

내부모형조종방법을 리용한 DC-DC강압변환기의 전압조종기설계

김명철, 주혁철, 리금혁

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학기술을 발전시키는것은 나라의 경제를 빨리 발전시키기 위한 중요한 담보입니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 133페이지)

DC-DC강압변환조종기술은 축전지충전, 안정된 전압원천, UPS체계 등 여러가지 전력 전자응용에서 매우 중요하다.

DC-DC강압변환기의 조종에는 전통적인 PI조종수법이나 LQ상태반결합조종수법이 많이 리용되였다.[1, 2]

이와 같은 조종수법으로는 입구전압이 불안정하거나 부하가 급격히 변하는 경우 출구전압의 안정성을 보장하기 어렵다.

이로부터 비선형상태반결합조종, 미끄럼조종과 같은 현대조종방법으로 불안정한 입구조건에서도 비선형대상인 변환기의 동적성능을 개선하는 연구[3]들이 진행되였다.

조종체계의 안정성을 담보하려면 대상의 파라미터변동범위에 대한 지식이 필요하며 조종법칙이 복잡하여 실현이 쉽지 않다.

본문에서는 내부모형조종방법을 리용하여 DC-DC강압변환기의 전압안정화를 위한 조종기를 설계하고 실험을 통하여 효과성을 검증하였다.

1. DC-DC강압변환기의 수학적모형화

DC-DC강압변환기(간단히 변환기)는 고정된 높은 직류전압을 보다 낮은 직류전압으로 안정화하는 전력변환기이다.

DC-DC강압변환기의 구성도를 그림 1에 보여주었다.

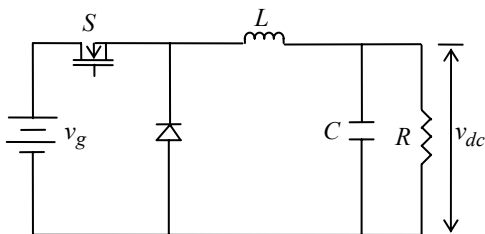


그림 1. DC-DC강압변환기의 구성도

그림 1에서 v_g 는 입구전압, S 는 절환기, L 은 선륜의 유도도, C 는 콘덴샤의 용량, R 는 부하저항, v_{dc} 는 출구전압이다.

주어진 대상의 수학적모형을 얻기 위하여 절환기의 도통상태에 따라 변환기를 두가지 상태로 나누어 론의하였다.

먼저 절환기가 도통된 경우에 수학적모형을 작성하자.

이 상태에서 2극소자는 역방향편의되며 입구 전압 v_g 는 선륜에서의 전압강하와 출구전압에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$v_g = L \frac{di_L}{dt} + R_L i_L + v_{dc} \quad (1)$$

이때 선류의 전류 i_L , 콘덴샤의 전압 v_c 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L}v_g - \frac{R_L}{L}i_L - \frac{1}{L}v_{dc} \\ \frac{dv_c}{dt} &= \frac{1}{C}(i_L - i_o)\end{aligned}\quad (2)$$

여기서 i_o 는 출구전류이다.

이제 콘덴샤의 유효저항을 R_c 라고 하면 출구전압과 출구전류는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}v_{dc} &= i_L \frac{R_c R}{R + R_c} + v_c \frac{R}{R + R_c} \\ i_o &= \frac{v_{dc}}{R} = i_L \frac{R_c}{R + R_c} + v_c \frac{1}{R + R_c}\end{aligned}\quad (3)$$

식 (2)에 식 (3)을 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L}V_g - \frac{1}{L}\left(R_L + \frac{R_c R}{R + R_c}\right)i_L - \frac{1}{L}\frac{R}{R + R_c}v_c \\ \frac{dv_c}{dt} &= \frac{1}{C}\left(\frac{R}{R + R_c}\right)i_L - \left(\frac{1}{R + R_c}\right)v_c\end{aligned}\quad (4)$$

따라서 변환기의 상태공간은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \dot{x} &= \begin{pmatrix} -R_L - \frac{R_c R}{R + R_c} & -\frac{R}{R + R_c} \\ \frac{R}{R + R_c} & -\frac{1}{R + R_c} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u \\ y &= \begin{pmatrix} \frac{R_c R}{R + R_c} & \frac{R}{R + R_c} \\ \frac{R_c}{R + R_c} & \frac{1}{R + R_c} \end{pmatrix} x\end{aligned}\quad (5)$$

여기서 u , x , y 는 각각 변환기의 입력, 상태, 출력이며

$$u = [v_g, 0]^T, \quad x = [i_L, v_c]^T, \quad y = [v_{dc}, i_o]^T$$

이다.

