

고성능 유도전동기 구동을 위한 자동 튜닝 Anti-windup 기법

石줄기[†], 李東楯*

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

Jul-Ki Seok and Dong-Choon Lee

요 약

본 논문에서는 PI형태의 속도제어기를 장착한 고성능 유도전동기의 조건부 적분형 자동 튜닝 anti-windup 기법을 제안한다. 제안된 방법에서는 전동기 운전 조건에 대한 사전 정보 없이도 전동기 토오크 지령의 주파수 해석에 의해서 적분기 온/오프 시점이 결정된다. 따라서, 사용자는 anti-windup 동작을 위한 별도의 제어 상수를 설정하지 않아도 된다. 또한, 동작 조건이 변동하여도 과도 상태의 속도는 항상 최소한의 오버슈우트와 정착시간을 가지도록 동작한다. 본 기법은 속도 및 토오크 응답의 오버슈우트를 허용하지 않는 유도전동기 고성능 응용 분야에 유용하게 적용 될 수 있으며, 기본 개념은 화학 공정이나 산업용 로봇과 같은 일반 산업 응용 분야에도 확대 적용 가능하다.

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.

Key Words : Tuning-free conditional integration, anti-windup, induction machine, Proportional-Integral (PI) type speed controller, frequency domain analysis, tuning parameters

1. 서 론

최근 지속 기준 제어 방법의 확립에 힘입어 유도 전동기는 스피들 구동 분야와 철강 압연 라인과 같은 산

업 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 제어기가 주로 사용되고 있다. 알려진 대로 PI 제어기는 경제적이면서도 모델링 오차 등에 비교적 강인한 장점이 있지만, 적분 제어기의 포화에 의한 누적(windup) 현상에 의해서 응답의 오버슈우트 및 느린 정착 시간을 초래하는 단점이 있다. 이러한

[†]교신저자 : 정희원, 영남대 전자정보공학부 조교수

*정희원, 영남대 전자정보공학부 부교수

E-mail : doljk@yu.ac.kr

접수일자 : 2004. 7. 22

1차 심사 : 2004. 9. 14

심사완료 : 2004. 9. 15

적분기 누적 현상은 운전 조건에 따라 심한 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^{[1]-[7]}.

- 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^{[1][2][3]}. 따라서, 모든 동작 조건에서 일관된 특성을 얻기 위해서는 적분기 온/오프 하는 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 제어기가 포화되면 그 때부터 누적된 값을 일정량만큼 적분기에서 빼내가는 방법이다^{[1][4]}. 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^{[5][6][7]}.

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 적분기법^{[1][2][3]}

그림 1은 조건부 적분 기법의 제어 구조를 나타낸다. 여기서, w_m^* 및 w_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^[7]. 그 중에서 가장 간단한 방법은 식 (1)과 같이 제어기가 포화되는 순간, 즉 $T_e \neq T_{e-u}$ 일 때 적분기의 동작을 멈추는 것이다.

$$Integration \begin{cases} ON : T_e = T_{e-u} \\ OFF : T_e \neq T_{e-u} \end{cases} \quad (1)$$

이 방법은 간단하지만 속도 지령, 가감속, 부하 조건 등 운전 조건에 의해서 변동하는 속도 오차에 관계없이 적분기의 온-오프 절환 시점을 고정하는 문제가 있다. 이 때문에 운전 조건에 따라 적분기 내의 누적량이 달라지므로 속도 응답 동특성은 운전 조건에 따라 다른 특성을 보이게 된다. 즉, 어떤 한 운전 조건에서 적분기 오프 시점을 튜닝하더라도 운전 조건이 변동하게 되면 적분기 누적량이 변동하여 windup 현상에 의한 속도 오버슈우트나 진동이 발생하는 것이다. 그러므로, 고성능 구동을 위해서는 운전 조건에 따라 적분기 온/오프 조건을 때변 변동해 주어야 하는데, 이는 튜닝을 위한 시간도 많이 필요하고, 여러 번 시험을 해야 하기 때문에 현장에서 적용하기란 매우 어렵다.

