

부하변동을 고려한 DC/DC 승압형 컨버터의 외란 관측기 기반 출력 궤환 제어기

논문

58-7-22

A Disturbance Observer-Based Output Feedback Controller for a DC/DC Boost Converter with Load Variation

정 구 종* · 김 인 혁* · 손 영 익*
(Goo-jong Jeong · In-Hyuk Kim · Young-Ik Son)

Abstract - Output voltage of a DC/DC power converter system is likely to be distorted if variable loads exist in the output terminal. This paper presents a new disturbance observer(DOB) approach to maintain a robust regulation of the output voltage of a boost type DC/DC converter. Unlike the buck-type converter case, the regulation problem of the boost converter is very complicated by the fact that, with respect to the output voltage to be regulated, the system is non-minimum phase. Owing to the non-minimum phase property the classical DOB approach has not been applied to the boost converter. Motivated by a recent result on the application of DOB to non-minimum phase system, an output feedback control law is proposed by using a parallel feedforward compensator. Simulation results using the Simulink SimPowerSystems prove the performance of the proposed controller against load variation.

Key Words : Boost Converter, Disturbance Observer, Non-minimum Phase, Output Feedback Control

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈과 환경 문제가 가시화되면서 선진국을 중심으로 신재생 에너지에 대한 관심과 투자가 크게 증가하고 있으며, 특히 연료전지와 태양광 발전 시스템에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다[1,2]. 연료전지와 태양광에서 출력되는 전기에너지는 직류(DC)전압의 형태로 일반적으로 부하가 요구하는 전압으로 승압(Boost) 또는 강압(Buck)하여 공급된다. 출력 전압은 출력 단의 부하에 따라 원하지 않은 과도상태가 빈번하게 발생하기 때문에 신재생 에너지의 연구와 동시에 부하 변동에 강인한 고효율의 DC/DC 컨버터 제어 연구도 꾸준히 주목받고 있다[3]. 특히, 승압형의 경우 비선형성과 비최소 위상(non-minimum phase) 시스템으로 인해 많은 연구자들의 관심을 받아왔다. 예를 들어 수동성에 기반한 제어 방법, 슬라이딩 모드 제어 기법, 데드비트 제어 기법 등과 같은 시스템의 부하 변동에 강인함을 보이는 다양한 제어기법이 발표되었다[4-9]. 본 논문에서는 컨버터 출력전압의 강인성을 향상시키기 위해 외란 관측기(Disturbance Observer; DOB) 기반 제어기를 제안한다. 이는 승압형 컨버터에 외란 관측기 기반 제어 기법을 적용한 첫 번째 결과이다.

외란 관측기는 시스템의 불확실성과 외란에 대해 강인한 제어기를 설계하기 위한 방법 중 하나로 공칭 시스템의 역

을 사용하여 외란을 관측하고 제어 입력에 보상하여 줌으로써 외란의 영향을 감소시키는 알고리즘이다[10]. 기존에 설계된 제어기의 교체없이 추가적으로 덧붙여 사용함으로써 외란과 시스템의 불확실성에 대처할 수 있다는 장점이 있다. 다른 제어 기법에 비해 설계 과정이 간단할 뿐만 아니라 뛰어난 외란 제거 성능을 보이기 때문에 로봇 및 정밀 제어 등을 비롯한 다양한 분야의 제어 문제에 적용되고 있다[11-14]. 하지만 설계과정에서 공칭 시스템의 역을 사용하기 때문에 영점이 없거나 복소평면의 좌반평면에만 존재하는 최소 위상 시스템으로 외란 관측기의 적용 범위가 제한적이었다.

승압형 컨버터는 비최소 위상 시스템이기 때문에 일반적인 외란 관측기를 직접 적용할 수 없다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 최근에 발표된 논문 [16]의 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 적용한다. 이는 참고문헌 [17]에서와 같이 병렬 보상을 설계하여 대상 시스템에 연결함으로써 결합된 시스템이 최소 위상 시스템이 되도록 한 이후에 기존의 외란 관측기 설계 기법을 적용하는 방법이다. 제안된 제어기의 동작영역에 따른 성능 및 부하 변동에 따른 강인성을 검토하기 위해 모의실험을 실시한다. 본 논문에서 제안하는 제어기는 컨버터의 전류 측정없이 전압 정보만을 이용하는 출력 궤환 제어기이다. 이를 위해 외란 관측기와 함께 사용되는 외부 제어기로 적분형 상태 궤환 제어기와 Luenberger 상태 관측기로 구성된 출력 궤환 제어기를 사용하였다. 성능 비교를 위해 PI 제어기 및 부하 변동에 강인한 성질을 지닌 논문 [8]의 제어기를 함께 실험하였다. Matlab Simulink의 SimPowerSystem을 사용하여 모의실험을 수행하였으며, 그 결과로부터 제안된 제어기의 성능을 확인할 수 있었다.

