

CRA 제어를 이용한 독립형 연료전지 인버터 시스템

박가우, 이진목, 정현선, 최재호
충북대학교 전기공학과

Stand-alone fuel cell inverter system using CRA controller

Gawoo Park, Jinmok Lee, Hunsun Jung, Jaeho Choi
School of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University

Abstract - 독립형 연료전지 전력변환 시스템에서 인버터는 출력주파수의 2배 성분의 리플을 가지고 있기 때문에 직류버스 전압에도 이 주파수 성분이 존재하게 된다. 이 리플 전류는 연료전지의 수명과 효율을 저하시키므로 제어를 통해 줄여야 한다. 최근 특성비 지정법을 이용하여 해석적으로 제어를 설계하는 방법이 제안되었다. 해석적인 방법으로 연료전지 인버터의 제어를 설계한다. 이 제어기는 부하 변동에 대해서 응답속도가 빠르며 120 Hz 리플에 강인함을 확인한다.

수 성분이 크게 나타나게 된다. 그러므로 연료전지의 효율을 높이고 수명을 연장하기 위해서는 컨버터의 직류출력 버스전압에 리플이 포함되더라도 일정 직류전류로 운전되어야 할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 직류전압에 포함된 120Hz 주파수에 강인한 특성비 지정법의 독립형 연료전지 인버터 제어를 설계한다. 독립형 연료전지 인버터 시스템에서 연료전지 인버터 제어기 설계를 위한 상태 변수를 커패시터의 전류: i_c 와 전압: v_c 로서 정의하고 상태변수 x_1 과 x_2 에 대해 전개하면 다음과 같다.

1. 서 론

화석연료와 원자력에너지의 매장량이 한계와 환경에 대한 심각한 영향으로 인해 최근 대체에너지에 대한 관심이 증대되고 있다. 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 제어를 설계하는 것이 중요하다. 그러나 지금까지는 최적의 제어상수를 얻기 위한 제어 이론적인 접근이 어려웠을 뿐만 아니라 이를 디지털로 구현하기 위한 제어기의 샘플링 시간 지연을 고려하기 어려웠다. 그러나 특성비 지정법을 이용하여 UPS용 CVCF 인버터 시스템의 제어를 설계하는 방법이 제시되었다^[1]. 이 방법은 해석적인 방법으로 제어기의 응답시간과 오버슈트를 설계시에 정할 수 있는 장점을 가지고 있다. CVCF 인버터의 시스템은 연료전지의 인버터의 제어와 유사하므로 이를 120 Hz의 성분을 갖는 연료전지 제어기 설계에 적용하여 제어기 성능을 분석한다.

$$\dot{x}_1 = -\frac{R_f}{L_f}x_1 - \frac{1}{L_f}x_2 + \frac{1}{L_f}v_o - (\dot{i}_o' + \frac{R_f}{L_f}i_o) \tag{1}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_f}x_1 \tag{2}$$

(단, $x_1 = i_c$, $x_2 = v_c$)

출력변수를 커패시터의 전압을 v_c 라 할 때 출력 방정식은 다음과 같다.

$$y = v_c = Hx = [0 \ 1]x \tag{3}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \omega \tag{4}$$

(단, $x^T = [x_1 \ x_2]$, $u = v_o$, $w = \dot{i}_o' + \frac{R_f}{L_f}i_o$)

2. 본 론

2.1 연료전지 시스템

독립형 연료전지 시스템은 그림 1과 같이 연료전지와 그로부터 발생된 전압을 승압하는 DC/DC 컨버터 그리고 컨버터의 전압을 단상 교류전압으로 바꾸어 주는 인버터로 구성된다. DC/DC 컨버터는 연료전지의 낮은 출력전압을 인버터가 요구하는 높은 전압으로 승압하기 위해 Full-bridge 컨버터와 고주파 변압기 및 정류기로 구성되며, 변압기와 정류기는 병렬로 구성하여 승압비 및 용량을 분담하였다.

