



# TM450 ACOPOS 제어 개념과 설정



## I 버전 정보

버전	날짜	수정내역	번역	검수
1.0	2018.2.6	첫번째 버전 (TM450TRE.42-ENG)	-	Eun Im

Table 1: Versions

### 선행 및 필요 조건

교육 자료	TM410 – Working with Integrated Motion Control TM440 – Motion Control: Basic Functions
소프트웨어	Automation Studio 4 Automation Runtime 4.08 Motion Control 2.49.1
하드웨어	ACOPOS drive / ACOPOSmulti / ACOPOSmicro / ACOPOSmotor / ACOPOSremote



## II 목차

1	소개 .....	1
1.1	학습목표 .....	1
2	폐루프 제어의 기본 .....	2
3	캐스케이드 제어(cascaded control) 개념 .....	5
3.1	설정점 발생기(setpoint generator) .....	6
3.1.1	기본 작동 .....	6
3.1.2	저크 한계(Jerk limitation) .....	8
3.2	예측 위치 컨트롤러(Predictive position controller) .....	10
3.3	속도 컨트롤러 .....	13
3.3.1	토크 제한(Torque limiting) .....	14
3.3.2	전류 설정점 필터(Current setpoint filter) .....	14
3.4	전류 컨트롤러 .....	15
4	제어 파라미터의 이론적 결정 .....	16
4.1	속도 컨트롤러(Speed controller) .....	16
4.2	위치 컨트롤러(Position controller) .....	17
5	컨트롤러 튜닝 절차 .....	18
5.1	일반 정보 .....	18
5.2	속도 컨트롤러 .....	20
5.2.1	비례 게인(Proportional gain), “kv” .....	21
5.2.2	적분 동작 시간(Integral action time), “tn” .....	21
5.2.3	속도 필터(Speed filter) .....	21
5.2.4	전류 설정점 필터(Current setpoint filter) .....	22
5.3	위치 컨트롤러 .....	24
5.3.1	비례 게인(Proportional gain), “kv” .....	24
5.3.2	적분 동작 시간(Integral action time) “tn” .....	25
5.3.3	지연 시간 보상 .....	25
5.3.3.1	총 지연 시간(Total delay time), “t <sub>total</sub> ” .....	28
5.3.3.2	예측 시간 (Prediction time), “t <sub>predict</sub> ” .....	28
5.3.4	최대 비례 동작(Maximum proportional action) “p <sub>max</sub> ” .....	30
5.3.5	최대 적분 동작 “i <sub>max</sub> ” .....	30
5.4	제한 값 파라미터 .....	31
5.4.1	“t <sub>jolt</sub> ” 저크 시간 필터(jerk time filter) .....	31
5.4.2	지연 오류 상쇄 제한(Lag error cancellation limit) .....	31
5.5	제어 파라미터 설정 개요 .....	34
6	오토튜닝을 이용한 제어 설정 결정 .....	35
7	컨트롤러 설정 저장 .....	39
8	요약 .....	40
	Automation Academy 에서 제공하는 것 .....	41



## 1 소개

전기식 드라이브의 모션 제어 품질은 프로세스 품질, 정밀도 및 동적 특성을 결정하는데 중요하다. 이것은 컨트롤러 설정 뿐만 아니라 제어 개념도 중요한 요인임을 의미한다.

이 교육 자료에서는 B&R 드라이브 솔루션의 기본 사항에 대해 설명한 다음, 단계별 방식으로 제어 개념을 설명한다. 그 다음에는 최적 제어 파라미터를 다룬다.

Automation Studio 툴은 컨트롤러 설정 결정과 시험에 유용하다 (TM410 – Working with Integrated Motion Control 참조). 여러 가지 예제는 이론을 이해하는데 도움이 될 것이다.



그림 1 B&R 동기 모터(전면)와 ACO-POSmuti system(후면)

### 1.1 학습목표

이 교육 자료에서는 B&R 모션 제어의 작동 방법 시범을 위해 선정된 애플리케이션과 연습을 이용한다.

- 폐루프 제어(closed-loop control) 기본 개념을 학습한다.
- ACOPOS 드라이브에 이용되는 캐스케이드 제어(cascade control) 개념을 학습한다.
- 제어 파라미터를 결정하고 오토튜닝 사용법과 절차를 학습한다.
- 속도와 위치 컨트롤러의 제어 파라미터를 수동으로 계산하는 절차를 학습한다.
- 제어 파라미터를 수정하고 저장하는 방법과 그것을 드라이브에 로딩하는 방법을 학습한다.

## 2 페루프 제어의 기본

B&R 드라이브 솔루션의 제어 개념을 더 상세히 다루기 전에 다음과 같은 질문을 던진다.

“드라이브는 왜 페루프 제어를 필요로 하는가?”

드라이브의 목표는 모터와 다양한 기구를 사용하여 가능한 한 신속하고 정확하게 특정 위치에 도달하는 것이다.

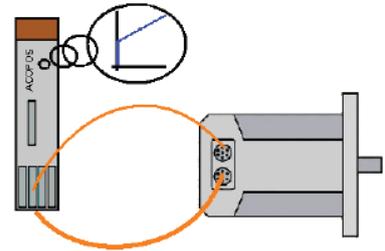


그림 2 ACOPOS 서버 드라이브와 모터

컨트롤러가 반드시 먼저 알아야 할 것은 모터가 움직여야 할 위치이다. 이 값은 일반적으로 위치 설정점(position setpoint)라고 부른다. 페루프 제어에서 이를 위해 기준 변수(reference variable)가 이용된다.

컨트롤러는 현재 모터가 어디에 있는지를 찾아내기 위해 위치 정보가 필요하다. 이 정보는 인코더(encoder)를 이용하여 얻는다. 인코더는 피드백을 통해 컨트롤러에 정보(모터의 실제 위치와 속도)를 제공하는 측정 요소이다.

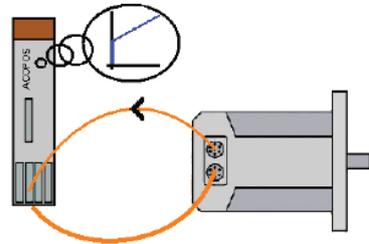


그림 3 인코더 정보가 ACOPOS 서버 드라이브에 전송됩니다.

위치 설정점과 실제 위치가 일치하지 않으면 제어 편차(control deviation) 또는 지연 오류(lag error)라 부른다.

### 페루프 컨트롤러(closed control loop)

서보 드라이브가 지연 오류(lag error)를 보상한다. 그러한 이유로 컨트롤러는 조작 변수(manipulated variable)를 출력한다. 조작 변수는 실제 위치가 위치 설정점에 도달하도록 제어 시스템에 영향을 미친다(이 경우에는, 모터와 그 이후에 기구들). 우리의 경우에, 실제 위치는 제어 변수(controlled variable)이다.

이 모든 것을 페루프 컨트롤러라고 부른다.

시스템에 영향을 미치는 외부적 요인도 있다. 이러한 유형의 요인들은 외란 변수(disturbance variables)라고 불리며 컨트롤러가 외란 변수를 보상해야 한다. 예를 들어, 매달려 있는 하중(hanging load)은 페루프 컨트롤러의 외란 변수이다.

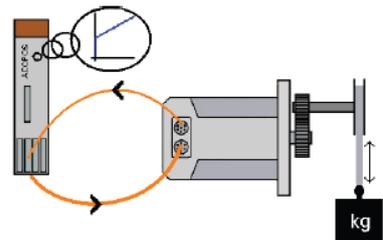


그림 4 외란 변수로 매달려 있는 하중과 페루프 컨트롤러

### 페루프와 개루프 컨트롤러의 차이

페루프 컨트롤러와 달리, 개루프 컨트롤러(open loop controller)에는 피드백(feedback)이 없다. 언제, 어떻게 목표에 도달했는지 결정할 수 없다는 것을 의미한다. 개루프 컨트롤러는 주로 주파수 변환기를 사용하는 속도 제어기에 사용된다.

**지금 페루프 컨트롤러에서 무슨 일이 일어나는가?**

페루프 컨트롤러는 한 가지 이상의 전송 요소(transfer elements)로 구성될 수 있다. 이 전송 요소는 입력 값에 따라 다르게 반응한다.

ACOPOS 서보 드라이브의 컨트롤러는 일반적으로 비례 요소 (P 요소, P 컴포넌트) 및 적분 요소로 (I 요소, I 컴포넌트) 구성된다.

**P 컴포넌트 (P component)**

P 컴포넌트는 즉시 비례 출력 값 점프를 입력 값 점프에 반응한다. 출력 점프 사이즈는 한 가지 요인으로 결정된다. 이 게인(gain)은 요인 “kv”로 알려져있다.

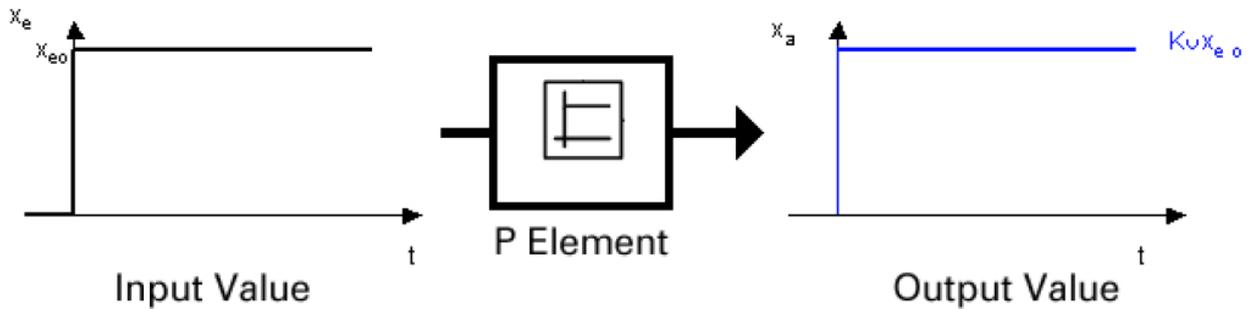


그림 5 P 컴포넌트의 반응

**I 컴포넌트 (I component)**

I 컴포넌트의 입력 변수가 증가할 때 출력 값은 램프(ramp) 형태로 연속적으로 증가한다. 이 램프의 기울기, 즉 출력 변수가 상승하는 속도는 특정 시간에 좌우된다. 이 시간은 적분 동작 시간 “ $t_n$ ”으로 알려져 있다.

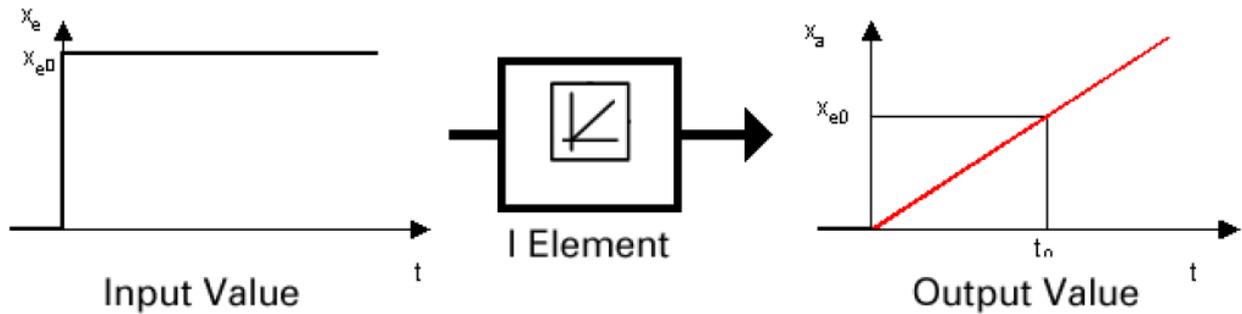


그림 6 I 컴포넌트의 반응

**PI 컨트롤러 특성**

PI 컨트롤러는 P와 I 컴포넌트를 포함한다. 양쪽 컴포넌트의 출력 값은 함께 합산된다. 그 결과, PI 컨트롤러는 입력 값의 증가에 따라 다음과 같이 반응한다: P 컴포넌트는 컨트롤러로 하여금 입력 값 변동에 즉각 반응하도록 한다. 나머지 컨트롤러 편차는 단 하나의 P 컴포넌트만 사용되는 경우에 나타난다. I 컴포넌트는 이를 적분하고 편차를 보상한다.

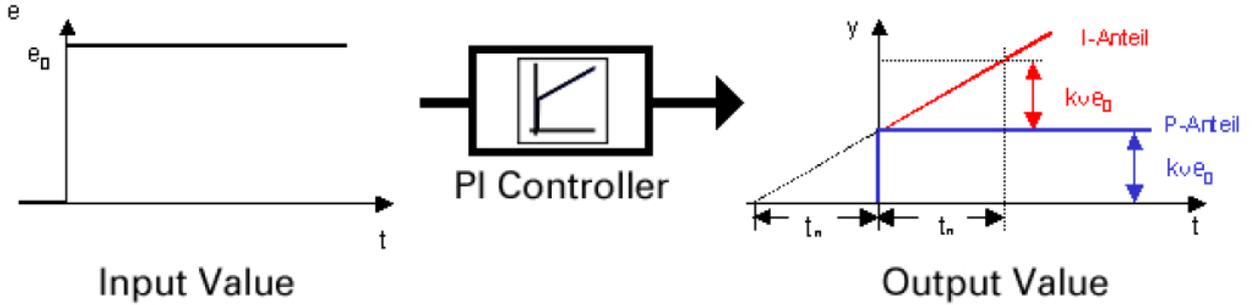


그림 7 PI 컨트롤러의 반응

B&R 서보 드라이브 제품군에 속하는 각 제품은 강력한 프로세서를 갖추고 있다. 프로세서는 여러 가지 작업 가운데 컨트롤러 알고리즘을 계산한다. 그러한 이유로 “디지털 제어(digital control)”라는 용어가 사용된다. 아날로그 (연속) 폐루프 제어와 디지털(이산 시간) 폐루프 제어의 차이는 제어 편차가 대응되는 시간 간격에 (cycle) 스캐닝된다는 점이다. 이 주기는 가능한 한 동일해야 하고 (= 지터가 없도록, jitter-free), 가능한 한 빨리 컨트롤러 편차의 변화를 받아들이도록 가능한 한 짧아야 한다.

### 3 캐스케이드 제어(cascaded control) 개념

캐스케이드 제어 개념은 B&R 서보 드라이브의 핵심이다. 위치 컨트롤러, 속도 컨트롤러, 전류 컨트롤러가 설정점 발생기에서 시작하여 캐스케이드 방식으로 연결된다. 그 결과 상위-레벨 컨트롤러의 조작 변수는 하위-레벨 컨트롤러의 기준 변수가 된다.

예를 들어, 위치 컨트롤러가 속도 컨트롤러를 위한 속도 설정점을 설정한다는 것을 의미한다.

