

Robust Current Estimation of DC/DC Boost Converter against Load Variation

김인혁* · 정구종* · 손영익†
(In-Hyuk Kim · Goo-jong Jeong · Young-Ik Son)

Abstract - This paper studies the state estimation problem for the current of DC/DC boost converters with parasitic inductor resistance. The parasitic resistance increases the system uncertainty when the output load variation occurs. In order to enhance the observation performance of the Luenberger observer this paper includes the integral of the estimation error signal to the estimation algorithm. By using the proposed PI observer the converter current signal is successfully reconstructed with the voltage measurement regardless of the load uncertainty. Computer simulation has been carried out by using Simulink/SimPowerSystem. Simulation results show the proposed method maintains robust estimation performance against the model uncertainty.

Key Words : DC/DC Boost Converter, PI Observer, Luenberger Observer, Sim Power System

1. 서론

스위칭 소자를 이용한 전력 변환 시스템의 제어 문제는 많은 연구자들의 관심을 받아 왔으며[1-4], 최근 연료 전지와 태양광 발전 시스템, 하이브리드 자동차 등 저공해 에너지 분야의 성장에 따라 더욱 활발히 연구되고 있다[5]. 직류 전압을 원하는 전압으로 승압 또는 강압하는 DC/DC 컨버터는 불확실한 부하 변동이나 소자 값으로 인해 원하지 않은 과도 상태가 빈번하게 발생한다. 따라서 불확실성에 강인한 컨버터 제어 알고리즘 연구가 계속 이어지고 있다[1-4]. 그림 1과 같은 DC/DC 승압형 컨버터는 입력과 상태 변수가 끊어진 형태의 비선형 시스템인 동시에 출력 전압에 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] 등을 대표적으로 들 수 있으나 이들은 인덕터의 등가 직렬 저항을 무시하고 제어를 설계하는 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 설계 기준이 되는 선형화된 모델의 불확실성을 증가시킨다.

본 논문에서는 인덕터 내부 저항을 포함한 DC/DC 승압형 컨버터 모델을 분석하고, 출력단의 부하 변동으로 인한 모델 불확실성에 대해 강인한 상태 관측기 설계 문제를 연구한다. 추정된 상태는 제어 입력으로써 뿐만 아니라 시스

템의 이상 감지 및 고장 진단 등으로 활용될 수 있으므로 가능한 정확하게 추정될 필요가 있다. 논문에서 다루는 PI 관측기는 불확실한 시스템의 제어 및 정상상태 오차를 제거하기 위한 적분항을 Luenberger 관측기에 추가한 형태를 지니며, 불확실성 및 외란이 존재하는 경우 상태 추정 성능이 Luenberger 관측기에 비해 우수하다[6].

본 논문의 관측기는 컨버터 시스템의 동작점 선형화 모델을 기반으로 설계되었으며 관측된 상태를 사용하는 적분형 상태 궤환 제어기와 함께 그 성능을 시험하였다. 부하의 불확실성으로 인한 동작점 변동으로 성능 저하가 발생하는 Luenberger 관측기와 달리 설계된 관측기는 실제 값으로 수렴하는 성능을 확인할 수 있다. 부하 변동에 따른 관측기의 성능 비교를 위해 Matlab Simulink의 SimPowerSystem을 사용하여 모의실험을 수행하였다.

2. 본론

2.1 DC/DC 승압 컨버터 모델링

본 논문에서 고려하는 DC/DC 승압 컨버터는 그림 1에서와 같이 인덕터 등가 저항 R_1 을 포함한다. 평균 스위칭 기법에 의한 모델 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\frac{R_1}{L}x_1 - \frac{1}{L}(1-d)x_2 + \frac{E}{L} \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{1}{C}(1-d)x_1 - \frac{1}{R_0C}x_2 \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 x_1 은 인덕터 전류, x_2 는 출력 전압, E 는 입력 전압이고 d 는 제어 입력(duty ratio)을 나타낸다(단, $0 \leq d < 1$). 회로 정수 L , C , R_0 는 각각 인덕턴스, 커패시턴스, 부하 저항을 나타낸다. 동작원리를 쉽게 확인하기 위해 먼저 이상적인 인덕터를 가진 모델을 고려한다. 식 (1)에서 인덕터 등가 저항을 무시하면(즉, $R_1 = 0$) 정상상태에서의 입출력 관계

* 준회원 : 명지대학교 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 명지대학교 전기공학과 부교수 · 공박

E-mail : sonyi@mju.ac.kr

접수일자 : 2009년 6월 24일

최종완료 : 2009년 9월 10일

와 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 나타낸다. 식 (2)에서 제어입력의 범위($0 \leq D < 1$)를 생각하면 출력 전압이 입력전압보다 높은 성질을 확인할 수 있다.

