

# 복소수 벡터로 설계된 동기 좌표계 비례 적분(PI) 전류 제어기의 안티 와인드업(anti-windup)

유현재, 정유석, 설승기  
서울대학교

## Novel Anti-windup Strategy for Complex Vector Synchronous Frame PI Current Controller

Hyunjae Yoo, Yu-seok Jeong, Seung-Ki Sul  
Seoul National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 복소수 벡터 기법으로 설계된 동기 좌표계 비례 적분(PI) 전류 제어기의 새로운 안티 와인드업(anti-windup) 기법을 제안한다. 복소수 벡터로 설계된 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기는 시스템 파라미터(parameter) 변동에 더 강인하다고 알려져 있다. 그러나 이 제어기의 안티 와인드업에 대한 연구는 아직 잘 이루어지지 않았다. 제어기는 그 구조에 따라 알맞은 안티 와인드업이 필요하게 되고, 적절치 못한 안티 와인드업 기법은 제어 시스템의 동특성을 저하시킬 수 있다. 그래서 복소수 벡터로 설계된 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기에 알맞은 안티 와인드업 기법을 제안하였고, 제안된 알고리즘(algorithm)의 유효성은 실험을 통하여 검증하였다.

### 1. 서론

일반적인 제어 시스템의 액츄에이터(actuator)는 그 능력에 따라 포화될 수 있는데, 만약 이를 무시하고 제어하게 된다면 이 액츄에이터 포화에 따르는 문제가 제어 동특성을 심각히 저하 시키는 것 뿐만 아니라 폐루프(closed loop) 시스템이 불안정(unstable)해질 수도 있다. 이는 제어기에 포함된 적분기의 와인드업(windup) 현상에 기인하는 것인데<sup>[1][2]</sup>, 이 문제를 해결하기 위해서는 제어 시스템의 구조가 어떤 형식으로든 적절히 수정되어야 한다.

아날로그(analog) 제어 시스템에서는 연산 증폭기(op amp)의 전원 전압(Vcc, -Vcc)에 의해서나 제너 다이오드(zener diode)에 의해 이 와인드업 문제를 해결할 수 있다. 그러나 디지털 제어 시스템에서는 제어기 출력이 발산(blow up)하는 것을 막기 위해 안티 와인드업(anti-windup)이 반드시 필요하게 된다.

다상 교류 전동기 제어에 있어서, 동기 좌표계 비례 적분(PI) 전류 제어기가 정상 상태에서 모든 상태 변수들이 dc 값들인 장점이 있으므로 광범위하게 사용되어 오고 있다<sup>[3]</sup>. 뿐만 아니라 그에 대한 안티 와인드업도 폭넓게 연구 되어 왔다<sup>[1][2]</sup>. 최근에 파라미터(parameter) 변동에 더 강인한 복소수 벡터로 설계된 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기가 소개 되었다<sup>[4][5]</sup>. 그러나 이 제어기의 안티 와인드업에 대한 연구는 아직 잘 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 시스템 표현의 용이성을 위해 복소수 벡터 표현법(complex vector notation)을 사용한다<sup>[4] [6]</sup>. 본 논문은 기존의 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기와 복소수 벡터로 설계된 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기의 안티 와인드업 특성을 영구 자석 동기 전동기(PMSM) 제어 시스템의 경우에 있어 논의한 뒤, 복소수 벡터 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기의 새로운 안티 와인드업을 제안한다.

### 2. 복소수 평면에서 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기의 안티 와인드업 설계

#### 2.1 영구자석 동기(PMSM)의 수학적 모델

영구자석 동기 전동기의 동기 좌표계 상의 전압 방정식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$v_{dq}^e = R_s i_{dq}^e + L_s \frac{di_{dq}^e}{dt} + j\omega_e L_s i_{dq}^e + \omega_e \Lambda_m \quad (1)$$

$R_s$  : 고정자 저항,  $L_s$ : 고정자 인덕턴스,  $\omega_e$  : 동기 속도,  $\Lambda_m$ : 영구 자석 flux linkage

복소수 벡터 표현법(complex vector notation)을 사용하면 2-입력, 2-출력 시스템을 하나의 식으로 간단히 표현할 수 있다.



셋트를 제작하였다. 그림 3의 셋트는 각 11kW 유도 전동기와 동기 전동기가 상호 결합(coupling)되어 있는 형태이며 유도 전동기는 부하로 작용하여 일정 속도(constant speed)로 제어되고 있으며, 동기 전동기는 일정 토크 제어로 동작 된다.



그림 3 실험 셋트

실험 셋트의 파라미터(parameter)들이 표 1에 나타나 있다.