† 교신저자, 정회원 : 명지대학교 전기공학과 부교수 · 공박
E-mail : sonyi@mju.ac.kr

* 준 회원 : 명지대학교 전기공학과 석사과정
접수일자 : 2009년 2월 28일
최종완료 : 2009년 6월 19일

2. 본 론

2.1 DC/DC 승압형 컨버터

DC/DC 컨버터는 임의의 직류 전원을 부하가 요구하는 형태의 직류 전원으로 변환시키는 장치이다. 본 논문에서는 그림 1과 같은 구조를 지닌 DC/DC 승압형 컨버터를 고려한다. PWM 방식으로 제어되는 스위치가 ON 되어있는 동안 입력 전원이 인덕터 양단에만 인가되어 전류의 충전이 이루어지고, 스위치가 OFF 되면 충전된 전류와 입력 전압이 함께 부하로 전달된다. 입력단의 전류는 스위치가 OFF 인 경우에만 출력단에 인가되므로 출력단 전류는 항상 입력단 전류보다 작다. 회로의 손실이 없다고 가정하면 “입력전류×입력전압 = 출력전류×출력전압”의 관계에서부터 출력 전압이 입력 전압보다 항상 높게 나타난다는 것을 알 수 있다 [18].

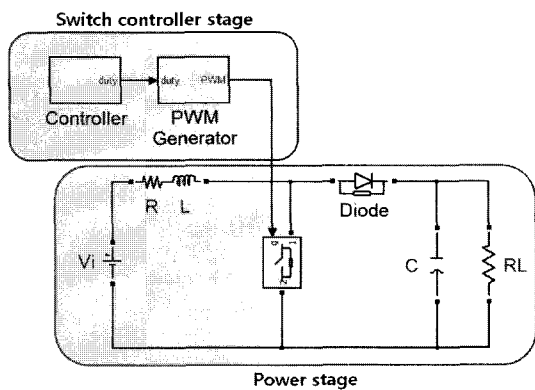


그림 1 DC/DC 승압형 컨버터의 구조
Fig. 1 Structure of DC/DC boost converter

그림 1의 수학적 모델은 평균 스위칭 기법을 이용하여 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{R}{L}i_L - \frac{1}{L}(1-d)v_c + \frac{1}{L}V_i \\ \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}(1-d)i_L - \frac{1}{R_L C}v_c \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 i_L 은 인덕터 전류, v_c 는 축전기 혹은 출력단 전압이며, V_i 는 입력전압이다. 제어 입력 d 는 듀티비(duty ratio)를 나타내고, R, L, C 는 회로 상수이며 R_L 은 부하 저항이다. 식 (1)에서 인덕터 저항을 무시하면 ($R=0$ 인 경우) 정상상태 입출력 관계는 아래 식과 같다.

$$V_c = \frac{1}{1-D} V_i \quad (2)$$

위 식에서 V_c 는 정상상태 출력 전압이며, D 는 정상상태 듀티비이다. 듀티비의 범위($0 \leq D < 1$)로부터 시스템이 안정하면 출력 전압이 항상 입력 전압보다 크다[18].

식 (1)에서 알 수 있듯이 승압형 컨버터는 입력과 상태변수가 곱해진 형태를 갖는 쌍선형 시스템(Bilinear System)이며[4], 출력 v_c 에 대해서 시스템의 영동특성(zero dynamics)이 불안정한 비최소 위상(non-minimum phase) 시스템이다[8]. 간단한 구조에도 불구하고 복잡한 동특성으로 인해 현재에도 전력전자 및 제어이론 연구자들 사이에서

연구가 계속되고 있다[9].