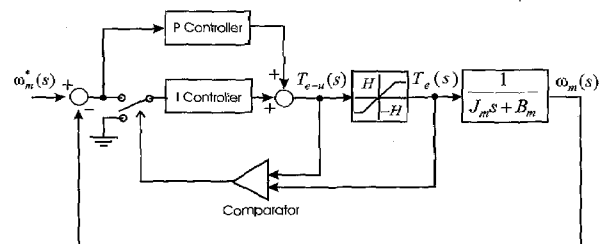


그림 1 조건부 적분 기법 제어 블록도

Fig. 1 Block diagram of conditional integration scheme

2.2 Back-calculation 기법

일반적인 Back-calculation 기법은 제어 입력이 포화될 경우 적분기 내에 누적된 값을 빼내는 방법으로 그

성능은 Back-calculation 상수 b 에 의존하게 된다^[1] 만약, b 를 크게 선정할 경우에는 지나치게 많은 양을 적분기에 빼내게 되어 포화가 끝나는 시점에서 적분기 값이 매우 작아지거나 음의 값을 가지게 된다. 이럴 경우 적분기에 의한 출력이 작아져서 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 된다. 따라서, 이 방법은 속도 응답이 제어기 상수 선정에 의존하게 되며 현장에서 다양한 시험을 통하여 적당한 상수 값을 찾아야만 한다.

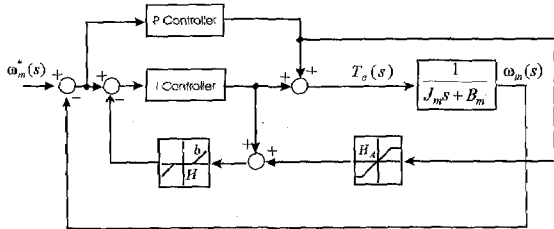


그림 2 Back-calculation 기법 제어 블록도
Fig. 2 Block diagram of back-calculation scheme

2.3 하이브리드 기법^{[5]-[7]}

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. 위 방법들과 마찬가지로 제어기 성능은 제어기 이득에 의존하며 사용자는 이득을 잘 관찰하여 가장 적당한 값을 찾아야만 한다. 식 (2)는 하이브리드 기법에 사용되는 anti-windup 조건과 이득 K_A 의 선정 방법의 예를 나타낸다.

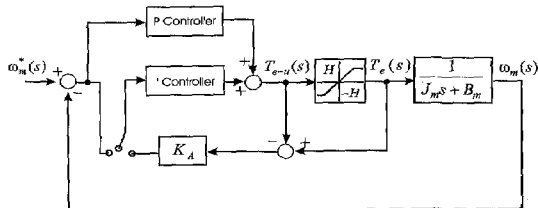


그림 3 하이브리드 기법 제어 블록도
Fig. 3 Block diagram of hybrid scheme

$$Integration \begin{cases} K_A(T_e - T_{e-u}), \\ T_e \neq T_{e-u} \text{ and } (w_m^* - w_m) T_{e-u} > 0 \\ w_m^* - w_m, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

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 영역의 개념에서 제어를 설계하고 해석하였기 때문이다. 즉, 적분기 누적 성분은 비선형적으로 증감하는데 반해 시간 영역에서 설계된 제어기는 누적되는 값을 선형적으로 줄여 가도록 동작하게 된다. 이 때문에 기존 방법들은 고정된 운전 조건에서는 잘 동작하지만, 운전 조건이 변하여 적분기에 누적되는 값이 변동하면 그 응답이 나빠지게 된다.

3. 제안된 Anti-windup 기법

3.1 주파수 영역에서 유도된 자동튜닝 anti-windup 기법

유도전동기 구동 응용분야에서 속도제어기는 대부분 PI 형태의 제어기가 널리 사용되는데, 그 이유는 제어 대상 플랜트를 관성 및 마찰로 구성된 1차 지연 형태로 간주하기 때문이다. 이러한 플랜트에 대한 주파수 응답을 도시하면 그림 4와 같다.

