1 \\ v_o &= C_1 x \end{aligned} \quad (1)$$

이고 x는 상태변수벡터, v₁는 입력전압, v_o는 출력전압을 나타내고 A₁, b₁, C₁ 등은 이들 벡터의 계수를 나타내는 행렬이다. off시간동안은

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_2 x + b_2 v_1 \\ v_o &= C_2 x \end{aligned} \quad (2)$$

로 나타내어진다.

여기서 duty cycle을 d라 하고 off시 duty cycle d'=1-d라 하면

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x + b v_1 \\ v_o &= C x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } A &= dA_1 + d'A_2 \\ b &= db_1 + d'b_2 \\ C &= dC_1 + d'C_2 \end{aligned}$$

소신호 모델을 도출하기 위하여 (3)에 나타난 시스템을 선형화하여 선전압과 duty cycle의 변동을 나타내면

$$\begin{aligned} v_1 &= V_1 + \hat{v}_1 \\ d &= D + \hat{d} \\ d' &= D' - \hat{d} \\ D' &= 1 - D \end{aligned} \quad (4)$$

이 되고 또한 상태변수와 출력에 대해서도

$$x = X + \hat{x} \quad (5)$$

$$v_o = V_o + \hat{v}_o$$

으로 나타낼 수 있다. 이들을 (3)식에 대입하여 평균하면

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= AX + bV_1 + A\hat{x} + b\hat{v}_1 + [(A_1 - A_2)X \\ &+ (b_1 - b_2)V_1]\hat{d} + 2차항 \end{aligned} \quad (6)$$

$$V_o + \hat{v}_o = CX + C\hat{x} + (C_1 - C_2)X\hat{d} + 2차항$$

정상상태에서 2차항들은 정상값에 비해 작기 때문에 무시하

면 dc모델은

$$0 = AX + bV_1 \quad (7)$$

$$V_o = CX$$

가 되고 ac모델은

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + b\hat{v}_1 + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_1]\hat{d} \quad (8)$$

$$\hat{v}_o = C\hat{x} + (C_1 - C_2)X\hat{d}$$

가 된다.

3. 3상 컨버터

다상을 다름에 있어 간단을 위해 3상 컨버터를 다루기로 한다. 3상 buck 컨버터는 그림1과 같다.

그림1에서 스위치 S_1, S_2, S_3 의 주기는 같으며 turn-on시간은 각각 $T_s/3$ 만큼씩 떨어져 있다. 이 컨버터의 duty cycle에 따른 동작파형을 나타내면 그림2와 같고 그림2로부터 동작모드를 나타낸 것이 그림3으로 freewheeling다이오드수에 따라 모드0-3의 4가지 모드로 동작된다. 즉,

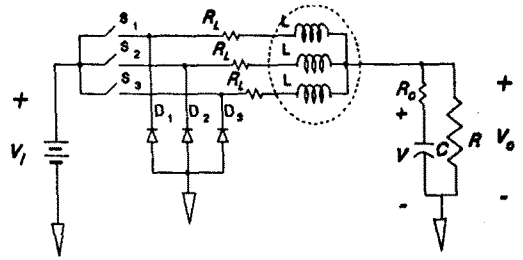
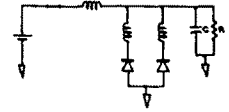
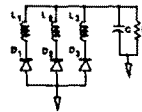


Fig. 1 A 3-phase buck converter

freewheeling:3

freewheeling:2

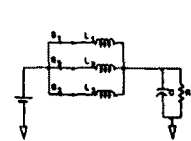
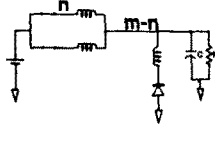


(a) Mode 0

(b) Mode 1

freewheeling:1

freewheeling:none



(c) Mode 2

(d) Mode 3

Fig. 2 Four modes of operation

3상 다중 컨버터의 동작은 그림2에서 알 수 있는 바와 같이 duty cycle에 따라 스위칭소자의 동작모드가 결정되며 여기에서 duty cycle에 따른 동작회로에 대하여 생각해 보기로 한다.

