

교류 전동기의 PI 전류제어를 위한 시스템 파라미터 계측법

최중경*

Measurement strategy of a system parameters for the PI current control of the A.C. motor

Jung-Keyng Choi*

요약 본 논문에서는 벡터제어 기법을 적용하는 교류 전동기 PI(비례-적분) 전류제어를 위한 주요 시스템 파라미터를 측정하는 방법을 제시한다. 전류제어를 위해서 PI 제어입력은 여러 선택적 방법에 의해 튜닝될 수 있다. 그 여러 방법들 중에서 주요 계통 파라미터인 권선 저항과 인덕턴스를 이용하는 방법이 빈번히 사용된다. 본 연구에서는 단순 궤환 제어의 결과들을 통해서 이 두 파라미터를 분석, 계측하는 기법을 제시한다. 이 분석적 측정 방법은 단위 계단 또는 다중 계단 기준 명령에 대해 단순 비례 궤환 이득을 이용하는 P 제어의 출력들을 분석하여 단계적으로 파라미터들을 계측해 내는 방법이다. 이 기법은 실시간적인 해석적 계측 방법으로 추가 계측 회로들 및 복잡한 계측 알고리즘들을 사용하지 않고 교류전동기의 벡터제어를 위한 토크성분과 자속성분 전류 제어이득을 같이 연산할 수 있는 방법이다.

Abstract This Paper propose the method that measure main system parameters for PI(proportional-integral) current control of a.c. motor adopting the vector control technique. For current control, the PI control input is could be tuning by several selective methods. Among the several methods, the method that using the main system parameters, wire resistance and inductance, are frequently used. In this study, the technique to dissect and measure these two system parameters through the results of simple feedback control. This analytic measurement method is measuring parameters step by step dissecting the results of P control using simple proportional feedback gain about the unit step or multiple step reference command. This strategy is an real time analytic measurement method that calculate current control gains of torque component and flux component both for vector control of A.C. motor without introducing the further measurement circuits and complex measuring algorithms.

Key Words : A.C. motor, current control, PI control gain, system parameter, step response

1. 서론

본 논문에서는 교류전동기의 PI 전류제어를 위한 주 시스템 파라미터인 결선된 전동기의 전 체 저항과 인덕턴스를 소프트웨어적으로 구현되는 실험적인 구동을 통해 자동 측정하는 방법을 제안한다.

일반적인 PI 제어기의 이득 선택 방법들은 제어

대상 계통의 동특성 정보(계통 파라미터, 전달함수 등)를 알고 있다는 가정에서 이득 선택법을 제안해 왔다. 하지만 이러한 미리 확보된 시스템 파라미터에 기반을 둔 설정법은 제공된 정보의 정확성이 요구되고, 온도 및 배선 포함 권선 길이의 변화 등, 주위 환경의 변화에 민활하지 못하며, 제어 목적의 정확한 달성을 위한 실질적인 방법이 되기에는 부

This research is funded by the Mid-level professor Financial Program at Changwon National University in 2023
 This research is published as a results of the Industrial Cluster Program by Korea Industrial Complex Corporation(IR KN2222)

*Department of Electronics Engineering, Changwon National University

Received August 22, 2023

Revised September 06, 2023

Accepted September 21, 2023

족함이 많았다. 그런 이유로 현장에서는 여러 이득 선택법을 혼합한 경험적인 이득 선택법을 사용하게 되었고, 이를 위해 결국 경험이 많은 제어 엔지니어의 도움이 필요하게 되었다. 본 논문에서는 제어 전문가가 아니더라도 컴퓨터만 다룰 줄 안다면 간단한 운영에 의해 PC 상에서 제공된 메뉴에 따라 시스템 파라미터를 계측하고 이득을 설정하는 과정이 자동으로 수행될 수 있는 방법을 제안한다. 특히 제안하는 방법의 효과는 전동기 계통의 전류 제어를 위한 파라미터를 계통이 응용 시스템에 장착된 상태에서 현장의 상황이 그대로 반영되는 상황에서 실시간으로 계측한다는 것이다. 이를 통하여 현장의 다양한 변화성에 적응하면서 안정하게 전류 이득을 튜닝하기 위한 계통정보 측정의 기본 과정을 제시한다.