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

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

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

부하 저항(R_o)의 변화가 D 와 X_2 에 영향을 미치지 않는 (2) 식과 달리 (4)에서는 부하 저항의 변동이 입력 및 출력 전압의 평형점을 변화시킬 수 있다.

전압 측정을 통한 전류 추정을 위해 본 논문에서는 식 (1)의 동작점 선형화 모델을 고려한다.

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L} & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{R_o C} \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} \frac{X_2}{L} \\ -\frac{X_1}{C} \end{bmatrix} u \quad (5)$$

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

위 식에서 $z = [x_1 - X_1 \ x_2 - X_2]^T$, $u = d - D$ 이다. 일반적으로 상태추정을 위해 널리 사용되고 있는 Luenberger 관측기는 식 (5)를 기반으로 설계되므로 모델의 불확실성이 존재하는 경우 식 (1)의 정확한 상태 추정이 어렵게 된다. 다음 절에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 PI 관측기를 이용한 전류 추정 방법을 제안한다.

2.2 PI 관측기를 이용한 제어기 설계

센서의 사용이 불가능하거나 비용절감을 위해 상태를 추정하여 사용해야 할 경우 상태 관측기가 사용된다. 일반적으로 Luenberger 관측기가 많이 사용되고 있으나, 시스템에 불확실성이 존재하게 되면 추정 오차 ($y - \hat{y}$)와 함께 그 적분 $\int (y - \hat{y})$ 을 추가로 사용하여 성능 향상을 얻고자 하는 연구가 진행되고 있다[6,7]. 오차의 적분효과는 불확실성에 강인한 것으로 잘 알려져 있으며 본 논문에서는 강인한 전류 추정을 위해 식 (6)과 같은 PI 관측기를 설계한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{z}} \\ \dot{\hat{f}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p N \\ 0 \ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{z} \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} (y - \hat{y}) \quad (6)$$

$$\hat{y} = C_p \hat{z}$$

행렬 A_p, B_p, C_p 는 식 (5)의 시스템 행렬, 입력 행렬, 출력 행렬을 각각 나타내며, \hat{z} 는 관측기의 상태변수이고, \hat{f} 는 외란이나 불확실성을 나타낸다. G_1, G_2 는 관측기 이득이며 N 은 시스템의 불확실성을 고려하기 위한 행렬이다. 본 논문의 모의실험에서는 식 (5)의 시스템 행렬을 고려하여 $N = [0 \ -1]^T$ 로 설계하였다. 이 N 은 적분기가 추가된 시스

템의 가관측성 조건을 만족시키고, 이는 부하변동으로 인한 불확실성에도 관측 오차가 제거될 수 있음을 의미한다[6].

설계된 N 과 식 (6)을 활용하여 논문에서 제안하는 제어기는 그림 1과 같은 PI 관측기 기반 적분형 상태제환 제어기로 구성된다. 적분형 상태제환 제어기는 상태제환 제어기에 적분항 $z_i = \int (r - y)$ 를 추가로 사용하는 제어기이며 제어 입력은 $u = -[K_1 \ K_2 \ K_3][z \ z_i]^T$ 이다. 이때, 이득 행렬 $[K_1 \ K_2 \ K_3]$ 은 폐루프 시스템이 안정하도록 결정한다. 결국, 출력전압(x_2)은 측정치를 이용하고 전류(x_1)는 관측기를 기반으로 추정하여 사용하는 적분형 상태제환 제어기이다. 다음 장의 모의실험에서 설계된 PI 관측기의 성능을 시험한다.

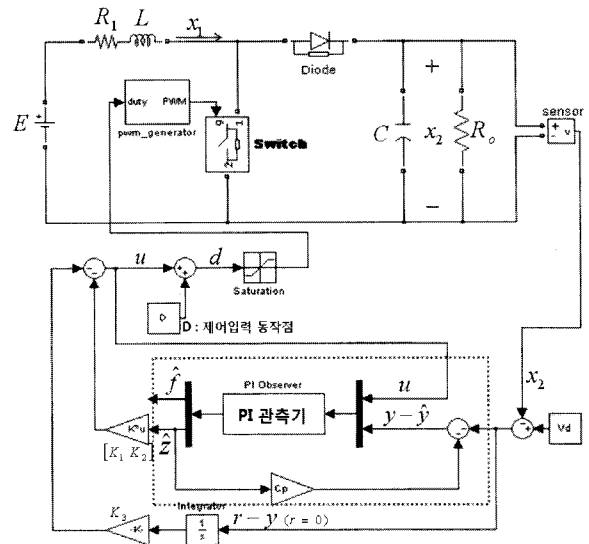


그림 1 PI 관측기 기반 적분형 상태 제환 제어기
Fig. 1 PI observer based integral state feedback controller