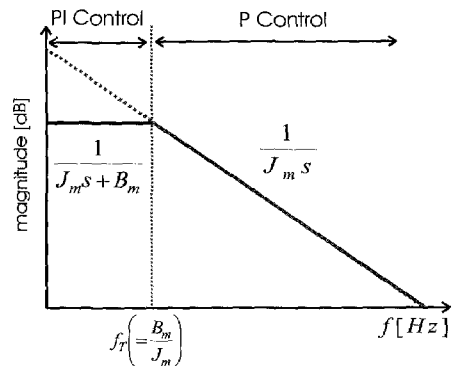


그림 4 유도전동기 기계적 시스템의 주파수 응답
Fig. 4 Frequency response of induction machine mechanical system

절점 주파수(Break frequency) f_T 를 기준으로 고주파 영역은 $1/J_m s$ 가 우세하고, 저주파에서는 마찰항이 우세하다. 즉, 고주파 영역에서는 플랜트가 마치 순수 1차 형태의 전달함수로 보이므로, 적분기가 이 영역에서 동작하면 적분항의 누적 값이 증가하여 정상상태 속도

응답에 오버슈트나 진동이 발생함을 알 수 있다.

이러한 windup 현상을 최소화 하려면 절점 주파수를 중심으로 고주파 영역에서는 적분기 동작을 오프하는 것이 바람직하다. 주어진 주파수 응답은 전동기 속도 혹은 토크에 대한 것으로 이러한 동작을 수행하려면 전동기 속도 혹은 토크 신호의 주파수를 분석해야 하는데, 일반적으로 측정 속도는 저속에서 정밀도가 낮기 때문에 저속에서 정확한 주파수 분석이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 토크 지령을 주파수 분석 신호로 채택하였는데, 대부분 고성능 유도전동기 시스템에서는 토크제어가 잘 수행되므로 토크 지령과 실제 토크가 거의 같다고 두어도 무리가 없다.

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^{[8][9]}. 시간영역에서 N 개의 토크 지령 $T_{e-u}^*[n]$ 을 주파수 영역에서의 N 개의 토크 지령 $X[k]$ 로 변화하는 DFT mapping은

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} T_{e-u}^*[n] e^{-j(2\pi/N)kn} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

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

$$\left| \frac{1}{J_m s} \right|_{s=j2\pi f_c} = 1 \quad (4)$$

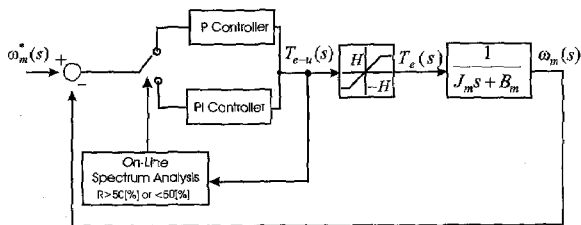


그림 5 제안된 anti-windup 전체 블록도
Fig. 5 Block diagram of proposed anti-windup scheme

3.2 주파수 영역에서 유도된 자동튜닝 anti-windup 기법

일반적으로 시간 영역에서의 토크 지령 신호에는 저주파 및 고주파가 다양하게 포함되어 있기 때문에 분석 시점에서 가장 지배적인 주파수를 알아내야만 한

다. 이를 위해 다음과 같은 Spectral Energy Ratio를 정의한다. 이는 에너지 개념에서 절환 시점을 파악하기 때문에 노이즈 등에 의한 절환 민감도를 줄일 수 있다.

$$R = \frac{\sum_{k=N_T}^{N_C} |X[k]|^2}{\sum_{k=0}^{N_C} |X[k]|^2} \times 100 [\%] \quad (5)$$

식 (5)에서 N_T 와 N_C 는 spectrum index로서 다음과 같이 계산되며 이 때 f_s 는 속도제어 주기이다.

$$N_T = \text{int} \left(\frac{f_T}{f_s} N \right) \quad (6)$$

$$N_C = \text{int} \left(\frac{f_C}{f_s} N \right) \quad (7)$$

식 (5)는 $0 < f < f_s$ 의 주파수 영역에서 $0 < f < f_T$ 에 존재하는 토크 지령의 스펙트럼 에너지가 어느 정도인지를 나타내고 있다. 따라서, 이 값이 50[%] 이하이면 저주파가 우세하므로 이 때는 PI제어기로 동작하여야 하고, 50[%] 이상이면 P 제어기로만 동작하면 적분기에 의한 windup 현상을 별도의 튜닝 상수나 조건없이 제거할 수 있다. 그림 5에 제안된 anti-windup 기법의 전체 블록도를 나타낸다.