2. 전동기 전류제어 시스템 파라미터

보통 벡터제어가 적용되는 교류전동기 시스템의 PI 전류제어 블록도는 아래의 그림과 같이 단순화 될 수 있다.

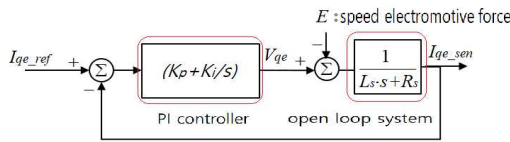


그림 1. 교류 전동기 PI 전류제어 블록도
Fig. 1. A.C. motor PI current control block diagram

$$u_p(t) = K_p \cdot [i_{qe_ref}(t) - i_{qe_sen}(t)] \quad (1)$$

$$U_p(s) = K_p \cdot [I_{qe_ref}(s) - I_{qe_sen}(s)] \quad (2)$$

$$u_i(t) = K_i \cdot \int_0^t [i_{qe_ref}(\tau) - i_{qe_sen}(\tau)] d\tau \quad (3)$$

$$U_i(s) = (K_i/s) \cdot [I_{qe_ref}(s) - I_{qe_sen}(s)] \quad (4)$$

여기서 i_{qe_ref} 는 벡터제어 계통의 전류 지령치이며, i_{qe_sen} 은 q축 전류 검출치이다. 위 식들에서 보듯이 PI 제어기의 비례입력(u_p)과 적분입력

(u_i)을 효과적으로 인가하기 위해서는 비례전류 제어이득(K_p)과 적분전류 제어이득(K_i)을 잘 선택해 주어야 한다. 보통 이득 선택 방법들은 전류제어 계통의 파라미터인 L_s , R_s 값의 데이터시트 상 주어진 정보나 예측 값을 기초로 한다.[1] 하지만 주어진 정보가 환경 변화에 따라 불확실하게 되거나 없을 때 그리고 전동기 축 결선에 추가되는 커패시터, 연장케이블, 필터 코일 등의 부가회로가 존재하는 경우 예상되는 정보와 그 값의 차이가 크게 날 수 있다. 이런 경우에는 직접 측정방법을 사용할 수 있지만 이러한 직접 측정법은 부가적인 계측 장비의 사용과 제어가 제작된 상황에서의 사용에 있어 불편함을 발생시킨다. 본 연구에서는 제어기에 구현되어 있는 인버터 회로와 전류측정 센서모듈을 그대로 이용하면서 단계적으로 프로그램적으로 제어기 자체에서 전체 저항 및 인덕턴스 파라미터를 계측하는 방법을 제안한다. 그 시작은 아래 그림과 같이 스텝 전류지령 i_{qe_ref} 을 인가한 후 시스템 분석 및 테스트 성격의 비례궤환 전류제어 테스트입력(u_{p_test})을 인가하는 것이다. 이때 속도기전력 항 E 는 0으로 무시한다. 여기서 시스템 파라미터는 온도, 추가 권선, 커패시터 상황을 모두 고려한 저항(R_t), 인덕턴스(L_t)가 된다.

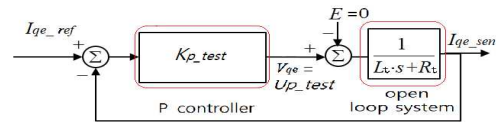


그림 2. 교류 전동기 전류제어 파라미터 분석을 위한 비례 궤환 테스트 입력 인가
Fig. 2. Proportional feedback test input for analyzing A.C. servo motor current control parameters

$$U_{p_test}(s) = K_{p_test} \cdot [I_{qe_ref} - I_{qe_sen}(s)] \quad (5)$$

여기서 $U_{p_test}(s)$ 는 비례테스트 입력으로 시스템 파라미터 정보가 포함된 출력을 안정하게 얻기 위한 시험 입력이다. K_{p_test} 는 비례테스트 입력의

비례이득을 뜻한다. 일반적으로는 간단한 일차지연 을 갖는 전류제어 시스템의 특성 분석을 위해서는 스텝 전압 입력을 가해 출력으로 나타나는 전류 파 형의 과도응답 특성과 정상상태 응답 특성을 분석 하는 방법을 사용해 왔다.[2] 아래 그림에 이러한 출력 파형 분석 방법을 통해 일차지연 시스템의 파 라미터를 계측하는 방법을 소개한다.

