

## 고성능 유도전동기 구동을 위한 자동 튜닝 Anti-windup 기법

석줄기, 배상규\*, 이동춘  
영남대학교, 로템\*

### Tuning-free Anti-windup Strategy for High Performance Induction Machine Drives

Jul-Ki Seok, Sang-Gyu Bae\*, and Dong-Choon Lee  
Yeungnam University, Rotem\*

#### ABSTRACT

This paper presents a tuning-free conditional integration anti-windup strategy for induction machine with Proportional-Integral (PI) type speed controller. The on/off condition of integral action is determined by the frequency domain analysis of machine torque command without a prior knowledge of set-point changes. There are no tuning parameters to be selected by users for anti-windup scheme. In addition, the dynamic performance of the proposed scheme assures a desired tracking response curve with minimal oscillation and settling time even in the change of operating conditions. This algorithm is useful in many high performance induction machine applications not to allow the oscillation and overshoot of speed/torque responses. The main idea can be extended to general applications such as chemical processes and industrial robots.

#### 1. 서 론

최근 자속 기준 제어 방법의 확립에 힘입어 유도전동기는 스피들 구동 분야와 철강 압연 라인과 같은 산업 응용에 폭 넓게 적용되고 있다. 이러한 고성능 응용 분야에서는 생산 제품의 품질과 산업 생산성 향상을 위하여 급가감속 및 고속 운전이 요구되고 있는데, 아직까지도 이러한 분야에서의 속도 제어기로는 고전적인 PI 형태의 제어가 주로 사용되고 있다. 알려진대로 PI 제어기는 경제적이면서도 모델링 오차 등에 비교적 강인한 장점이 있지만, 적분 제어기의 포화에 의한 누적(windup) 현상에 의해서 응답의 오버슈트 및 느린 정착 시간을 초래하는 단점이 있다. 이러한 적분기 누적 현상은 운전 조건에 따라 심

한 경우에 응답의 불안정 현상을 유발하여 시스템의 잦은 트립(trip)의 원인이 되기도 한다. 이상의 문제점을 해결하기 위하여 이미 많은 anti-windup 기법이 소개되었는데, 이를 크게 분류하면 다음의 3가지 형태로 요약할 수 있다<sup>[1]-[4]</sup>.

- 조건부 적분 기법(Conditional Integration Scheme)
- Back-calculation 기법
- 하이브리드 기법(Hybrid Scheme)

조건부 적분 기법은 주어진 특정 조건이 만족됨에 따라 적분기의 동작을 온 혹은 오프하는 방법으로 주어진 조건에 의해서 anti-windup 특성이 민감하게 영향을 받는다<sup>[1][2][3]</sup>. 따라서, 모든 동작 조건에서 일관된 특성을 얻기 위해서는 적분기 온/오프하는 조건을 속도 지령의 프로파일(profile)에 따라 계속 변동시켜야만 하는데, 이는 실제 산업 현장에서는 거의 적용 불가능하다. 따라서, 이 기법은 사용자가 오랜 시간 원하는 특성을 얻기 위해서 별도의 튜닝 작업을 하여 타협된 조건을 찾아야 하는 번거로움이 있다.

또 다른 대안으로 제시된 Back-calculation 기법은 제어가 포화되면 그 때부터 누적된 값을 일정량만큼 적분기에서 빼내가는 방법이다<sup>[1][4]</sup>. 전체 동작 특성은 얼마만큼의 누적량을 제거할 것인지를 결정하는 Back-calculation 상수에 의해서 결정되는데, 이 역시 운전 조건에 따라 튜닝해야만 안정된 응답을 얻을 수 있다.

마지막으로 위 두 가지 기법을 혼합한 하이브리드 기법이 있는데, 이는 두 종류의 튜닝해야 할 조건 및 상수가 있어서 튜닝 절차가 더욱 복잡하다.

이상의 기존 기법들은 동작 조건 변동에 따른 anti-windup 상수 및 조건의 민감도 때문에 실제 적용 측면에서 많은 튜닝 시간이 소요되는 한계가 있다. 또한, 이 기법들은 공통적으로 시간 영역(time domain)의 개념에서 설계되었는데, 시간 영역의 결과들은 많은 경우 지엽적인 해답을 제시하는 경우가 대부분이다.

