

PI 관측기를 이용한 DC/DC 승압 컨버터 제어기 설계

김인혁*, 정구종*, 손영익*
*명지대학교 전기공학과

Design of controller for DC/DC boost converter using PI observer

In-Hyuk Kim*, Goo-Jong Jeong*, Young-Ik Son*
*NPTC, Department of Electrical Engineering, Myongji University

Abstract - DC/DC 승압 컨버터는 인덕터 내부 저항으로 인하여 부하 저항의 변화가 시스템 동작점에 영향을 미치게 되며, 이로 하여 제어기 설계의 기준이 되는 선형화된 모델은 불확실성을 가지게 된다. 본 논문은 인덕터의 내부 저항과 출력단의 부하 변동으로 인한 불확실성에 대하여 출력 전압의 강인성을 향상시키기 위해 PI 관측기 기반 적분형 상태 변수 궤환 제어기를 제안한다. PI 관측기는 불확실한 시스템 제어에 널리 사용되는 오차의 적분항을 Luenberger 관측기에 추가한 형태로써 불확실성에 강인한 추정 성능을 보인다. 모의실험을 통해 불확실성이 존재하는 경우 제안된 제어기의 강인성을 확인하고 설계된 관측기가 Luenberger 관측기에 비해 상태변수 추정 성능이 우수함을 보인다.

1. 서 론

스위칭 소자를 이용한 전력변환 시스템의 제어 문제는 많은 연구자들의 관심을 받아 왔으며[1-4], 최근 연료전지와 태양광 발전시스템, 하이브리드 자동차 등 저공해 에너지 분야의 성장에 따라 더욱 활발히 연구되고 있다[5]. 직류 전압 형태의 전기 에너지를 부하가 요구하는 전압으로 승압 또는 강압하는 DC/DC 컨버터의 출력 전압은 불확실한 부하 변동이나 소자 값으로 인해 원하지 않은 과도상태가 빈번하게 발생한다. 따라서 신재생 에너지원에 대한 연구와 동시에 불확실성에 강인한 고효율의 컨버터 제어 알고리즘 연구가 계속 이어지고 있다. 특히, 그림 1과 같은 DC/DC 승압형 컨버터는 입력과 상태 변수가 곱해진 형태의 비선형 시스템인 동시에 출력전압에 대한 영동특성(zero dynamics)이 불안정한 비최소 위상(non-minimum phase) 시스템으로 많은 선행 연구 결과를 찾을 수 있다. 그 중 PBC(Passivity-Based Control) [1], PI 제어 [2], 슬라이딩 모드 제어 [3], PD(Parallel Damped) PBC [4]와 같은 다양한 제어 결과들은 인덕터의 등가 직렬 저항을 무시하고 설계되는 것이 일반적이다. 하지만 실제 승압형 컨버터 시스템 구현 시 인덕터의 내부 직렬 저항은 항상 존재하며, 이로 인하여 부하 저항이 입력 및 시스템 상태의 동작점에 영향을 미쳐 제어기 설계의 기준이 되는 선형화된 모델의 불확실성을 증가시킨다.

본 논문에서는 인덕터의 내부 저항과 출력단의 부하 변동으로 인한 DC/DC 승압형 컨버터의 불확실성에 대한 출력전압의 강인성을 향상시키는 방법으로 적분형 상태 궤환 제어기를 사용한다. 이 때 출력 전압만으로 구성된 관측기를 이용하여 제어기에 사용되는 상태를 추정한다. 추정된 상태는 제어 입력으로써 뿐 만 아니라 시스템의 고장 진단 등으로 사용될 수 있으므로 가능한 정확하게 추정될 필요가 있다. PI 관측기는 불확실한 시스템의 제어 및 정상상태 오차를 제거하기 위한 적분항을 Luenberger 관측기에 추가한 형태를 가지며, 불확실성 및 외란이 존재하는 시스템에 대한 상태 추정 성능이 Luenberger 관측기에 비해 우수하다.[6] 일반적으로 컨버터는 과전류가 흐를 경우 이를 차단하는 보호 회로가 필수적인데 Luenberger 관측기는 불확실성이 존재할 경우 인덕터의 전류 추정 성능이 현저히 떨어져 차단 성능을 보장할 수 없지만, PI 관측기는 이러한 경우에도 우수한 추정 성능으로 안정적인 차단 성능을 보장할 수 있을 것으로 기대한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서 승압형 컨버터의 모델링 및 그 특성을 살펴보고, 2.2절에서 PI 관측기 기반 적분형 상태 궤환 제어기를 설계한다. 제안된 제어기의 성능 및 부하 변동에 따른 관측기의 성능 비교를 위해 3장에서 Matlab Simulink의 SimPowerSystem을 사용하여 모의실험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 DC/DC 승압 컨버터 모델링