3.3 절점 주파수의 선정

주파수 영역에서의 자동 튜닝 anti-windup을 수행하기 위해서는 기계적 시스템에서 주어지는 절점 주파수 f_T 를 알아야만 한다. 현재 상용으로 시판되고 있는 모든 산업용 전동기 구동 장치는 모터의 관성을 초기에 온라인 또는 오프라인 방식으로 추정을 하여 알아내지만, 마찰 계수의 값은 추정하지 않기 때문에 일반적으로 절점 주파수의 값을 알 수 없다. 그런데, 대부분 유도전동기 전동기 구동 시스템 설계에 있어서 정격 속도에서 마찰에 의한 부하 토포크는 경험적으로 정격 토포크의 30%를 넘지 않도록 설계 한다. 본 논문에서는 가능한 절점 주파수의 최대 값을 구하기 위해서 최대 마찰 B_{max} 을 정격 토포크의 50%로 설정하고, 최소 모터 관성은 모터 자체 관성으로 설정하였다. 이상의 조건에서 상용 전동기 시스템들의 절점 주파수를 알아본 결과 최대 값은 10[Hz]를 넘지 않았다. 이 값과 본 논문에서 주어진 속도 제어 주파수 1[kHz], 데이터 개수 $N=128$ 을 대입하면 식 (6)에 의해서 N_T 는 1이 되

므로 R 의 분해능이 매우 낮게 된다. 그러므로, 본 논문에서는 최대 절점 주파수와 가까우면서도 R 의 분해능을 높이기 위해 절점 주파수를 25[Hz]로 고정하였다. 절점 주파수를 25[Hz]로 고정한 경우, 그림 6과 같이 주파수 영역에서는 실제 절점 주파수와 비교해서 차이가 크게 나타나 보이지만, 시간 영역에서 보면 약간의 오차가 있을 뿐 그 차이는 극히 작다. 이는 그림 6의 시간 영역 속도 파형에서 알 수 있듯이 절환 시점에서는 속도 혹은 토크가 저주파로 느리게 변동하기 때문에 주파수 영역에서의 오차가 그리 크지 않게 나타나는 것이다. 이상의 설정이 현실적으로 큰 문제가 없음을 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

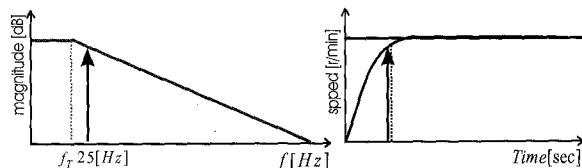


그림 6 시간 영역에서 본 f_T 와 주파수 영역에서 본 f_T 선택의 차이 비교
 Fig. 6 Influence for selection of break frequency in frequency and time domain

4. 실험 결과

제안된 anti-windup 기법의 타당성을 검증하기 위하여 표 1의 3kW 유도전동기를 대상으로 실험을 수행하였다. 전류제어 주기는 100 μ s, 속도 제어 주기는 1ms로 설정하였고, 속도제어기 대역폭은 100rad/s로 두었다. 프로세서는 TMS320VC33 - 120MHz를 사용하였고, 토크 지령의 샘플링 갯수 $N=128$ 에 대하여 실시간 FFT 알고리즘의 수행시간은 약 31 μ s이고, 절점 주파수는 25Hz로 고정하였다. 또한, 모든 시험에 대해서 전류 및 속도 제어가 이득은 동일하게 설정하였다.

표 1 실험에 사용된 3kW 유도전동기 정격 및 상수
 Table 1 Ratings and parameters of 3kW induction motor under test

정격 용량	3[kW]
정격 전압	230[V]
정격 속도	1500[r/min]
정격 토크	15[Nt-m]
자체 관성	0.0089[kg-m ²]

4.1 조건부 적분기법

그림 7은 1000r/min 램프 속도 지령에 대해 적분기 온-오프 시점을 오랜 시간 튜닝한 결과를 나타낸다. 그림에서 위로부터 속도 지령, 실제 속도, 전동기 토크 및 적분기 누적항을 나타낸다. 이 시험에서 사용된 조건은 식 (1)과 같고, 주어진 운전 조건에 대해서 튜닝하였기에 비교적 만족할만한 속도 및 토크 응답을 보여주며, 적분 누적항의 값이 작기 때문에 정상상태 도달시 windup에 의한 현상도 작음을 알 수 있다.

