

오차 공간 접근법을 이용한 연료전지용 인버터 제어기 설계

박가우, 염상구, 김형철, 이진목, 김수철, 이재문, 정현선, 최재호
 충북대학교 전기공학과

Design of digital Controller for Fuel Cell Inverter using Error Space Approach

Gawoo Park, Sanggu Yeom, Hyungchul Kim, Jinmok Lee,
 Soocheol Kim, Jaemoon Lee, Hunsun Jung, Jaeho Choi

School of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University, Korea

ABSTRACT

연료전지용 전력변환 시스템에서 기존의 PID 제어기의 해석적인 해를 얻는 것은 매우 어려운 일이다. 최근, UPS용 CVCF 시스템에서 오차 공간 접근법을 이용한 새로운 제어알고리즘을 바탕으로 시스템의 제어기의 제어상수를 해석적으로 접근하여 좋은 성능을 얻은 바 있다. 오차 공간 접근법은 해석적으로 시스템의 응답속도 및 오버슈트를 임의의 제한범위 내로 설계할 수 있도록 하는 제어할 수 있는 장점이 있다. 이러한 UPS 시스템의 제어기 설계방법을 유사한 구조의 연료전지의 인버터 제어기 설계에 적용하여 해석적으로 제어기의 제어상수를 얻고 시뮬레이션을 통하여 제어기가 안정하며 빠른 응답속도를 가지는 것을 확인한다.

1. 서론

현재 사용하고 있는 화석연료와 원자력에너지는 매장량이 한계가 있고 환경에 심각한 영향을 주고 있다. 이러한 환경문제 및 자원의 고갈을 해결할 수 있는 에너지 자원으로 태양광, 풍력, 연료전지 등의 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 연료전지는 시간 및 장소에 구애받지 않는 장점을 가지고 있어 더욱더 중요한 에너지로 부각되고 있다.

연료전지 인버터는 효율을 극대화하기 위해서는 최적의 제어기를 설계 하는 것이 중요하다. 그러나 지금까지는 최적의 제어상수를 얻기 위한 제어이론적인 접근이 어려웠을 뿐만 아니라 이를 디지털로 구현하기 위한 제어기의 샘플링 시간 지연을 고려하기 어려웠다. 그러나 최근 UPS용 CVCF 인버터 시스템에서 제어기 설계를 오차 상태 접근법을 이용하여 좋은 결과를 얻은 바 있다^[1]. 오차 상태 접근법을 통한 인버터는 오버슈트와 응답시간을 설계 초기에 정할 수 있는 장점을 가지고 있다. CVCF 인버터의 시스템은 연료전지의 인버터의 제어와 유사하므로 이를 연료전지 제어기 설계에 적용하여 제어기의 성능을 분석한다.

2. 오차 상태 접근법

2.1 연료전지 인버터 시스템

독립형 연료전지 시스템은 그림 1과 같이 연료전지와 그로

부터 발생된 전압을 승압하는 DC/DC 컨버터 그리고 컨버터의 전압을 단상의 교류전압으로 바꾸어 주는 인버터로 구성된다. 이때 컨버터의 출력전압이 일정하다면 이는 UPS 시스템과 유사한 그림 2에서와 같은 구조로 표현 가능하다.

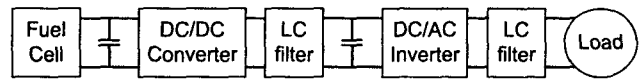


그림 1 연료전지 시스템
 Fig. 1 The fuel cell system

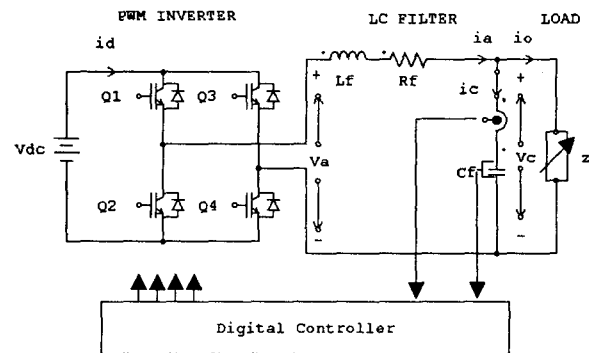


그림 2 연료전지 인버터 시스템
 Fig. 2 The fuel cell inverter system

이러한 시스템에서 연료전지 인버터 제어기 설계를 위한 상태 변수를 i_c 와 v_c 로서 정의하고 상태변수 x_1 과 x_2 에 대해 전개하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = -\frac{R_f}{L_f}x_1 - \frac{1}{L_f}x_2 + \frac{1}{L_f}v_a - (\hat{i}_o + \frac{R_f}{L_f}i_d) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_f}x_1 \quad (2)$$