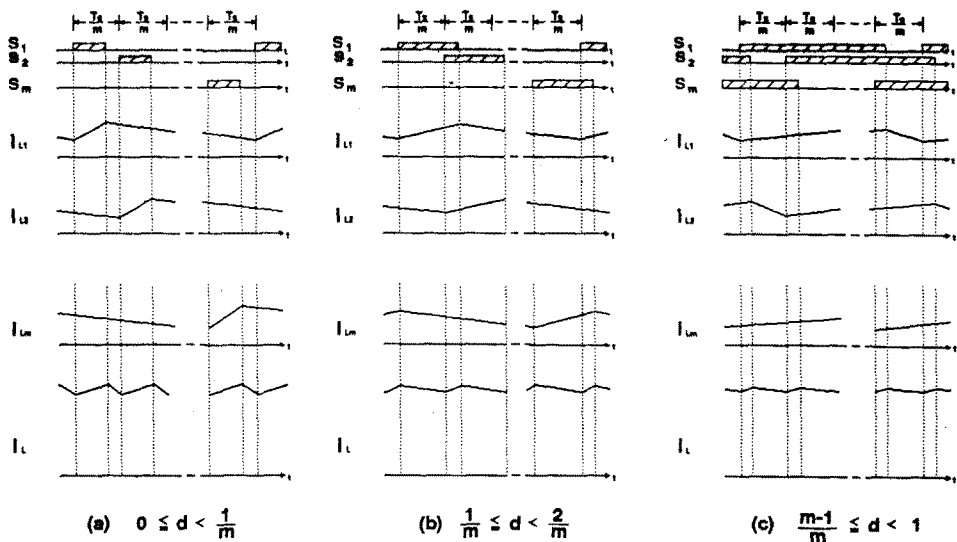


Fig. 2 Waveforms of converter operations

3.1 duty cycle에 따른 동작회로

먼저 duty cycle d 가 $0 < d \leq 1/3$ 인 경우, 그림2에서 보듯이 $T_s/3$ 마다 같은 상태가 반복되기 때문에 $T_s/3$ 기간만을 고려한다면 그림3의 모드0와 모드1의 반복으로 이루어지는 topology가 되어 이의 동작회로를 나타내면 그림4(a)와 같다. 그림4(a)에서 인덕터 L 와 저항 R_L 이 각각 $1/3$ 이 되고 입력전압이 $v_i/3$, 스윗칭주파수는 반면 3배가 된다. 한편 $1/3 < d \leq 2/3$ 에서의 동작상태는 모드1과 모드2의 반복으로 이루어지며 이의 동작회로는 그림4(b)와 같다. 여기에서는 freewheeling 다이오드와 ground사이에서 $v_i/3$ 의 전원이 있는 것이 특징이다. 마찬가지로 $2/3 < d < 1$ 인 경우의 동작회로는 그림4(c)와 같다.

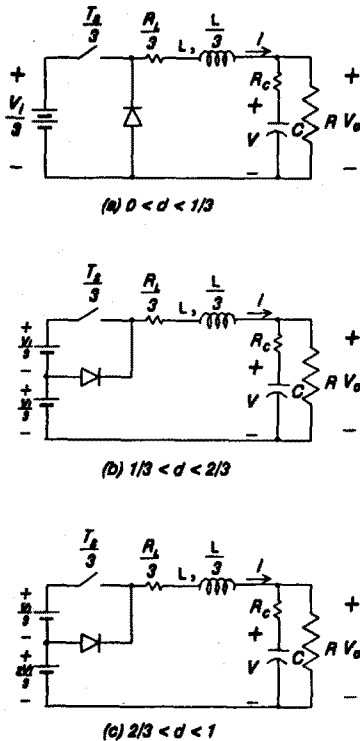


Fig.4 Equivalent circuits according to duty cycle

3.2 컨버터에 대한 상태방정식

2절에서 언급한 평균기법을 3.1에서 구한 동작회로에 적용하기 위하여 회로의 상태방정식을 구하면 다음과 같다. 상태변수로서 인덕터의 전류 i , 커패시터전압 v 를 취하면

$$x = [i, v]^T \tag{9}$$

이 된다. duty cycle에 따른 각 matrix를 구하면 다음과 같다.