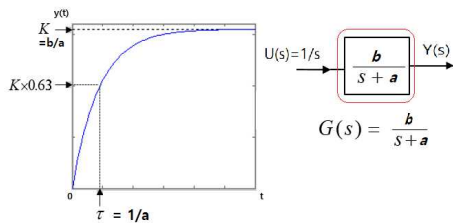


그림 3. 일차 지연 시스템에 대한 스텝 입력- 출력 응답 의 분석

Fig. 3. The analysis of output response to step input about the first order delay system

여기서 $K(=b/a)$ 값은 단위 계단입력(unit step input)에 대한 정상상태 출력 값이고, $\tau(=1/a)$ 는 시상수를 의미한다. 즉 정상상태 값의 정보와 시상수 정보에 일차 지연시스템의 파라미터 정보 a, b 가 담겨있는 것이다. 이런 직접적인 전압 입력 인가 방법은 인버터를 직접 이용하는 분석에서는 전동기의 작은 상 저항으로 인해 과전류 위험성을 발생시킬 수 있다. 대신 그림2에서 제시 한 테스트 비례입력, u_{p_test} 를 인가하게 되면 인버 터의 높은 직류전압을 감안해도 궤환제어에 의해 안정적인 정상상태 출력 전류 특성을 얻을 수 있 다. 단지 출력전류가 전류지령과는 일치하지 않고 보다 낮은 값으로 안정화되는 특성을 갖는다. 아래 그림4에서 이 두 가지 방법에 의한 전류 안정화 특 성을 비교해서 보인다.

테스트 입력에 의한 비례궤환 제어의 경우 그림 2의 교류전동기 전류제어시스템에 대해 페루프 전달함수 $G_c(s) = I_{qe_sen}/I_{qe_ref}$ 의 유도와 계단 지 령입력 I_{qe_ref} 에 의한 전류출력을 분석해 본다.

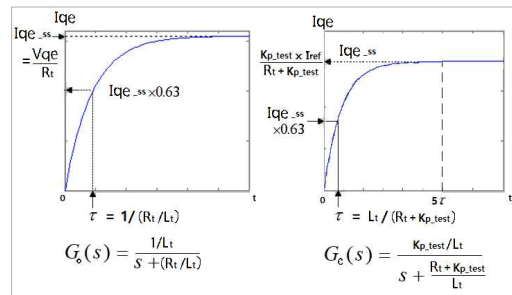


그림 4. 일차지연 시스템에 대한 스텝전압 입력시스템과 스텝 전류지령-비례궤환 제어시스템의 출력 비교 분석 Fig. 4. Output analysis of the step voltage input system and step current command-proportional feedback control system about first order delay system

$$G_c(s) = \frac{K_{p_test}/(L_t s + R_t)}{1 + \frac{K_{p_test}}{L_t s + R_t}} = \frac{K_{p_test}/L_t}{s + \frac{R_t + K_{p_test}}{L_t}} \quad (6)$$

$$I_{qe}(s) = \frac{K_{p_test}/L_t}{s + (R_t + K_{p_test})/L_t} \times \frac{I_{qe_ref}}{s} \quad (7)$$

$$i_{qe}(t) = \frac{K_{p_test} \cdot I_{qe_ref}}{R_t + K_{p_test}} \left[1 - e^{-\frac{R_t + K_{p_test}}{L_t} t} \right] \quad (8)$$

$$I_{qe_ss} = \frac{K_{p_test} \cdot I_{qe_ref}}{R_t + K_{p_test}}, \tau = \frac{L_t}{R_t + K_{p_test}} \quad (9)$$

여기서 I_{qe_ss} 는 스텝 전류지령 I_{qe_ref} 에 대한 정 상상태 출력응답 값이고 τ 는 과도응답 특성을 알 려주는 시상수이다.