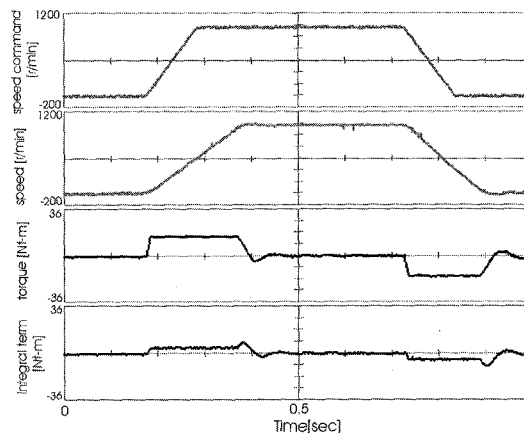


그림 7 1000 r/min 램프 속도 지령에 대한 조건부 적분기법의 응답 파형
 Fig. 7 Responses of conditional integration scheme for 1000 r/min ramp speed command

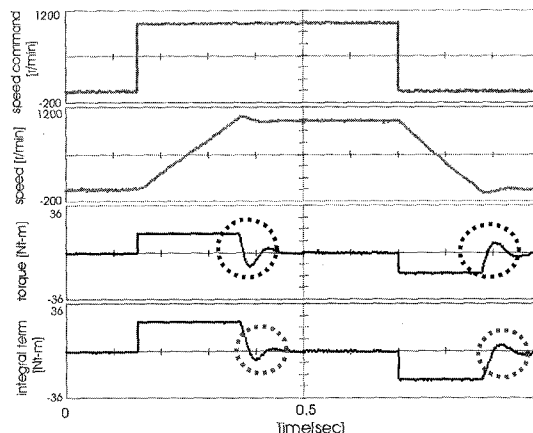


그림 8 1000 r/min 스텝 속도 지령에 대한 조건부 적분기법의 응답 파형
 Fig. 8 Responses of conditional integration scheme for 1000 r/min step speed command

그림 8은 그림 7에서 설정된 적분기 온/오프 조건을 고정된 상태에서 속도 지령의 가속 시간만 조정해 준 것

우의 파형이다. 앞서 설명한 바와 같이 운전 조건에 변화함에 따라 적분 누적항이 커지고, 이에 의해서 적분기 windup 현상이 나타남을 속도 및 토크 응답을 통하여 확인할 수 있다. 이러한 응답 특성은 속도 제어기 이득, 부하의 기계적 구조 등에 따라 시스템 불안정을 유발할 수도 있는데, 이를 해결하려면 모든 운전 조건에 따라 적분기 온/오프 조건을 가변하여야만 한다.

4.2 Back-calculation 기법

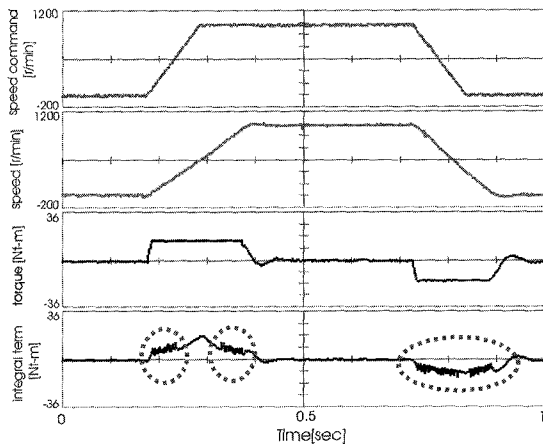


그림 9 1000 r/min 램프 속도 지령에 대한 back-calculation 기법의 응답 파형
 Fig. 9 Responses of back-calculation scheme for 1000 r/min ramp speed command

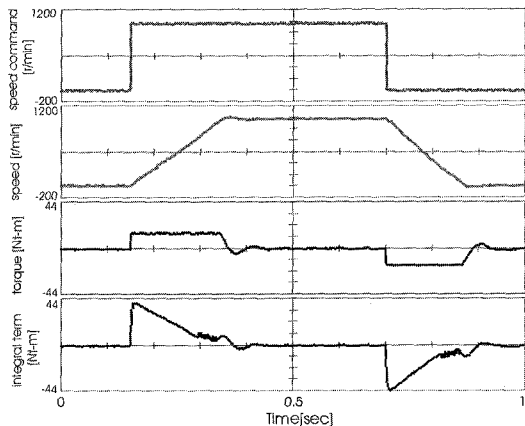


그림 10 1000 r/min 스텝 속도 지령에 대한 back-calculation 기법의 응답 파형
 Fig. 10 Responses of back-calculation scheme for 1000 r/min step speed command