본 논문에서 고려하는 DC/DC 승압 컨버터는 보다 실제적인 제어 문제를 다루기 위해 그림 1과 같은 인덕터의 등가 직렬저항 R_l 을 포함한다. 평균 스위칭 기법에 의한 수학적 모델은 아래 식과 같다.

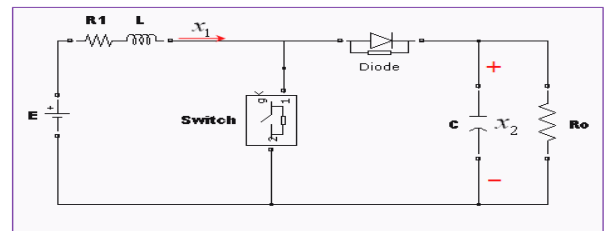
$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\frac{R_l}{L}x_1 - (1-d)\frac{1}{L}x_2 + \frac{E}{L} \\ \frac{dx_2}{dt} &= (1-d)\frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{R_o C}x_2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x_1 은 인덕터 전류, x_2 는 출력 전압, E 는 입력 전압이고 d 는 제어 입력(duty ratio)를 나타낸다 (단, $0 \leq d < 1$). 회로 정수 R_l, L, C, R_o 는 각각 인덕터 등가 직렬 저항, 인덕턴스, 커패시턴스, 부하 저항을 나타낸다. DC/DC 승압 컨버터의 동작원리를 쉽게 확인 하기위해 먼저 이상적인 인덕터를 가진 모델에 대해 생각해 보자. 식 (1)에서 인덕터 등가 저항을 무시하면(즉, $R_l = 0$) 정상상태에서의 입출력 관계와 전류는 식 (2)와 (3)으로 쓸 수 있다.

$$X_2 = \frac{1}{1-D}E, \text{ 혹은 } D = 1 - \frac{E}{X_2} \quad (2)$$

$$X_1 = \frac{X_2}{(1-D)R_o} \quad (3)$$

위 식에서 X_1, X_2, D 는 각각 x_1, x_2, d 의 동작점을 나타내며 식 (2)로부터 제어입력의 범위($0 \leq D < 1$)를 생각하면 출력전압이 입력전압보다 높아지는 DC/DC 승압 컨버터의 성질을 알 수 있다.



〈그림 1〉 DC/DC 승압 컨버터 구조

한편, 인덕터 등가 저항을 고려한 동작점 식은 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$X_2 = \frac{1}{1-D} \cdot \frac{(1-D)^2}{(1-D)^2 + (R_l/R_o)} E \quad (4)$$

$$D = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{E}{X_2} + \sqrt{\left(\frac{E}{X_2}\right)^2 - \frac{4R_l}{R_o}} \right]$$

식 (4)로부터 인덕터 등가 저항(R_l)이 존재할 경우에 부하저항(R_o)의 변동이 동작점을 변화시키는 것을 알 수 있으며, 이는 동작점이 불확실성을 가지게 됨을 의미한다. DC/DC 승압 컨버터의 선형화 모델은 아래 식과 같다.

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} -\frac{R_l}{L} & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{R_o C} \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} \frac{X_2}{L} \\ -\frac{X_1}{C} \end{bmatrix} u \quad (5)$$

$$y = [0 \ 1]z$$

여기서 $z = [x_1 - X_1 \ x_2 - X_2]^T$, $u = d - D$ 이다.