본 논문에서는 출력단 부하 R_L 의 변동으로 발생하는 출력 전압의 왜곡현상을 개선하기 위한 새로운 제어기를 제안한다. 동작점 선형화 방법으로 얻어진 선형 모델을 바탕으로 적분형 출력 계환 제어기를 먼저 설계하고, 새로운 외란 관측기를 추가한다. 제어기 설계를 위한 동작점 선형화 모델은 아래 식과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{V_c}{L} \\ -\frac{I}{C} \end{bmatrix} u \\ y = [0 \ 1]x \end{cases} \quad (3)$$

상태변수 x 는 $[i_L - I \quad v_c - V_c]^T$, 입력 $u = d - D$ 이며, $[I \ V_c]$ 및 D 는 각각 인덕터 전류, 출력 전압, 듀티비의 동작점 값이다. 식 (3)의 전달함수로부터 시스템의 영점은 $z_1 = \{V_c(1-D)/I - R\}/L$ 임을 알 수 있고, 실제로 작은 값을 갖는 인덕터 저항 R 에 대해 복소평면 우반평면에 위치한다. 즉, 시스템 (3)도 비최소 위상 시스템이다.

2.2 비최소 위상 시스템의 외란 관측기

시스템의 불확실성과 외란에 강인하고 기존 제어기에 추가가 용이한 점으로 인해 외란 관측기 제어기법은 많은 연구가 진행되어 왔다. 외란 관측기 기반 제어기는 그림 2와 같이 폐루프 시스템이 원하는 성능을 갖게 하는 주제어기 $C(s)$ 에 추가로 설계된다. 제어 입력 v 와 시스템 $P(s)$ 사이의 외란이 존재하거나 제어 대상 시스템 $P(s)$ 의 불확실성으로 인해 발생하는 성능 저하에 대처하기 위해 그림 3과 같이 외란 관측기가 추가로 설계된다. 이 때 공칭 시스템 $P_n(s)$ 를 대상으로 설계되며 (외란이 없는) 그림 2의 폐루프 시스템과 같은 성능을 유지하도록 한다.

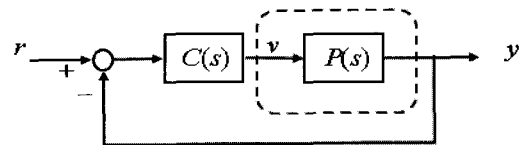


그림 2 폐루프 제어 시스템
Fig. 2 Closed-loop System

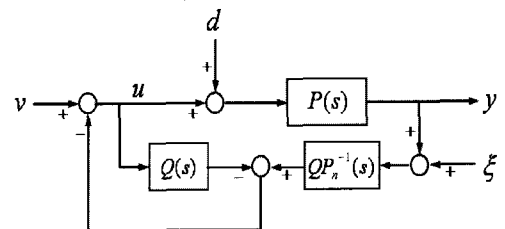


그림 3 외란 관측기의 구조
Fig. 3 Structure of DOB

그림 3에서 외란 관측기는 공칭 시스템의 역함수 $P_n^{-1}(s)$ 를 사용한다. 대부분의 시스템의 전달함수는 분모의 차수가 분자의 차수보다 높으므로 $P_n^{-1}(s)$ 를 직접 사용할 수 없고,

적절한 상대차수를 갖는 Q -필터를 사용하여 $QP_n^{-1}(s)$ 를 사용한다. 외란 관측기의 Q -필터는 시스템의 성능에 많은 영향을 미치므로 잡음과 외란의 주파수 대역을 고려하여 설계한다[12,13].

한편, 준 시스템이 복소평면 우반평면에 영점이 존재하는 비최소 위상 시스템인 경우, $QP_n^{-1}(s)$ 는 불안정하므로 사용할 수 없다. 즉, 외란 관측기의 성능 및 안정성을 보장하기 위해서는 대상 시스템이 최소 위상 시스템이어야 한다[15]. 비최소 위상 시스템인 승압형 컨버터를 위해 본 논문에서는 그림 4와 같은 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 적용한다[16]. 이는 최근에 발표된 기법으로써 [17]에서와 같이 병렬 보상기(V -필터)를 이용하여 시스템 $(P_n + V)(s)$ 를 최소 위상 시스템으로 만든 후에 기존의 외란 관측 기법을 사용하는 방법이다.

