

계통 연계 인버터 전류 제어를 위한 PI 관측기 설계

최대식*, 정종규*, 이지현*, 손영익*, 김갑일*, 한병문*
*명지대학교

PI Observer Design for Grid-Connected Inverter Current Control

Dae-Sik Choi*, Jong-Kyou Jeong*, Ji-Heon Lee*, Young-Ik Son*, Kab-Il Kim*, Byung-Moon Han*
*Myongji University

Abstract - 새로운 에너지원의 도입 필요성이 증가함에 따라 인버터를 통한 직류전원의 계통 연계에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 간섭성분 및 계통 전압을 전향 보상하여 전류 제어를 구성하는 고전적인 기법은 시스템 파라미터의 불확실성에 대해 원하는 성능을 얻기 어렵다. 본 논문에서는 PI 관측기를 이용한 추가 보상을 통해 파라미터 불확실성에 대한 강인성을 증가시키는 방법을 제안한다.

1. 서 론

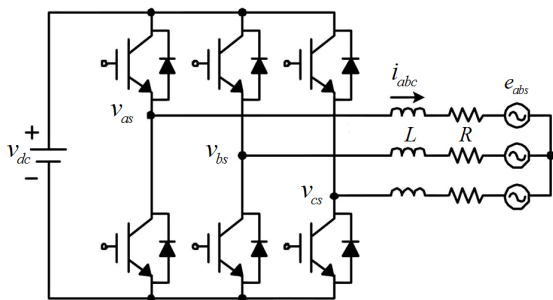
전 세계적으로 화석연료의 고갈 문제가 크게 대두되고 있다. 대처 방안으로 새로운 에너지원에 대한 연구가 진행 중이며, 특히 태양광 발전이나 풍력발전 등의 친환경 분산전원에 대한 연구가 증가하고 있다 [1-2]. 분산전원에 의한 직류 전원을 계통에 연계하기 위해서 일반적으로 3상 전압형 인버터가 사용된다. 본 논문에서는 계통 연계 인버터의 전류 제어기 설계 문제를 다룬다.

인버터의 전류 제어 기법으로 인덕터에 의한 간섭성분 및 계통 전압을 전향 보상하여 제어기를 구성하는 기술적 최적화(Technical Optimum) 기법이 널리 사용되고 있다. 이 기법은 간섭성분 및 계통 전압을 전향 보상(Feed-forward Compensation)으로 간섭성분 및 계통 전압에 대한 영향을 배제한 상태에서 PI 제어기로 페루프 시스템의 응답을 간단하게 설계할 수 있는 장점이 있다. 하지만 설계 파라미터의 불확실성이 있을 경우에 원하는 성능을 얻기 어려운 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 파라미터의 불확실성에 강인함을 유지하기 위해서 PI 관측기 이용하여 불확실성을 보상한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서는 3상 계통 연계 인버터의 d-q 회전 변환 모델에 대해서 알아보고, 2.2절에서는 기술적 최적화 기법을 이용한 고전적인 전류 제어기 설계를 알아본다. 2.3절에서는 PI 관측기 설계를 알아보고, 3장에서 제안하는 방법을 통한 성능 향상을 모의 실험을 통해 시험한다.

2. 본 론

2.1 3상 인버터 d-q 회전 변환 모델



〈그림 1〉 3상 계통 연계 인버터 모델

그림 1은 등가 직렬 저항 R 과 인덕터 L 을 통해 계통에 연계된 3상 계통 연계 인버터를 보여준다. 시스템에 대한 전압 방정식을 구하면 식 (1)로 표현된다[4-5].

$$v_{abc} = Ri_{abc} + L \frac{di_{abc}}{dt} + e_{abc} \quad (1)$$

여기서 v_{abc} 는 인버터 출력전압, i_{abc} 는 계통으로 흐르는 인버터 출력 전류, e_{abc} 는 계통 전압을 나타내며 각각 $v_{abc} = [v_a \ v_b \ v_c]^T$, $i_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$, $e_{abc} = [e_a \ e_b \ e_c]^T$ 로 표현된다. 그림 1에서 인가되는 전압, 전류가 전부 각주파수 ω_c 을 갖는다면 d-q 회전좌표(동기 좌표계)