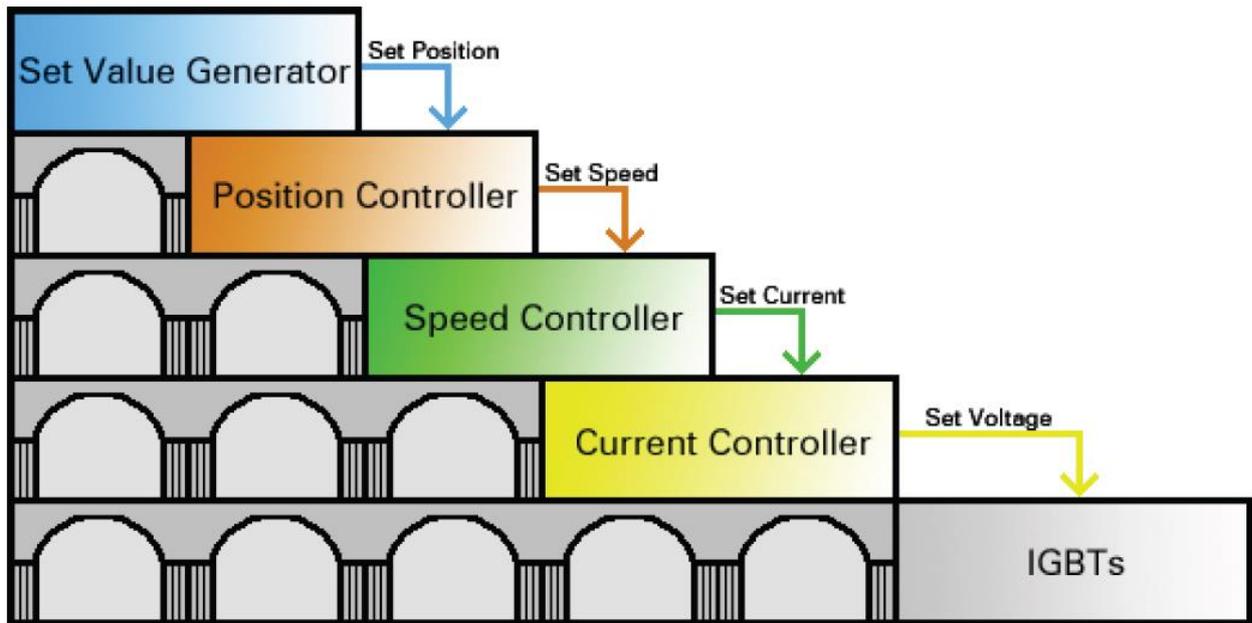


그림 8 캐스케이드 컨트롤러 구조: 하이-레벨 위치 컨트롤러가 하위-레벨 컨트롤러를 위해 설정점을 생성한다.

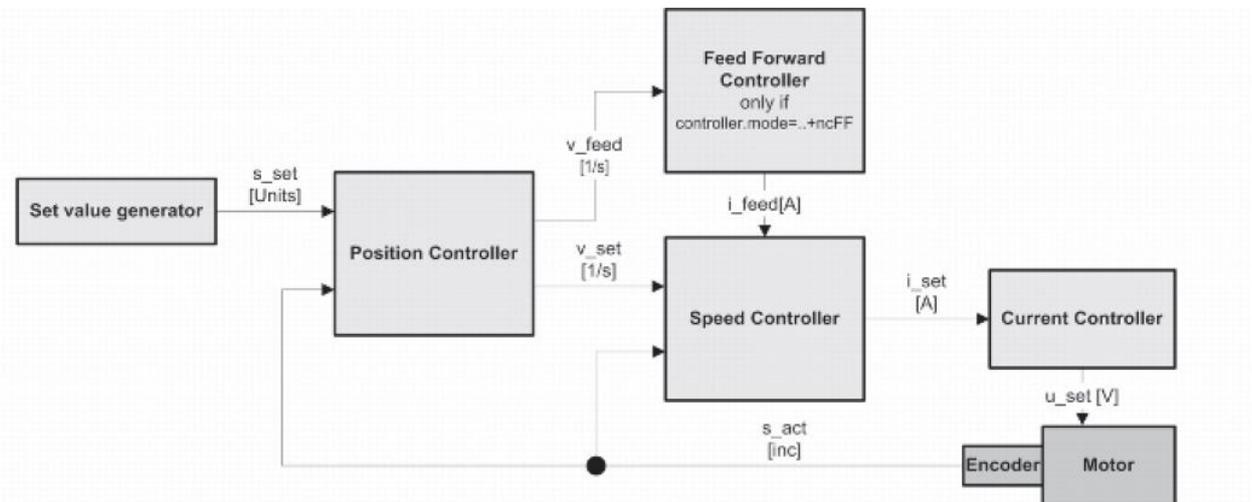


그림 9 설정점 생성기와 컨트롤러 캐스케이드를 포함한 제어기 블록 다이어그램

**?** Motion W Reference manual W ACP10 W NC objects W NC object "ncAXIS" W Controller W Controller mode "ncPOSITION"

### 3.1 설정점 발생기(setpoint generator)

#### 3.1.1 기본 작동

앞에서 살펴보았듯이 설정점 발생기는 위치 컨트롤러를 위한 기준 변수를 제공한다. 생성 주기는  $400 \mu s^1$  이다.

설정점 발생기의 업무는 기본 구동 수행 명령 후에 움직임 프로파일(movement profile)을 만드는 것이다. 프로파일 경로는 대부분 기본 구동 파라미터에 의존한다 (목표 위치, 가속도 등).

Element	Data Type	Description
...		
<b>move</b>		<b>Axis movement</b>
...		
<b>basis</b>		<b>Basis movements</b>
<b>parameter</b>		<b>Parameters</b>
<b>s</b>	DINT	Target position or relative move distance [Units]
<b>v_pos</b>	REAL	Speed in positive direction [Units/s]
<b>v_neg</b>	REAL	Speed in negative direction [Units/s]
<b>a1_pos</b>	REAL	Acceleration in positive direction [Units/s <sup>2</sup> ]
<b>a2_pos</b>	REAL	Deceleration in positive direction [Units/s <sup>2</sup> ]
<b>a1_neg</b>	REAL	Acceleration in negative direction [Units/s <sup>2</sup> ]
<b>a2_neg</b>	REAL	Deceleration in negative direction [Units/s <sup>2</sup> ]

그림 10 기본 구동을 위한 제한 값

<sup>1</sup>설정점 발생기는  $400 \mu s$  또는 그 이상의 속도로 ACOPOS 시스템 상에서 계산된다. 정확한 수치는 또한 각각의 드라이브 컨트롤러의 데이터 시트로부터 얻을 수 있다.

다음 그림은 이러한 유형의 프로파일과 사용되는 파라미터 값을 보여준다.

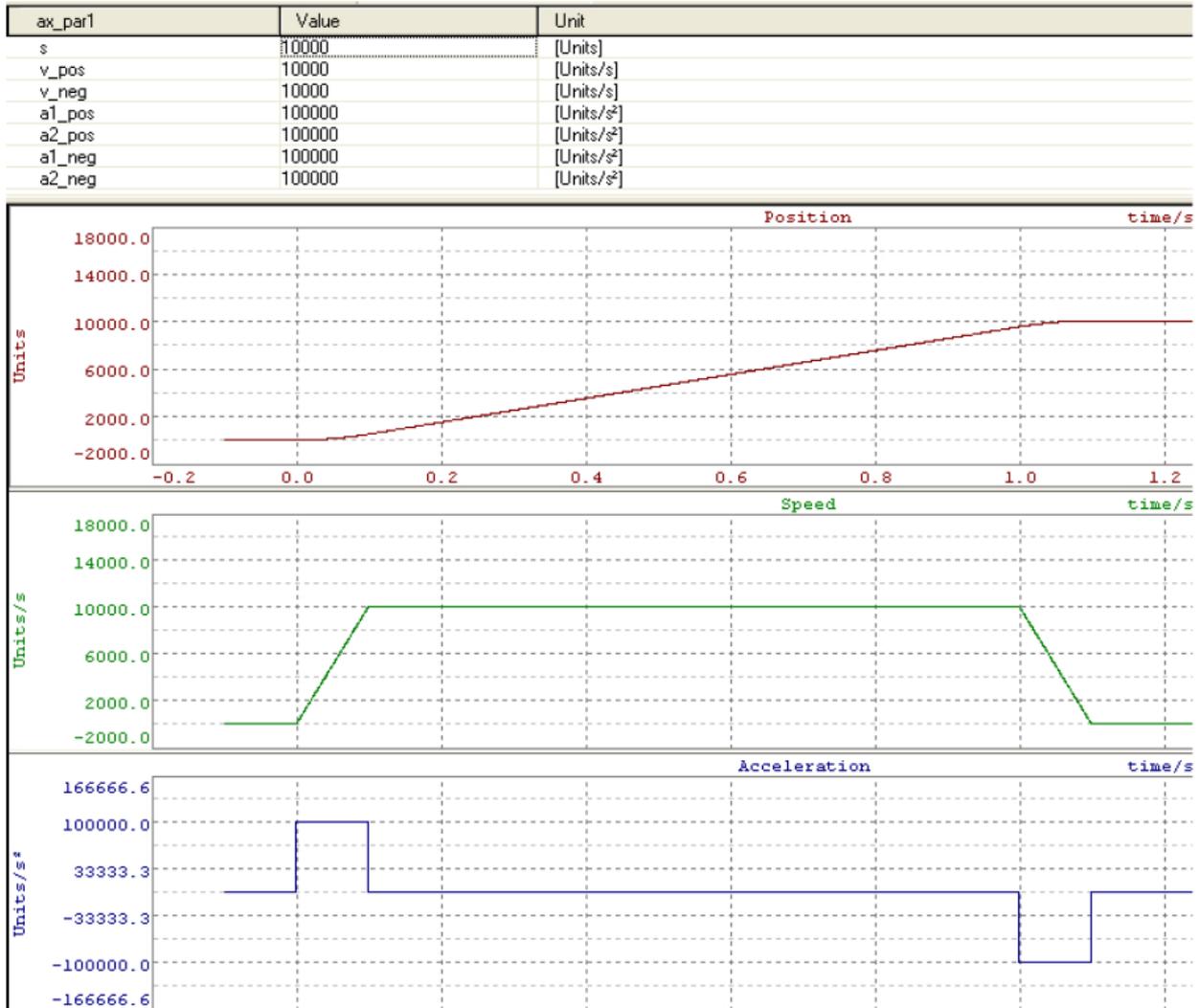


그림 11 위치, 속도, 가속도에 대한 트레이스 기록 (속도의 1 차 미분)

차트를 보면 각각의 가속도 끝에서 점프가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 점프를 졸트(jolt)라 부른다. 각각의 속도 곡선이 꺾일 때 이러한 현상이 발생한다.

일반적으로 이러한 유형의 거동은 바람직하지 않다. 이러한 경우에 모터는 반드시 더 높은 토크를 발생시켜야 하기 때문이다. 게다가, 기구에 더 높은 부하가 가해지고 전체 시스템이 진동한다.

그러한 이유로 설정점 발생기에는 저크 한계(jerk limitation)가 있다.

?

Motion W Reference manual W NC objects W "ncAXIS" NC object

- Base movements
- Limit values

### 3.1.2 저크 한계(Jerk limitation)

속도 곡선에서 굴곡이 발생하는 변화로 졸트(jolt)가 발생한다. 속도가 가속 시작 단계에서 천천히 증가하거나 가속 종말 단계에서 천천히 감소한다면, 직사각형 가속도 프로파일은 사다리꼴 사각형이 된다. 다음 트레이스 기록은 이것을 보여준다:

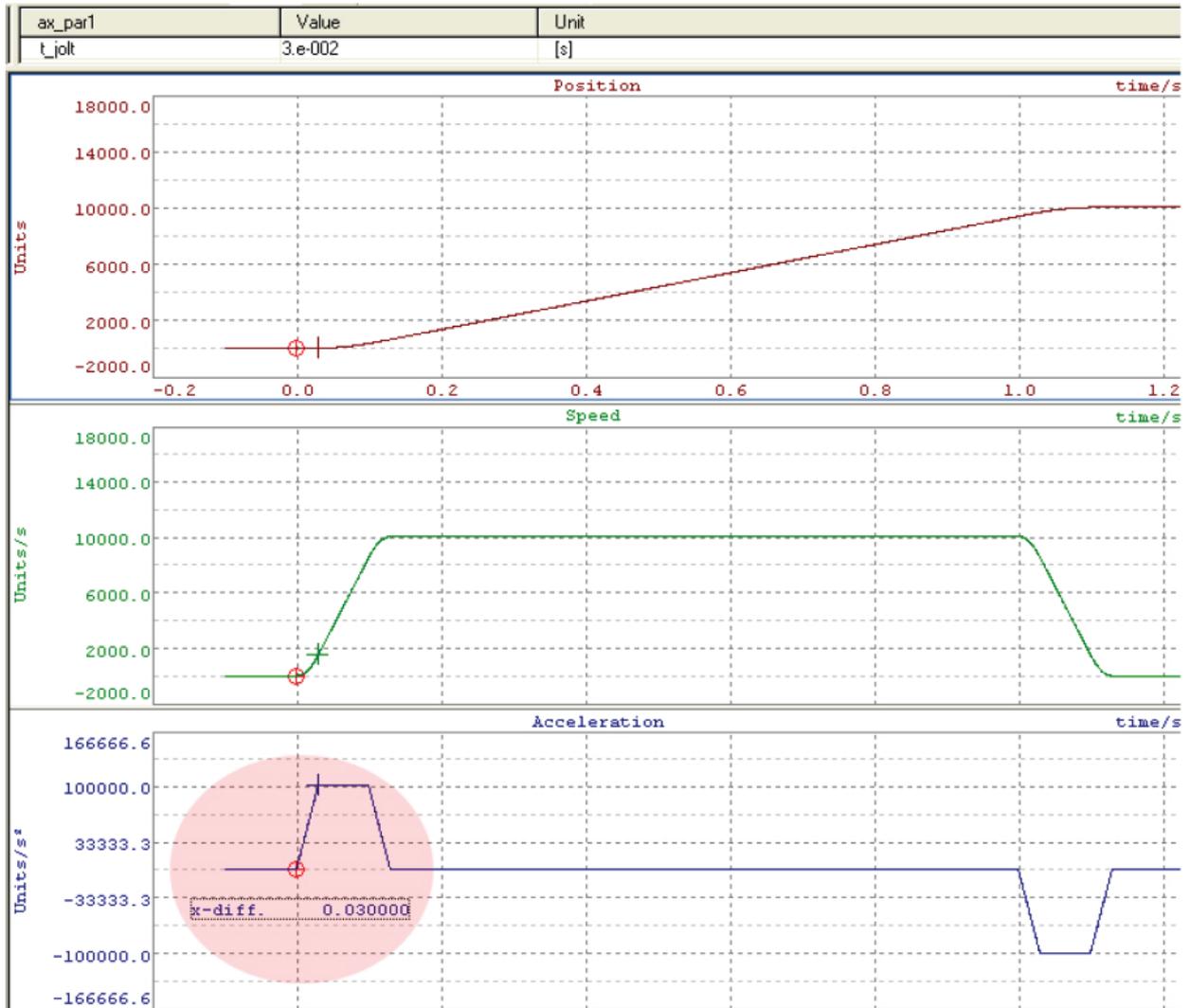


그림 12 활성화된 저크 필터와 위치, 속도, 가속도 트레이스 기록

서보 드라이브가 저크-제한 모션 프로필을 발생시키도록 저크 필터 시간을 설정할 수 있다. 저크 필터 시간은 영(0)에서 정의된 최대값까지 가속하기 위해 요구되는 시간이다. 저크 한계는 실행시간 중 선형 필터를 이용한다. 그림에서 저크 필터 시간 “t\_jolt”가 0.03 초로 설정되어 있는 것을 볼 수 있다. 아래 차트 다이어그램의 측정 커서는 가속도 상승 시간이 저크 필터 시간과 동일함을 보여준다.

?

Motion W Reference manual W NC objects W "ncAXIS" NC object W Base movements

능동 저크 한계는 설정점 발생 시간을 연장시킨다. 보다 낮은 저크 부하로 시스템 안정화 시간(settling time of system)이 현저히 단축되기는 경우가 많기에 위치 결정 목표에 더 일찍 도달할 수 있다.