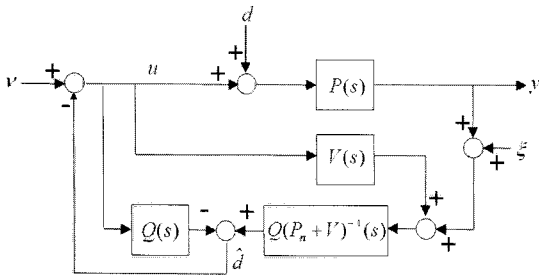


그림 4 비최소 위상 시스템의 외란 관측기
Fig. 4 DOB for Non-minimum Phase System

그림 4의 외란 관측기가 제대로 동작하기 위해서는 설계된 V -필터가 외란의 주파수 영역에서 $(P + V)(s) \approx P(s)$ 인 추가적인 성질이 만족되어야 한다[16]. 이와 같은 성질을 만족하는 $V(s)$ 를 설계하기 위해 본 논문에서는 아래와 같은 PID 제어를 설계한다.

$$C_2(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (4)$$

시스템 $P(s)$ 가 PID 제어기 (6)에 의해 안정하면 특성방정식 $1 + P(s)C_2(s) = 0$ 의 근은 모두 복소평면 좌반평면에 위치하게 된다. 한편, 전달함수 $(P + C_2^{-1})(s)$ 의 영점은 $1 + P(s)C_2(s) = 0$ 의 근과 같으므로 $V(s) = C_2^{-1}(s)$ 로 결정하면 $(P + V)(s)$ 는 최소 위상 시스템이다. 또한, 식 (4)의 형태에 의해 저주파 대역에서 $V(s) \approx 0$ 이므로 $(P_n + V)(s) \approx P_n$ 을 만족한다. 결국 $P(s)$ 를 안정하게 하는 PID 제어기의 역수로 그림 4와 같은 외란 관측기를 설계할 수 있다. 그림 4의 출력 y 는 아래 식과 같다.

$$y = \frac{P(P_n + V)}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} v + \frac{P(P_n + V)(1 - Q) + PVQ}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} d - \frac{PQ}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} \xi \quad (5)$$

일반적으로 외란 d 는 저주파 신호, 측정 잡음 ξ 는 고주파 신호라고 가정한다. 저주파 영역에서는 $Q(s) \approx 1$, $V(s) \approx 0$ ($(P_n + V)(s) \approx P_n$)으로 외란에 대한 영향은 사라지고, 고주파 영역에서는 $Q(s) \approx 0$ 으로 측정 잡음에 대한 영향을 무시할

수 있다. 따라서, 식 (5)는 아래와 같이 근사된다.

$$y \approx P_n(s)v \quad (6)$$

2.3 DC/DC 승압형 컨버터 시스템의 제어기 설계

부하 변동에 강인한 제어기를 설계하기 위해 본 논문에서는 컨버터의 전압 측정값만 사용하는 외란 관측기 기반의 출력 궤환 제어기를 제안한다. 이 때, 주제어기(외부 루프 제어기)로는 상태 궤환 제어기법과 Luenberger 관측기를 사용하였으며 정상상태 오차를 줄이기 위해 적분기를 함께 사용하였다 (즉, Integral state feedback controller + Luenberger observer). 상태 변수 방정식 (3)에 적분기를 추가하고 새로운 상태 변수 $z = \int (r - y)dt$ 로 정의하면, 전체 시스템 식은 아래와 같다.(단, $r = V_c$ 이다.)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (7)$$

한편, 본 논문에서 사용한 관측기는 아래와 같다. 이 때, $y = v_c - V_c$ 이고 $u = d - D$ 이다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (8)$$

그림 5는 본 논문에서 제안하는 전체 제어기 구조이다. 미선형 공칭 시스템을 동작점 선형화하고 얻은 시스템 (7)에 대해 상태 궤환 제어기와 관측기 (8)을 설계한다. 설계된 주제어기 만으로는 외란이나 부하 변동에 만족할 만한 성능을 얻기 어려운 경우를 위해 그림 4의 (비최소 위상) 외란 관측기를 추가한다. 외란 관측기는 식 (3)의 모델을 기준으로 설계되며, 승압형 컨버터는 비최소 위상 시스템이므로 앞에서 소개한 V -필터를 사용하여 외란 관측기를 설계한다. 다음 장의 모의실험에서 자세한 제어기 설계 과정 및 그 성능을 확인한다.