비례궤환 제어에 의한 출력 특성은 비례제어의 결과 정상상태 전류출력이 지령 값에 못 미치는 일 정 상수 출력이 발생하는 것을 식(8)을 통해 알 수 있으며, 상승 특성은 비례이득에 의해 개선됨 역시 식(8)을 통해 알 수 있다. 그리고 I_{qe_ss} 와 시상수 τ 를 계측할 수 있으면 식(9)와 같이 저항과 인덕턴 스 값을 계산할 수 있음을 알게 된다. 시상수 τ 는 비례 궤환 제어에 의한 출력이 정상상태 출력 (I_{qe_ss})의 63.2%에 도달하는 시간으로 알려져 있 다.[3]

$$R_t = \frac{K_{p_test} \cdot I_{qe_ref}}{I_{qe_ss}} - K_{p_test} \quad (10)$$

$$L_t = \tau \cdot (R_t + K_{p_test}) \quad (11)$$

정상상태 출력(I_{qe_ss}) 및 과도응답 시간 τ 의 측정오차가 적을수록 파라미터 계산의 정확성이 높아진다. 그리고 전류 지령치가 클수록, 테스트 비례이득이 예상 저항 값과 비슷할수록 측정은 예상 값에 가까워질 수 있다.

3. 시뮬레이션을 통한 전류제어 파라미터의 계측법 구현

계측의 정밀도 및 예상되는 실 계측의 문제점을 알아보기 위해 전력전자 시뮬레이션 툴을 이용하여 2장에서 제시된 전동기의 저항 및 인덕턴스 계측법을 수행한다. 아래 그림5의 회로는 3상 인버터를 IGBT 전력용 스위칭소자로 구현하고 3상 모터의 Y 결선을 0.05 옴 상저항과 0.5mH 상인덕턴스를 이용하여 모델링한 회로이다. 3상 스위치의 A상, B상의 상단 스위치를 온한 상태에서 C상의 하단에 V_{SM} 의 PWM 제어 스위치 신호를 인가하여 A, B 상으로 전류가 흘러들어가 C 상으로 합 전류가 출력되는 3상 여자 스텝제어의 한 시퀀스를 모의실험하고 있다. C 상 출력 전류는 C 상 전류지령 신호 i_{c_ref} 에 의해 입력되는 전류 지령과 전류 검출치 i_{c_sen} 의 차이 신호에 비례한 비례제어 입력이 10kHz 삼각파 펄스와 비교되어 발생하는 PWM 전류제어 펄스에 의해 제어되는 상황이다.

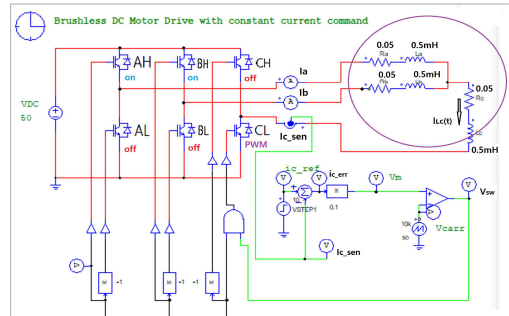


그림 5 비례 제어를 적용하는 3상 여자 스텝 전류제어 시스템의 시뮬레이션 회로

Fig. 5. The simulation circuit of three phase excitation step current control system adopting proportional feedback control

그림6에 비례제어이득(K_{p_test}) 0.1과 C상 전류지령치(i_{c_ref}) 10A를 갖는 C상 전류 스텝제어의 결과를 보인다. 이 비례제어 제어입력에 의해 출력되는 C상 전류는 일차 지연 특성을 갖는 전류 상승 특성과 일정 전류오차를 갖는 정상상태 출력 특성을 보인다. 이는 2장에서 보인 교류전동기 전류제어 특성과 일치한다. 비례 테스트 제어이득 0.1을 갖는 비례입력에 의해 1.5X0.05옴, 1.5X0.5mH 값을 갖는 RL 회로의 정상상태전류(I_{LC})의 평균값이 5.6965A로 얻어지고, 정상상태에 도달하는 시간 5 τ 는 24.4ms로 계측되었다.

