

장력 제어 시스템 전용 인버터

백진욱, 전종욱, 김광연, 김정빈, 김경서
LS산전

AC Drive for Tension Control System

J. W. Paek, J. W. Jeon, K. Y. Kim, J. B. Kim, K. S. Kim
LS Industrial Systems Co. Ltd.

Abstract

본 논문에서는 장력 검출 장치(로드셀, 댄서 등)가 장착되어 있는 생산 설비에서 강선, 강판, 제지, 섬유, 비닐 등과 같은 소재의 장력을 정밀하게 제어하기 위한 인버터의 장력 제어 전용 PID 제어기와 직경 또는 소재의 두께를 실시간으로 추정하여 인버터의 출력 주파수를 보정하는 추정기를 제안한다. 본 논문에서 제안된 방법을 다양한 용량(0.37kW~160kW) 대의 인버터에 탑재하여 실제 부하에 적용함으로써 산업 현장에서 요구하는 수준 이상의 우수한 제어 성능을 나타냄을 확인하였다.

1. 서론

댄서나 로드셀 등과 같은 장력 검출 장치가 장착되어 있는 장력 제어 시스템에 본 논문에서 제안된 알고리즘을 탑재한 장력 제어 전용 인버터를 적용하여 각각의 전동기의 속도를 효과적으로 제어할 수 있다.

본 논문에서는 인버터 내부의 장력 제어 전용 PID 제어기와 직경 또는 소재의 두께를 추정하는 방법과 이러한 제안된 알고리즘에 의하여 인버터의 최종 출력 주파수가 결정되는 원리와 그 효과에 대해서 기술한다.

2. 장력 제어 전용 인버터의 구성

2.1 장력 제어 시스템 개요

그림 1 은 일반적인 장력 제어 시스템의 한 예이다. 장력 제어 시스템은 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 첫째, 공정의 가장 앞단에서 소재의 장력을 제어하면서 풀어주는 언와인더부, 둘째, 공정의 중간 부분에서 소재의 장력을 유지하면서 가공하는 캡스틴 블록부, 셋째, 공정의 가장 마지막 단에서 소재의 장력을 제어하면서 감는 와인더부로 구성된다.

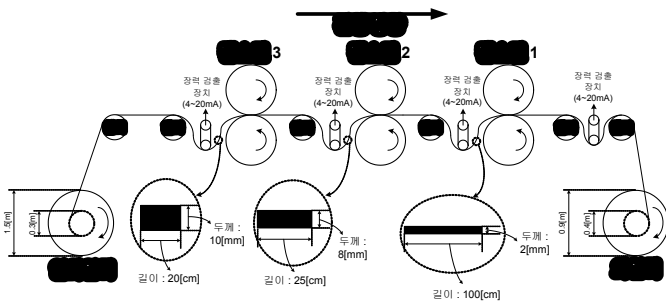


그림. 1 일반적인 장력 제어 시스템

각각 소재의 장력을 검출하는 댄서 또는 로드셀 등과 같은 장력 검출 장치가 부착되어 적절한 장력으로 제어된다. 이와 같은 장력 검출 장치에서 출력되는 신호(0~10V 또는 4~20mA)는 해당 요소를 제어하는 인버터의 피드백 신호로 입력되어 인버터 내부의 장력 제어 전용 PID 제어기 및 직경 및 소재의 두께 추정 알고리즘에 의해 인버터의 최종 출력 주파수가 결정된다.

2.2 와인더 제어 알고리즘

그림 2 는 와인더 제어의 전체 구성도이다. 그림 2 에서 볼 수 있듯이 모두 6부분(선속 지령부, 장력 제어 전용 PID 제어기부, 직경 연산부, 최종 속도 연산부, 단선 감지부, 아날로그 출력부)으로 구성된다.