그림 2에 제시된 back-calculation 기법을 구현하기 위해서는 두 종류의 상수를 튜닝해야 하는데, 본 시험

에서는 오랜 시간 튜닝 끝에 다음과 같은 값을 구하였다.

$$\begin{cases} H_A = H \\ b = 7 \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)에 주어진 상수를 가지고 그림 9, 10과 같은 실험을 수행하였다. 앞서 설명한 대로 적분기 누적항에 back-calculation 상수에 의한 채터링이 발생하고, 운전 조건 변동에 의해서 그림 9와 10의 적분기의 누적량이 변동함을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 고성능 운전시 반복정밀도를 떨어뜨리는 주요한 원인으로 작용한다.

4.3 하이브리드 기법

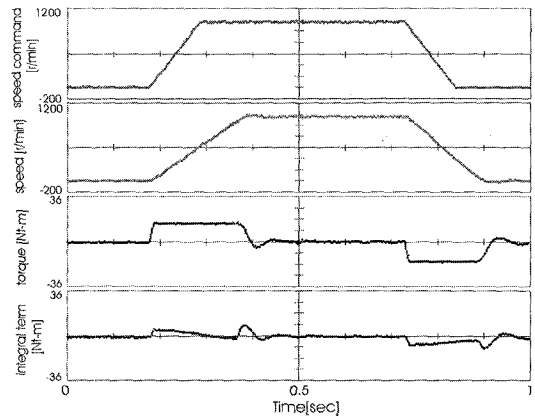


그림 11 1000 r/min 램프 속도 지령에 대한 하이브리드 기법의 응답 파형
 Fig. 11 Responses of hybrid scheme for 1000 r/min ramp speed command

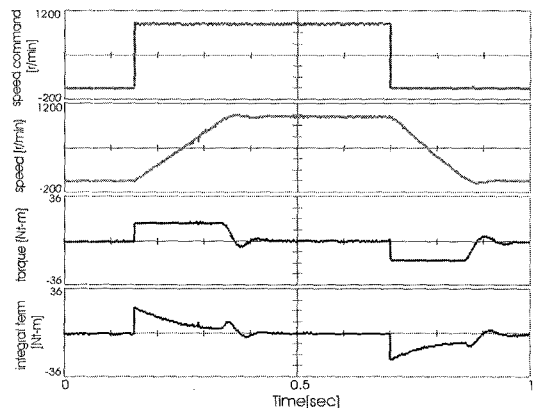


그림 12 1000 r/min 스텝 속도 지령에 대한 하이브리드 기법의 응답 파형
 Fig. 12 Responses of hybrid scheme for 1000 r/min step speed command

하이브리드 기법의 시험은 식 (2)와 같은 조건으로 수행하였는데, 상수 K_A 는 그림 11의 램프 지령에 대하여 여러 번의 시험을 통하여 선정하였다. 튜닝된 값을 이용한 시험에서는 속도 및 토크 응답도 우수하고, 적분기 누적량도 작음을 확인할 수 있다. 적분기 누적량의 형태가 조건부 적분 기법 및 back-calculation 기법을 혼합하여 놓은 형태이다.

동일한 조건에서 속도 지령을 스텝으로 바꾸었을 때의 응답 파형을 그림 12에 도시하였다. 운전 조건 변동에 대해서 적분기 누적량이 변동함을 확인할 수 있다. 앞선 두 가지 기법보다는 특성이 우수하지만 초기에 튜닝이 어려운 단점이 있다.

4.4 제안된 자동튜닝 anti-windup 기법

제안된 기법에 대한 응답 파형을 그림 13, 14에 도시하였다. 본 방법은 운전 전에 튜닝해야 할 상수 및 조건이 전혀 없으며 운전 조건이 변동하여도 적분기 누적량의 변동이 매우 작고, 실제 그 값도 매우 작은 값을 알 수 있다. 이러한 특성으로 두 경우 모두 속도 및 토크 응답이 매우 우수하다. 이는 제어기에서 토크 지령의 주파수 분석을 통하여 최적의 제어기 절환 시점을 결정하기 때문에 가능한 것이다.