본 논문에서는 사용자의 튜닝 편의와 시스템 유지, 보수 측면에서 튜닝 상수가 필요없는 조건 적분 형태의 anti-windup 기법을 제시하고자 한다. 제안된 방법은 주파수 영역에서 전동기 토크 지령 신호를 분석하여 제어기 내부에서 자동적으로 적분기 온/오프 시점을 계산하여 사용자의 편의를 도모하였다. 또한, 전동기 동특성적인 측면에서도 기본 방법과 비교하여 최소한의 오버슈우트와 가장 빠른 정착시간을 가짐을 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

## 2. 기존 Anti-windup 기법

### 2.1. 조건부 적분 기법

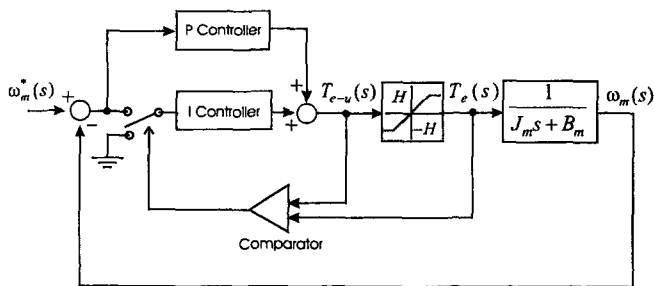


그림 1 조건부 적분 기법 제어 블록도

그림 1은 조건부 적분 기법의 제어 구조를 나타낸다. 여기서,  $\omega_m^*$  및  $\omega_m$ 은 속도 지령 및 실제 속도를 나타내며,  $T_e$ 는 실제 출력 토크이고,  $T_{e-u}$ 는 제한기(limiter)  $H$ 에 의해 제한되기 전의 토크를 나타낸다. 시스템 관성 및 마찰계수는  $J_m$  및  $B_m$ 으로 표현하였다. 적분 시점을 결정하는 조건은 비교기(comparator)에 의해서 결정되는데, 속도의 오버슈우트 및 정착시간을 줄이기 위하여 이미 다양한 방식의 조건이 연구되었다. 그 중에서 가장 간단한 방법은 제어기가 포화되는 순간, 즉  $T_e \neq T_{e-u}$ 일 때 적분기의 동작을 멈추는 것이다. 이 방법은 간단하지만 적분기의 온-오프 전환 시점이 성능에 많은 영향을 미치는데, 최적의 전환 시점은 운전 조건에 의해서 계속 변동하므로 이 값을 정하는 데는 상당한 경험과 사전 시험이 요구된다.

### 2.2. Back-calculation 기법<sup>[1],[4]</sup>

일반적인 Back-calculation 기법은 적분기 내에 누적된 값을 빼내는 방법으로 그 성능은 Back-calculation 상수  $b$ 에 의존하게 된다. 만약,  $b$ 를 크게 선정할 경우에는 지나치게 많은 양을 적분기에 빼내게 되어 응답시간이 느려지는 문제가 있고, 적분 값에 채터링을 유발하여 토크 리플이 커질 수도 있다. 이러한 문제를 방지하기 위하여 그림 2와 같이 보조 제한기  $H_A$ 를 설치하는 방법이 소개되었지만, 이 값의 선정 또한 제어기 성능에

영향을 미치게 되는 문제가 여전히 존재한다.

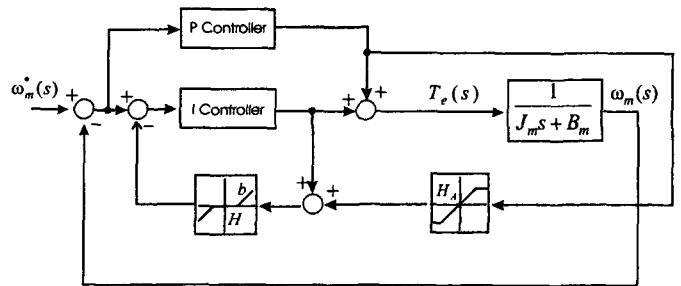


그림 2 Back-calculation 기법 제어 블록도

### 2.3. Hybrid 기법

그림 3에 보이는 Hybrid 기법은 위 두 가지 방법을 혼합한 형태로 제어기 전체 성능은 anti-windup 제어기의 이득  $K_A$ 의 영향을 받는다. 응답 특성은  $K_A$ 가 작으면 조건부 적분 기법에 가까워지고, 크면 Back-calculation 기법에 접근한다.