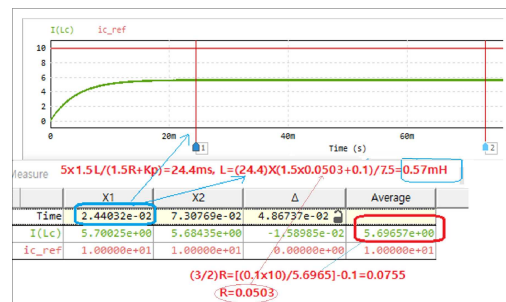


그림 6. 비례 제어를 적용하는 3상 여자 스텝 전류제어 시스템의 시뮬레이션 결과 ($K_{p_test}=0.1$, $i_{c_ref}=10A$)

Fig. 6. The simulation results of three phase excitation step current control system adopting proportional feedback control ($K_{p_test}=0.1$, $i_{c_ref}=10A$)

이 결과를 토대로 2장에서 제안한 상저항과 상인덕

턴스 계산법을 적용하면 아래와 같은 파라미터 계산 값이 얻어진다.

$$R_t \times 1.5 = \frac{K_{p_test} \cdot I_{c_ref}}{I_{(Lc)}} - K_{p_test} = \frac{0.1 \times 10A}{5.6965} - 0.1 = 0.0755$$

$$R_t = 0.0503 \tag{12}$$

$$L_t \times 1.5 = \tau \cdot (1.5R_t + K_{p_test}) = (24.4ms/5) \times (0.0755 + 0.1) = 0.85644mL$$

$$L_t = 0.57096mH \tag{13}$$

시뮬레이션 결과를 보면 정상상태 출력의 계측과 과도응답의 계측이 정확히 이루어질수록 시스템 파라미터의 연산 결과가 실제 값과 거의 같게 나타남을 알 수 있다. 그리고 계측이 제어를 통해 이루어지므로 전동기 권선에 부담을 줄 일이 없다.

4 자동화 계측 프로그램을 이용하는

파라미터의 실제 계측 실험

이번 절에서는 실제 교류 서보전동기에 적절한 테스트 비례이득을 갖는 비례 제어 입력을 인가해 얻은 실험적 결과들을 분석하여 직접 전동기 전류제어 파라미터들을 측정한다. 아래 그림7은 이러한 파라미터 측정을 위해 제작된 PC 프로그램 판넬을 보여준다. 전동기 구동제어기와 통신하면서 필요한 과정의 제어 및 계측, 분석을 용이하게 해준다.

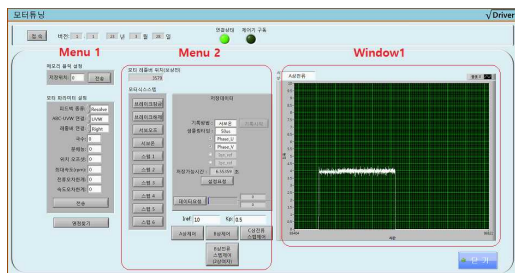


그림 7. 전류제어 이득 오토튜닝을 위한 교류 서보전동기 6 스텝구동 제어 및 계측 판넬

Fig. 7. AC servo motor 6 step driving control and measurement panel for auto tuning of current control gain

아래 그림 8, 9는 특정 교류서보전동기에 U상 전류 지령치를 20A 로 설정하고 비례 테스트이득 0.5에 의한 비례 전류제어입력을 인가할 때의 정상상태 전류 측정과 과도 응답 특성인 시상수를 계측한 결과이다.

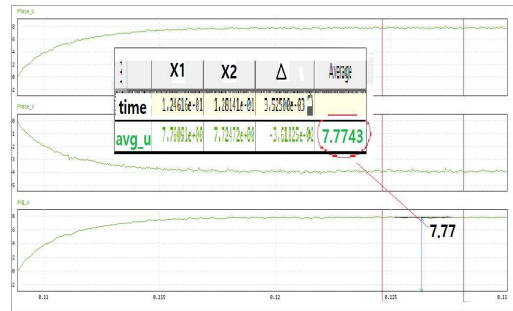


그림 8. 비례 테스트 이득 입력에 의한 U상 전류제어 실험 결과(U 상 전류 정상상태 평균치 계측)

Fig. 8. The experimental results of U phase current control by the proportional test gain input(measurement of the average steady state U phase current)