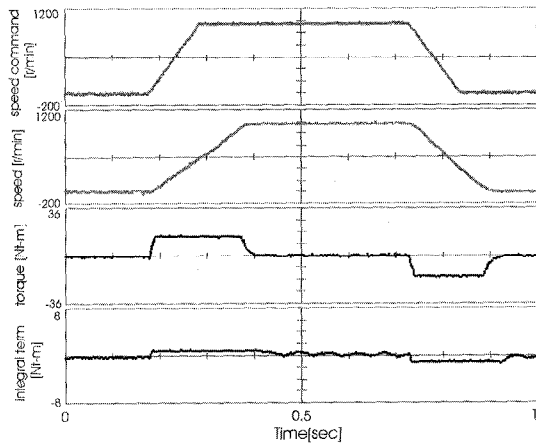


그림 13 1000 r/min 램프 속도 지령에 대한 제안된 기법의 응답 파형
Fig. 13 Responses of proposed scheme for 1000 r/min ramp speed command

그림 15는 제안된 기법의 동작을 설명하기 위하여 2개의 내부 변수를 추가로 도시하였다. 위로부터 실제 속도, 토크, Spectral Energy Ratio R , 제어기 스위칭 플래그를 보여 준다. 제어기 스위칭 플래그가 1일 때는 PI 제어가 수행되고, 0일 때는 P 제어만 수행됨을

나타내는데, Spectral Energy Ratio R 이 50[%]가 되는 지점에서 정확히 P 제어에서 PI 제어로 절환이 일어나음을 확인할 수 있다.

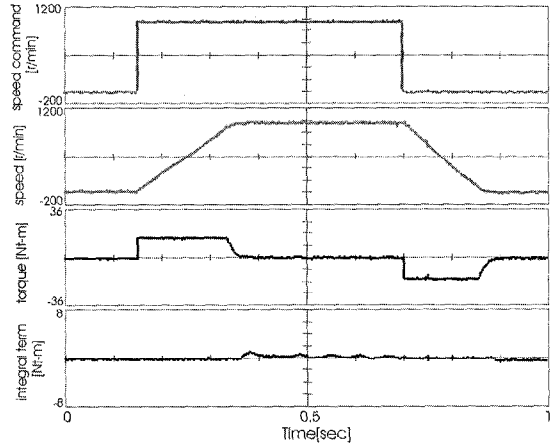


그림 14 1000 r/min 스텝 속도 지령에 대한 제안된 기법의 응답 파형
Fig. 14 Responses of proposed scheme for 1000 r/min step speed command

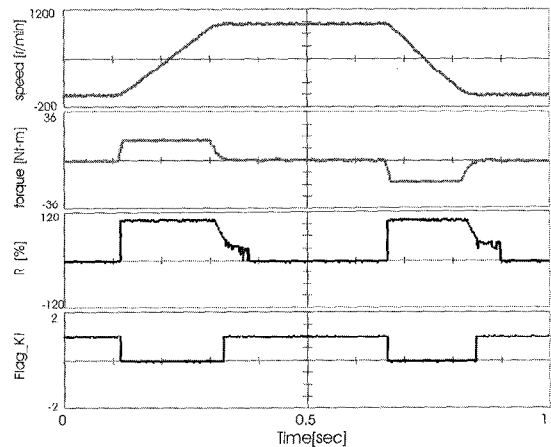


그림 15 제안된 기법의 Spectral Energy Ratio 및 제어기 절환 플래그
Fig. 15 Spectral energy ratio and switching flag of proposed scheme

4.5 응답성 비교

기존 방법 및 제안된 방법의 응답 성능을 정량적으로 평가하기 위하여 스텝 속도 지령에 대한 두 가지 비교를 수행하였다. 그림 16은 튜닝된 기존 방법 및 제안된 방법의 정상상태 도달 속도 응답 파형을 확대한 것이다. 제안된 방법의 속도 응답이 가장 작은 오차를 가지고 수렴함을 확인할 수 있다.