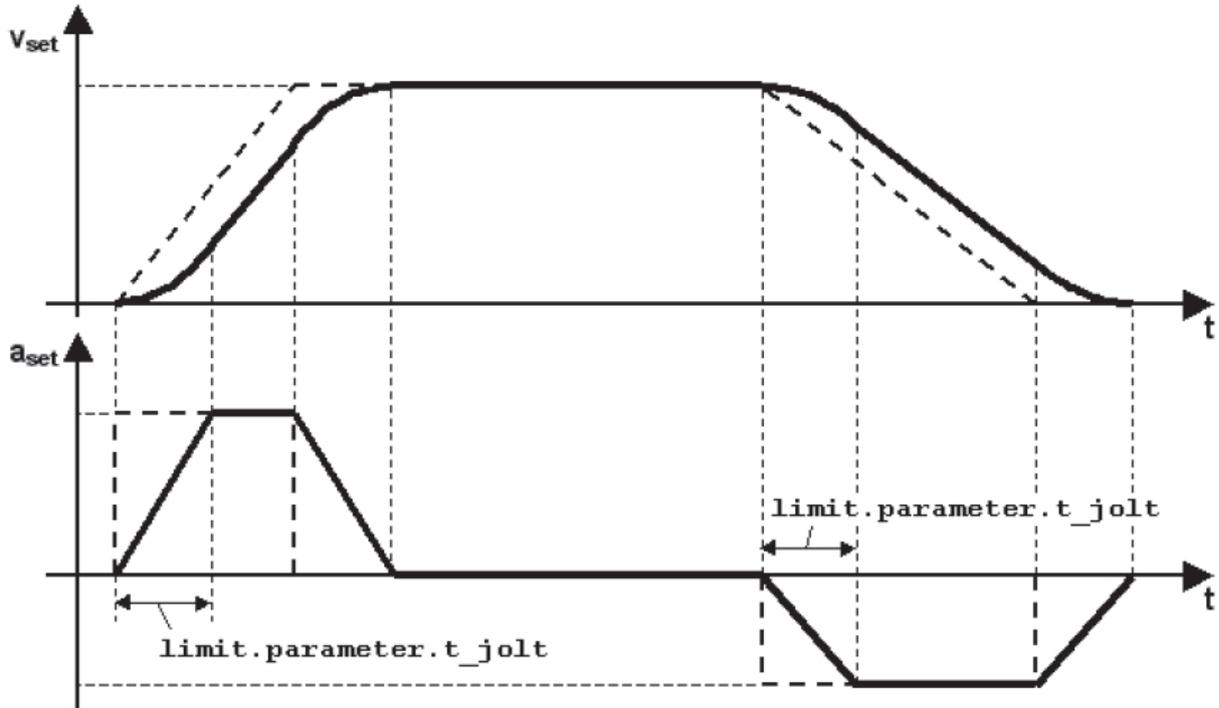


그림 13 저크 한계가 있는 (굵은선)과 저크 한계가 없는(점선) 구동 타임 타이머그램

 “t\_jolt” 파라미터는 최대 속도와 가속도는 같은 한계 값에 위치한다. “t\_jolt”에 대해 0.0 ~ 0.2 초 사이 값을 정의할 수 있다.

### 3.2 예측 위치 컨트롤러(Predictive position controller)

설정점 발생기는 위치 컨트롤러의 기준 변수를 생성한다. 서보 드라이브는 모터의 인코더 시스템과 대응되는 인코더 인터페이스 카드를 통해 제어 변수를 (현재 모터 위치) 받아들인다. 제어 편차는 이 두 변수로부터 결정되며, 이것은 더 하위-레벨 속도 컨트롤러의 새로운 조작 변수가 된다.

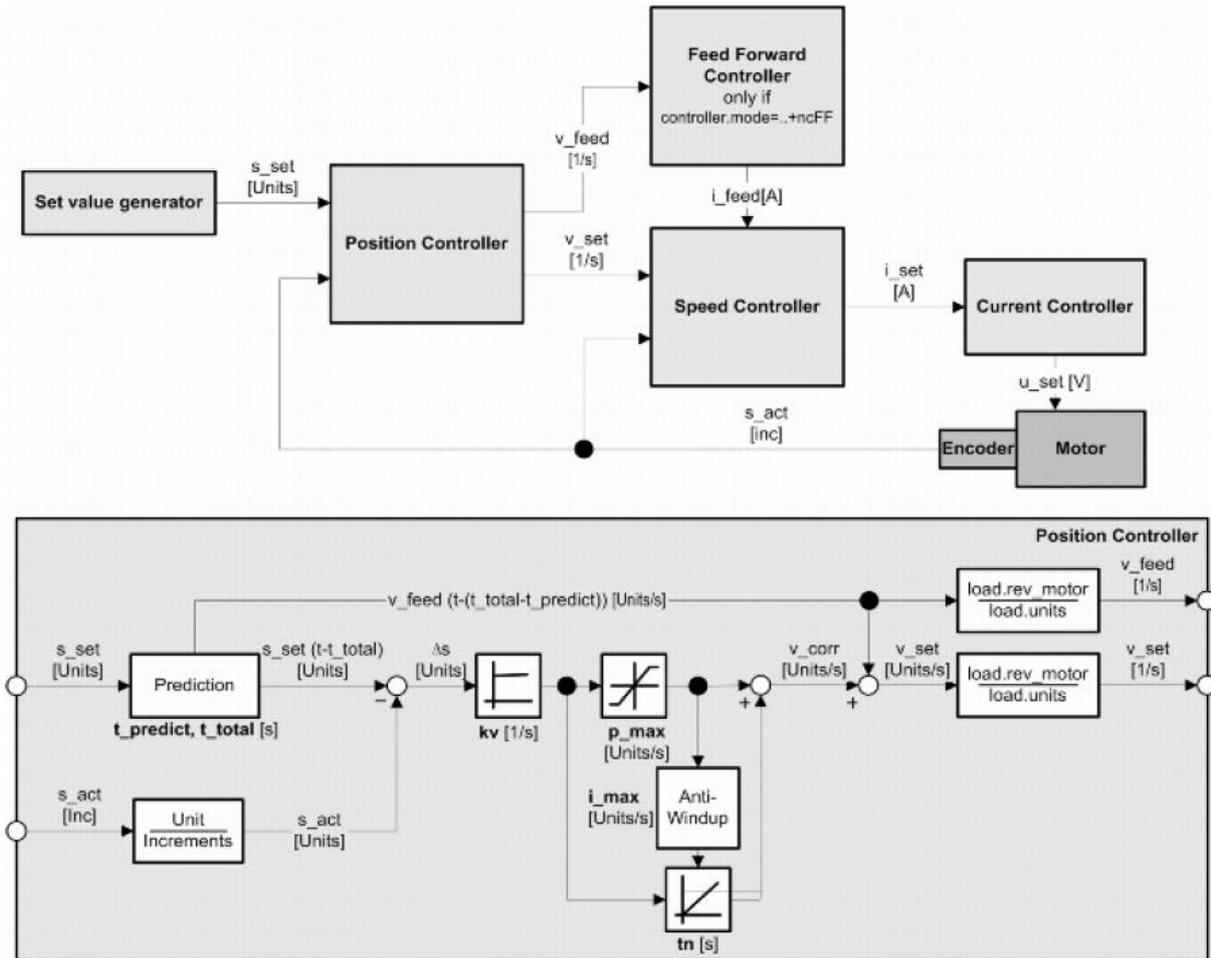


그림 14 블록 다이어그램 개요와 위치 컨트롤러의 상세한 블록 다이어그램

위치 컨트롤러는 안티-와인드업(anti-windup) (조작 변수 제한) 기능과 “예측(predictive)” 피드 포워드(feed forward) 기능을 갖춘 PI 컨트롤러로 구현된다.

“kv” 요인을 갖는 비례 요소는 지연 오류(lag error)가 발생한 경우에 속도 설정점을 즉시 변경시킨다. 설정점 또는 외란 변수의 변화는 이러한 유형의 제어 편차 원인이 될 수 있다.

적분 동작 시간 “tn”을 포함하는 I 컴포넌트는 정지 외란 양을 (예: 매달기 하중) 보상하는데 이용된다.

조작 변수 제한은 “p\_max”와 “i\_max” 파라미터를 이용하여 구현된다. 이 값은 P 컴포넌트와 I 컴포넌트의 최대 영향을 제한한다.

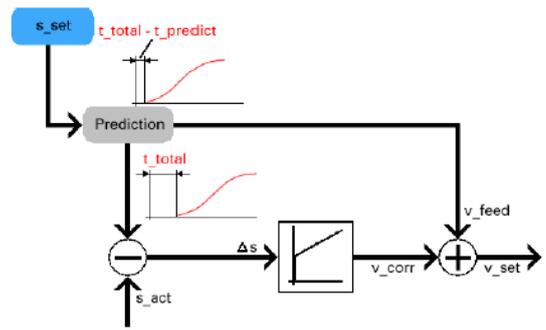


그림 15 예측, 피드 포워드

피드 포워드(feed forward)는 위치 컨트롤러의 예측적(predictive) 요소이다.

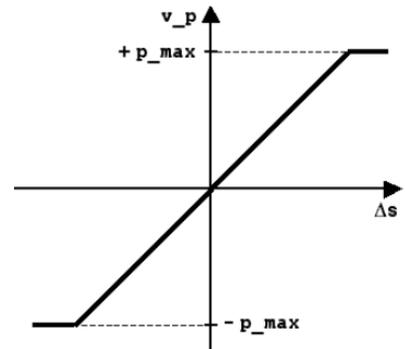
피드 포워드 속도(“v\_feed”)는 위치 설정점(s\_set) 차이에서 기인한다. PI 컨트롤러는 지연 오류(lag error, Δs)로부터 교정 속도(“v\_corr”)를 확립한다. 이 두 가지 속도는 합산되어 이후에 속도 컨트롤러를 위한 속도 설정점(v\_set)을 생성한다. 이때 위치 설정점과 지연(t\_total)을 함께 PI 컨트롤러에 전송하면 피드 포워드는 예측이다. 설정점은 제어 시스템의 지연 시간만큼 지연되어야 한다. 그러한 이유로 속도 설정점(t\_total - t\_predict)이 속도 컨트롤러에 먼저 도입된다. PI 컨트롤러에 대응되는 위치 설정점이 받아들여진다면, 이미 제공된 속도 설정점의 결과로 제어 편차가 작아진다. 나머지 편차를 보정해야 하기 때문에 PI 컨트롤러에 부하가 발생한다. 피드 포워드가 없다면 PI 컨트롤러는 자체만으로 속도 설정점을 처리해야 할 것이다. 이것은 설정점 추적 거동과 드라이브의 다이내믹스(dynamics)을 개선한다.

지연 오류(lag error) “Δs”로부터 기인하는 “v\_corr” 계산:

먼저, 비례 계인으로부터 기인하는 속도 “v\_p”를 계산하고, “p\_max” 제한을 적용한다:

```

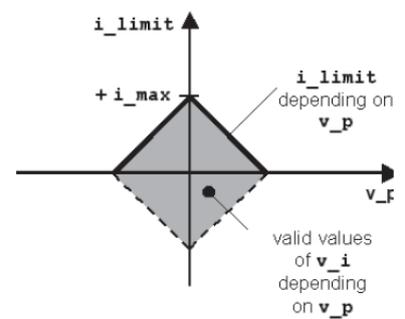
v_p = kv * Δs
if ( v_p > p_max )
    v_p = p_max
else if ( v_p < -p_max )
    v_p = -p_max
    
```



이 값과 “i\_max”는 “i\_limit”를 계산하는데 이용되고 적분 계인 “v\_i”로부터 발생하는 속도는 이 값으로 제한된다:

```

i_limit = i_max - |v_p|
if ( i_limit < 0 )
    i_limit = 0
v_i = f(v_i, Δs, kv, tn)
if ( v_i > i_limit )
    v_i = i_limit
else if ( v_i < -i_limit )
    v_i = -i_limit
    
```



최종적으로 “ $v_{corr} = v_p + v_i$ ”를 계산할 수 있다.

속도 설정점이 속도 컨트롤러에 전달되기 전에, 속도 설정점은 파라미터 변환 가능 단위 시스템(unit/s)에서 물리적 모터 인코더 시스템(rev/s)으로 변환된다.

위치 컨트롤러에서 지연 오류(lag error) 감시도 수행된다. 제어 편차가 파라미터 변환 가능 경계 값을 초과하는 경우에는 비상 정지가 실행된다.



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive control W Position controller

- Function W Setpoint sources
- Function W Controller
- Expansions for the PI controller

### 피드 포워드 제어(Feed-forward control)

설정점 추적 거동을 개선하기 위해, 위치 설정점 이외에도, 속도와 토크 설정점 또는 전류 설정점이 제공된다. 피드 포워드 제어는 외란 변수 거동에는 전혀 영향을 미치지 않는다. 또한 축 그룹을 갖는, 상이한 위치 설정점의 실행 시간은 POS\_CTRL\_T\_TOTAL 총 지연 시간과 함께 상호간에 조정될 수 있다.

### 추가 정보

- [“지연 시간 보상”](#)



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive control W Position controller W Feedforward control

- Predictive speed control
- Delayed speed control
- Speed and feed-forward torque control

Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive control W Position controller W Configuration guidelines for torque feed forward input control

### 3.3 속도 컨트롤러

속도 컨트롤러의 임무는 상위-레벨의 위치 컨트롤러의 조작 변수와 측정된 속도 차이를 결정하는 것이다. 이때 하위-레벨의 전류 컨트롤러의 조작 변수는 안티-와인드업(anti-windup)을 갖는 PI 컨트롤러를 사용하여 생성된다.

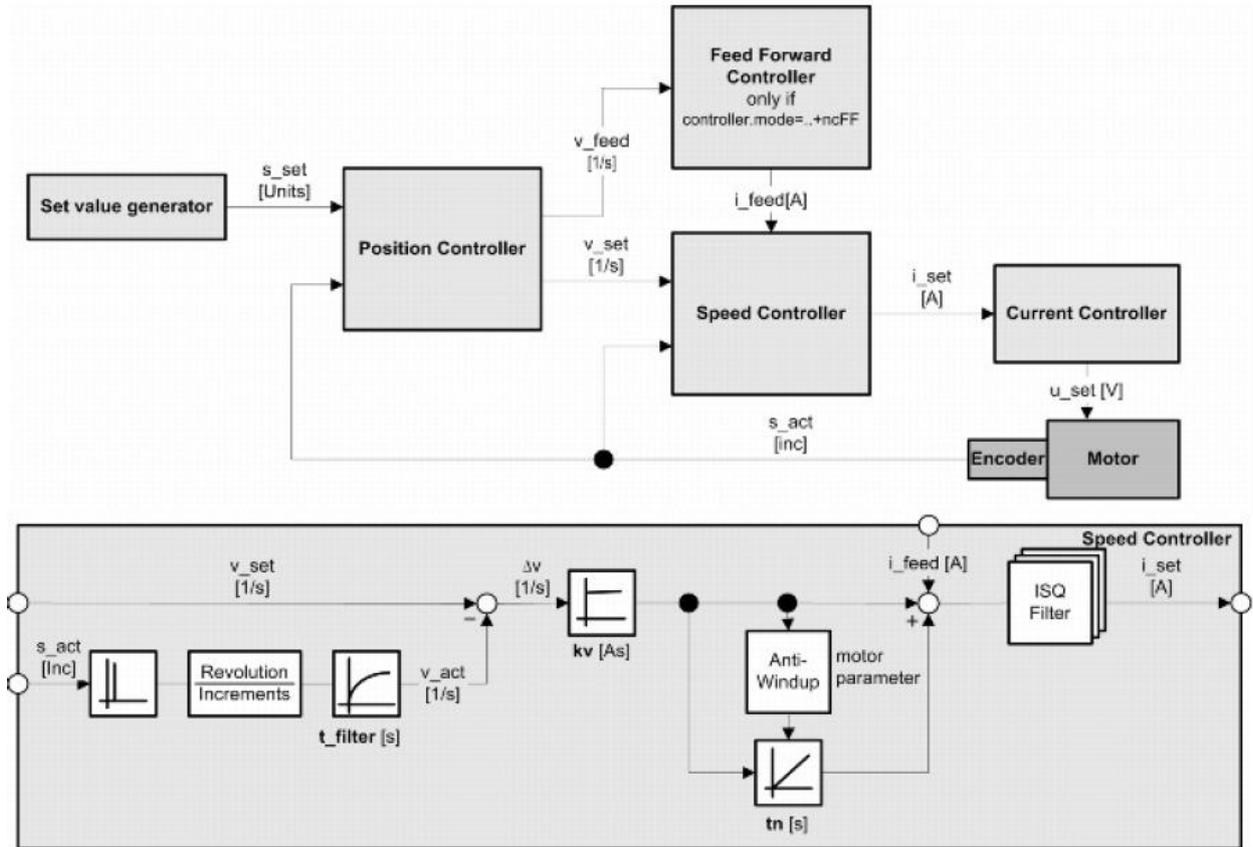


그림 16 블록 다이어그램 개요와 속도 컨트롤러의 상세한 블록 다이어그램

위치 컨트롤러로 속도 설정점은 먼저 인터플레이터(interpolator)를 통해 제공된다. 이것이 필요한 것은 위치 컨트롤러는 400 μs 주기로 실행되는 반면에, 속도 컨트롤러<sup>2</sup>는 200 μs 으로 실행되기 때문이다. 이 값은 최대 모터 속도를 사용하여 제한된다.