컨버터 제어는 외부 전압제어기와 내부 전류제어기로 구성된다. 외부 전압제어기는 인버터가 요구하는 직류전압 기준치로 제어되도록 동작되며, 이 전압제어기의 출력은 연료전지 출력 전류량과 비교하여 설정된 전류 범위 내로 운전되도록 전류제어기가 내부제어기로 동작한다.

인버터에 의해서 출력되는 전력은 출력주파수의 2배인 120Hz 성분을 갖게 되므로 직류버스 전압에도 이 주파수 성분이 존재하게 된다. 그러나 컨버터의 전압제어기가 120Hz 주파수 성분이 포함된 출력전압을 제어대상에 포함하게 되므로 연료전지의 출력 전류 또한 120Hz 리플전류를 띠게 되는데 이는 연료전지의 수명과 효율을 저하시키는 요소가 된다. 따라서 컨버터의 직류전압을 일정하게 유지시키기 위한 제어 구조에서는 120Hz 전류리플이 연료전지로부터 공급되어야 하나 연료전지로부터 이 주파수 성분이 공급되지 않고 일정 직류 성분만 공급된다면 출력직류버스 전압에는 이 주파

2.2 특성비 지정법

특성비 지정법 (Characteristic ratio assignment: CRA)은 전달함수의 특성비를 지정하는 방법으로 선형 시스템에서 전달함수가 식 (5)와 같이 고려할 수 있다. 이때 특성비를 식 (6)과 같이 정의하고 시정수를 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

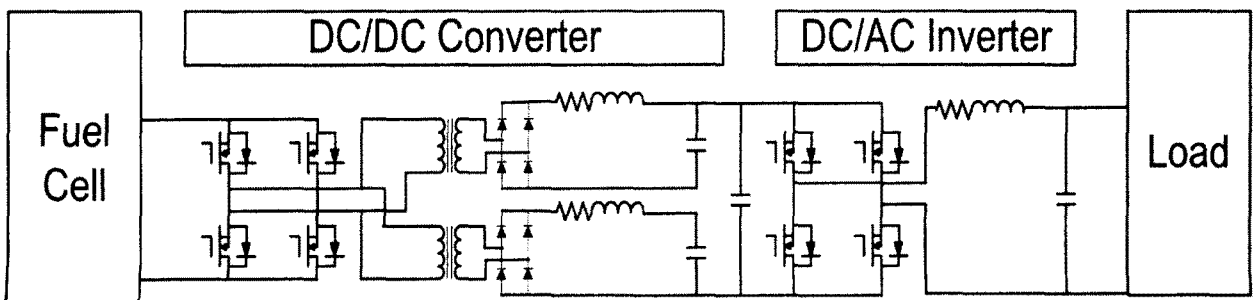
$$G(s) = \frac{n(s)}{p(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \tag{5}$$

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \dots, \alpha_{n-1} = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \tag{6}$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \tag{7}$$

α_1' 와 τ 로 $\delta(s)$ 를 나타낼 때 계수 a_1 는 식 (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 a_0 , τ 를 양의 값으로 정의 할 때 특성비 α_k 를 식 (10), (11)과 같다.

$$a_1 = a_0 \tau \tag{8}$$



〈그림 1〉 연료전지 시스템

$$a_i = \frac{a_0^i}{\alpha_{i-1} \alpha_{i-2} \alpha_{i-3} \dots \alpha_2 \alpha_1^{i-1}}, \text{ for } i=2, \dots, n \quad (9)$$

$$\alpha_1 > 2 \quad (10)$$

$$\alpha_k = \frac{\sin(k\pi/n) + \sin(\pi/n)}{2\sin(\pi/n)} \cdot \alpha_1 = \Gamma_k \cdot \alpha \quad (11)$$

(단, $k=2, \dots, n-1$)