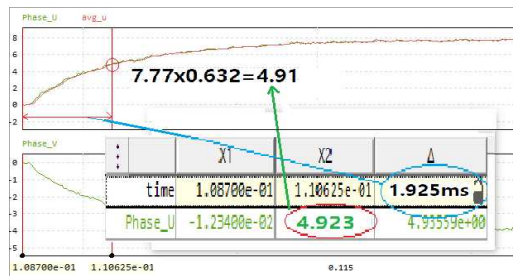


그림 9. 비례 테스트 이득 입력에 의한 U상 전류제어 실험 결과(시상수 τ의 계측)

Fig. 9. The experimental results of U phase current control by the proportional test gain input(measurement of the time constant τ)

이 계측치를 토대로 결선 및 배선을 포함하는 전체 상저항과 상인덕턴스를 2장의 식을 이용하여 계산하면 아래와 같이 산정된다. 실제 전동기의 데이터시트 상의 순수 상저항은 0.4675Ω 이고 상인덕턴스는 2mH(2kHz 교류인가 시) 이다. 그리고 정격전류는 8 A_{rms}, 최대전류는 30A_{rms} 급이다.

$$R_i \times 1.5 = \frac{0.5(K_{p_test}) \times 20(I_{U_ref})}{7.77(I_{LC})} - 0.5 = 0.787$$

$$R_i = 0.5247 \tag{14}$$

$$L_i \times 1.5 = 1.925ms(\tau) \cdot [1.5R_i + 0.5(K_{p_test})] = 2.477mH$$

$$L_i = 1.652mH \tag{15}$$

위 파라미터 연산 값들은 전동기가 부하에 연결되고 구동제어기와 결선된 상태에서 제어기 프로그램이 U 상으로 전류가 흘러나오는 스텝 구동 계측프로그램을 짧은 순간 가동하여 얻은 결과이다. 전동기의 순수 상 저항 값과 교류 인덕턴스 값과는 차이가 난다. 반복적인 실험을 통해 데이터의 유용성을 확인해 보기 위해 다양한 조건에서 스텝전류 출력을 계측하여 아래 표에 보인다.

표 1. 동일한 전동기에 대한 다양한 조건에서의 비례 제어 실험 결과 및 파라미터 계산치들

Table 1. The results of Proportional control and calculations of parameters on various driving conditions about the same motor

I_{U_ref}	K_{p_test}	I_{LC_ss}	$\tau(ms)$	$R_i(\Omega)$	$L_i(mH)$
8A	1.0	4.405	1.1868	0.544	1.437
10A	0.5	3.875	1.647	0.527	1.416
10A	0.6	4.275	1.3	0.536	1.216
20A	0.4	6.52	2.024	0.551	1.655
20A	0.5	7.77	1.925	0.525	1.652
20A	0.6	8.54	1.79	0.537	1.677

위 실험 결과들을 토대로 분석해보면 전동기 데이터 스위트 상의 파라미터 정보와 제안된 분석계측 방법에 의한 결과에 일정한 차이가 보인다. 이 차이들은 결국 전동기가 제어보드와 부하와 연결된 상황에서는 비결선 전동기의 순수 정격 파라미터 값은 유지되지 못함을 알려주는 것이다. 그리고 제안된 방법에 의한 계산 값에도 매 실험 값 계측 시 측정 오차가 포함되기 때문에 어느 정도 편차가 보인다. 특히 인덕턴스의 측정에 있어 편차가 많이 발생하였다. 인덕턴스 측정 시에는 정상상태 값의 63.2% 도달 시간을 계측하여 이용한다. 이 시간 측정은 과도 과정 중에 전류 상승에 약간의 왜곡(전류제어 입력의 급격한 변화)이 발생해도 측정값에 변화가 심하게 발생한다. 본 논문에서는 전류 출력 값에 평

균치 필터를 사용하는 개선된 방법을 제안하였지만 지연이 거의 없으면서 필터링 효과가 좋은 필터의 적용 문제는 조금 더 연구가 필요한 분야라 생각되고, 본 연구의 추후 과제라 할 것이다. 그리고 비례테스트 이득을 선정하는 기준과 이득의 변화에 따른 계측 결과의 비교 분석 역시 추후 연구가 필요하다. 지금까지는 이득을 계측된 저항 값과 유사한 값으로 설정하고 지령 전류치를 변화시키면서 계측하는 방법이 조금 더 안정된 테스트 방법이라 생각된다.