실제 속도는 인코더 위치를 미분하여 결정된다. 이 값은 속도 필터를 통해 전송된다. 이 값은 속도 설정 값에서 차감되기 전에 “incr./s”에서 “rev/s” 단위로 변환된다.

속도 필터 기능을 보다 상세히 설명한다.

“kv” 요인을 갖는 P 컴포넌트는 컨트롤러로 하여금 모든 제어 편차에 즉각 반응하도록 한다. 이것은 속도 컨트롤러의 다이내믹스(dynamics)를 위해 중요하다.

적분 동작 시간 “tn”을 갖는 I 컴포넌트는 정지 외란 변수를 (예: 하중 토크) 보상하는 데 이용된다.

<sup>2</sup> 샘플링 시간은 구성된 컴포넌트에 따라 좌우된다. 정확한 데이터는 각 컴포넌트의 데이터 시트에서 찾아볼 수 있다.

PI 컨트롤러의 출력은 상이한 전류 설정점 필터를 이용하여 필터링할 수 있다. 필터의 기능에 대해 설명한다.

전류 설정점이 전류 컨트롤러의 기준 변수로 제공되기 전에, 그 값은 토크 리미터를 이용하여 제한된다. 이 토크 제한은 속도 컨트롤러 1 컴포넌트의 안티-와인드업(anti-windup) 한계도 결정한다.

### 3.3.1 토크 제한(Torque limiting)

토크 제한기는 대부분의 경우에 다음과 같은 위험으로부터 모터와 ACOPOS 서보 드라이브를 보호하는데 이용된다:

- ACOPOS 서보 드라이브는 모터가 다룰 수 있는 것보다 (모터 피크 전류, motor peak current) 더 많은 전류를 출력할 수 없다.
- 모터 고정자 전류가 ACOPOS 피크 전류(ACOPOS peak current)를 초과할 수 없다.

디폴트로, 토크 제한기는 다음 두 개 값 중 작은 쪽을 이용하여 사전에 초기화된다.

- motor peak current (MOTOR\_CURR\_MAX)
- ACOPOS peak current (ACOPOS\_CURR\_MAX)



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive control W Torque limiter  
 Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Motor W Synchronous motor  
 Programming W Libraries W Motion libraries W ACP10\_MC W Function blocks W Torque  
 control W Torque limiting

### 3.3.2 전류 설정점 필터(Current setpoint filter)

전류 설정점 필터 ISQ\_FILTER 는 상이한 3 개 필터의 캐스케이드로 구성된다. 필터 캐스케이드는 속도 컨트롤러 입력단에 위치하고 직교(quadrature) 전류 설정점 isq 를 필터링한다. 예를 들어, 필터는 원하는 신호로부터 매우 빈번한 외란을 (예: 신호 간섭) 분리시키거나 공진 주파수를 억제하는 (대역 저지 필터, band-stop filter)역할을 수행한다.

인코더 신호내 외란은 다음 중 하나 또는 그 이상에 의해 야기될 수 있다:

- 통신 경로 상의 외란 커플링(인코더 케이블).
- 아날로그 신호를 디지털 형식으로 변환할 때 양자화 간섭. 대부분 낮은 해상도를 갖는 리졸버 신호(resolver)를 평가할 때 발생한다.

예를 들어 체결 장치를 사용하는 모터 축에 직접 부하 커플링처럼 뒤틀림 방지(warp-resistant) 드라이브 기구를 갖춘 기계 시스템에는 페루프 제어로 인한 진동이 발생할 수 있다("2 질량 진동: two-mass oscillation"). 이러한 유형의 시스템은 일반적으로 700 ~ 1500 Hz 범위의 공진 주파수를 갖는다. 다음 요인에 의존한다:

- 기계 시스템의 강성(rigidity)
- 기계 시스템의 질량 관성
- 시스템의 물리적 배치

### 속도 필터(Speed filter)

실제 속도는 속도 컨트롤러에서 처리되기 앞서 필터링된다. 이 필터는 “속도 필터(speed filter)”라고 알려져 있으며 저주파 통과 필터(low pass filter)와 같은 기능을 한다. 저주파 통과 필터를 이용하여 고주파 외란은 속도 신호로부터 필터링된다. 이로 인해 높은 컨트롤러 품질을 달성한다.



저주파 통과 필터의 제한 주파수가 너무 낮게 설정되면, 바람직한 신호 부분도 필터링 될 것이다.

### 대역 저지 필터(band-stop filter)

노치 필터(notch filter)를 이용하여, 전류 컨트롤러를 위해 전류 설정점의 주파수 범위를 필터링할 수 있다.



대역 저지 필터는 고정 커플링을 갖는 기구에서만 사용되어야 한다(예: 직접 구동). 이 필터는 벨트나 기어같은 연결부에 사용되서는 안 된다!

더욱이, 기존 관성 모멘트가 언제나 일정한 경우에만 사용될 수 있다!

시스템의 공진 주파수는 기계적 마모로 천이될 수 있다. 이것은 시간이 흐름에 따라 정의된 필터가 효과를 상실할 수 있음을 의미한다.

노치 필터는 공진 주파수가 700 ~ 1500Hz 범위에 있는 경우에만 효과적이다.

입력된 “노치 주파수(notch frequency)” (= 기계 시스템의 공진 주파수)에서 최대 댐핑 양이다. 노치 주파수 주변으로 댐핑이 3 dB 보다 더 낮은 범위가 (대역폭, bandwidth) 존재한다. 대역폭이 더 작게 설정될수록, 노치 주파수에서 댐핑은 더 강력하다.

일단 사용에 필요한 모든 요건이 충족된 경우에, 대역 저지 필터는 전체 시스템의 불안정성을 야기시키지 않고 컨트롤러 게인 요인을 높이는데 이용될 수 있다.

전류 설정점 필터로 사용가능한 9 개 필터는 모두 매뉴얼에 기술되어 있다.



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive control W Current set-point filter

## 3.4 전류 컨트롤러

전류 컨트롤러는 위치 및 속도 컨트롤러와 마찬가지로 PI 컨트롤러로 구성된다. 대응되는 파라미터는 모터 파라미터와 특정한 ACOPOS 파라미터를 사용하여 자동으로 결정된다.

전류 컨트롤러는 절연 게이트 양극성 트랜지스터(Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT)를 제어하기 위해 조작 변수를 이용한다. 이때 IGBT 는 펄스폭 변조(pulse width modulated: PWM) 전류 신호를 모터에 출력한다. 전류 컨트롤러는 PWM 스위칭 주파수(PWM switching frequency)<sup>3</sup>에 따라 상이한 주기 시간으로 작동한다.

<sup>3</sup> 예를 들어서, 20 kHz 의 스위칭 주파수일때 전류 컨트롤러 주기 시간 50 μs 이다. 가능한 스위칭 주파수는 언제나 서보 드라이브 또는 인버터 모듈의 데이터 시트에서 찾아볼 수 있다.

## 4 제어 파라미터의 이론적 결정

앞 장에서 ACOPOS 서보 드라이브 컨트롤러가 어떻게 구성되고 관련있는지 학습하였다. 이번에는 제어 파라미터에 대응되는 값을 찾아보자. 요건 중 일부가 충족되지 않는 경우에, 이 값을 경험적으로 계산하거나 결정할 수 있다.

시스템의 총 관성 모멘트를 알고 부하가 모터에 고정되어 있다면, 제어 파라미터를 위한 좋은 시작 값을 결정하기 위해서 다음 공식을 이용할 수 있다. 대부분의 경우, 수동으로 파라미터 값을 미세 조정함으로써 보다 우수한 컨트롤러 구동을 달성할 것이다.



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions

- Drive identification W Control parameters (autotuning) Procedure to auto-tune the speed and position controller W Approximate parametrization
- Drive control W Cycle time of the controller cascade

### 4.1 속도 컨트롤러(Speed controller)

전류 컨트롤 루프의 대체 시간 상수  $T_I$ :

$$T_I = 2 \times \left( 0.000075 + \frac{1}{2 \times \text{switching\_frequency}} \right)$$

개별 시간 상수와 대체 시간 상수의 합  $T_{\sigma_v}$ :

$$T_{\sigma_v} = T_I + T_{tot_v} + T_{filter}$$

$T_{tot_v} = 0.000175s$  (인코더 인터페이스 데드 타임(dead time), 속도 결정 및 샘플링)

$T_{filter}$  ("t\_filter" 파라미터) = 속도 필터의 필터 시정수

속도 컨트롤러의 비례 게인:

$$kv = \frac{J \times \sqrt{2} \times \pi}{T_{\sigma_v} \times k_t}$$

$J$  = 총 관성 모멘트 ( $J_{motor} + J_{brake} + J_{load}$ )

$k_t$  = 사용되는 모터의 토크 상수 [Nm/A]

속도 컨트롤러의 적분 동작 시간:

$$tn = 4 \times T_{\sigma_v}$$

## 4.2 위치 컨트롤러(Position controller)

개별 시간 상수와 대체 시간 상수의 합  $T_{\sigma_p}$ :

$$T_{\sigma_p} = T_{interpol} + 4 \times T_{\sigma_v} + T_{tot_p}$$

$T_{interpol}$  = 인터플레이터로 발생하는 데드 타임 (0.0001s)

$4 \times T_{\sigma_v}$  = 속도 제어 루프의 대체 시간 상수

$T_{tot_p}$  = 샘플링으로 발생하는 데드 타임 (0.0002s)

위치 컨트롤러의 비례 게인:

$$kv = \frac{1}{2 \times T_{\sigma_p}}$$

위치 컨트롤러의 적분 동작 시간:

$$tn = 4 \times T_{\sigma_p}$$



무부하 모터 “8LSA23.ee060ffgg-3”의 파라미터

$k_t = 0.73 \text{ Nm/A}$

$J = 0.07 \text{ kgcm}^2$

Switching frequency = 10kHz

속도 컨트롤러(Speed controller):

$$T_i = 2 \times \left( 0.000075 + \frac{1}{2 \times \text{switching\_frequency}} \right) = 2 \times \left( 0.000075 + \frac{1}{2 \times 10000} \right) = \mathbf{0.00025s}$$

$$T_{\sigma_v} = T_i + T_{tot_v} + T_{filter} = 0.00025 + 0.000175 + 0 = \mathbf{0.000425s}$$

$$kv = \frac{J \times \sqrt{2} \times \pi}{T_{\sigma_v} \times k_t} = \frac{0.000007 \times \sqrt{2} \times \pi}{0.000425 \times 0.73} = \mathbf{0.100 \text{ As/rev}}$$

$$tn = 4 \times T_{\sigma_v} = 4 \times 0.000425 = \mathbf{0.0017s}$$

위치 컨트롤러(Position controller):

$$T_{\sigma_p} = T_{interpol} + 4 \times T_{\sigma_v} + T_{tot_p} = 0.0001 + 4 \times 0.000425 + 0.0002 = \mathbf{0.002s}$$

$$kv = \frac{1}{2 \times T_{\sigma_p}} = \frac{1}{2 \times 0.002} = \mathbf{250 \frac{1}{s}}$$

$$tn = 4 \times T_{\sigma_p} = 4 \times 0.002 = \mathbf{0.008s}$$

## 5 컨트롤러 튜닝 절차

이 장에서는 현장에서 오랜 기간 동안 입증된 제어 파라미터를 결정하는 방법에 대해 학습한다. 이미 계산된 수치를 점검하고 미세 조정할 것이다. 이것이 가능하지 않다면 적절한 수치를 경험으로 결정할 수 있다. 이 경우에는 해당 노트에 지정된 값을 시작 값으로 사용할 수 있다.

컨트롤러 설정 계산을 용이하기 위해 오토튜닝(autotuning)을 이용할 수 있다( "[오토튜닝을 이용한 제어 설정 결정](#)" 참조).

?

Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive identification W Control parameters(autotuning)

- Approximate parameter settings

Motion W Commissioning W Autotuning

### 5.1 일반 정보

제어 파라미터는 실제로 기구가 조립되어 있는 상태에서만 결정할 수 있다. 축에 상이한 질량 하중이 걸려 있는 경우에는, 반드시 무부하 상태와 최대 부하 상태에서 파라미터를 실험한다. 파라미터는 여러 가지 속도와 가속도에서도 실험한다.

실험 중 타협이 필요할 수도 있다.

모든 기구의 특징이 다르기 때문에, 제어 파라미터에 보편적으로 타당한 값을 이용하는 것은 불가능하다. 캐스케이드 컨트롤러의 파라미터를 결정하려면, 가장 아래 (최종) 컨트롤러로부터 시작하여 위쪽으로 작업을 수행하는 것이 좋다. 우리의 경우에는 속도 컨트롤러 설정에서 시작하여 위치 컨트롤러로 진행되는 것을 의미한다. 전류 컨트롤러는 ACOPOS 서보 드라이브에서 자동으로 파라미터화된다.

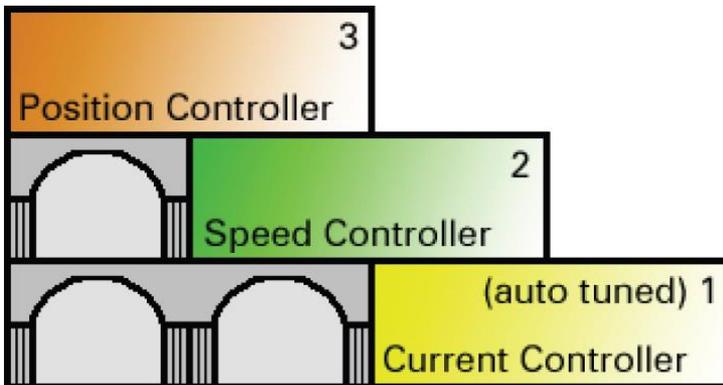


그림 17 제어기 설정 순서

일반적으로 컨트롤러를 가장 “하드(hard)”하게 설정하는 것을 목표로 한다. 외란 변수가 가능한 신속하고 완벽하게 보상될 때 컨트롤러는 “하드”한 것으로 간주된다.

우리는 모터 축에 장착된 플라이휠 질량을 수동으로 회전시키고자 한다.



- 플라이휠 질량이 용이하게 회전될 수 있다면, 컨트롤러는 “소프트(soft)”하게 설정된 것이다.
- 플라이휠 질량을 회전시키기 어렵거나 불가능하다면, 컨트롤러는 “하드(hard)”하게 설정된 것이다.

때로는 컨트롤러를 가장 하드(hard)하게 설정하는 것이 목표가 아닐 수 있다. 하드한 페루프 제어가 급속한 발열과 기구에 높은 하중, 그에 따르는 심한 마모의 원인이 되기 때문이다. 이러한 이유로 파라미터를 결정할 때 흔히 타협점을 발견해야 한다.

제어 파라미터를 설정에 도움을 받기 위해서 NC 시험 창(NC test window)을 이용한다. 이것은 제어 파라미터를 온라인 상태로 변경하고 초기화가 가능하다. 또한 기본 모션 파라미터를 이용하여 위치 결정 동작 시작도 할 수 있다. NC 시험 창에서 트레이스를 설정, 시작, 평가할 수 있다.

전형적인 동작 중에 컨트롤러 구동은 트레이스 추적을 위한 적합한 파라미터 선택에 따라 매우 정확하게 추정될 수 있다. 일반적으로 기본 동작(예: 상대적 또는 절대적 동작)이 시작되고 대응되는 파라미터가 기록된다.

제어 파라미터는 기록된 수치 진동이 최소한으로 유지되도록 선택한다.