3. 모의실험

모의실험을 통해 Luenberger 관측기와 PI 관측기의 상태 관측 성능을 비교한다. PI 관측기는 그림 1과 같이 적분형 상태 제환 제어기의 구현에 사용되었고 Luenberger 관측기는 그림 1의 시스템에서 상태관측만을 하도록 구성되었다. 보다 현실적인 고려를 위해 식 (1) 대신 Matlab Simulink의 SimPowerSystem을 사용하여 실험하였다. 실험에 사용한 회로의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 DC/DC 승압 컨버터의 파라미터
Table 1 Parameter of the DC/DC boost converter

인덕터	$L = 1\text{mH}$	인덕터 저항	$R_1 = 0.6\Omega$
커패시터	$C = 1\text{mF}$	스위칭주파수	$f_s = 20\text{KHz}$
입력전압	$E = 12\text{V}$	초기부하	$R_o = 50\Omega$

목표 전압은 24[V]이며 부하 저항은 $t = 50\text{ms}$ 에서 $R_o = 14.8\Omega$ 으로 $t = 110\text{ms}$ 에서 $R_o = 85.72\Omega$ 으로 변동한다. 관측기의 성능 비교에 앞서 그림 2는 관측된 상태를 이용한 제어기의 전압(x_2) 제어 결과를 나타낸다. 부하변동으로 인한 모델의 불확실성에 대해 설계된 제어기가 그 성능을 유

지하고 있음을 알 수 있다. 그림 3과 4는 두 관측기의 성능 차이를 보여준다. 그림 3의 Luenberger 관측기는 부하변동이 일어날 경우 인덕터 전류를 정확하게 추정하지 못함을 알 수 있다. 그림 4는 PI 관측기를 사용한 결과이며 부하변동이 일어나더라도 인덕터 전류를 정확하게 추정하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 PI 관측기의 사용으로 제어기의 전류 추정 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

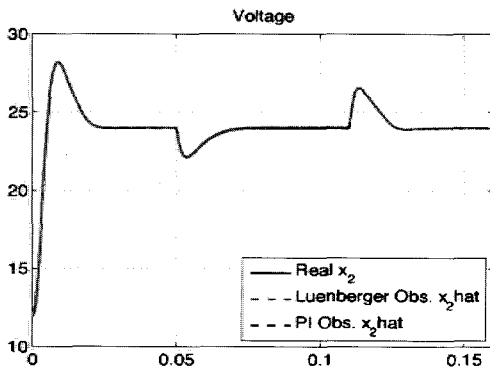


그림 2 부하 변동시 출력전압
Fig. 2 Output voltage with load variation

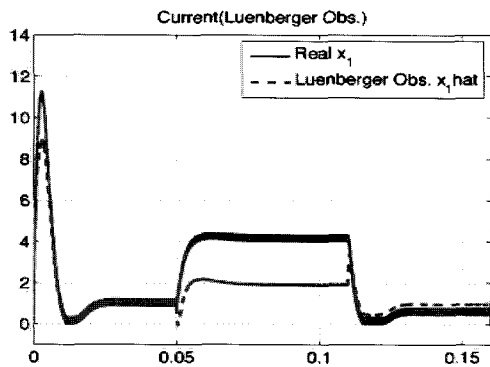


그림 3 Luenberger 관측기를 사용한 인덕터 전류추정
Fig. 3 Current Estimation Using Luenberger Observer

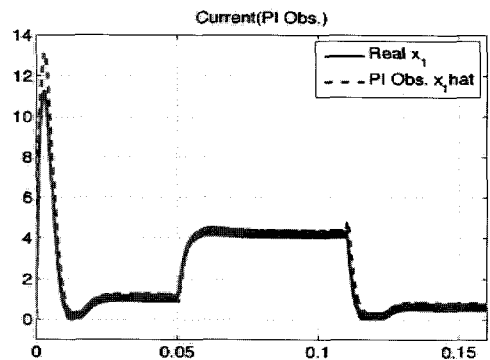


그림 4 PI 관측기를 사용한 인덕터 전류추정
Fig. 4 Current Estimation Using PI Observer

4. 결 론

본 논문에서는 부하 변동과 인덕터 등가 저항(R_L)이 존재할 때 DC/DC 승압 컨버터의 동작점에 불확실성이 발생함을 살펴보았으며, 부하 변동시 Luenberger 관측기는 인덕터 전류 추정에 있어서 실패한 반면, 제안된 PI 관측기는 불확실성에 강인한 관측 성능을 보임을 확인하였다. 논문의 적용 예로 컨버터의 고장진단 등 보호기능이 필요한 경우 설계된 관측기를 사용으로 보호기능 개선에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

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

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 Science*, Vol. 26, No. 9, pp1571-1582, 1995.
- [7] D. Koenig, "Unknown Input Proportional Multiple-Integral Observer Design for Linear Descriptor Systems: Application to State and Fault Estimation", *IEEE Trans. on Auto. Contr.*, Vol. 50, No. 2, pp. 212-217, 2005.