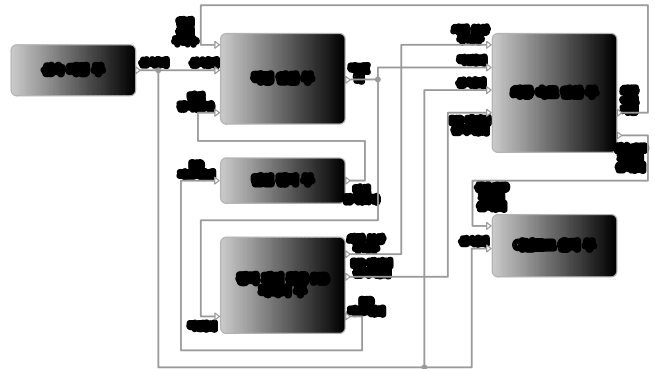


그림. 2 와인더 제어의 전체 구성도

와인더는 공정이 진행됨에 따라 실제 직경이 증가하게 된다. 식 (1) 에서 보는 바와 같이 선속[mpm]을 일정하게 유지하기 위해서는 전동기 속도[rpm]를 직경이 증가하는 만큼 비례적으로 낮춰줘야 한다.

$$\text{전동기 속도 [rpm]} = \frac{\text{선속 [mpm]}}{\text{직경 [m]}} \quad (1)$$

이 전동기의 속도, 즉 인버터의 출력 주파수는 그림 2 의 장력 제어 전용 PID 제어기부가 동작하여 낮춰준다. 또한, 실제 증가하는 직경을 그림 2 의 직경 연산부에서 추정하여 그 추정된 직경을 이용하여 그림 2 의 최종 속도 연산부에서 인버터의 출력 주파수를 최종적으로 낮춰주게 된다(식1). 이러한 방법은 기존의 일반 Process PID 제어기만을 사용하여 와인더의 장력을 제어하는 것보다 훨씬 더 안정적인 성능을 보여준다. 왜냐하면, 직경 연산부에서 추정된 직경이 인버터의 출력 주파수를

한 번 더 보상해주기 때문에 인버터의 출력 주파수에서 PID 제어기의 출력이 차지하는 비율이 매우 작아지게 된다. 따라서 장력 제어 전용 PID 제어기의 출력이 포화할 위험이 없어지고, I 제어기에 의한 인버터 출력 주파수의 오실레이션이 현저하게 줄어드는 효과가 있다.

그림 3 은 인버터 인터페이스용 윈도우 프로그램에서 불러온 장력 제어 전용 PID 제어기부의 기능 블록이다. 기본적인 PID 제어기 외에 외란 보상 기능(APP86-88), 기동시 PID 제어기 출력의 과도 현상을 개선하기 위한 특수 기능(APP51)이 적용되었다. 또한 공정이 진행됨에 따라 와인더에 감겨진 소재에 의해 중량이 무거워지게 된다. 이에 따라 커지는 관성의 보상을 위해서 P 계인을 특정 프로파일(APP56-57)로 증가시켜줄 수 있다.

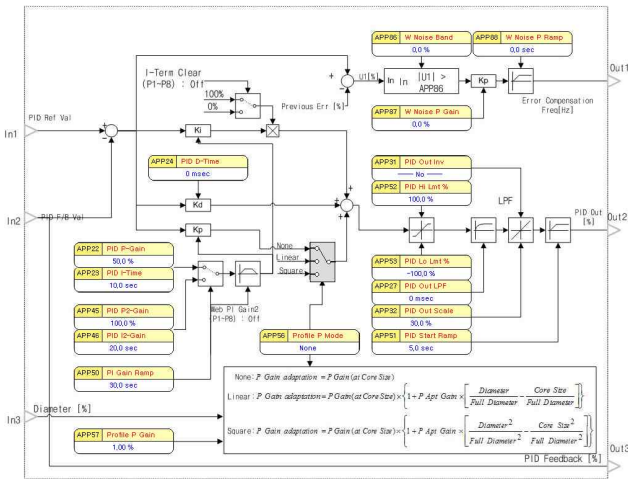


그림.3 장력 제어 전용 PID 제어기부

그림 4 는 직경 연산부이다. 직경 초기값을 사용자가 직접 입력할 수 있다(APP63-66). 또한 어떤 특수 조건(예를 들어 속도가 너무 낮거나 인버터 이상 상태 등)에서 직경 연산을 중지할 수도 있다. 직경 추정은 식 (2) 와 같이 지령 선속(그림 4 의 In2 : Main Speed Ref[%])과 현재 전동기 속도(그림 4 의 In1 : Out Freq[Hz])의 비율에 의해 이루어진다.