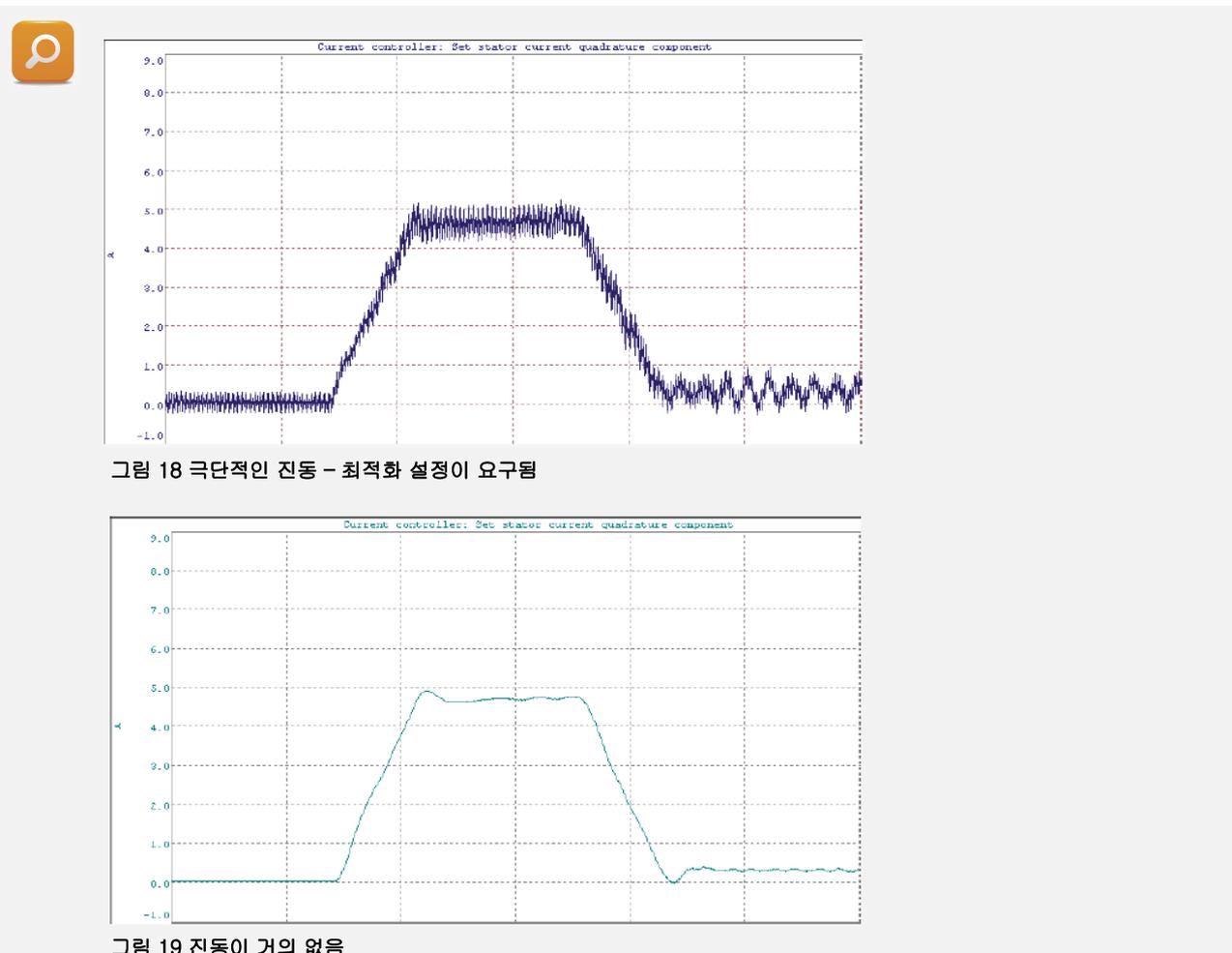


그림 18 극단적인 진동 - 최적화 설정이 요구됨

그림 19 진동이 거의 없음

사용자는 모든 파라미터가 설정되면 모든 요건이 충족되었음을 반드시 확인해야 한다(예: 지연 오류(lag error)가 허용 범위 이내).

기계적 마모로 인해 시스템이 상이한 거동을 보일 수 있기 때문에 요건이 충족되었다면 게인 요인의 여유가 있음을 확인한다. 대응되는 여유는 (약 1/3) 결정된 값으로부터 취해진다.

## 5.2 속도 컨트롤러

다음 파라미터는 속도 컨트롤러의 데이터 구조에서 제공한다. 다음 3 가지 매개 변수와 최대 3 개의 전류 설정점 필터는 속도 컨트롤러를 위해 설정할 수 있다. 이 파라미터는 제어 파라미터(control parameter)의 하위 그룹에 위치한다:

Element	Data Type	Description
...		
<b>speed</b>		<b>Speed Controller</b>
kv	REAL	Proportional amplification [A sec / Revolutions]
tn	REAL	Integral action time [sec]
t_filter	REAL	Filter time constant [sec] (from V1.12 on)
<b>isq_filter1</b>		<b>ISQ Filter1 (from V1.24 on)</b>
type	UINT	Type (default setting: ncOFF):
		ncOFF: Filter switched off
		ncLOW_PASS: Low pass
		ncNOTCH: Notch
		ncZ_TRANS: z transfer function
		ncISQF_LIM: Limitation (from V2.06 on)
		ncISQF_LIM2: Limitation 2 (from V2.06 on)
		ncISQF_LIM3: Limitation 3 (from V2.06 on)
		ncISQF_COMP: Compensation (from V2.06 on)
		ncISQF_TRQ_ADDLIM: Torque ADDLIM function (from V2.37 on)
		ncBIQUAD: Biquad (from V2.19 on)
a0	REAL	Coefficient a0
a1	REAL	Coefficient a1
b0	REAL	Coefficient b0
b1	REAL	Coefficient b1
b2	REAL	Coefficient b2
c0_par_id	UINT	Parameter ID for coefficient c0 (from V2.06 on)
c1_par_id	UINT	Parameter ID for coefficient c1 (from V2.06 on)
<b>isq_filter2</b>		<b>ISQ Filter2 (from V1.24 on)</b>
type	UINT	Type (default setting: ncOFF):

그림 20 제어 파라미터 - 속도 컨트롤러



속도 컨트롤러를 설정할 때, 기록하고자 다음 파라미터를 NC 트레이스(NC Trace)에 설정할 수 있다:

- Speed setpoint: SCTRL\_SPEED\_REF (ID 250) [1/s]
- Actual speed: SCTRL\_SPEED\_ACT (ID 251) [1/s]
- Current controller: Stator current setpoint of quadrature component ICTRL\_ISQ\_REF (ID213) [A]

스캔 주기(scan rate)는 가능한 느리게 설정한다 (약 0.2 ~ 4 ms).

가능한 정확하게 NC 트레이스가 시작하도록 트리거 이벤트를 이용할 수 있다(추가 정보는 Automation Studio 도움말에서 찾아볼 수 있다).

속도 컨트롤러만 활성화되도록 위치 컨트롤러의 “kv” 및 “tn” 파라미터는 “0”으로 초기화한다.



“Current controller: Stator current setpoint of quadrature component”의 값은 전류 설정점의 토크 발생 성분이다.

전류 피크 값은 NC 트레이스에 표시된다. 모터 파라미터 및 ACOPOS 서보 드라이브 파라미터 규격과 비교하기 위해서 이 값을 반드시  $\sqrt{2}$  ( $\approx 1.414$ )로 나눠야 한다.



Motion W Reference manual W ACOPOS parameter IDs W ACP10

- CTRL speed
- CTRL current

Motion W Reference manual W NC objects W "ncAXIS" NC object W Closed loop controller W Data structure

Motion W Diagnostics W NC Trace W Configuration

### 5.2.1 비례 게인(Proportional gain), “kv”

속도 컨트롤러의 가장 중요한 파라미터는 게인 요소 “kv”이다. 이 파라미터는 컨트롤러의 동적 특성을 현저히 결정한다. 목표는 시스템에 진동을 일으키지 않는 가장 큰 값을 설정하는 것이다.



요소의 시작 값으로 nominal motor current ( $I_n$ )를 1/5 ~ 1/10 을 이용할 수 있다.



예제:

속도 설정점과 실제 속도 사이의 차이:	1 rev/s
요소 “kv”의 값:	2 As/rev
P 성분의 출력 값:	2 A

### 5.2.2 적분 동작 시간(Integral action time), “tn”

대부분의 애플리케이션에서 속도 컨트롤러의 적분 동작 시간을 사용할 필요가 없다(“tn” = 0 s). 애플리케이션에서 I 성분이 꼭 필요한 경우에는 이 값을 너무 낮게 설정해서는 안 된다(예: 부하 축 외란, 빈약한 (소프트한) 부하 커플링, 높은 속도 정밀도). 그렇지 않으면 속도 컨트롤러에 진동이 증가한다.



I 성분을 사용하고자 한다면 적분 동작 시간의 시작 값로 100 ms (0.1 s)를 사용할 수 있다. 그 다음에는 값을 서서히 줄여간다.

### 5.2.3 속도 필터(Speed filter)

속도 필터의 필터 시간 상수 “t<sub>filter</sub>”는 속도 컨트롤러 파라미터 중 마지막 파라미터다. [s] 단위를 사용하여 한계 주파수를 설정하는데 이용된다(예: 1 kHz 는 0.001 s 에 해당됨).

속도 컨트롤러를 사용하는 컨트롤러 구동 향상은 높은 관성 질량 모멘트를 갖는 시스템과 낮은 해상도의 인코더 시스템에서만(예: 리졸버) 달성될 수 있다. 반면에 높은 해상도의 인코더 시스템이 사용되는 경우에, 속도 필터는 일반적으로 컨트롤러 구동의 어떠한 향상도 가져오지 못한다.



0.8 ms (0.0008 s)부터 시작할 수 있다. 컨트롤러 거동이 개선될 때까지 (진동 감소) 이 값을 서서히 증가시킨다. 일반적으로 이용 가능한 수치는 0.8 ~ 2 ms 사이다.

### 5.2.4 전류 설정점 필터(Current setpoint filter)

속도 컨트롤러에서 전류 설정점 필터(예: 대역 저지 필터)도 작동한다.



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive control W Current setpoint filter

#### 대역 저지 필터(band-stop filter)를 위한 파라미터 결정

다음 단계를 이용하여 시스템의 공진 주파수를 결정할 수 있다.

- 위치 컨트롤러 파라미터를 “0”으로 초기화하고, 속도 필터( $t_{\text{filter}} = 0$ )와 전류 설정점 필터를 비활성화한다.
- 컨트롤러 스위치를 켜다.
- 기구가 진동할 때까지 속도 컨트롤러의 비례 게인(proportional gain)을 증가시킨다.
- 트레이스를 이용하여 실제 속도를 기록한다 (스캔 주기 = 200  $\mu\text{s}$ ). 트레이스 추적이 완료되면 컨트롤러를 끈다.
- 트레이스에서 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transformation: FFT)을 이용하여 주파수 스펙트럼을 분석한다.
- 트레이스에서 발생하는 가장 주목할 만한 주파수를 대역 저지 필터의 노치 주파수로 설정한다.
- 최소 대역폭을 입력한다(예: 25 Hz).
- 컨트롤러를 다시 켜고 속도 컨트롤러의 임계 비례 게인을 결정한다.
- 임계 값이 증가하였다면, 구동이 대역폭과 노치 주파수의 변동으로 인한 것인지 여부를 결정한다. 그렇지 않으면 특성 고유 진동수를 다시 결정한다.
- 더 이상의 개선이 불가능하다면 결정된 수치를 MpAxisBasic 컴포넌트의 mapp 설정이나 NC Init 모듈에 입력한다.



뚜렷한 공진 주파수를 결정할 수 없다면, 대역 저지 필터를 사용해서는 안된다.

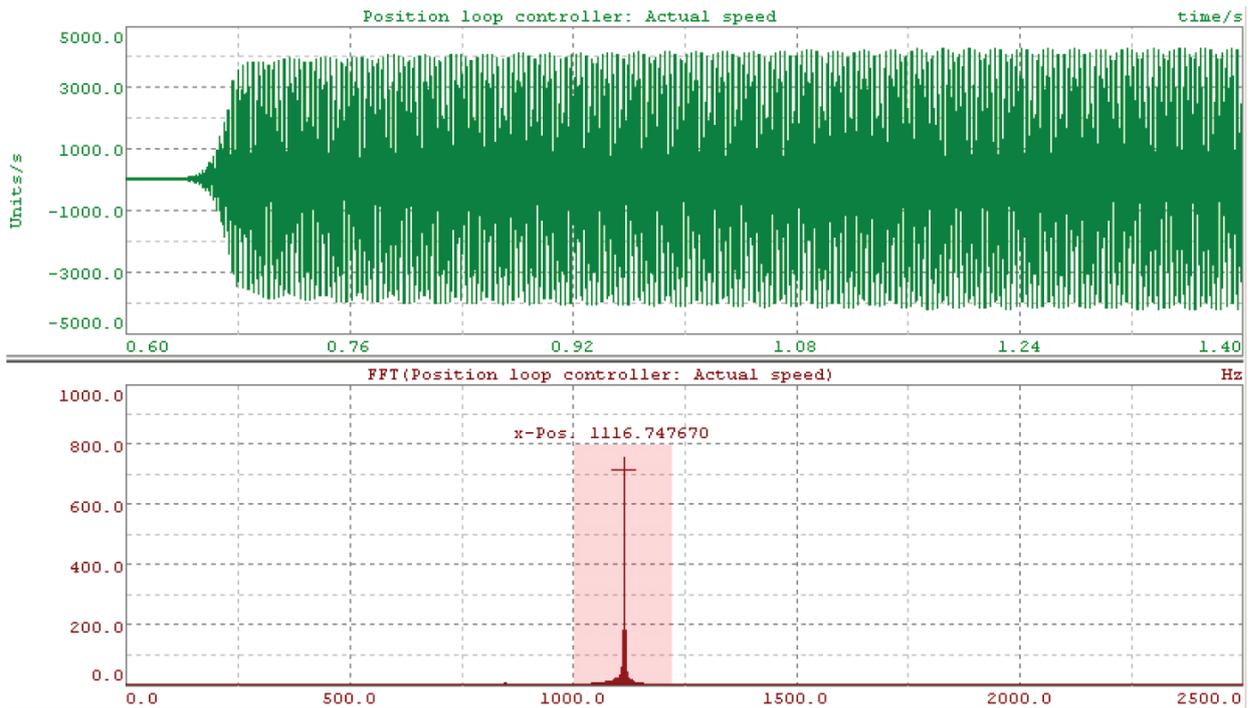


그림 21 NC Trace 에서 주파수 스펙트럼 분석 - FFT 를 이용한 공진 주파수 결정

 Motion W Diagnostics W NC Trace W Curve calculations W Special functions

### 서보 루프 옵티마이저(Servo Loop Optimizer)

서보 루프 옵티마이저(Servo Loop Optimizer: SLO)는 주파수 응답 지원을 받아서 서보 드라이브 컨트롤러를 설정하는 방법을 제공한다. SLO 는 오토튜닝을 기반으로 하지만 계산된 설정을 미세 조정하고 측정을 통해 효과를 시험할 수 있는 파인 튜닝(fine-tune)을 제공한다.

 Motion W Diagnostics W Servo Loop Optimizer W Controller settings

- Plant
- Speed controller
- Position controller

**예제: 수동으로 속도 컨트롤러의 컨트롤러 설정과 필터 설정 방식 결정**  
 사용할 기본 동작 파라미터는 사전에 NC Init module 에 정의되어 있다.

위치 결정 경로는 “s” = ± 50000units 이다.

추가 토크 설정점을 사용하여 정지 조작 변수를 예제 프로젝트에서 모의 실험한다.

NC Trace 를 위한 파라미터:

최대 트레이스 기간(Maximum trace duration):	2 초
샘플링 속도(sampling rate):	0.0008 초

플로우 차트를 이용하여 속도 컨트롤러를 단계 별로 설정한다(“제어 파라미터 설정 개요” 참조).