다음으로 절환기가 차단된 경우 수학적모형을 보자.

이때 2극소자는 정방향편의되며 선류전류 i_L 과 콘덴샤전압 v_c , 출구전압 v_{dc} 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{di_L}{dt} &= -\frac{R_L}{L}i_L - \frac{1}{L}v_{dc} \\ \frac{dv_c}{dt} &= \frac{1}{C}(i_L - i_o)\end{aligned}\quad (6)$$

출구전압이 콘덴샤전압과 다르다는것을 고려하면 출구전압과 출구전류는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 v_{dc} &= i_L \frac{R_c R}{R + R_c} + v_c \frac{R}{R + R_c} \\
 i_o = \frac{v_{out}}{R} &= i_L \frac{R_c}{R + R_c} + v_c \frac{1}{R + R_c}
 \end{aligned} \tag{7}$$

식 (6)에 식 (7)을 대입하면 변환기의 상태공간은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{di_L}{dt} &= -\frac{1}{L} \left(R_L + \frac{R_c R}{R + R_c} \right) i_L - \frac{1}{L} \frac{R}{R + R_c} v_c \\
 \frac{dv_c}{dt} &= \frac{1}{C} \left(\frac{R}{R + R_c} \right) i_L - \left(\frac{1}{R + R_c} \right) v_c
 \end{aligned} \tag{8}$$

따라서 변환기의 상태공간은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \dot{x} &= \begin{pmatrix} -R_L - \frac{R_c R}{R + R_c} & -\frac{R}{R + R_c} \\ \frac{R}{R + R_c} & -\frac{1}{R + R_c} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u \\
 y &= \begin{pmatrix} \frac{R_c R}{R + R_c} & \frac{R}{R + R_c} \\ \frac{R_c}{R + R_c} & \frac{1}{R + R_c} \end{pmatrix} x
 \end{aligned} \tag{9}$$

변환기의 모형 (5)와 (9)에서 다른 점은 입력결수행렬뿐이다.

이로부터 한 절환주기동안의 변환기의 평균모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \dot{x} &= \begin{pmatrix} -R_L - \frac{R_c R}{R + R_c} & -\frac{R}{R + R_c} \\ \frac{R}{R + R_c} & -\frac{1}{R + R_c} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u \\
 y &= \begin{pmatrix} \frac{R_c R}{R + R_c} & \frac{R}{R + R_c} \\ \frac{R_c}{R + R_c} & \frac{1}{R + R_c} \end{pmatrix} x
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 k 는 절환기의 도통상태를 표시하는 결수이다. 즉

$$k = \begin{cases} 1, & t = t_{ON} \\ 0, & t = t_{OFF} \end{cases}$$

이다.

식 (10)으로부터 절환주기가 일정할 때 변환기의 입출력모형은 다음과 같다.

$$\frac{\hat{v}_{out}(s)}{\hat{k}(s)} = \frac{v_g}{M} \left[\frac{R_c C s + 1}{LC \left(\frac{R + R_c}{R + R_L} \right) s^2 + \left(R_c C + \frac{R R_L C + L}{R + R_L} \right) s + 1} \right] \tag{11}$$

여기서 $M = R / (R + R_L)$ 이다.

식 (11)에서 보는바와 같이 부하저항이 가변인것으로 하여 대상의 모형에는 불확정성이 존재한다.

2. DC-DC강압변환기의 2자유도내부모형조종

변환기의 설정전압에 대한 추종특성, 입구전압변화와 부하변동을 비롯한 외란에 대한 억제특성을 독립적으로 조절하도록 조종기를 2자유도내부모형조종방식으로 설계한다.(그림 2)

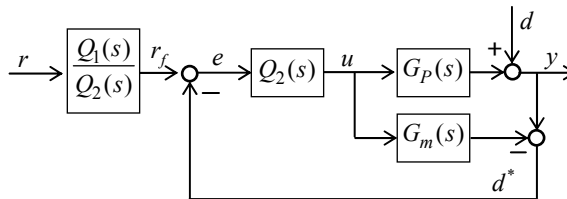


그림 2. 2자유도내부모형조종체계의 구성도

그림 2에서 $G_p(s)$ 는 실제조종대상, $G_m(s)$ 는 조종대상의 공칭모형, $Q_1(s)$ 와 $Q_2(s)$ 는 각각 목표량추종을 위한 조종기, 외란억제를 위한 조종기이며 r 는 설정입력, y 는 체계의 출력, u 는 조종력, d 는 외란, d^* 은 실제대상출력과 공칭모형출력의 편차이다.