$$\text{직경} [m] = \frac{\text{선속} [mpm]}{\text{전동기 속도} [rpm]} \quad (2)$$

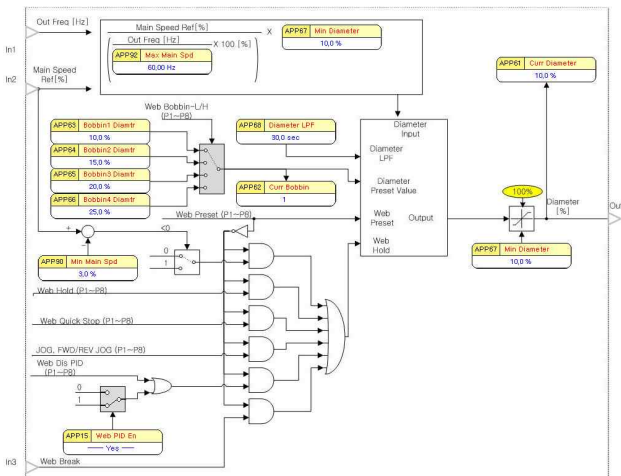


그림.4 직경 연산부

최종 속도 연산부에서는 지령 선속(그림 5 의 In3 : Main Speed[%])과 PID 제어기부의 출력인 PID 출력치(그림 5 의

In4 : PID Out[%]), 직경 연산부의 출력인 직경(그림 5 의 In2 : Diameter[%]) 을 이용하여 인버터의 최종 출력 주파수를 결정하게 된다.

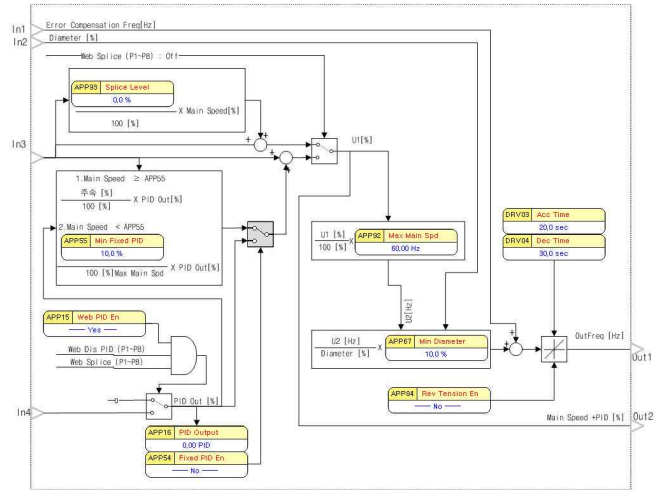


그림.5 최종 속도 연산부

와인더의 전체적인 기능을 요약한 제어 블록도는 그림 6 과 같다. Diameter estimator 에서는 지령 선속과 현재 전동기의 최종 속도의 비를 저역 필터링하여 직경 \hat{D}_{dia} 를 추정한다. Plant 에서는 장력 검출 장치의 피드백(PID Feedback)과 사용자가 설정한 레퍼런스(PID Ref)를 PID 제어한 후 그 PID 출력치를 지령 선속에 더하고, 마지막으로 Diameter Estimator 에서 추정된 직경 \hat{D}_{dia} 로 나눔으로써 인버터의 최종 출력 주파수가 결정된다.