3. 모의 실험

제안된 제어기의 성능을 확인하기 위해 컴퓨터 모의실험을 실시하였다. 이 때, 시스템 모델 식 (1)을 사용하는 대신 Matlab Simulink SimPowerSystems와 PWM Generator를 이용하였다 (그림 5). 제어기의 강인성과 동작영역을 확인하기 위해 부하 변동 및 기준 입력 변경 실험을 수행하였다. 제어기 성능 비교를 위해 PI 제어기 및 슬라이딩 모드 제어기가 사용되었다. 모의실험에 사용된 공칭 동작점은 $I = 1.0111A$, $V_c = 24V$, $D = 0.5253$ 이다. 시스템 및 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1 모의실험 변수

Table 1 Simulation Parameters

인덕터	$L = 1mH$	입력 전압	$V_i = 12V$
인덕터 저항	$R = 0.6\Omega$	출력 전압	$V_o = 24V$
캐패시터	$C = 1mF$	R_L (기준입력변경)	20Ω
부하 변동	$R_L = 50\Omega \rightarrow 14.28\Omega \rightarrow 50\Omega$		
Q 필터 (Butterworth)	3차, 차단주파수 = $5000rad/s$		

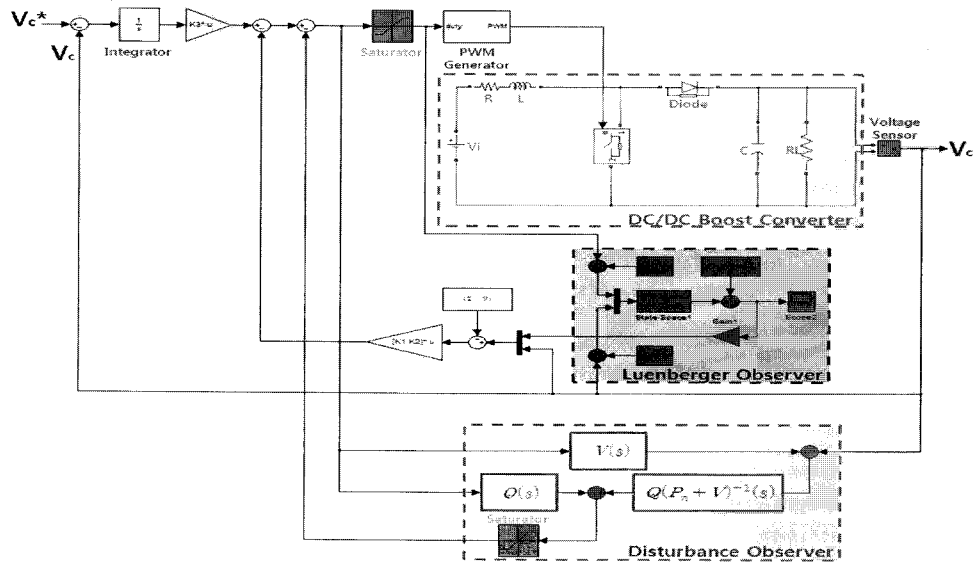


그림 5 Luenberger 관측기 기반 적분형 출력 궤환 제어기 + 외란 관측기
 Fig. 5 Integral output feedback controller with Luenberger observer + Disturbance observer

주제어기 $C(s)$ 로는 Luenberger 관측기를 사용한 적분형 출력 궤환 제어기가 사용되었다. 페루프 시스템의 극점은 아래 식과 같이 결정하였으며, 이에 따른 이득 행렬 K 는 식 (10)과 같다.

$$\lambda(A - BK) = [-500, -500, -300] \quad (9)$$

$$K = [0.0295 \quad 0.0270 \quad -6.9530] \quad (10)$$

전류 i_L 의 추정을 위한 Luenberger 관측기의 극점 및 이에 따른 이득 행렬 L 은 아래 식과 같다.

$$\lambda(A - LC) = [-5000, -5000] \quad (11)$$

$$L = [40307 \quad 9380]^T \quad (12)$$

그림 6과 7은 제안된 적분형 출력 궤환 제어기의 부하변동에 대한 성능을 확인하기 위한 것이다. 보편적으로 사용되는 PI 제어기와 부하변동에 강인한 것으로 알려진 논문 [8]의 슬라이딩 모드 제어기를 함께 비교하였다. 논문 [8]에서 제안한 제어기는 integral reconstructor 기반 슬라이딩 제어기법을 사용하며, 부하 변동에 강인하다고 알려져 있다. 그림 7로부터 적분형 출력 궤환 제어기가 다른 제어기에 비해 진동이 작고 정상상태 도달 시간이 빠름을 알 수 있다. 하지만 제어기 모두 부하 변동의 영향을 크게 받고 있음을 확인할 수 있다. 논문 [8]의 제어기도 준 시스템에 대해서는 부하변동에 취약하고 추가 연구가 필요함을 알 수 있다. 부하변동의 영향을 줄이기 위해 적분형 출력 궤환 제어기에 대해 외란 관측기를 추가로 설계한다.