표 1 영구자석 동기 전동기의 파라미터(parameter)

파라미터	값
$P_{rated}$	11kW
$i_{rated}$	58.6A
$R_s$	21.7mΩ
$L_s$	0.7mH
$\Lambda_m$	0.1473Wb-turns

전류 제어기 대역폭(Bandwidth)는 200Hz이고 운전 주파수는 기계각 속도로 1500r/min에 해당하는 100Hz이다. 그리고 각 축의 전류 지령치는 식 (12), (13)과 같다.

$$i_d^{e*} = 0A(\text{for } 70\text{msec}) \quad (12)$$

$$i_q^{e*} = -50A(\text{for } 70\text{msec}) \quad (13)$$

그림 4는 복소수 벡터로 설계된 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기에서 안티 와인드업 이득(Ka)이 식 (5)와 같이 주어졌을 때 그 동특성을 보여준다.

그림 4에서 전류 제어기 출력 값이 와인드업(windup) 되고, 적절치 못한 안티 와인드업 이득에 의해 전류 제어기 동특성에 있어 큰 오버슈트(overshoot)가 나타나고 정착 시간(settling time)이 길어진다.

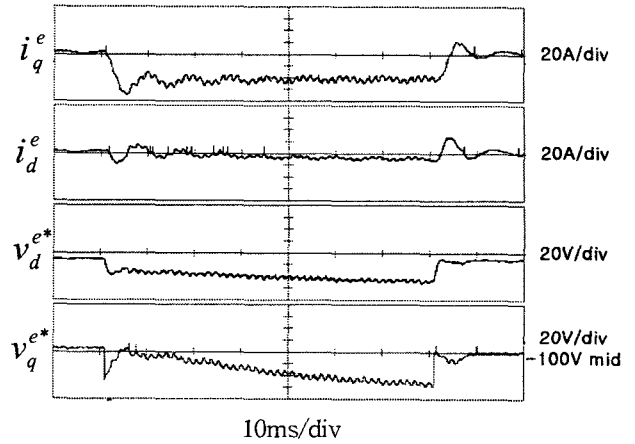


그림 4 기존의 안티 와인드업 이득을 가지는 복소수 벡터 비례 적분 전류 제어기의 동특성

그림 5는 복소수 벡터로 설계된 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기에서 제안된 안티 와인드업 이득(Ka)이 식 (10)과 같이 주어졌을 때 그 동특성을 보여준다.

전류 제어기 출력 값은 와인드업(windup) 되지 않고 오버슈트와 정착 시간이 현저히 줄어들음을 확인할 수 있다.

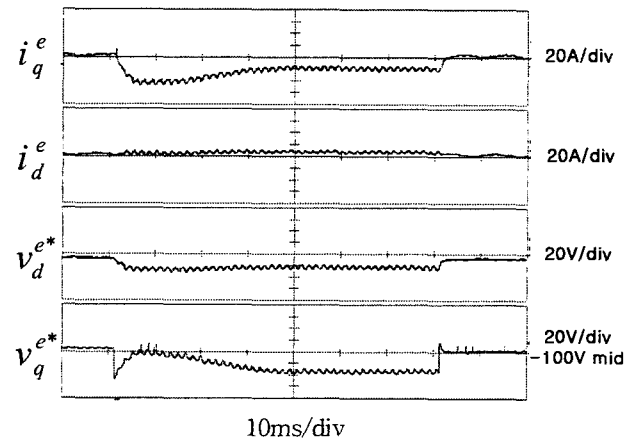


그림 5 제안된 안티 와인드업 이득을 가지는 복소수 벡터 비례 적분 전류 제어기의 동특성

### 3. 결론

본 논문은 기존의 상태 변수 궤환형(state feedback type) 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기의 안티 와인드업을 먼저 분석한 뒤<sup>[1][2]</sup>, 전류 제어시 파라미터 민감도(parameter sensitivity)가 우수한 복소수 벡터로 설계된 동기 좌표계 비례 적분 전류 제어기<sup>[4][5]</sup>의 새로운 안티 와인드업 방법을 제안하였다. 제어 시스템에 알맞은 적절한 안티 와인드업의 구현으로 동특성의 개선을 수식 및 실험으로 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] C. Bohn, and D.P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies," *IEEE Control System Magazine, Vol.16, No.2, April, 1995, pp.33-40.*
- [2] Y. Peng, D. Vrancic, and R. Hanus, "Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers," *IEEE Control System Magazine, Vol.16, No.2, Aug. 1995, pp.48-57.*
- [3] T.M. Rowan, and R.J. Kerkman, "A New Synchronous Current Regulator and an Analysis of Current Regulated PWM Inverters," *IEEE Trans on Ind. Appl., vol. IA-22, July, pp. 678-690, 1986.*
- [4] F. Briz, M.W. Degner, and R.D. Lorenz, "Analysis and design of current regulators using complex vectors," *IEEE Trans on Ind. Appl., pp. 817-825, May/July 2000.*
- [5] H. Kim, R.D. Lorenz, "A virtual translation technique to improve current regulator for salient-pole ac machines," *in Conf. Rec. 2004 PESC, pp 487-493, Aachen, Germany 2004.*
- [6] J. Holtz, "The representation of AC machine dynamics by complex signal flow graphs," *IEEE Trans on Ind. Elec., pp. 263-271, June 1995.*