실제대상과 공칭모형은 일반적으로 일치하지 않는다.

대상의 섭동을 곱하기섭동으로 보면 실제대상 $G_p(s)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$G_p(s) = G_m(s)(1 + \Delta G(s))$$

여기서 $\Delta G(s)$ 는 모형의 불확정성이다.

만일 $\Delta G(s)$ 가 유계이라면 내부모형조종의 안정성은 파라메터들을 적절히 선택함으로써 담보할수 있다.

조종체계의 2자유도내부모형조종기는 $G_m(s)$ 와 $Q_1(s)$, $Q_2(s)$ 들로 구성한다.

조종력 $u(s)$ 와 출력 $y(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$u(s) = [Q_1(s)r(s) - Q_2(s)d(s)] / [1 + Q_2(s)(G_p(s) - G_m(s))] \quad (12)$$

$$y(s) = G_p(s)u(s) + d(s) \quad (13)$$

식 (12), (13)으로부터 닫힌체계의 출력은 다음과 같다.

$$y(s) = \frac{G_p(s)Q_1(s)r(s) + (1 - Q_2(s)G_m(s))d(s)}{1 + Q_2(s)(G_p(s) - G_m(s))} \quad (14)$$

대상이 공칭모형과 일치하는 경우 즉 $G_m(s) = G_p(s)$ 인 경우 체계의 출력은 다음과 같이 표시된다.

$$y(s) = G_m(s)Q_1(s)r(s) + (1 - Q_2(s)G_m(s))d(s) \quad (15)$$

식 (15)에서 보는바와 같이 체계의 목표량추종특성은 조종기 $Q_1(s)$ 에만 의존하며 외란억제특성은 조종기 $Q_2(s)$ 에만 의존한다.

조종기는 다음의 두 단계로 설계한다.

첫 단계: 모형 $G_m(s)$ 를 두 부분으로 나눈다.

$$G_m(s) = G_{m-}(s)G_{m+}(s)$$

여기서 $G_{m+}(s)$ 는 오른쪽반평면령점만을 포함하고 $|G_{m+}(j\omega)|=1$ 을 만족시키며 $G_{m-}(s)$ 는 왼쪽반평면령점들을 포함한다.

둘째 단계: $G_{m-}(s)$ 와 저역통과려파기 $F_1(s)$ 와 $F_2(s)$ 로 내부모형조종기 $Q_1(s)$, $Q_2(s)$ 를 구성한다.

$$\begin{cases} Q_1(s) = F_1(s)/G_{m-}(s) \\ Q_2(s) = F_2(s)/G_{m-}(s) \end{cases} \quad (16)$$

식 (16)에서 $F_1(s)$ 와 $F_2(s)$ 는 실현가능성려파기로서 다음과 같다.

$$F_1(s) = \frac{1}{(\varepsilon_1 s + 1)^{n_1}}, \quad F_2(s) = \frac{1}{(\varepsilon_2 s + 1)^{n_2}} \quad (17)$$

여기서 ε_1 , n_1 은 각각 $F_1(s)$ 의 시정수, 차수이며 ε_2 , n_2 는 각각 $F_2(s)$ 의 시정수, 차수이다.

식 (16), (17)에서 보는바와 같이 조종기는 2개의 파라미터들에 의하여 특징지어진다. 려파기들의 차수들은 크면 클수록 응답이 빠지고 계산이 보다 복잡해지기때문에 조종실현에 맞게 최소로 선택한다.

조종실현의 목적에 맞게 내부모형조종체계(그림 2)를 전통적인 출력반결합조종체제로 변환한다.

그림 3에 2자유도내부모형조종체계의 등가구성도를 보여주었다.

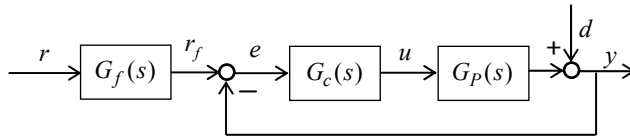


그림 3. 2자유도내부모형조종체계의 등가구성도

그림 3에서 $G_f(s)$, $G_c(s)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{cases} G_f(s) = Q_1(s)/Q_2(s) \\ G_c(s) = Q_2(s)/(1 - G_m(s)Q_2(s)) \end{cases} \quad (18)$$

변환기 (15)의 상대차수가 1이므로 $F_1(s)$ 와 $F_2(s)$ 의 차수를 1로 한다. 조종체계에서 조정가능한 파라미터들은 ε_1 , ε_2 이며 체계의 목표량추종특성과 외란억제특성은 이 파라미터들에 의하여 관계된다.