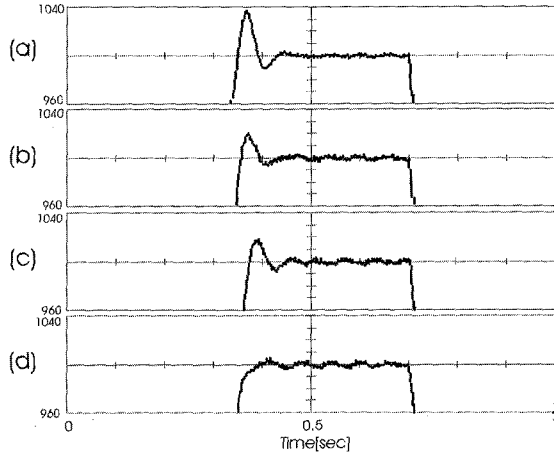


그림 16 스텝 속도 지령에 대한 확대된 비교 응답 파형:
(a) 조건부 적분 기법, (b) Back-calculation 기법,
(c) 하이브리드 기법, (d) 제안된 기법

Fig. 16 Comparison of speed performance for step speed command:(a) Conditional Integration Scheme, (b) Back-calculation Scheme, (c) Hybrid Scheme, (d) Proposed Scheme

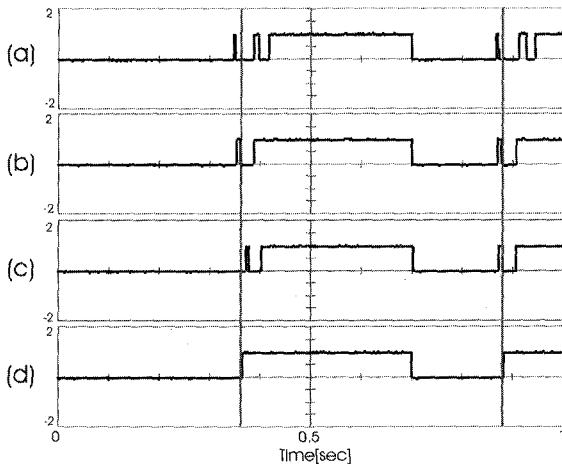


그림 17 정착시간 비교 결과:(a) 조건부 적분 기법,
(b) Back-calculation 기법, (c) 하이브리드 기법,
(d) 제안된 기법

Fig. 17 Comparison of settling time:(a) Conditional Integration Scheme, (b) Back-calculation Scheme, (c) Hybrid Scheme, (d) Proposed Scheme

그림 17은 그림 16의 응답에 대한 정착시간을 비교하였다. 여기서 보여지는 플래그는 속도 오차가 1[r/min] 미만일 경우 1이 된다. 제안된 방법의 정착시간이 가장 빠름을 확인할 수 있다. 표 2에서 비교된 결과를 정리하였다.

표 2 각 anti-windup 기법의 비교 결과

Table 2 Summary of results of each anti-windup strategy

기법	운전 조건에 따른 일관성	튜닝 상수 개수	오버슈우트	정착시간
조건부 적분 기법	나쁨	1	4%	260ms
Back-calculation 기법	보통	2	2%	240ms
하이브리드 기법	보통	2	1.8%	250ms
제안된 기법	우수	0	< 0.2%	210ms

5. 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.

본 연구는 산업자원부의 (R-2003-B-314) 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

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.

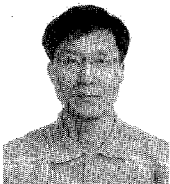
- [5] A. S. Hodel and E. C. E. Hall, "Variable-structure PID control to prevent integrator windup", *IEEE Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 3, June, pp. 445~450, 1998.
- [6] H. B. Shin, "New anti-windup PI controller for variable-speed motor drives", *IEEE Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 2, April, pp. 442~451, 1995.
- [7] A. Visioli, "Modified anti-windup schemes for PID controllers", *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 150, No. 1, pp. 49~54, 2003.
- [8] James H. McClellan, Ronald W. Schafer, and Mark A. Yoder, *DSP First: A Multimedia Approach*. Prentice Hall, pp.320~377, 1999.
- [9] Dimitris G. Manolakis, Vinay K. Ingle, and Stephen M. Kogon, *Statistical and Adaptive Signal Processing*. McGraw Hill, pp.195~225, 2000.

저 자 소 개



석줄기(石雋基)

1992년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1998년~2001년 삼성전자 생산기술센터 자동화연구소 책임연구원. 현재 영남대 전자정보공학부 조교수.



이동춘(李東椿)

1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1989년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1998년 미국 Texas A&M Univ. 방문연구 교수. 2004년 미국 Wisconsin Univ. 방문연구 교수. 현재 영남대 전자정보공학부 부교수.