앞 절에서 언급한 대로 비최소 위상 외란 관측기를 위한 V -필터는 시스템 $P(s)$ 를 안정하게 하는 PID 제어기의 역수를 사용한다. 본 모의 실험에서는 아래와 같은 PID 제어기를 설계하였다. 따라서 $V(s)$ 는 식 (14)와 같이 설계된다.

$$C_2(s) = \frac{s^2 + 1000s + 250000}{5000s} \quad (13)$$

$$V(s) = C_2^{-1}(s) = \frac{5000s}{s^2 + 1000s + 250000} \quad (14)$$

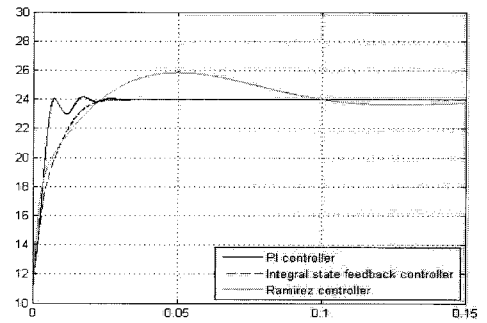


그림 6 출력 전압
 Fig. 6 Output voltage

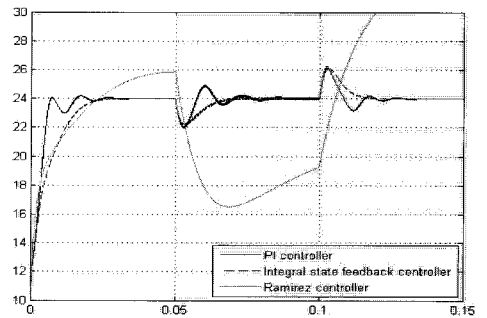


그림 7 부하 변동시 출력 전압
 Fig. 7 Output voltage with load variation

외란 관측기가 제대로 동작하기 위해서는 설계된 V 필터가 외란의 주파수 영역에서 $(P + V)(s) \approx P(s)$ 인 추가적인 성질이 만족되어야 한다. 그림 8은 $(P + V)(s)$ 와 $P(s)$ 의 보드선도이다. 외란의 주파수 영역, 즉 저주파 영역을 포함한 넓은 영역에서 $(P + V)(s) \approx P(s)$ 을 만족함을 알 수 있다. 외란 관측기의 Q -필터는 Butterworth 필터를 사용하며 표 1과 같이 결정하였다. 다음의 모의실험을 통해 외란 관측기를 추가한 제어기의 성능을 확인한다.

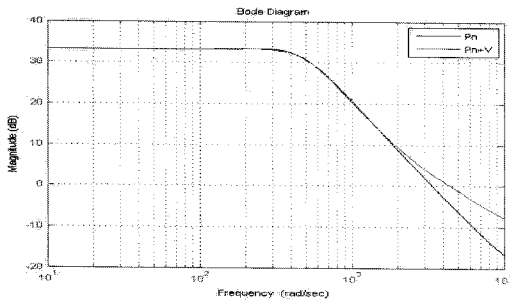


그림 8 $(P+V)(s)$ 와 $P(s)$ 의 보드선도
 Fig. 8 Bode plot of $(P+V)(s)$ and $P(s)$

3.1 부하 변동 실험

부하 저항 R_L 이 0.05초에 50Ω에서 14.28Ω으로 감소하고, 0.1초에 다시 50Ω으로 변동되는 경우를 모의하였다. 그림 9는 외란 관측기의 사용 유무에 따른 출력 전압의 비교이고, 그림 10에서는 제어 입력을 나타내었다. 그림 10에서 제어 입력의 차이는 외란 관측기에서 부하 변동에 의한 변화를 추정하여 제어 입력을 보상함을 의미한다. 그 결과 그림 9와 같이 부하 변동으로 인한 과도상태가 개선되었음을 알 수 있다.