조종체계의 출력오차 $e(s)$ 는 다음과 같다.

$$e(s) = \frac{(1 + G_c(s)G_p(s) - G_f(s)G_c(s)G_p(s))r(s) - d(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (19)$$

공칭모형과 대상이 일치한다면

$$e(s) = (1/(\varepsilon_2 s + 1) - 1)d(s)$$

이며 ε_2 가 작으면 높은 정확도와 모형불확정성에 대한 강한 로바스트성이 담보된다.

내부모형조종체계에서 로바스트안정성조건은 다음과 같다.

$$|G_{m+}(s)F_2(s)|l_m \leq 1 \quad (20)$$

여기서 l_m 은 모형불확정성의 상한

$$|[G_p(s) - G_m(s)] / G_p(s)| \leq l_m$$

이다.

변환기에서 $|G_{m+}(s)|=1$ 이므로 식 (20)은 다음과 같이 표시된다.

$$|F_2(s)|l_m \leq 1 \quad (21)$$

이로부터 ε_2 는 주어진 모형불확정성한계에 대하여 로바스트안정성조건 (21)을 만족시키도록 선택한다.

다음 파라미터 ε_1 은 고정된 ε_2 에 대하여 평가함수

$$\text{ISE} = \int_0^T (r(t) - y(t))^2 dt$$

가 최소가 되도록 선택한다.

이렇게 설계된 내부모형조종체계는 $G_c(s)$ 를 근사한 조종성능을 가지는 PID조종기를 구하여 실현한다.

주목하는 주파수구간에서의 $G_c(s)$ 의 주파수응답을 계산하고 $|G_c(j\omega)|$ 가 최소로 되는 주파수 ω_z 를 얻는다.

이때 PID조종기를 다음과 같이 구성한다.

$$K_{\text{PID}}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (22)$$

여기서

$$\begin{aligned} k_p &= \text{Re}\{G_c(j\omega_z)\} \\ k_i &= |G_c(j\omega_s)|\omega_s \\ k_d &= (G_c(j\omega_z) - k_p - k_i/(j\omega_z))/(j\omega_z) \end{aligned}$$

이다. (ω_s 는 임의의 작은 주파수 ($\omega_s = 0.001\text{rad/s}$))

조종과정에 미분기에 의한 잡음의 영향을 줄이기 위하여 조종기 (22)를 다음과 같이 실현한다.

$$K_{\text{PID}}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \frac{T_d s}{T_n s + 1} \quad (23)$$

여기서 T_n 은 잡음저파를 위한 적당한 상수이다.

DC-DC강압변환기의 파라미터들이 표 1과 같이 주어졌을 때 제안한 내부모형조종체계에 대한 조종실험을 진행하였다.

표 1. DC-DC강압변환기의 파라미터

v_g / V	v_{dc} / V	L / mH	$R_L / \text{m}\Omega$	$R_C / \text{m}\Omega$	C / mF	R / Ω
50	30	2	30	1	20	0.3~1.3

먼저 변환기의 파라미터들을 리용하여 모형을 구하면 다음과 같다.

$$G_m = \frac{48.87(s + 0.000\ 02)}{0.000\ 003\ 913s^2 + 0.002s + 1}$$

변환기의 부하가 변화될 때 모형변동

$$\Delta G = [G_p(s) - G_m(s)] / G_m(s)$$

로부터 그것의 한계 l_m 을 다음과 같이 선택하였다.

$$l_m = \frac{0.8s+1}{0.4s+50} \quad (24)$$

이때 체제의 로바스트안정성조건 (21)을 만족시키는 파라미터 ε_2 를 구하면 $\varepsilon_2 = 0.009$ 이다.

다음 파라미터 ε_2 를 0.009로 고정하고 각이한 ε_1 에 따르는 조종체제의 ISE를 구한 다음 최소로 되는 파라미터를 선택하였다.(표 2)

표 2. 각이한 ε_1 에 따르는 조종체제의 ISE

ε_1	0.1	0.01	0.03	0.04	0.05	0.001	0.002	0.000 1
ISE	44.56	5.161	13.07	17.56	22.06	8.877	7.878	20.121

표 2에서 보는바와 같이 목표량추종특성이 좋은 경우는 $\varepsilon_1 = 0.01$ 이다.