2.3 연료전지용 인버터 제어기 설계

기준 신호 v_c^* 는 주파수 ω_0 [rad/sec]를 갖는 사인 파형이므로 식 (12)를 만족한다. 이때 추종 오차를 0으로 만드는 제어기의 설계를 위한 오차 상태 방정식을 식 (13)로 정의한다. 페루프 시스템의 특성다항식은 식(14)과 같이 구할 수 있다.

$$\ddot{v}_c + \omega_0^2 v_c^* = 0 \quad (12)$$

$$\dot{z} = Az + B\mu, \quad \mu = -[k_1 \ k_2 \ K_0] \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ \xi \end{bmatrix} = -Kz \quad (13)$$

$$\text{(단, } K_0 = [k_3 \ k_4], \ z = [e \ \dot{e} \ \xi]^T, \ \xi \equiv \ddot{x} + \omega_0^2 x, \ \mu \equiv \ddot{u} + \omega_0^2 u) \quad (14)$$

다음과 같이 $e = v_c^* - v_c = v_c^* - y$, $\eta(s) = s^{-1}[-k_2 e(s) + \eta_1(s)]$ 와 $\eta_2(s) = \eta(s)$ 를 가정하면 오차 상태 접근법에 의해서 우리는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다^[2].

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_1 \\ -k_2 \end{bmatrix} e \quad (15)$$

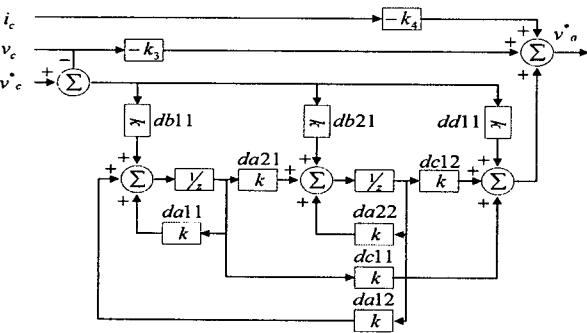
$$\eta = [0 \ 1] \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$u = \eta - k_3 x_1 - k_4 x_2 = \eta - K_0 x \quad (17)$$

이러한 연속시간 제어기를 Bilinear 변환에 의해 이산 상태 공간화하면 다음 식 (18)와 (19)를 얻을 수 있으며 이러한 제어기는 그림 2와 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\eta}(k+1) = a_d \bar{\eta}(k) + b_d e(k) \quad (18)$$

$$\eta(k) = c_d \bar{\eta}(k) + d_d e(k) \quad (19)$$



〈그림 2〉 독립형 연료전지 인버터 시스템 제어기

2.4 시뮬레이션 및 결과

연료전지 인버터 시스템은 3 kW 정격이며 DC 링크 전압은 부스트 컨버터에 의해 500V로 전압으로 제어되며 인버터의 CVCF 제어로 311 V의 출력전압을 얻는다. 인버터의 PWM 스위칭 주파수는 12 kHz이고 샘플링 주파수도 12 kHz이다. CRA 제어기의 응답 속도 및 오버슈트를 설계자의 의도대로 결정할 수 있으므로 오버슈트가 3% 이내이며 응답시간 즉 정정시간이 8 ms 이내로 되도록 제어기를 설계한다. 오버슈트가 3%이내이면 식 (20)에 의해서 $\alpha_{11} = 2.6$ 가 되어야 한다^[3]. 그러므로 정정시간이 3 ms 일 때 $\omega_n > 1200$ 이며 τ_{11} 을 구할 수 있다.

$$\zeta = \frac{\sqrt{\alpha_{11}}}{2} > 0.80, \quad t_s = \frac{4.5\zeta}{\omega_n}, \quad \tau_{11} = \frac{2\zeta}{\omega_n} > \frac{0.8 \times 2}{1200} = 1.33 \times 10^{-3} \quad (20)$$