(1) $0 < d \leq 1/3$ 의 경우

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} -(R_L + 3R) // R_c / L & -3R / L(R + R_L) \\ R / C(R + R_c) & -1 / C(R + R_c) \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$b_1 = [1/L, 0]^T \quad b_2 = [0, 0]^T$$

$$C_1 = C_2 = [R // R_c, R / (R + R_c)]$$

이며 모드1의 동작기간은 T_1 , 모드0의 동작기간은 $(T_s/3 - T_1)$ 이다.

(2) $1/3 < d \leq 2/3$ 의 경우

$$A_1, A_2, C_1, C_2 : \text{상동} \tag{11}$$

$$b_1 = [2/L, 0]^T \quad b_2 = [1/L, 0]^T$$

이 되며 모드1의 동작기간은 $(T_1 - T_s/3)$ 이며, 모드2의 동작기간은 $(2T_s/3 - T_1)$ 이다.

(3) $2/3 < d < 1$ 인때

$$A_1, A_2, C_1, C_2 : \text{상동} \tag{12}$$

$$b_1 = [3/L, 0]^T \quad b_2 = [2/L, 0]^T$$

이며 모드2의 기간은 $(T_1 - 2T_s/3)$ 이며 모드3의 동작기간은 $(T_s - T_1)$ 이다.

3.3 평균기법적용

위의 경우에 대해 평균기법을 적용하여 A, b 및 C matrix를 구하면 duty cycle에 관계없이 다음과 같이 된다. 즉,

$$A = A_1, C = C_1 \tag{13}$$

$$b = [3/L, 0]^T$$

이로부터 3상 buck type의 컨버터에 대한 dc모델 및 ac모델을 나타내면 다음과 같다.

「 dc 모델 」

$$\begin{bmatrix} -(R_L + 3R) // R_c / L & -3R / L(R + R_L) \\ R / C(R + R_c) & -1 / C(R + R_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/L \\ 0 \end{bmatrix} V_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_o = [R // R_c, R / (R + R_c)] \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix}$$

「 ac 모델 」

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_L + 3R // R_C)/L & -3R/L(R + R_L) \\ R/C(R + R_C) & -1/C(R + R_C) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/L \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + v_1 \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \hat{d}$$

$$v_o = [R // R_C, R/(R + R_C)] \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix}$$

4. 결 론

전력변환회로에서의 다상화는 인덕터의 전류 ripple이나 transformer의 크기나 중량을 줄이는데 이용되고 있다. 본 연구에서는 다상(3상) 다중 컨버터의 동가회로를 구하고 이 회로에 대해 평균기법을 적용하여 보았고 dc모델 및 ac모델을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. D.J.Scott and F.C.Lee, " An improved switching converter model using discrete and average techniques," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-29, No. 2, pp.190-202, 1983.3

2. R.D Middlebrook and S.Cuk, " A general unified approach to modeling switching-converter power stages," IEEE Power Electronics Specialists Conference 1976 Record, pp.18-34

3. R.Tymerski and V.Vorperian, " Generation, classification and analysis of switched-mode DC-to-DC converters by the use of converter cells," INTELEC 1986, pp.181-195, 1986.10

4. Rudolf P.Steverns and Gordon Bloom, Modern DC-to-DC switchmode power converter circuits, Van Nostrand Reinhold Electrical, 1985

5. 山村 昌, 大野 榮一, ハワ-エレクトロニクス入門, pp.143-147, 1984

6. V.Voperian, " Simplified analysis of PWM converters using the model of the PWM switch," Proceeding of VPEC, pp.1-9, 1989.9