일반적으로 상태추정을 위해 널리 사용되고 있는 방법인 Luenberger 관측기는 식 (5)의 선형 시스템을 기반으로 설계 되므로 제어 모델의 불확실성이 존재하는 경우에는 정확한 상태 추정이 어렵게 된다. 다음 절에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서 사용한 PI 관측기를 이용한 제어기 설계 방법을 소개한다.

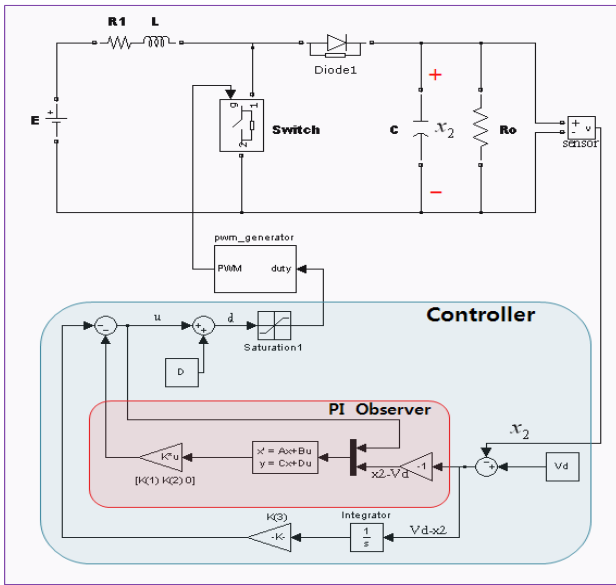
2.2 PI 관측기를 이용한 제어기 설계

센서의 사용이 불가능하거나 비용절감을 위해 상태를 추정하여 사용해야 할 경우 상태 관측기의 사용은 필연적이다. 간단한 방법으로 Luenberger 관측기가 많이 사용되었으나, 시스템에 불확실성이 존재하게 되면 $L(y-\hat{y})$ 항만을 사용하여 상태를 추정하는 것이 어려우므로 PI 관측기는 $\hat{f} = L_2 \int (y-\hat{y})$ 를 추가로 사용한다. 오차의 적분효과는 불확실성에 강인한 것으로 잘 알려져 있으며 본 논문에서 제안하는 PI 관측기는 식 (6)과 같다.

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = \begin{bmatrix} A & M \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{z} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} (y-\hat{y}) \\ \hat{y} = [C \ 0] \hat{z} \end{cases} \quad (6)$$

A, B, C 는 식 (5)의 시스템 행렬, 입력 행렬, 출력 행렬을 각각 나타내며, \hat{z} 는 관측기의 상태변수이고, L_1, L_2 는 관측기 이득이며 N 은 시스템의 불확실성을 나타내는 행렬이다. PI 관측기의 성능은 N 에 따라 좌우되는 경우가 많이 있다.

본 논문에서 제안하는 제어기는 그림 2와 같은 형태이다. 출력전압 (x_2)는 측정치를 이용하고 PI 관측기를 기반으로 전류는 추정하여 사용하는 적분형 상태 변수 변환 제어기이다. 다음 장의 모의실험에서 제안된 제어기의 성능을 시험한다.



〈그림 2〉 PI 관측기 기반 적분형 상태 궤환 제어기

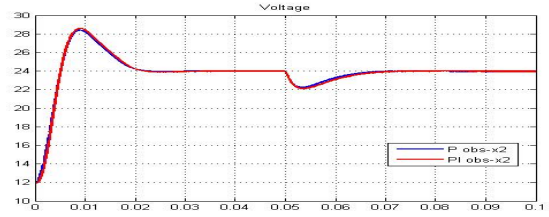
3. 모의 실험

모의실험을 통해 Luenberger 관측기와 PI 관측기의 상태관측 성능을 비교한다. 본 논문에서는 현실적인 고려를 위해 Matlab Simulink의 SimPowerSystem을 사용하였다. 실험에서 사용한 DC/DC 승압 컨버터의 파라미터는 표 1과 같다.