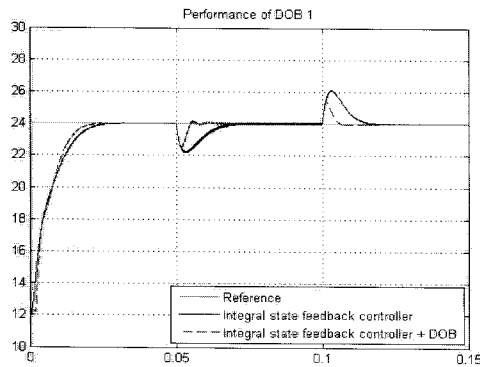


그림 9 부하 변동시 출력 전압
 Fig. 9 Output voltage with load variation

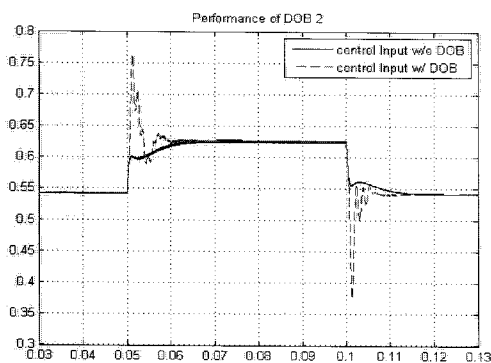


그림 10 부하 변동시 제어 입력
 Fig. 10 Control input with load variation

3.2 기준 입력 변경 실험

제안된 제어기는 동적점 선형화에 기반한 선형 제어기이므로 동작점이 변경될 경우 그 성능을 보장할 수 없다. 이를 시험하기 위해 기준 입력을 추종하는 모의실험을 수행하였다. 본 모의실험에서는 기준 입력이 0.05초에 24V에서 20V로, 0.1초에 20V에서 28V로 변하는 경우를 모의하였다. 그림 11은 적분형 출력 제한 제어기를 적용하였을 경우와 추가적으로 외란 관측기를 적용하였을 경우의 출력 전압을 비교한 것이다. 외란이 없는 경우 두 제어기에 대한 결과가 유사하며 제안된 주제어기의 동작영역이 동작점 부근 일정 영역에서 보장되고 있음을 확인할 수 있다.

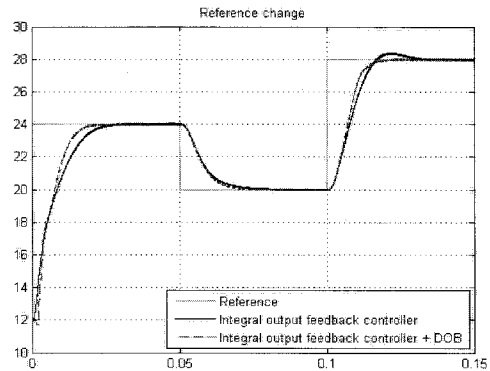


그림 11 기준 입력 변화시 출력 전압
 Fig. 11 Output voltage in reference change

4. 결 론

본 논문에서는 DC/DC 승압형 컨버터 제어기에서 고려해야 할 부하 변동 및 시스템 불확실성에 대한 제어기 설계 방법을 연구하였다. 부하 변동으로 인한 출력 전압 변화에 대한 성능 개선을 위해 외란 관측기를 적용하였으며 모의실험을 통해 시스템의 강인성을 향상시킬 수 있음을 보였다. 시스템의 불확실성과 외란에 강인한 성질을 갖는 기존의 외란 관측기는 그 적용 범위가 최소 위상 시스템으로 제한되어 있어 승압형 컨버터에는 적용한 사례가 없었으나 최근에 제안된 비최소 위상 시스템의 외란 관측기를 활용함으로써 외란 관측기의 적용 범위를 넓힐 수 있었다. 외란 관측기와 함께 사용된 주제어기로는 상태 관측기와 적분형 상태 제한 제어기를 사용함으로써 인덕터 전류의 측정없이 출력 전압만으로 원하는 성능의 제어기를 설계하였다. Matlab Simulink Toolbox인 SimPowerSystems를 사용하여 모의실험을 수행하였으며 PI 제어기 및 슬라이딩 제어 기법과 비교하여 제안된 제어기의 성능 개선을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 선도연구센터육성사업(ERC)의 지원으로 수행되었음 (차세대 전력기술연구센터)
 이 연구에 참여한 연구자는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았음

참 고 문 헌

[1] J. Wang, F. Z. Peng, J. Anderson, A. Joseph, R. Buffenbarger, "Low Cost Fuel Cell Converter System for Residential Power Generation", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1315-1322, 2004. 09.