를 사용하여 식 (2), (3)으로 나타낼 수 있다. d-q 회전 변환을 사용하면 3상 교류 전압 및 전류는 동기 좌표계의 직류 전압 및 직류 전류로 표현된다.

$$v_d^e = R i_d^e + L \frac{di_d^e}{dt} - \omega_c L i_q^e + e_d^e \quad (2)$$

$$v_q^e = R i_q^e + L \frac{di_q^e}{dt} + \omega_c L i_d^e + e_q^e \quad (3)$$

2.2 전류 제어기 설계(Classical Method)

일반적으로 널리 쓰이는 인버터 전류 제어의 설계 기법으로 기술적 최적화를 들 수 있다. 그림 2에서와 같이 간섭성분을 전향 보상하는 항과 PI 제어기를 결합하여 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$v_d^e = \frac{K_p s + K_i}{s} (i_d^{e*} - i_d^e) - \omega_c L i_q^e + e_d^e \quad (4)$$

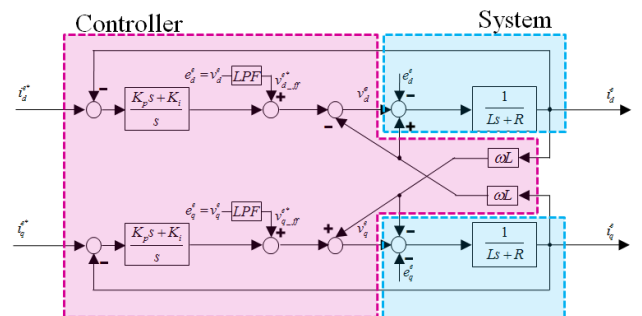
$$v_q^e = \frac{K_p s + K_i}{s} (i_q^{e*} - i_q^e) + \omega_c L i_d^e + e_q^e \quad (5)$$

여기서 i_d^{e*} , i_q^{e*} 는 각각 d, q축의 목표 전류를 나타낸다. 인덕터에 의한 간섭성분 $\omega_c L$ 을 비간섭 제어를 행하도록 하며, 계통 전압 e_d^e , e_q^e 를 함께 전향 보상함으로써 간섭성분 및 계통 전압의 변동에 의한 영향을 배제한 상태에서 식 (4), (5)를 사용하여 각각의 페루프 전달함수가 식 (6)과 같이 되도록 PI 제어기를 설계할 수 있다.

$$\frac{i_d^{e*}(s)}{v_d^e(s)} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c}, \quad \frac{i_q^{e*}(s)}{v_q^e(s)} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (6)$$

이 때, PI 제어기 이득을 $K_p = \omega_c L$, $K_i = \omega_c R$ 로 설계하면 PI 제어기의 영점(Zero)이 시스템의 극점(Pole)을 상쇄하므로 원하는 전류 페루프 응답 특성이 되도록 ω_c 를 설계 할 수 있다.

하지만 파라미터의 불확실성이 있을 경우 원하는 응답 특성을 얻기 어렵다. 다음 절에서 관측기를 사용하여 파라미터의 불확실성에도 성능을 유지하는 전향 보상을 설계한다.



〈그림 2〉 3상 계통 연계 인버터 전류 제어 구조(Classical Method)

2.3 PI 관측기 설계

본 논문에서는 파라미터의 불확실성에 강인한 성능을 위해 불확실성 및 미지입력이 존재하는 시스템에 대해 상태를 추정하는 PI 관측기를 사용한다. PI 관측기는 불확실성이 주로 저주파 영역에 존재한다고 간주하고 불확실성을 상수로 가정된 상태에서 설계된다. 대상 시스템은 식 (7)로 나타낼 수 있다[3].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Nf \\ f &= 0 \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 A , B , C 는 시스템 행렬, 입력 행렬, 출력 행렬을 각각 나타내