(단, $x_1 = i_c$, $x_2 = v_c$)

출력변수를 v_c 라 할 때 출력 방정식은 다음과 같다.

$$y = v_c = Hx = [0 \ 1]x \quad (3)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} x^T + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \omega \quad (4)$$

(단, $x^T = [x_1 \ x_2]$, $u = v_a$, $w = \dot{i}_o + \frac{R_f}{L_f} i_o$)

2.2 오차 상태방정식을 이용한 제어기

기준 신호 v_c^* 는 주파수 ω_0 [rad/sec]를 갖는 사인 파형이므로 식 (5)를 만족한다. 이때 추종 오차를 0으로 만드는 제어기의 설계를 위한 오차 상태방정식을 식 (6)과 (7)로 정의한다. 폐루프 시스템의 특성다항식은 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\ddot{v}_c + \omega_0^2 v_c^* = 0 \quad (5)$$

$$\dot{z} = Az + B\mu \quad (6)$$

$$\mu = -[k_1 \ k_2 \ K_o] \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ \xi \end{bmatrix} = -Kz \quad (7)$$

(단, $K_0 = [k_3 \ k_4]$, $z = [e \ \dot{e} \ \xi]^T$, $\xi \equiv \dot{x} + \omega_0^2 x$, $\mu \equiv \dot{u} + \omega_0^2 u$)

$$\Delta_c(S) = |Si - (A - BK)| \quad (8)$$

$$e = v_c^* - v_c = v_c^* - y, \quad \eta(s) = s^{-1}[-k_2 e(s) + \eta_1(s)]$$

와 $\eta_2(s) = \eta(s)$ 로 가정하면 오차 상태 접근법에 의해서 우리는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다^[2].

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_1 \\ -k_2 \end{bmatrix} e \quad (9)$$

$$\eta = [0 \ 1] \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$u = \eta - k_3 x_1 - k_4 x_2 = \eta - K_0 x \quad (11)$$

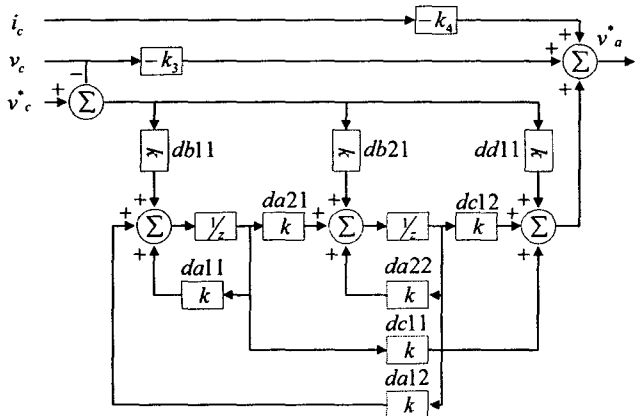


그림 3 연료전지의 디지털 제어기

Fig. 3 Digital Controller and the fuel cell inverter system

이러한 연속시간 제어기를 Tustin 근사화에 의해 이산 상태

공간화하면 다음 식 (12)와 (13)를 얻을 수 있으며 이러한 제어기는 그림 3와 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\eta}(k+1) = a_d \bar{\eta}(k) + b_d e(k) \quad (12)$$

$$\eta(k) = c_d \bar{\eta}(k) + d_d e(k) \quad (13)$$

3. 시뮬레이션 및 결과

3.1 제어기 파라미터 결정

연료전지 인버터 시스템은 3 kW 정격이며 DC 링크 전압은 부스트 컨버터에 의해 400 V로 전압이 일정하게 유지되며 인버터의 CVCF 제어로 311 V의 출력전압을 얻는다. 인버터의 PWM 스위칭 주파수는 12 kHz이고 샘플링 주파수도 12 kHz이다. 오차 공간 접근법은 제어기의 응답 속도 및 오버슈트를 설계자의 의도대로 결정할 수 있으므로 오버슈트가 3% 이내이며 응답시간 즉 정정시간이 8 ms 이내로 되도록 제어기를 설계한다.