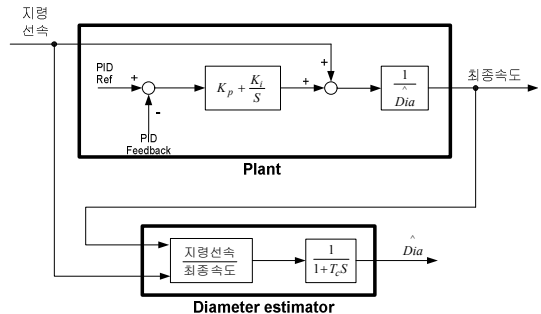


그림.6 와인더의 제어 블록도

2.3 언와인더 제어 알고리즘

언와인더는 그림 2 에서 설명한 와인더의 전체 구성도와 동일하다. 하지만 언와인더는 공정이 진행됨에 따라 실제 직경이 감소하게 되며, 식 (1) 에서 보는 바와 같이 선속[mpm] 을 일정하게 유지하기 위해서는 전동기 속도[rpm] 를 직경이 감소하는 만큼 비례적으로 높혀줘야 한다.

2.4 캡스틴 제어 알고리즘

제강, 제선 라인에서 주로 적용되는 캡스틴은 언와인더와 와인더 사이에 위치하여 해당 구간의 장력을 일정하게 유지함으로써 연속 공정을 가능하게 해준다. 그림 1 에서와 같이 좌측에서 우측 방향으로 갈수록 소재의 두께가 얇아지는데 이 때 캡스틴의 회전 속도는 빨라져야 한다. 왜냐하면 각 캡스틴에서는 동일한 시간 내에 두께와 길이가 다른 소재를 처리해야 하기 때문이다. 이러한 원리에 의해 식 (3) 이 성립된다.

$$\frac{\text{전동기 속도 [rpm]} \cdot \text{선속 [mpm]} \cdot \text{소재의 기준 두께 [m]}}{\text{캡스톤 직경 [m]} \cdot \text{소재의 현재 두께 [m]}} \quad (3)$$

그림 7 은 캡스톤의 전체 구성도이다. 그림 2 의 와인더의 전체 구성도와 유사하지만, 직경 연산부 대신에 소재 두께 연산부가 적용되어 있다. 인버터의 출력 주파수는 선속 지령부에서 만들어지는 선속과 장력 제어 전용 PID 제어기부의 PID 출력치에 의해서 1차로 결정된다. 또한 식 (4) 를 이용하여 소재의 현재 두께를 추정하며, 추정된 소재의 현재 두께에 의해 최종적으로 인버터의 출력 주파수가 결정된다.

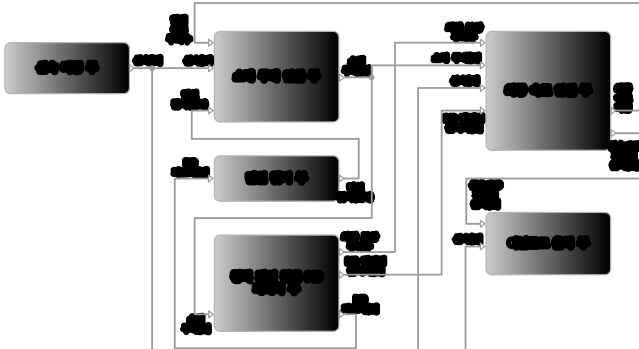


그림.7 캡스톤의 전체 구성도

와인더에서와 마찬가지로 이러한 방법은 기존의 일반 Process PID 제어기만을 사용하여 각 캡스톤 구간의 장력을 제어하는 것보다 훨씬 더 안정적인 성능을 보여준다. 왜냐하면, 소재 두께 연산부에서 연산된 소재의 두께가 인버터의 출력 주파수를 최종적으로 한 번 더 보상해주기 때문에 인버터의 출력 주파수에서 PID 제어기의 출력이 차지하는 비율이 매우 작아지게 된다. 따라서 I 제어기의 출력이 포화할 위험이 없어지고, 인버터 출력 주파수의 제어 성능이 개선되는 효과가 있다.

캡스톤의 장력 제어 전용 PID 제어기부 및 최종 속도 연산부는 와인더의 그림 3과 그림 5 와 각각 동일하다.