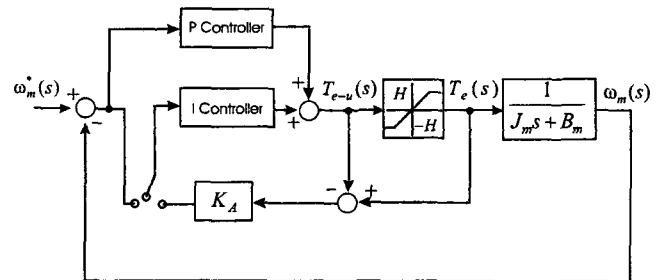


그림 3 Hybrid 기법 제어 블록도

이상에서 살펴본 바와 같이 기존의 anti-windup 기법의 공통적인 문제점은 동작 조건에 따라 제어기 상수 혹은 튜닝 조건이 변동한다는 것이다. 따라서, 전 운전 영역에서 만족스러운 응답 특성을 얻기 위해서는 동작 조건에 따라 튜닝 상수 혹은 조건을 가변시켜야만 하는데, 이는 산업 현장에서 현실적으로 매우 어려운 작업이다. 이러한 공통적인 문제가 발생하는 원인은 기존의 방법이 모두 시간 영역(Time-domain)의 개념에서 제어기를 설계하고 해석하였기 때문인데, 많은 경우 시간영역에서의 접근법은 국부적인 해답만을 제시하는 경우가 많다.

## 3. 제안된 Anti-windup 기법

유도전동기 구동 응용분야에서 속도제어기는 대부분 PI 형태의 제어기가 널리 사용되는데, 그 이유는 제어대상 플랜트를 관성 및 마찰로 구성된 1차 지연 형태로 간주하기 때문이다. 이러한 플랜트에 대한 주파수 응답을 도출하면 그림 4와 같다. 절점 주파수(Break frequency)를 기준으로 고주파 영역은  $\frac{1}{J_m s}$ 가 우세하고, 저주파에서는 마찰항이 우세하다. 즉, 고주파 영역에서는 플랜트가 마치 순

수 1차형태의 전달함수로 보이므로, 적분기가 이 영역에서 동작하면 적분항의 누적 값이 증가하여 정상상태 속도 응답에 오버슈우트나 진동이 발생함을 알 수 있다.

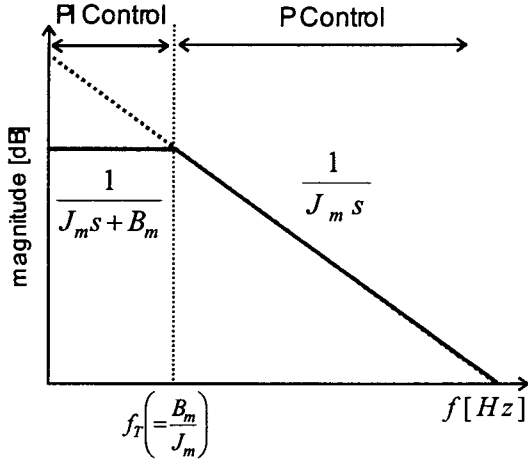


그림 4 유도전동기 기계적 시스템의 주파수 응답

이러한 windup 현상을 최소화 하려면 절점 주파수를 중심으로 고주파 영역에서는 적분기 동작을 오프하는 것이 바람직하다. 이러한 동작을 수행하려면 전동기 속도 혹은 토크 신호의 주파수를 분석해야 하는데, 일반적으로 측정 속도는 저속에서 정밀도가 낮기 때문에 본 연구에서는 토크 지령을 주파수 분석 신호로 채택하였다. 실제 시스템에서 토크 지령은 비주기적이고 속도 제어 주기마다 발생하는 이산 신호이다. 이러한 신호는 Discrete Fourier Transform(DFT)을 이용하면 쉽게 분석할 수 있고, 계산 시간을 줄이기 위해 흔히 Fast Fourier Transform(FFT)을 사용한다. 시간영역에서  $N$ 개의 토크 지령  $T_{e-u}^*[n]$ 을 주파수 영역에서의  $N$ 개의 토크 지령  $X[k]$ 로 변화하는 DFT mapping은

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} T_{e-u}^*[n] e^{-j(2\pi/N)kn} \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