- 1) 이 경우에 위치 제어 파라미터 “kv”에 수치 “0”을 입력하면 어떤 일이 생기는가?
- 2) 전류 설정점 필터로 대역 저지 필터를 사용/설정하는 것이 가능한가?
- 3) 속도 필터를 사용/설정할 수 있는가?
- 4) 속도 컨트롤러의 적분 동작 시간 “tn”을 설정하겠는가?

### 5.3 위치 컨트롤러

위치 컨트롤러 설정 파라미터는 제어 파라미터 하위 그룹에 위치한다:

Element	Data Type	Description
...		
<b>position</b>		<b>Position controller</b>
kv	REAL	Proportional amplification [1/sec]
tn	REAL	Integral action time [sec]
t_predict	REAL	Prediction time [sec]
t_total	REAL	Total delay time [sec]
p_max	REAL	Max. proportional action [Units/sec]
i_max	REAL	Max. integral action [Units/sec]

그림 22 제어 파라미터 - 위치 컨트롤러



위치 컨트롤러를 설정할 때, 기록하고자 다음 파라미터를 NC 트레이스(NC Trace)에 설정할 수 있다:

- Actual speed of the position controller: PCTRL\_V\_ACT (ID 92) [units/s]
- Lag error of the position controller: PCTRL\_LAG\_ERROR (ID112) [units]
- Quadrature component of the current controller stator current setpoint: IC-TRL\_ISQ\_ACT (ID214) [A]

이 경우에 샘플링 속도를 가능한 느리게 설정해야 한다.



Motion W Reference manual W ACOPOS parameter IDs

- CTRL position controller
- CTRL current

Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive control W Position controller

#### 5.3.1 비례 게인(Proportional gain), “kv”

“kv” 요소 값은 위치 컨트롤러가 진동을 일으키지 않는 가장 큰 값으로 설정한다.



50/s 값에서 시작하고 점진적으로 증가시킨다.

	지연 오류(lag error):	15 units
	“kv” 요소 값	100/s
	P 컴포넌트의 출력 값:	1,500 Units/sec

### 5.3.2 적분 동작 시간(Integral action time) “ $t_n$ ”

속도 컨트롤러의 적분 동작 시간을 위해 유사한 조건이 적용된다. 일부 애플리케이션에는 P 컨트롤러 사용만으로 충분하다. 정지 외란 변수를 지닌 축을 보상해야 한다면 반드시 I 컴포넌트를 사용해야 한다(예: 매달기 하중). 속도 컨트롤러를 부드럽게 설정할 수 밖에 없는 경우에도 위치 컨트롤러의 I 컴포넌트 이용이 필요할 수도 있다.

적분 동작 시간이 속도 컨트롤러에 이미 설정되어 있다면 위치 컨트롤러에는 설정할 필요가 없다.



설정이 필요하다면 시작 값으로 100 ms 를 사용할 수 있다.

위치 컨트롤러의 I 컴포넌트는 목표 위치에 도달할 때 진동을 일으키기 때문에 특수한 경우에만 이용해야 한다.

### 5.3.3 지연 시간 보상

커플링 마스터로부터 커플링 슬레이브로 데이터를 전송할 때 지연이 개입된다. 총 지연 시간(“ $t_{total}$ ”)을 위한 위치 컨트롤러 파라미터를 사용하여 커플링 마스터 상을 보상할 수 있다. 지연 시간 보상과 이를 계산하는 방법에 세부 사항은 “**지연 시간 계산(Calculation of delay times)**” 표에서 찾아볼 수 있다. 이 표는 Automation Studio 도움말에서 다운받을 수 있다.

축을 네트워크 외부에서 시작하는 설정점에 연결하기 위해서는 브로드캐스트 채널(broadcast channel)을 설정할 필요가 있다.



Programming W Libraries W Motion libraries W ACP10\_MC W Function blocks W Important points W Axis coupling

- Compensation of delay times
- Coupling axes to different networks

컨트롤러 블록 다이어그램에서의 위치 컨트롤러 총 지연 시간 (“t<sub>total</sub>”)

그림 상단에 ACOPOS 블록 다이어그램이 표시되어 있다. 그림에서 설정점 발생기는 위치 컨트롤러에 위치 설정점을 제공한다. 하부에는 위치 컨트롤러가 상세히 표시되어 있다.

여기에서는, 여러 가지 가운데, “t<sub>total</sub>” 값이 위치 컨트롤러에 어떻게 제공되는지를 보여준다.

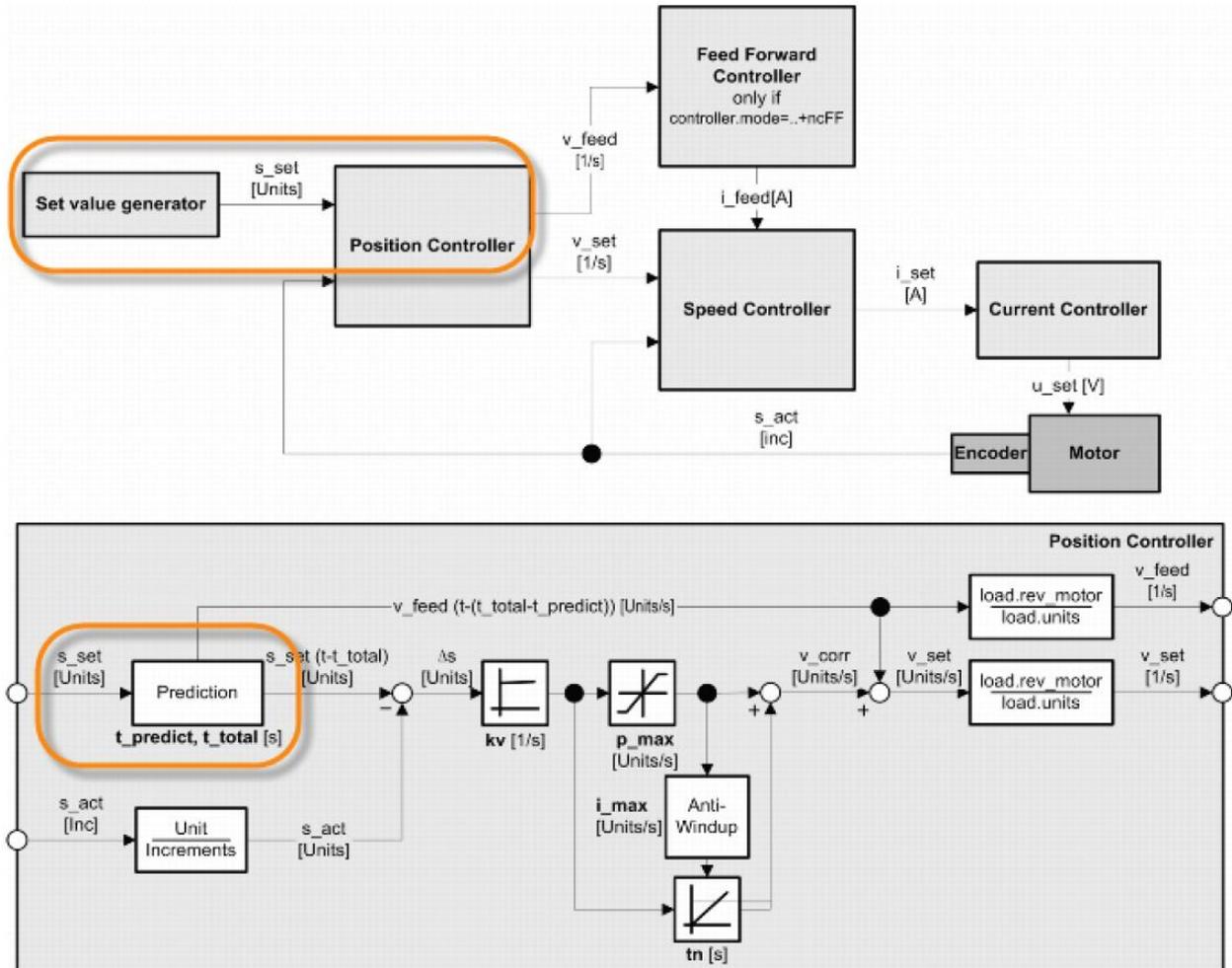


그림 23 “ncPOSITION” 블록 다이어그램 컨트롤러 모드

? Motion W Motion W Reference manual W ACP10 W NC objects W NC object "ncAXIS" W Controller W Controller mode "ncPOSITION"

Name	Value	Unit	Description
gMplink_AxisBasis_gAxis1			
Axis configuration	Enabled		Initial axis configuration defined by the Init. Parameter Table or by this file
Axis name	Axis		Unique name for the axis throughout the project
Axis			Axis configuration section
Drive			Drive configuration section
Gearbox			Scaling configuration
Transformation			Transformation configuration
Controller setup			Controller settings
Mode	Position		Controller mode
Position			Controller for position loop
Proportional gain	50.0	1/s	Proportional gain
Integral time	0.0	s	Integral time
Prediction time	0.0004	s	Prediction time
Total delay time	0.0004	s	Total delay time

그림 24 MpAxisBasic 을 위한 mapp 구성에서 “t<sub>total</sub>” 설정

“t<sub>total</sub>” 파라미터는 mapp 설정에서 위치 컨트롤러 파라미터와 함께 설정된다.

“t<sub>total</sub>” 감시

네트워크에 지연 시간 보상이 작동하도록 이를 적절히 설정할 필요가 있다. CTRL 위치 컨트롤러: 모든 커플링 축에 대한 보상 효과는 NC Trace 를 사용하여 “PCTRL\_V\_SET Parameter: Parameter ID 114: CTRL position controller : Velocity setpoint”를 그래프로 작성함으로써 결정할 수 있다. NC Trace 에서, 커플링 마스터 상의 설정점이 변경될 때에는 모든 축에 속도 설정점이 동시에 변경되어야 한다.

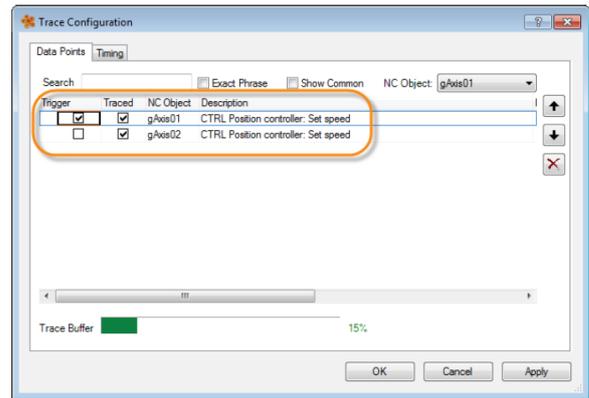


그림 25 모든 커플링 축에 대한 위치 컨트롤러의 속도 설정점을 그래프로 작성하기 위한 트레이스 설정

다음 그림은 두 커플링 축에 위치 컨트롤러 속도 설정점 값을 보여주는 NC 트레이스 기록이다. NC 트레이스 기록 간격은 400 μs 로 설정되어 있다. 측정 커서를 임의의 위치에 이동시키면 양쪽 곡선에서 동일한 설정점이 얻어진다. 편차가 인식되면 “t<sub>total</sub>” 파라미터 설정은 부적합한 것이다.

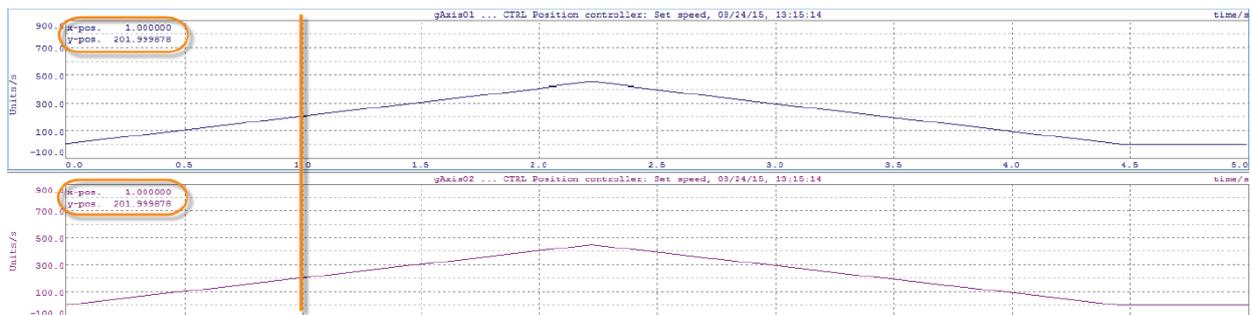


그림 26 모든 커플링 축의 PCTRL\_V\_SET: Parameter ID 114 기록



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W

- Driver controller W Position controller
- Controller identification W Controller parameters (autotuning)

추가 정보



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Network, position coupling and axis cross-link

- Network coupling
- Axis cross-link

Motion / Reference manual / ACP10SDC

- Feed forward and delay compensation
- Setpoint / position setpoint calculation – SDC internal

### 5.3.3.1 총 지연 시간(Total delay time), “t<sub>total</sub>”

단일 축 애플리케이션에서 이 파라미터는 예측 시간과 동일한 값으로 초기화한다.

다축 애플리케이션에서 네트워크를 통한 지연은 “t<sub>total</sub>”을 이용하여 보상될 수 있다.

잠재적 수치 범위는 파라미터 “t<sub>predict</sub>”와 같은 크기이다.

### 5.3.3.2 예측 시간 (Prediction time), “t<sub>predict</sub>”

이 파라미터는 피드 포워드에서 요구된다. “t<sub>predict</sub> = 0s” 값은 피드 포워드를 비활성화시킨다.

예측 시간은 가속과 감속 단계 중에 지연 오류(lag error)를 근사적으로 “0”으로 보상하는 것이 가능하다. 이 파라미터는 일반적으로 “kv” 및 “tn”에 올바른 값이 결정된 후에 설정된다.



“t<sub>predict</sub>” 파라미터의 잠재적 수치 범위는 0.0 ~ 0.06 초이다.

일반적으로 속도 컨트롤러를 하드(hard)하게 설정할 수 있으면 큰 예측 시간은 필요하지 않다.

정의 규칙:

$$t_{predict} = \frac{4 \times \pi \times J}{(kv_{speed\_controller} \times k_t)} + 0.0002$$

J = 모터의 관성 모멘트 [kgm<sup>2</sup>]

kv<sub>speed\_controller</sub> = 속도 컨트롤러의 비례 게인 [As/rev.]

k<sub>t</sub> = 사용된 모터의 토크 상수 [Nm/A]

다음 차트는 여러 가지 예측 시간 값의 지연 오류(lag error)를 보여준다.