오차 상태 접근법을 이용한 연료전지 시스템의 사양은 표 1과 같다.

표 1 연료전지 인버터의 사양
Table 1 Spec. of the fuel cell inverter

System parameter	Values	
Filter	Inductance (L_f)	2 mH
	Resistance (R_f)	0.01 Ω
	Capacitance (C_f)	120 μ F
Reference voltage	311 V	
DC-link (v_c^*)	400 V	
Switching Frequency	12000 Hz	
Sampling Frequency	12000 Hz	

오버슈트가 3% 이내이면 식 (14)을 만족해야 하므로 $\alpha_d = 2.6$ 가 되어야 한다^[3]. 정정시간은 오버슈트가 5% 미만일 때 식 (15)과 같이 근사화 될 수 있다. 그러므로 정정시간이 3 ms 일 때 $\omega_n > 1200$ 이며 식 (20)에 의해서 τ_{d1} 을 구할 수 있다.

$$\zeta = \frac{\sqrt{\alpha_d}}{2} > 0.80 \quad (14)$$

$$t_s = \frac{4.5\zeta}{\omega_n} \quad (15)$$

$$\tau_{d1} = \frac{2\zeta}{\omega_n} > \frac{0.8 \times 2}{1200} = 1.33 \times 10^{-3} \quad (16)$$

$\tau_{d1} = 0.27 \times 10^{-3}$ 이로부터 얻은 파라미터의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} da &= 9.995066415112733e-001 & -1.184060372944024e+001 \\ & 8.331277672963638e-005 & 9.995066415112733e-001 \\ db &= 9.377279394902976e+006 \\ & 1.475118106092303e+004 \end{aligned}$$

dc = 3.471365697068182e-009 8.331277672963638e-005
 dd = 6.146325442051264e-001
 k3 = 1.871000000000000e+001
 k4 = 7.08703999999997e+000

3.2 시뮬레이션

연료전지 인버터의 시뮬레이션은 그림 2과 같은 회로에 그림 3과 같은 디지털 제어기로 제어되며 Psim 6.0으로 시뮬레이션 하였다. α 값은 일정하게 유지하면서 τ 값이 변화 할 때의 응답속도를 알아보기 위해서 인버터에 정격의 50%의 부하로 운전하다가 0.8 ms에서 부하를 정격의 100%로 변화시켜 응답속도를 알아보았다.

τ 가 1.3m 인경우의 인버터 출력 전압 및 기준전압은 그림 4와 같다. 초기의 응답속도가 다소 늦는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 오버슈트는 일어나지 않는 안정한 상태를 확인할 수 있다. 이때의 커패시터 전류 및 부하전류를 그림 5에서 나타내고 있다. LC 필터를 통과한 부하전류는 전압과 같은 위상으로 리플이 없이 제어가 되고 있다.

τ 가 0.27m 인경우의 인버터 출력 전압 및 기준전압은 그림 6에서와 같이 초기의 응답속도가 매우 빠르며 부하 변동시에도 빠른 응답을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 빠른 응답임에도 불구하고 오버슈트가 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이때의 커패시터 전류 및 부하전류를 그림 7에서 나타내고 있다. 전류의 변화는 τ 값이 변화하더라도 많은 변화를 보이지 않았다.

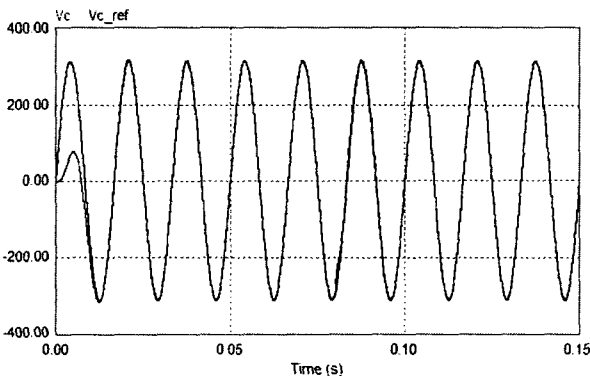


그림 4 기준 전압 및 커패시터 전압 ($\tau=1.3 \times 10^{-3}$)
 Fig. 4 Reference and capacitor voltage ($\tau=1.3 \times 10^{-3}$)