며, N 은 시스템의 불확실성을 나타내는 행렬이다. x 는 시스템의 상태변수이고, f 는 시스템의 불확실성을 나타낸다. 식 (7)의 시스템에 대해 설계한 관측기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + N\dot{f} + G_1(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{f}} &= G_2(y - \hat{y}) \end{aligned} \quad (8)$$

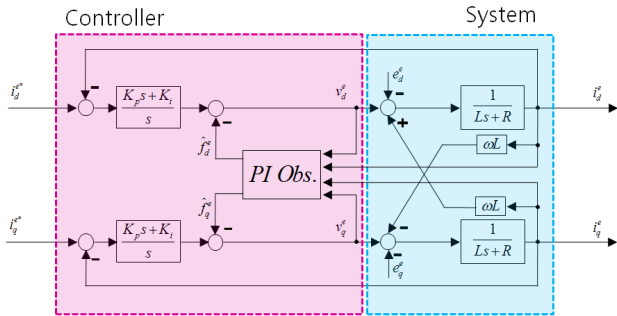
오차변수를 $[e_x \ e_f]^T = [x - \hat{x} \ f - \hat{f}]^T$ 로 정의하면 식 (9)의 오차 시스템을 얻을 수 있고 식 (9)의 관측기 이득 G_1 , G_2 는 오차 시스템이 안정하도록 설계하면 된다.

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_f \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A - G_1 C & N \\ -G_2 C & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} e_x \\ e_f \end{pmatrix} \quad (9)$$

본 논문에서 제안하는 PI 관측기는 식 (2), (3)을 사용하여 식 (10)의 형태로 수정하여 설계되며 실제 파라미터가 다른 경우($L \neq \hat{L}$, $R \neq \hat{R}$)를 고려하여 설계된다.

$$\begin{aligned} v_{dq}^e &= \hat{R}\hat{i}_{dq}^e + \hat{L} \frac{d\hat{i}_{dq}^e}{dt} - f_{dq}^e \\ \dot{f}_{dq}^e &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 사용하여 관측기를 설계하고 관측기에서 추정된 외란을 사용하여 전류 보상한다. 그림 3은 제안된 PI 제어기의 블록선도이다. 다음 장의 모의실험에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제안된 관측기의 성능을 시험한다.



〈그림 3〉 제안된 관측기를 이용한 전류 제어 구조

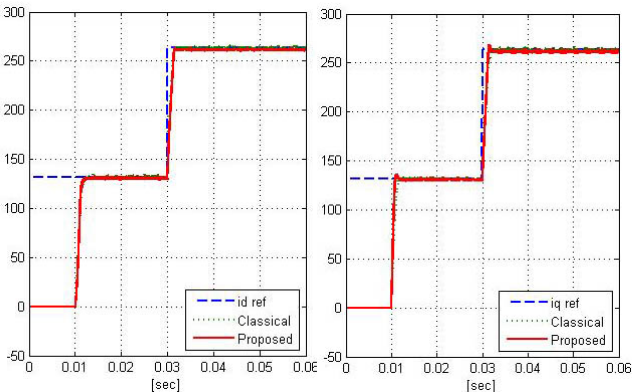
3. 모 의 실험

모의실험을 통해 제안된 방법과 고전적인 방법의 성능을 비교한다. 모의실험에 사용된 파라미터는 표 1에 정리하였다.

〈표 1〉 3상 계통 연계 인버터 파라미터

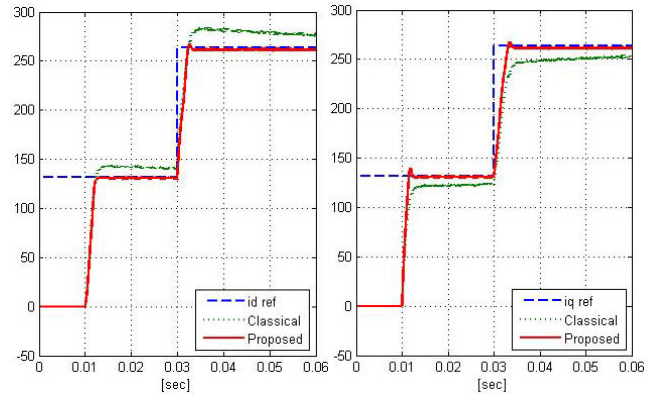
계통 선간전압	380[V _{rms}]
입력전압(v_{dc})	1000[V]
필터 인덕턴스(\hat{L})	0.003[H]
등가 직렬 저항(\hat{R})	0.05[Ω]
스위칭 주파수	10[kHz]