대응되는 속도 프로파일:

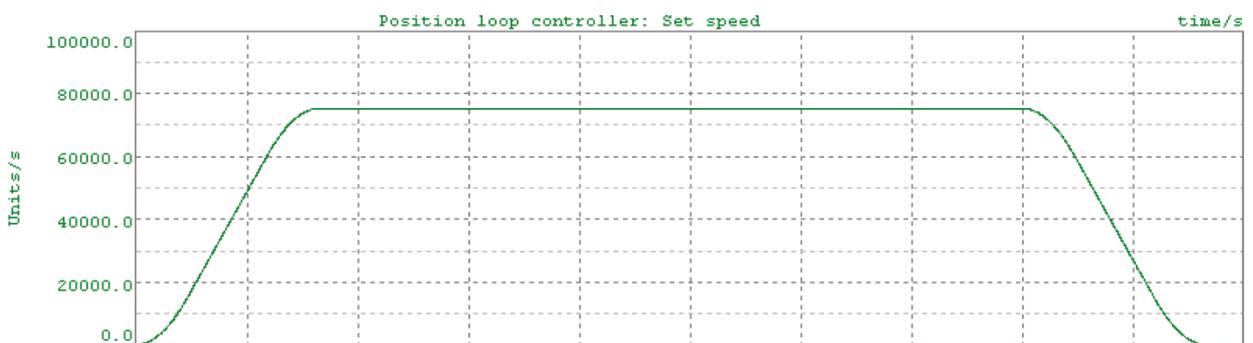


그림 27 지연 오류 곡선의 속도 곡선

“t\_predict” 너무 낮게 설정됨:

가속 단계: 양의 지연 오류 감속 단계: 음의 지연 오류	⇒ 설정 위치가 앞섬
--	-------------

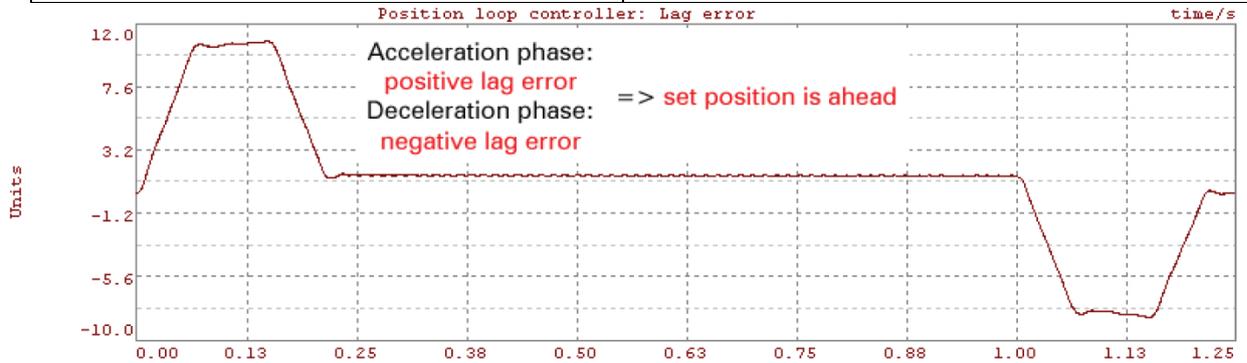


그림 28 “t\_predict” 예측 시간 너무 낮음

“t\_predict” 너무 높게 설정됨:

가속 단계: 음의 지연 오류 감속 단계: 양의 지연 오류	⇒ 실제 위치가 앞섬
--	-------------

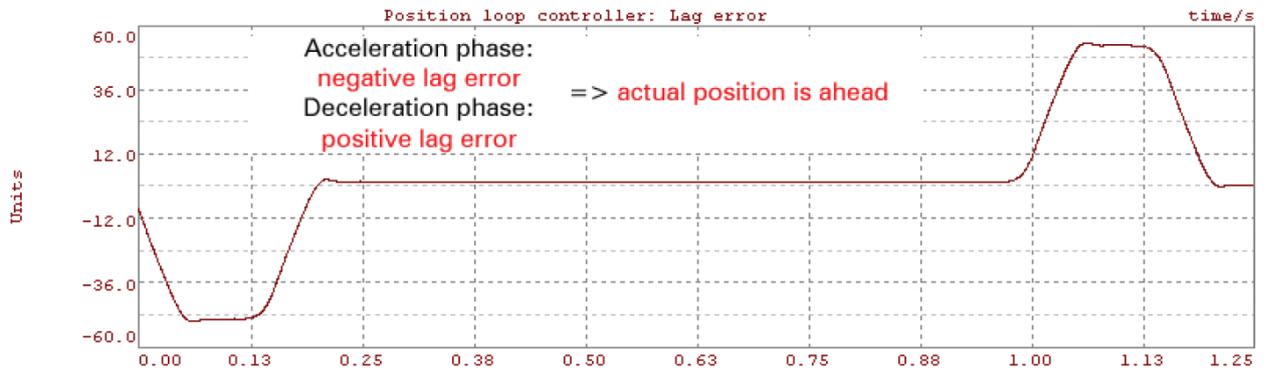


그림 29 “t\_predict” 예측 시간 너무 높음

“t\_predict” 적절히 설정됨:

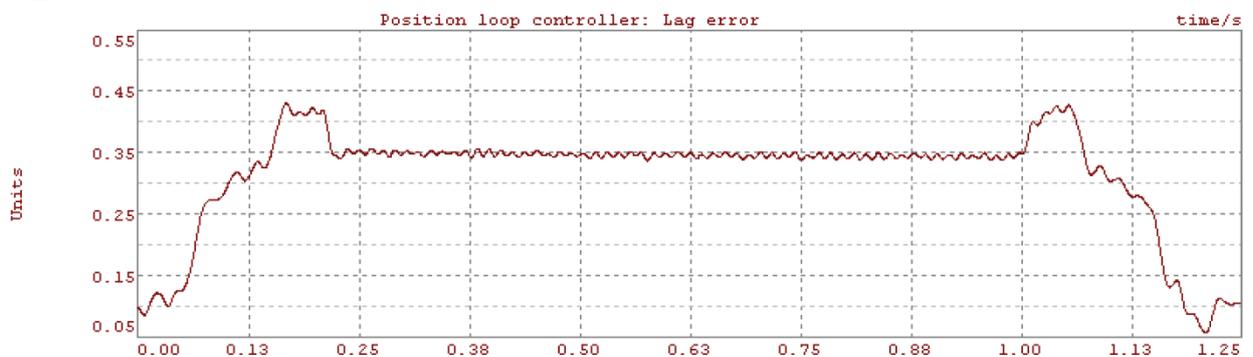


그림 30 “t\_predict” 예측 시간 적절함

### 5.3.4 최대 비례 동작(Maximum proportional action) “p\_max”

비례 게인의 영향은 “p\_max” 파라미터를 이용하여 제한할 수 있다. 지나치게 큰 조작 변수를 방지하기 위해 사용된다.

이 파라미터는 다음 공식으로 계산한다:

$$p\_max = \frac{I_{max} \times 2}{kv_{speed\_controller}} + unit\_factor$$

$I_{max}$  = 모터 피크 전류 [A]

$kv_{speed\_controller}$  = 속도 컨트롤러의 비례 게인 [As/rev.]

$unit\_factor$  = unit scaling [units/rev.]

### 5.3.5 최대 적분 동작 “i\_max”

적분 요소의 최대 영향은 “i\_max” 파라미터를 이용하여 제한될 수 있다. 이것은 “와인드업(windup)” 방지를 위해 수행될 수 있다.

이 파라미터 값은 필요한 홀딩 토크(holding torque)를 위해 아래 공식으로 계산한다:

$$i\_max = \frac{\frac{M}{k_t} \times 1.1}{kv_{speed\_controller}} + unit\_factor$$

$M$  = 필요한 홀딩 토크 [Nm]

$k_t$  = 사용되는 모터 토크 상수[Nm/A]

$kv_{speed\_controller}$  = 속도 컨트롤러의 비례 게인 [As/rev.]

$unit\_factor$  = unit scaling [units/rev.]

#### 예제: 위치 컨트롤러를 위하여 수동으로 컨트롤러 설정하기

이번 예제에서는 이전 예제에서 사용한 프로젝트와 하드웨어를 사용한다.

기본 동작 파라미터는 NC Init module 에 정의되었다.

위치 결정 경로(positioning path) “s” = ± 50000 units

가산 토크 설정점(additive torque setpoint)을 사용하는 예제 프로젝트에서 정지 조작 변수를 시뮬레이션한다.

트레이스 파라미터:

Max. trace duration	2 초
Sampling rate	0.0008 초

단계 별로 위치 컨트롤러를 설정하기 위해 플로우 차트를 이용한다([“제어 파라미터 설정 개요”](#) 참조). 이전 예제에서 얻은 속도 컨트롤러 값을 얻는다.

1) 위치 컨트롤러의 적분 동작 시간 “tn”을 이용하지 않으면 무슨 일이 발생하는가?



Motion W Reference manual W ACOPOS drive functions W Drive control W Position controller W Function W Closed loop controller

## 5.4 제한 값 파라미터

제어 파라미터가 최적화되어도, 제한 값 설정을 위해 두 파라미터를 설정한다

### 5.4.1 “t<sub>jolt</sub>” 저크 시간 필터(jerk time filter)

파라미터 값은 저크 필터 시간 없이 위치 결정 동작 중에 지연 오류(lag error)를 기록함으로써 결정할 수 있다. 동작 말미에, 시스템이 먼저 “정착(settle down)”해야한다는 것은 분명하다. 트레이스로부터 결정된 후, 설정 시간(진동이 사라질 때까지의 시간)을 저크 필터 시간, “t<sub>jolt</sub>”으로 이용할 수 있다.

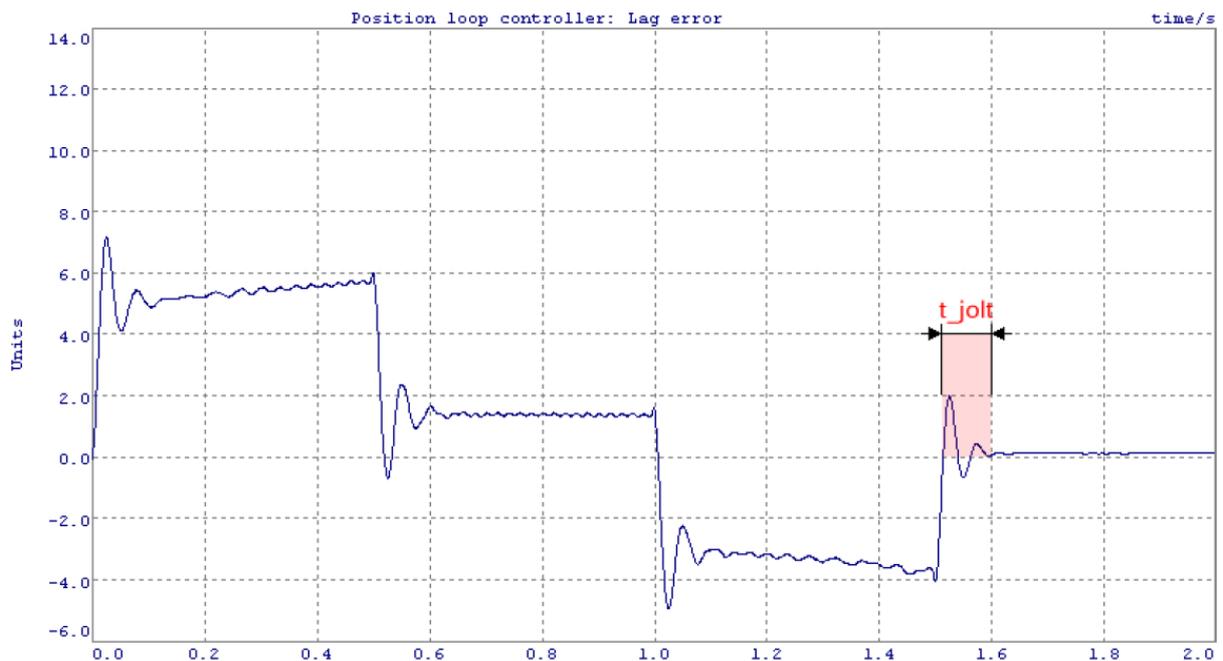


그림 31 위치 컨트롤러에서 지연 오류를 관찰함으로써 “t<sub>jolt</sub>” 저크 시간 계산하기

### 5.4.2 지연 오류 상쇄 제한(Lag error cancellation limit)

지연 오류(lag error) 감시를 위해 제한 값 “ds\_warning” 및 “ds\_stop”이 정의된다(위치 컨트롤러에서 실제 위치와 위치 설정점 사이의 차이).

Element	Data Type	Description
...		
<b>limit</b>		<b>Limit values</b>
...		
<b>parameter</b>		<b>Parameters</b>
...		
ds_warning	REAL	If the lag error exceeds "ds_warning", a warning will be indicated
ds_stop	REAL	If the lag error exceeds "ds_stop", an active movement will be stopped
...		

그림 32 제한 값 파라미터 - 지연 오류 상세 제한

현재 지연 오류 값이 “ds\_warning” 파라미터에 설정된 값을 초과할 때 경고(warning)이 출력된다. 현재 지연 오류 값이 “ds\_stop” 파라미터에 설정된 값을 초과하는 경우에는 비상 정지(emergency stop)이 실행된다.

 비상 정지가 일어나면 통제된 비상 정지 램프(ramp)가 생성된다. 속도 설정점은 현재 초기화 제한 값을 이용하여 “0”으로 감속된다. 그 다음에는 컨트롤러가 꺼진다.

“ds\_stop” 값은 아래 공식으로 계산한다:

$$\frac{I_{max}}{kv_{speed\_controller} \times kv_{position\_controller}} \times 2 \times unit\_factor$$

- $I_{max}$  = 모터 피크 전류 [A]
- $kv_{speed\_controller}$  = 속도 컨트롤러의 비례 게인 [As/rev.]
- $kv_{position\_controller}$  = 위치 컨트롤러의 비례 게인 [1/sec]
- $unit\_factor$  = unit scaling [units/rev.]

 Motion W Reference manual W NC objects W "ncAXIS" NC object W Limit values  
Motion W Reference manual W NC objects W "ncAXIS" NC object W Movements W Abort-ing a movement

### 예제: 제한 값 파라미터 결정

이번 예제에서는 이전 예제에서 사용한 프로젝트와 하드웨어를 사용한다.

기본 동작 파라미터는 NC Init module 에 정의되었다.

위치 결정 경로(positioning path) “s” = ± 50000 units

가산 토크 설정점(additive torque setpoint)을 사용하는 예제 프로젝트에서 정지 조작 변수를 시뮬레이션한다.

트레이스 파라미터:

Maximum trace duration	2 초
Sampling rate	0.0008 초

제한 값 파라미터를 올바르게 설정하고 결과를 확인한다.

5.5 제어 파라미터 설정 개요

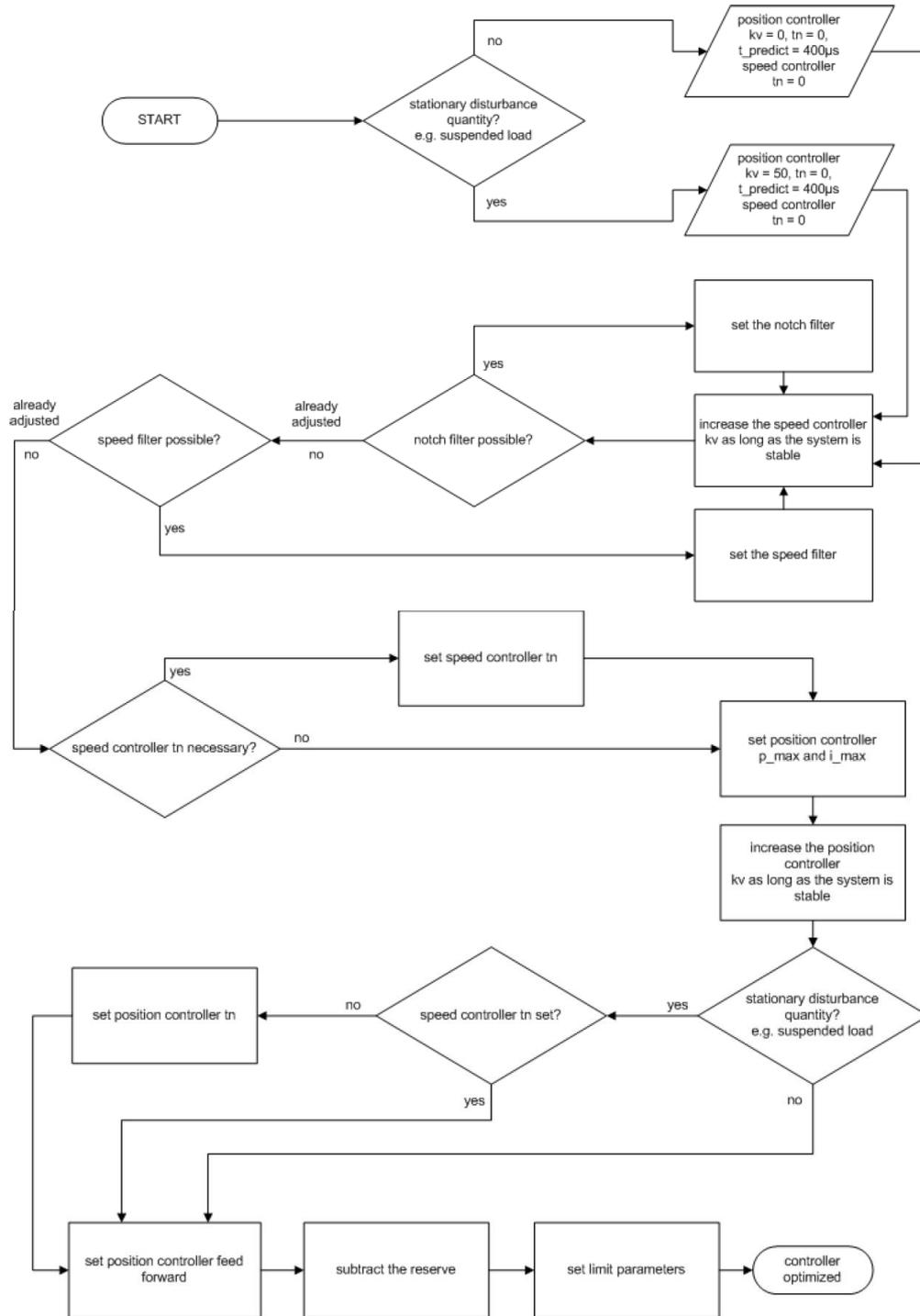


그림 33 제어 파라미터 설정을 위한 프로세스 개요

## 6 오토튜닝을 이용한 제어 설정 결정

B&R 드라이브 소프트웨어는 캐스케이드 제어 개념을 기반으로 한다. 위치 결정 명령을 수신 후 경로 프로필을 계산하는 설정점 발생기가 위치 컨트롤러에 위치 설정점을 제공한다. 위치 설정점을 달성하기 위해, 위치 컨트롤러는 속도 프로필을 규정한다. 속도 컨트롤러의 임무는 속도 설정점에 가능한 한 가까이 유지하는 것이다.