[2] J. H. Lee, H. S. Bae, B. H. Cho, "Resistive Control for a Photovoltaic Battery Charging System Using a Microcontroller", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 7, Jul. 2008.

[3] 광동걸, "소프트 스위칭형 벡-승압형 DC-DC 컨버터에 관한 연구", *전력전자학회 논문지*, 제12권 제5호 pp. 394-399, 2007. 10.

[4] H. Sira-Ramirez, "Sliding Motions in Bilinear Switched Networks", *IEEE Trans. on Circuits and System*, Vol. 34, No. 8, 1987.

[5] H. Sira-Ramirez, R. A. Perez-Moreno, R. Ortega, M. Garcia-Esteban, "Passivity-Based Controllers for the Stabilization of DC-to-DC Power Converter", *Automatica*, Vol. 33, No. 4, pp. 499-513, 1997.

[6] R. Naim, G. Weiss, S. Ben-Yaakov, " H^∞ Control Applied to Boost Power Converters", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 677-683, Jul. 1997.

[7] G. Escobar, R. Ortega, H. Sira-Ramirez, J. P. Vilain, and I. Zein, "An experimental comparison of several nonlinear controllers for power converters", *IEEE Control System Magazine*, Vol. 19, No. 1, pp. 66-82, 1999. 02.

[8] H. Sira-Ramirez, "On the generalized PI sliding mode control of DC-to-DC power converter: a tutorial", *Int. Journal Control*, Vol. 76, pp. 1018-1033, 2003

[9] C. Y. Chan, "Simplified Parallel-Damped Passivity-Based Controllers for DC-DC Power", *Automatica*, Vol. 44, No. 11, pp. 2977-2980, 2008. 11.

[10] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics", *Trans. of Japanese Society of Electrical Engineers*, Vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.

[11] T. Umeno, Y. Hori, "Robust servosystem design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators", *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol. 40, No. 5, pp. 473-485, 1993.

[12] 최영진, 양광진, 정완균, 김홍록, 서일홍, "강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계(1) : 2차 시스템에 대한 이론적 해석", *제어·자동화시스템공학 논문지*, 8권 8호, pp. 655-663, 2002.

[13] 양광진, 최영진, 정완균, "2차 시스템에 대한 이산시간 외란 관측기의 분석", *제어자동화시스템공학 논문지*, Vol. 9, No. 6, pp. 425-434, 2003.

[14] P. Mattavelli, "An Improved Deadbeat Control for UPS Using Disturbance Observers", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, Vol. 52, No. 1, pp. 206-212, 2005.

[15] H. Shim, N.H. Jo, and Y.I. Son, "A new disturbance observer for non-minimum phase linear systems," *Proc. of American Control Conference 2008*, pp. 3385-3389, June 11-13, 2008.

[16] 손영익, 김성중, 정구종, 심형보, "PID 제어기로 안정화 가능한 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기 설계", *전기학회논문지*, 57권 5호, pp. 1612-1617, 2008. 09.

[17] H. Kaufman, I. Barkana, K. Sobel, *Direct Adaptive Control Algorithms*, Springer-Verlag, 2nd Ed., 1998

[18] 노의철, *전력전자공학*, 문운당, 제 2판, 2007.

저 자 소 개



정 구 종 (鄭 求 種)

2008년 명지대학교 전기공학과 졸업.
 2008년~현재 명지대학교 전기공학과 석사과정.
 주관심분야: 제어이론 및 적용, 임베디드 시스템
 Tel : 031-330-6358
 E-mail : gold85@mju.ac.kr



김 인 혁 (金 仁 勲)

2009년 명지대학교 전기공학과 졸업.
 2009년~현재 명지대학교 전기공학과 석사과정.
 주관심분야: 제어이론 및 적용, 임베디드 시스템
 Tel : 031-330-6358
 E-mail : hyucin@mju.ac.kr



손 영 익 (孫 瑛 翼)

1995년 서울대학교 전기공학과 졸업.
 2002년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2007년~2008년 Cornell University Visiting Scholar. 2003년~현재 명지대학교 전기공학과 부교수.
 Tel : 031-330-6358
 E-mail : sonyi@mju.ac.kr