전류 제어기는 표 1의 파라미터를 사용하여 설계된다. 전류 PI 제어기의 이득은 $\omega_c = 3000$ ($K_p = 9, K_i = 150$)으로 설계하였으며 PI 관측기의 극점은 모두 -15000 에 위치하도록 설계하였다. 모의실험은 계통이 정상상태일 때, 0.01[sec]에 제어기를 동작하였고, 0.03[sec]에 목표 전류를 다시 변경하였다.



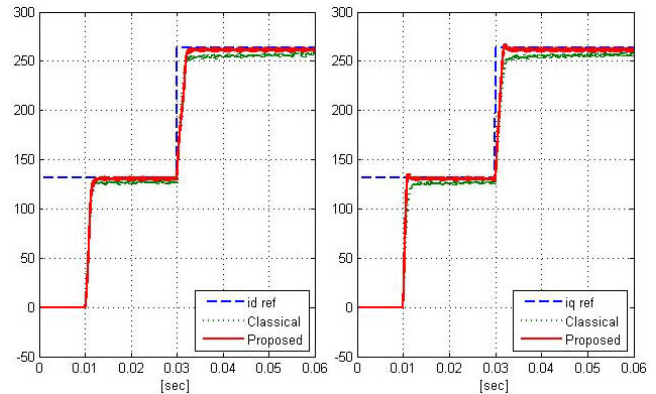
〈그림 4〉 불확실성이 없을 경우의 전류 제어 성능($L = \hat{L}, R = \hat{R}$)

그림 4는 고전적인 기법과 제안하는 기법의 파라미터 불확실성이 없을 경우의 전류 제어 성능이다. 파라미터의 불확실성이 없을 경우에는 성능이 유사함을 알 수 있다.



〈그림 5〉 불확실성이 있을 경우 전류 제어 성능($L = 0.005$)

그림 5는 필터 인덕턴스 \hat{L} 에 불확실성이 있는 경우의 전류 제어 성능을 비교한다. 본 논문에서 제안한 기법을 사용한 결과에서 성능이 개선됨을 알 수 있다.



〈그림 6〉 불확실성이 있을 경우 전류 제어 성능($R = 0.5$)

그림 6은 등가 직렬 저항 \hat{R} 에 불확실성이 있는 경우의 전류 제어 성능을 비교한다. 본 논문에서 제안한 기법이 고전적인 기법에 비해 강인함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 3상 계통 연계 인버터의 파라미터 불확실성에 대해 PI 관측기를 이용한 제어기 설계 방법을 제안하였다. 제안된 기법은 기술적 최적화 기법에 추가로 사용하였으며 파라미터 불확실성에 대해 성능을 개선할 수 있음을 모의실험으로 확인하였다.

감사의 글

이 연구에 참여한 연구자는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았음

[참 고 문 헌]

- [1] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems", *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol 19, No 5, pp. 1184-1194, 2004.
- [2] 정종규, 심명보, 이해연, 한병문, "다중펄스 컨버터와 PWM 컨버터로 구성된 Back-to-Back 컨버터의 계통연계 성능 분석", *전력전자학회논문지*, vol. 15, no. 6, pp. 451-459, 2010.
- [3] S. Soffker, T. J. Yu, P. C. Muller, "State estimation of dynamical systems with nonlinearities by using proportional-integral observer", *Int J. Systems Sci.*, vol. 26, no. 9, pp. 1571-1582, 1995
- [4] 노의철, 정규범, 최남선, *전력전자공학*, 문은당, 2007.
- [5] 설승기, *전기기기 제어론*, 홍릉과학출판사, 2009.