측정의 방법으로 먼저 낮은 전류지령이 아니라 정격 전류에 가까운 안정된 지령에 대한 출력 전류를 분석하여 상저항을 계측하는 것이 첫 번째 순서가 됨을 알 수 있다. 그리고 인덕턴스 계측을 위해서는 정상상태 전류 값이 정격전류 정도가 흐르도록 정격전류 이상의 지령을 내려 과도과정이 충분히 길게 나타나도록 해야 됨이 예측된다. 실제 이렇게 측정된 파라미터를 기본으로 하여 교류전동기의 de 축과 qe 축 전류를 분리 제어하는 각각의 비례이득과 적분이득을 선정하면 전동기 회사 자체에서 제공되는 전동기 내부 권선만을 고려하는 파라미터를 이용하는 PI 제어기보다 우수하고 신뢰도 높은 제어기를 설계할 수 있다.[4][5]

5. 결 론

3상 교류전동기에 대해 6 스텝 구동의 특정 스텝 구동을 실행하게 되면 전동기는 특정 위치에 고정되면서 일반적인 저항, 코일 직렬회로의 도통 특성을 보여주게 된다. 이때 스텝 구동의 상전류를 비례궤환 제어입력에 의해 제어하게 되면 전류 지령치에 대한 전류 출력의 관계는 라플라스 영역의 일차 지연 특성을 갖는 전달함수로 표현할 수 있게 된다. 이 전달함수에 포함되 있는 전동기 권선과 각종 연결회로의 합 저항과 합 인덕턴스 값은 지령 전류 값과 비례궤환 이득 그리고 정상상태 출력전류 및 과도응답 시상수 계측값을 이용하여 연산될 수 있다. 이 방법을 통해 연산되는 전류제어 시스템 파라미터들은 제어과정 중에 빠르게 연산되어 제어 하는 자동 PI 제어이득 조정 기능 구현에 있

어 아주 중요한 한부분이 될 수 있다.[6][7][8] 더불어 제안된 전류출력 분석법은 전동기 권선의 밸런싱 여부 및 절대위치센서의 초기위치 판별에도 주요한 역할을 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Sang-Hoon Kim, DC, AC, BLDC Motors, 3rd ed, Bogdoo, 2018.
- [2]. Astrom, K. J. and T. Haggund(1983). "Automatic Tuning of PID Controllers," Instrument Society of America, 1988.
- [3] B. C. Kuo, *Automatic Control Systems*, 10th ed, New Jersey, NJ: McGraw-Hill, 2017.
- [4] Seung-Rohk Oh. "PID Autotuning Algorithm Based on Saturation Function Feedback," Journal of IEEE Koreal, 2(2):98-104, 1998
- [5] UI-Chel Noe, Gue-Bum Jueng, Nam-Seb Choi, Power Electronics, 4th ed, Munundang, 2019.
- [6] Y. I. Son, I. H. Kim, D. S. Choi and H. Shim, "Robust Cascade Control of Electric Motor Drives using Dual Reduced-Order PI Observer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.62,pp.3672-3682,2015.
- [7] Y. I. Son, J. K. Jung, and S. Y. Jang, "Comparative analysis on transfer functions of a PI controller and PI observer-based controllers," INFORMATION AND CONTROL SYMPOSIUM , 2017, pp. 326-327.
- [8] H. W. Park, H. J. Kim, K. M. Kim, M. S. Choi, and T. W. Kim, "Study on PI and I-P controller Design of AC Servo SPMSM," Power Electronics Conference , 2018, pp. 406-407.

저자약력

최 중 경 (Jung-Keyng Choi)

[정회원]



- 1986년: 고려대학교 전기공학과 공학사
- 1988년: 고려대학교 전기공학과 공학석사
- 1992년: 고려대학교 전기공학과 공학박사
- 1992년 ~ 현재: 국립 창원대학교 전기전자 제어공학부 전자전공 교수

〈관심분야〉 measurement, intelligent control, servo motor control, electronic circuit design