결과 내부모형조종체제의 조종기 $G_f(s)$, $G_c(s)$ 는 다음과 같다.

$$G_f(s) = \frac{0.009s+1}{0.01s+1}, \quad G_c(s) = \frac{3.913e^{-5}s^2 + 0.002s+1}{0.4396s^2 + 8.797e^{-6}s} \quad (25)$$

식 (23)으로부터 내부모형조종기 $G_c(s)$ 를 근사시킨 PID조종기는 다음과 같다.

$$G_{PID}(s) = 0.0047 + \frac{2.2733}{s} + \frac{8.8e-5s}{0.001s+1} \quad (26)$$

PID조종기 (26)과 조종기 $G_c(s)$ 의 진폭주파수특성을 작도하여보면 적분작용과 미분작용이 근사하며 최저굴곡점이 일치한다는것을 알수 있다.

공칭조건과 입구전압변동인 경우, 부하변동인 경우 설정전압이 $v_{dc\text{설}} = 30\text{ V}$ 일 때 제안한 조종기 IMC_PID와 선행방법[2]으로 설계한 PID조종기와의 비교실험을 진행하였다.

그림 4에 공칭조건에서 체제의 목표량추종특성모의결과를 보여주었다.

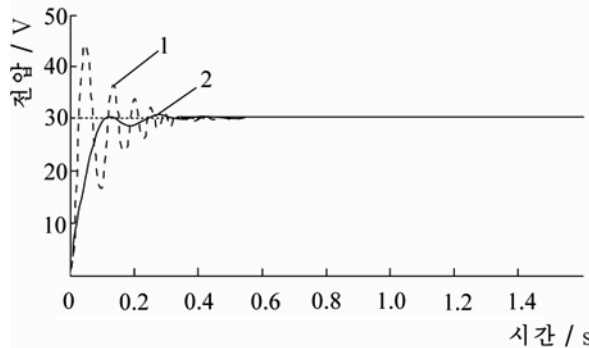


그림 4. 공칭조건에서 체제의 목표량추종특성모의결과(1-PID, 2-IMC_PID)

또한 정상상태에서 $t = 0.6\text{ s}$ 인 시각에 입구전압 v_g 가 50V에서 45V로 변동되고 $t = 0.8\text{ s}$ 인 시각에 50V로 변동되었을 때 체제의 응답을 그림 5에 보여주었다.

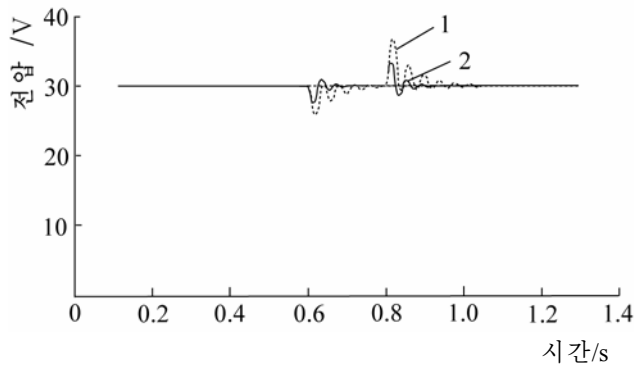


그림 5. 입구전압변동에 대한 체계의 응답(1-PID, 2-IMC_PID)

부하변동인 경우의 조종모의결과는 입구전압변동인 경우 체계의 응답과 유사하게 외란에 대한 로바스트성이 강하다는것을 보여주었다.

모의결과에서 보는바와 같이 제안한 조종기는 선행조종기에 비하여 목표량추종특성이 좋고 외란억제능력이 강하다는것을 알수 있다.

DC-DC강압변환기의 장치실험을 통하여 내부모형조종방법으로 설계된 조종기의 전압조종성능이 선행조종기에 비하여 높다는것을 검증하였다.

맺 는 말

DC-DC강압변환기의 2자유도내부모형조종기를 설계하고 그것과 근사한 조종성능을 가지는 PID조종기에 의하여 변환기의 전압조종을 실현하였다.

참 고 문 헌

- [1] Pranjal Lalita et al.; International Journal of Computational Engineering Research, **8**, **6**, 108, 2018.
- [2] Zeng Qiu et al.; Control Engineering Practice, **46**, 105, 2016.
- [3] F. Giri et al.; IEEE Trans. Automat. Contr., **54**, **9**, 2174, 2009.

주체109(2020)년 2월 5일 원고접수

Voltage Controller Design for DC-DC Buck Converter Using Internal Model Control Scheme

Kim Myong Chol, Ju Hyok Chol and Ri Kum Hyok

In this paper, we designed two degree of freedom internal model controller for DC-DC buck converter and implemented the converter's voltage control by PID controller which had control performance approximated to IMC controller's one.

Keywords: DC-DC buck converter, internal model control, voltage control