이고, 이 mapping은  $T_{e-u}^*[n]$ 이 유한하면 항상 존재한다. 그림 4에서 교차 주파수(Crossover frequency)  $f_c$ 를 다음과 같이 정의하면

$$\left| \frac{1}{J_m s} \right|_{s=j2\pi f_c} = 1 \quad (2)$$

$0 < f < f_c$ 인 영역에서는 P 제어기로만,  $f_r < f < f_c$  영역에서는 PI 제어기로 동작하도록 할 수 있다. 일반적으로 시간 영역에서의 토크 지령 신호에는 저주파 및 고주파가 다양하게 포함되어 있기 때문에 분석 시점에서 가장 지배적인 주파수를 알아내야만 한다. 이를 위해 다음과 같은 Spectral Energy Ratio를 정의한다. 이는 에너지 개념에서 절환 시점을 파악하기 때문에 노이즈 등에 의한 민감도를 줄일 수 있다.

$$R \equiv \frac{\sum_{k=N_T}^{N_C} |X[k]|^2}{\sum_{k=0}^{N_C} |X[k]|^2} \times 100 [\%] \quad (3)$$

식 (3)에서  $N_T$ 와  $N_C$ 는 spectrum index로서 다음과 같이 계산되며 이 때  $f_s$ 는 속도제어 주파수이다.

$$N_T = \text{int} \left( \frac{f_r}{f_s} N \right) \quad (4)$$

$$N_C = \text{int} \left( \frac{f_c}{f_s} N \right) \quad (5)$$

식 (3)은  $0 < f < f_s$ 의 주파수 영역에서  $0 < f < f_r$ 에 존재하는 토크 지령의 스펙트럼 에너지가 어느 정도인지를 나타내고 있다. 따라서, 이 값이 50[%] 이하면 저주파가 우세하므로 이 때는 PI 제어기로 동작하여야 한다.

#### 4. 실험 결과

제안된 anti-windup 기법의 타당성을 검증하기 위하여 3kW 유도전동기를 대상으로 실험을 수행하였다. 전류제어 주기는  $50\mu s$ , 속도 제어 주기는  $1ms$ 로 설정하였고, 속도제어기 대역폭은  $100rad/s$ 로 두었다. 토크 지령의 샘플링 갭수  $N=128$ 에 대하여 실시간 FFT 알고리즘의 수행시간은 약  $31\mu s$ 이고, 절점 주파수는  $25Hz$ 로 고정하였다.

##### 4.1. 조건부 적분 기법

그림 5는 1000r/min 램프 속도 지령에 대해 적분기 온-오프 시점을 오랜 시간 튜닝한 후, 동일한 튜닝 조건에서 속도 지령을 스텝으로 인가한 파형을 나타낸다. 운전조건에 변동하자 응답에 오버슈우트가 발생하고 정착시간도 늘어남을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 응용분야 및 제어기 이득에 따라 시스템 불안정을 유발할 수도 있다.

##### 4.2. Back-calculation 기법

그림 6은 Back-calculation 기법으로  $H_A=H$ ,  $b=7$ 로 선장한 경우의 결과이다. 1000r/min 램프 지령의 경우, Back-calculation 상수에 의해서 적분기에 채터링이 발생함을 확인할 수 있고, 상수가 더 커지면 이에 의한 토크 리플이 유발될 수 있다.

##### 4.3. 제안된 기법

그림 7은 제안된 방법의 응답 파형으로 주파수 영역에서 절환 시점을 자동적으로 결정하였기 때문에 고성능 응답을 보여주며 기존 방법과 비교하여 네 번째 적분기 누적량도 가장 적음을 알 수 있다.

그림 8은 기존 방법과 제안된 anti-windup 방법의 속도 응답을 확대한 파형으로 제안된 방법의 오버슈우트가 가장 적음을 알 수 있고 이에 의한 정착시간도 가장 빠름을 확인할 수 있다.