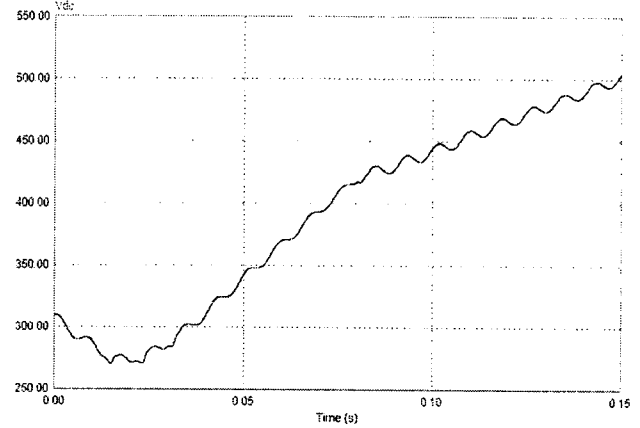
$\tau_{11} = 0.27 \times 10^{-3}$ 이로부터 얻은 파라미터의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} da &= \begin{bmatrix} 0.999516 & -11.840604 \\ 0.000083 & 0.999507 \end{bmatrix} \\ db &= \begin{bmatrix} 9377279.394903 \\ 14751.181061 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

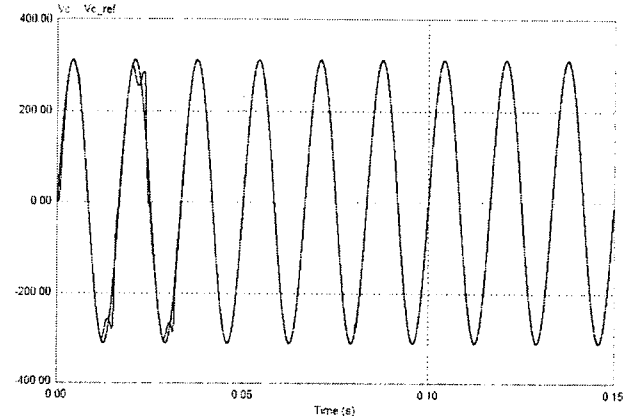
$$\begin{aligned} dc &= 0.0 & 0.000083 \\ dd &= 0.614633 \\ k3 &= 18.710000 \\ k4 &= 7.08704 \end{aligned}$$

연료전지 인버터 시스템의 실제 사양은 $L=2$ mH, $R=0.01$ Ω , $C=120$ μ F이며 시뮬레이션은 그림 1과 같은 회로에 그림 2와 같은 디지털 제어기로 제어되며 Psim 6.0으로 시뮬레이션 하였다. 응답속도를 알아보기 위해서 인버터에 정격의 50%의 부하로 운전하다가 0.8 ms에서 부하를 정격의 100%로 변화시켜 응답속도를 알아보았다. τ 가 0.27 m 인 경우의 DC 링크 전압은 그림 3과 같다. 인버터 출력 전압 및 기준전압은 그림 4와 같다. 초기의 응답속도가 다소 늦으나 오버슈트는 일어나지 않는 안정한 상태를 확인할 수 있다.

〈그림 3〉 DC 링크 전압 ($\tau=0.27 \times 10^{-3}$)



〈그림 4〉 인버터의 기준 전압과 출력전압 ($\tau=0.27 \times 10^{-3}$)



3. 결 론

본 논문은 CRA 기법을 이용하여 독립형 연료전지 인버터의 강인한 제어기를 설계를 하였다. 제안된 제어기 설계기법은 해석적으로 제어 상수 값을 얻을 수 있으며 더욱이 오버슈트와 응답속도를 제어기 설계 초기에 자유로이 조절이 가능하다는 점에서 매우 유용하다. 이러한 방법으로 구성된 제어기는 부하의 변동에서도 안정적이었으며 빠른 응답속도를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음

[참 고 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