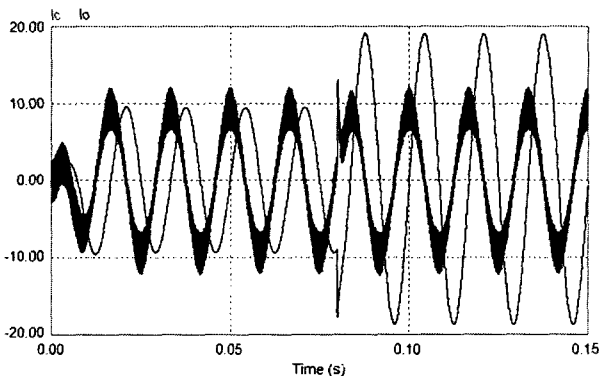


그림 5 커패시터 전류 및 부하전류 ($\tau=1.3 \times 10^{-3}$)
 Fig. 5 Capacitor current and load current ($\tau=1.3 \times 10^{-3}$)

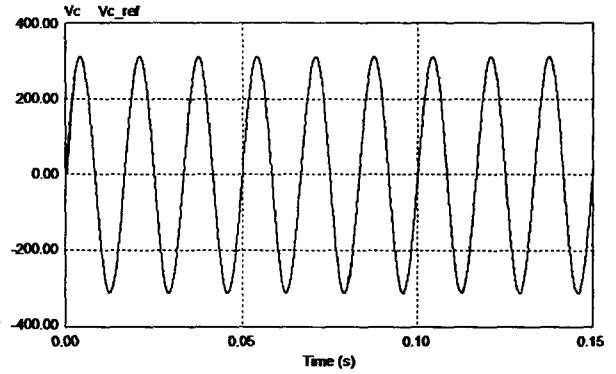


그림 6 기준전압과 커패시터 전압 ($\tau=0.27 \times 10^{-3}$)
 Fig. 6 Reference voltage and capacitor voltage when load is changed ($\tau=0.27 \times 10^{-3}$)

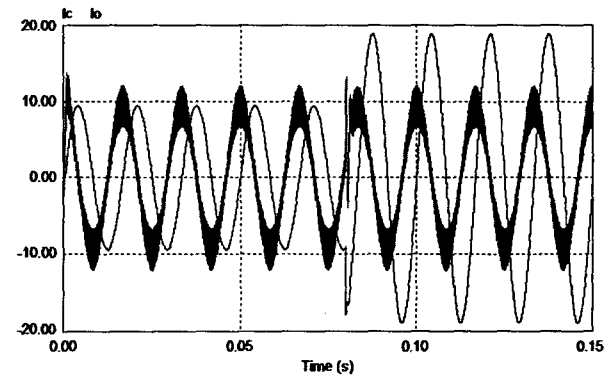


그림 7 부하 전류 및 커패시터 전류 ($\tau=0.27 \times 10^{-3}$)
 Fig. 7 Load current and capacitor current when load is changed ($\tau=0.27 \times 10^{-3}$)

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구 결과로 수행되었음

4. 결론

독립형 연료전지 인버터의 제어를 오차 공간 접근법을 이용하여 제어기 설계를 하였다. 제어기 설계에서 해석적으로 제어 상수 값을 얻었으며 더욱이 오버슈트와 응답속도를 자유로이 조절이 가능하다는 점에서 매우 유용하다. 이러한 방법으로 구성된 제어기는 부하의 변동에서도 안정적이었으며 빠른 응답속도를 가졌다. 향후 연료전지 전체시스템을 구성하기 위해서 컨버터 부분의 제어를 해석적으로 접근 할 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] Y.T. Woo and Y.C. Kim, "Digital control of a single-phase UPS inverter for robust AC-voltage tracking," *Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 3, no. 4, pp. 620-630, 2005, December.
- [2] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback control of dynamic systems*, Prentice hall, 2002.
- [3] B. C. Kuo, *Automatic control system*, Prentice hall, 1990.