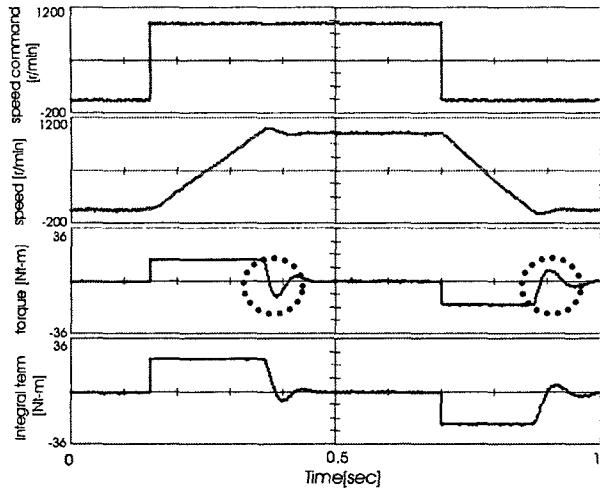


그림 5 1000r/min 스텝 지령에 대한 조건부 적분 기법 응답 파형

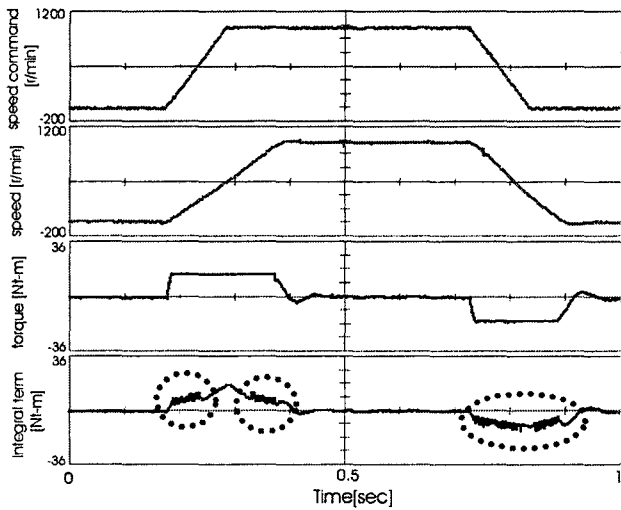


그림 6 1000r/min 램프 지령에 대한 Back-calculation 기법 응답 파형



그림 7 1000r/min 스텝 지령에 대한 제안된 기법 응답 파형

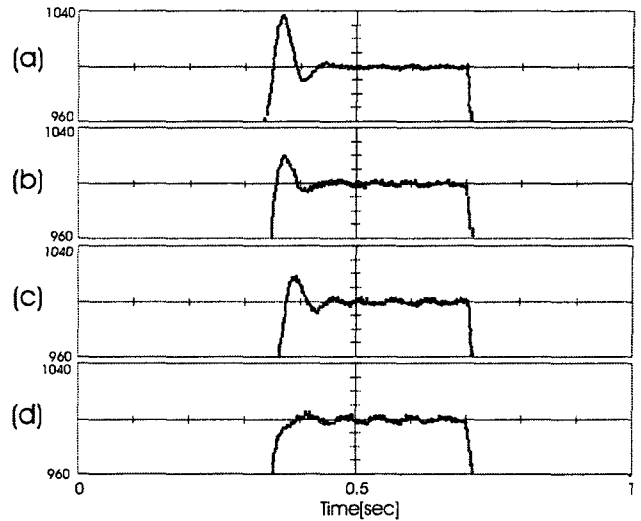


그림 8 비교 확대 파형: (a)조건부 적분기법, (b)Back-calculation 기법, (c)Hybrid 기법, (d)제안된 기법

#### 4. 결 론

본 논문에서는 사용자의 튜닝 편의와 시스템 유지, 보수 측면에서 튜닝 상수가 필요없는 조건 적분 형태의 anti-windup 기법을 제시하였다. 제안된 방법은 주파수 영역에서 전동기 토오크 지령 신호를 분석하여 제어기 내부에서 자동적으로 적분기 온/오프 시점을 계산하여 사용자의 편의를 도모하였다. 또한, 전동기 동특성적인 측면에서도 기본 방법과 비교하여 최소한의 오버슈우트와 가장 빠른 정착시간을 가짐을 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2003-041-D0024)

#### 참 고 문 헌

- [1] K. J. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America, pp.88-92, 1995.
- [2] Y. Peng, D. Vrancic, and R. Hanus, "Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers", *IEEE Control Systems Magazine*, Aug., pp. 48-57, 1996.
- [3] K. S. Walgama, S. Ronnback, and J. Sternby, "Generalisation of conditioning technique for anti-windup compensators", *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 139, no. 2, pp. 109-118, 1991.
- [4] C. Bohn and D. P. Atherton, "An Analysis package comparing PID anti-windup strategies", *IEEE Control Systems Magazine*, April, pp. 34-40, 1995.