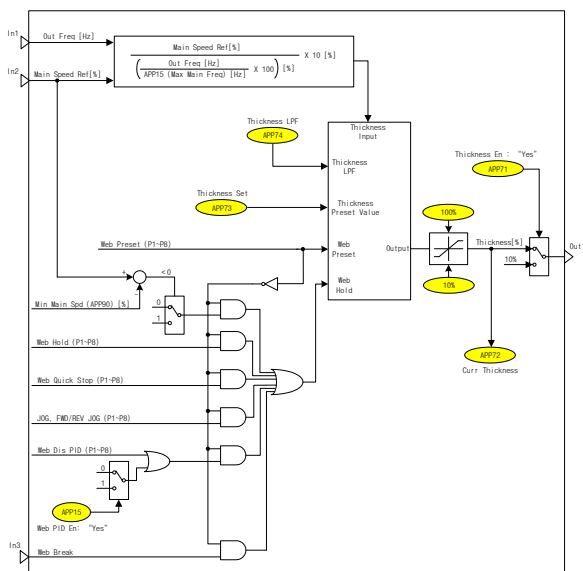


그림.8 소재 두께 연산부

그림 8 은 소재 두께 연산부이다. 해당 캡스톤 블록에서의 소재의 기준 두께를 사용자가 직접 입력할 수

있으며(APP73), 이 값이 소재 두께의 초기값이 된다. 또한 어떤 특수 조건(예를 들어 속도가 너무 낮거나 인버터 이상 상태 등)에서 소재 두께 연산을 중지할 수도 있다.

소재의 현재 두께 추정은 식 (4) 와 같이 지령 선속(그림 8 의 In2 : Main Speed Ref[%]) 과 현재 전동기 속도(그림 8 의 In1 : Out Freq[Hz]) 의 비율에 의해 이루어진다.(식 (4) 에서 캡스톤의 직경 및 소재의 기준 두께는 모두 상수임.)

$$\frac{\text{추정된 소재의 현재 두께 [m]} \cdot \text{선속 [mpm]} \cdot \text{소재의 기준 두께 [m]}}{\text{전동기 속도 [rpm]} \cdot \text{캡스톤 직경 [m]}} \quad (4)$$

이상과 같이 캡스톤의 전체적인 기능을 요약한 제어 블록도는 그림 9 와 같다. Thickness estimator 에서 지령 선속과 현재 전동기의 최종 속도의 비를 저역 필터링하여 소재의 현재 두께 \hat{Thick} 를 추정한다. Plant 에서는 장력 검출 장치의 피드백(PID Feedback) 과 사용자가 설정한 레퍼런스(PID Ref) 를 PID 제어한 후 그 PID 출력치를 지령 선속에 더하고, 마지막으로 Thickness Estimator 에서 추정된 소재의 현재 두께 \hat{Thick} 로 나눔으로써 인버터의 최종 출력 주파수가 결정된다.

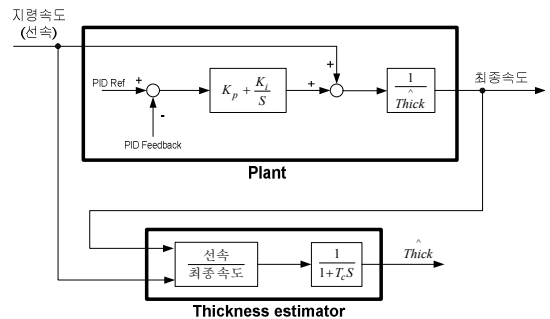


그림.9 캡스톤의 제어블록도



그림.10 장력 제어 전용 인버터 적용 사진

3. 결론

본 논문에서 제안한 알고리즘을 탑재한 장력 제어 전용 인버터(0.37kW~160kW) 를 현재까지 신선, 필름, 비닐 생산 라인 등에 적용하였으며, 저속 영역에서 고속 영역(선속 기준으로 1200[mpm]) 까지 고정밀도의 장력 제어가 가능함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] David R. Roisum, "The Mechanics of Web Handling", TAPPI Press, 1998
- [2] Bill Drury, "The Control Techniques Drives and Controls Handbook", pp296~298, IEE, 2001