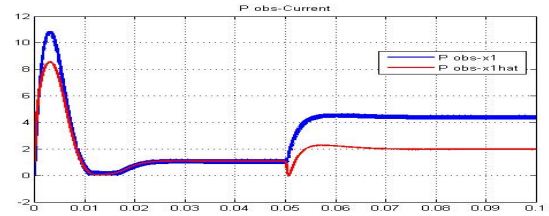
〈표 1〉 DC/DC 승압 컨버터의 파라미터

인덕터	$L = 1mH$	인덕터 저항	$R_l = 0.6\Omega$
커패시터	$C = 1mF$	스위칭주파수	$f_s = 20KHz$
입력전압	$E = 12V$	초기부하	$R_o = 50\Omega$

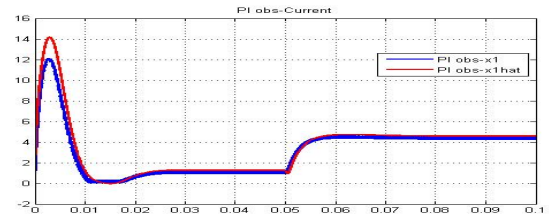
모의실험의 목표 전압(Desired Voltage)은 24[V]이며 부하는 $t = 50$ ms에서 $R_o = 14.8\Omega$ 으로 변동한다. 그림 3은 출력 전압(x_2)의 제어 결과를 PI 관측기 기반 제어기와 Luenberger 관측기 기반 제어기에 대해 비교한 결과이다. 결과에서 적분형 상태 변수 궤환 제어기가 부하변동에 강인함을 볼 수 있다. 다음으로 관측기가 추정하는 전류에 대한 비교를 하였다. 그림 4는 Luenberger 관측기를 사용했을 경우의 인덕터 전류(x_1)와 추정된 인덕터 전류(\hat{x}_1)를 비교한 결과이다. 그림 4의 결과로부터 Luenberger 관측기는 부하변동이 일어날 경우 인덕터 전류를 정확하게 추정하지 못함을 알 수 있다. 그림 5는 PI 관측기를 사용하며 부하변동이 일어나더라도 인덕터 전류를 정확하게 추정하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 PI 관측기의 사용으로 제어기의 전류추정 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.



〈그림 3〉 부하 변동시 출력전압 비교



〈그림 4〉 Luenberger 관측기 사용시 인덕터 전류추정



〈그림 5〉 PI 관측기 사용시 인덕터 전류추정

4. 결 론

본 논문에서는 부하 변동과 인덕터 등가 저항(R_l)이 존재할 때 DC/DC 승압 컨버터의 동작점에 불확실성이 존재함을 살펴보았으며, 부하 변동시 Luenberger 관측기는 인덕터 전류추정에 있어서 실패한 반면, 본 논문에서 제안한 PI 관측기는 불확실성에 강인한 관측 성능을 보임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 교육과학기술부/한국과학재단 선도연구센터육성사업(ERC)의 지원으로 수행되었음 (차세대전력기술연구센터) 이 연구에 참여한 연구자는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았음

[참 고 문 헌]

- [1] H. Sira-Ramirez, R. A. Perez-Moreno, R. Ortega, M. Garcia-Esteban, "Passivity-Based Controllers for the Stabilization of DC-to-DC Power Converters", *Automatica*, Vol. 33, No. 4, pp. 499-513, 1997.
- [2] J. Alvarez-Ramirez, I. Cervantes, G. Espinosa-Perez, P. Maya, A. Morales, "A Stable Design of PI Control for DC-DC Converters with an RHS Zero", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 48, No. 1, pp. 103-106, 2001.
- [3] H. Sira-Ramirez, "On the Generalized PI Sliding Mode Control of DC-to-DC Power Converters: a tutorial", *Int. J. Control*, Vol. 76, No. 76, pp. 1018-1033, 2003.
- [4] C. Y. Chan, "Simplified Parallel-Damped Passivity-Based Controllers for DC-DC Power Converter", *Automatica*, Vol.44, No. 11, 2008.
- [5] 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.
- [6] D. Soffker, T. J. Yu, P. C. Muller, "State Estimation of Dynamical Systems with Nonlinearities by using Proportional-Integral Observer", *Int. J. Systems*, Vol. 26, No. 9, pp1571-1582, 1995.