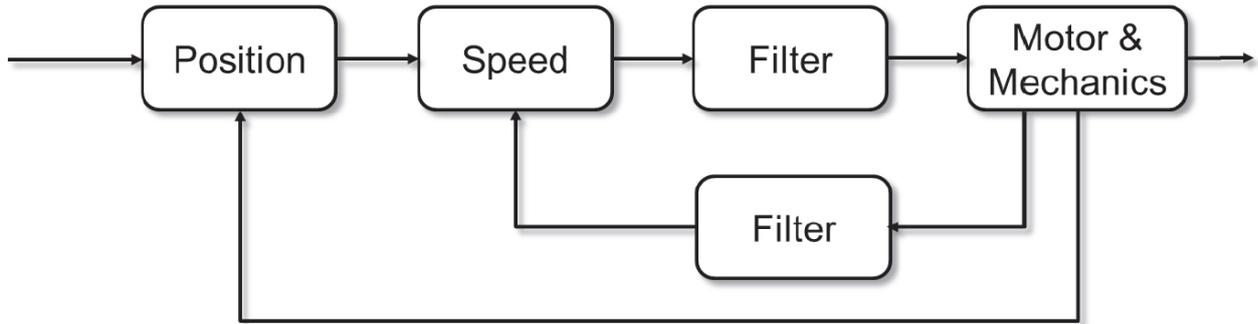


그림 34 간략화한 캐스케이드 제어 개념의 도해

통합 오토튜닝 절차는 자동으로 제어 파라미터를 계산한다. 페루프 제어를 위한 파라미터는 다음 순서에 따라 계산되는 것을 권장한다: 속도 컨트롤러, 그 다음 위치 컨트롤러. 제어 설정은 피드 파워드의 파라미터를 결정하기 전에 시험이 완료되어야 한다.

### 오토튜닝 준비

오토튜닝을 수행하기 전에 드라이브가 작동하고 있어야 한다. 정지 유지 제동기(holding brake) 기능을 반드시 확인해야 한다. 또한 인코더의 측정 회전 방향과 거리를 확인하는 것도 필요하다. 편차가 관찰되거나 인코더의 다른 오작동이 검출되면, 반드시 인코더를 기계적, 전기적으로 점검한다. 인코더를 phasing 을 수행한다<sup>4</sup>. 그 다음 튜닝 파라미터를 입력할 수 있다:

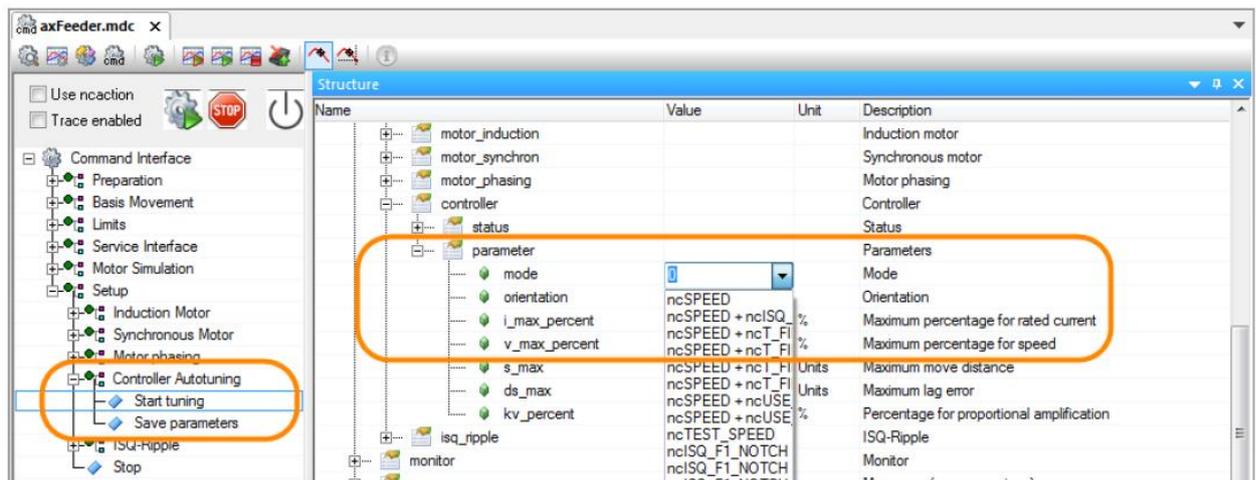


그림 35 Command interface 에서 오토튜닝 명령; NC TEST 창 / 파라미터 창에서 튜닝 파라미터

<sup>4</sup>일반적으로 B&R 모터에는 phasing 을 요구하지 않는다. 예를 들자면, Phasing 은 인코더가 나중에 설치되는 경우에 필요하다. 모터 시운전은 “TM460 - Initial Commissioning of Motors”에 상세히 기술되어 있다.



오토튜닝 절차의 각 단계 분석을 위한 적절한 NC 트레이스 설정(NC Trace configuration)은 Automation Studio 도움말 “Motion W Commissioning W Autotuning”에서 제공한다.

### Tune the cooling output

속도 컨트롤러의 임무는 (중속된) 위치 컨트롤러의 조작 변수와 측정된 속도 사이의 차이를 결정하는 것이다. 가속에 의한 속도의 편차로 작용하는 중속된 전류 컨트롤러의 조작 변수를 계산한다.

“ncSPEED” 오토튜닝 모드<sup>5</sup>를 선택하고 명령 인터페이스로부터 튜닝 절차를 다시 시작하면 속도 컨트롤러에 대한 파라미터가 결정된다.

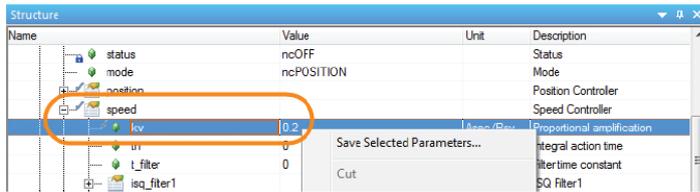


그림 36 파라미터 창에서 파라미터 보기와 저장하기

이 파라미터는 속도 컨트롤러 설정 파라미터 창에 표시된다. 단축 메뉴에서 <Save selected parameters>을 선택함으로써 저장할 수 있다.

### 위치 컨트롤러 튜닝(Tuning the position controller)

위치 컨트롤러의 목적은 설정점 발생기에 의해 제공되는 위치와 실제 위치를 비교하고 속도를 변경하여 위치 변경에 작동하는 중속 속도 컨트롤러의 조작 변수를 생성한다.

“ncPOSITION” 오토튜닝 모드를 선택하고 명령 인터페이스로부터 튜닝 절차를 다시 시작하면 위치 컨트롤러에 대한 파라미터가 결정된다.



여기에는 하위 속도 컨트롤러가 안정(stable)되어 있는 것이 요구된다.

이 파라미터는 위치 컨트롤러 설정 파라미터 창에 표시된다. 단축 메뉴에서 <Save selected parameters>을 선택함으로써 저장할 수 있다.

### 컨트롤러 설정 시험(Testing the controller settings)

새로운 컨트롤러 파라미터를 이용하여 동작하기 전에 제어 루프의 안정성을 확인해야 한다. 이러한 목적을 위해서, 제어 루프에 짧은 외란 신호를 가할 수 있는 옵션이 있다 (“ncTEST” 오토튜닝 모드). 컨트롤러 파라미터가 올바르게 설정되어 있다면 외란은 감쇠 될 것이다. 표시된 그림은 가이드라인일 뿐이다. 핵심적 요소는 전류 또는 속도가 감쇠를 보여야 한다.

<sup>5</sup>속도 컨트롤러를 튜닝시 시스템을 안정을 위해 다양한 필터를 이용할 수 있다. (예: “ncSPEED + ncISQ\_F1\_NOTCH”)

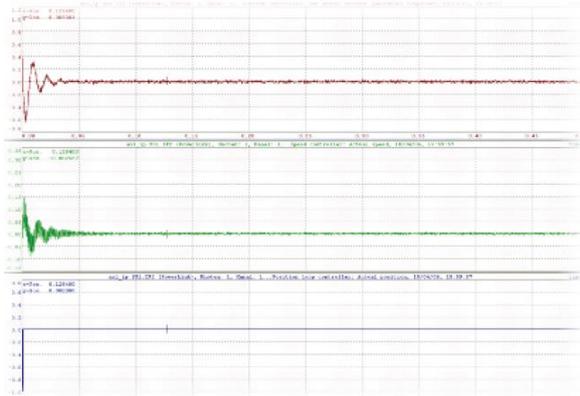


그림 37 예시: 만족스러운 컨트롤러 파라미터

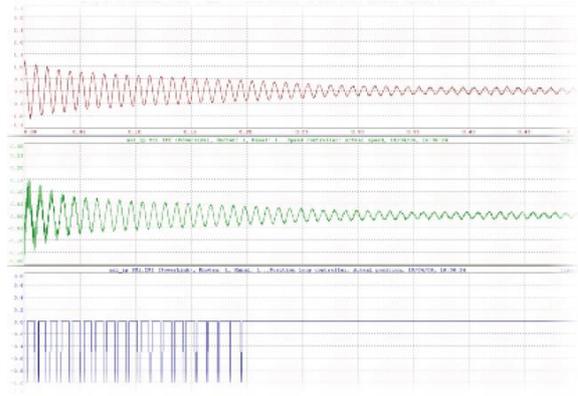


그림 38 실례: 만족스럽지 않는 컨트롤러 파라미터

컨트롤러 파라미터를 시험하기 위해 몇 가지 파라미터를 기록하는 것은 좋은 아이디어이다. 파라미터 구성 방법에 대한 더 많은 정보는 Automation Studio 도움말에서 제공한다.

Trced	Trigger	Description	ID
x		CTRL current: Stator current setpoint of the quadrature component	213
x		CTRL speed: Actual speed	251
X		CTRL position controller: Actual position	111
	x	Status: Controller	465

표 1 "ncTest" 튜닝 모드에서 기록된 파라미터 개요

Motion W Reference manual W ACP10 W

- NC objects W NC object "ncAXIS" W Setup (from 1.24 on) W Setup for controller (autotuning) W Mode "ncTEST" (controller test)
- Overview of ACOPOS parameter IDs

**피드 포워드 컴포넌트(Feed-forward components)**

피드 포워드 컴포넌트의 목적은 속도 변화시 컨트롤러에 부하를 감소시키기 위한 것이다. 피드 포워드 컴포넌트에 사용되는 값은 시스템의 관성 모멘트를 고려하여 오토튜닝 중 결정된다.

여기에는 하위의 속도와 위치 컨트롤러의 안정성이 요구된다. 이를 수행하기 위해 축이 작동되어야 하고 반드시 참조되어야 한다.

Motion W Commissioning

- Testing the holding brake
- Encoder phasing

Motion W Commissioning W Autotuning

- Preparing autotuning
- Speed controller
- Position controller
- Feed-forward components
- Testing controller settings

Motion W Reference manual W ACP10 W NC objects W NC object "ncAXIS" W Setup (from V1.24 on) W Setup for controller (autotuning)

- Function
- Data structure
- Mode "ncSPEED" (speed controller)
- Mode "ncPOSITION" (position controller)
- Mode "ncTEST" (controller test)
- Mode "ncFF" (feed forward)
- Example: Setup for controller in NC Test

#### 예제: 오토튜닝을 이용한 제어 파라미터 결정

축의 컨트롤러 파라미터를 결정하기 위해서 오토튜닝 절차를 이용한다. 이를 수행하기 위해 다음과 같이 진행한다.

- 1) NC Test Window 열기
- 2) 위치 유지 제동기(holding brake)와 인코더 신호 확인
- 3) 속도 컨트롤러의 오토튜닝 수행
- 4) 위치 컨트롤러의 오토튜닝 수행
- 5) 컨트롤러 파라미터 시험하기



## 8 요약

제어와 관련된 모든 파라미터에 대해 설명하였고 캐스케이드 제어를 이용한 영향을 보여주었다. 제어 파라미터의 이론적 결정과 캐스케이드 제어의 근사적 파라미터에 관한 지식은 통합된 오토튜닝 절차를 이용하거나 컨트롤러 수동 설정을 위한 단계별 절차 만큼 중요하다. 추가적인 전류 설정 값 필터가 구동 장치의 거동을 조정하기 위해 속도 제어기에 제공된다. NC Trace, 통합 오토튜닝 절차, 서보 루프 옵티마이저(sevo loopoptimizer)는 드라이브 솔루션의 파라미터를 위한 도구로 사용된다.

결정된 파라미터는 애플리케이션에 따라 상이한 수치를 보이며, 이러한 수치를 얻기 위한 절차는 언제나 동일하다.



그림 41 전면에 B&R 동기 모터와 ACO-POSmuti system

## Automation Academy 에서 제공하는 것

우리는 고객뿐만 아니라 직원을 대상으로 한 교육 과정을 제공합니다.

**Automation Academy 에서, 당신은 필요로 하는 능력을 즉시 향상시킬 수 있습니다.**

자동화 엔지니어링 분야에서 필요로 하는 지식증진을 위해 세미나가 준비되어 있습니다. 한번 이수하면, 당신은 B&R 기술을 이용하여 능률적인 자동화 솔루션을 개발하는 위치에 있을 것입니다.

이를 통해 귀하와 귀사는 끊임없이 변화하는 시장 수요에 보다 빠르게 대응할 수 있게 됨으로써 결정적인 경쟁 우위를 확보 할 수 있습니다.



### 세미나



품질 및 관련성은 세미나의 필수 구성 요소입니다. 특정 세미나의 페이스는 엄격하게 코스 참가자가 직면한 요구 사항과 경험에 근거합니다. 그룹 스터디와 자율 학습에 조합은 학습 경험을 극대화하는데 필요한 높은 수준의 유연성을 제공합니다. 각 세미나는 숙련된 경험이 풍부한 강사 중 한 명이 진행합니다.

### 교육 자료(Training module)

교육 자료는 세미나뿐만 아니라 자율 학습을 위한 기초를 제공합니다. 컴팩트 모듈은 일관된 교육 개념에 의존합니다. 상황식 구조는 복잡하고 상호 연관된 주제를 효율적이고 효과적으로 배울 수 있습니다. 광범위한 도움말 시스템이 가장 좋은 보완책입니다. 교육 자료는 다운받을 수 있으며 인쇄된 버전으로 주문할 수 있습니다.

카테고리 주제:

- 제어 기술(Control technology)
- 모션 제어(Motion control)
- 세이프티 기술(Safety technology)
- 화면작화(HMI)
- 프로세스 컨트롤(Process control)
- 진단 및 서비스(Diagnostics and service)
- 파워링크와 오픈세이프티 (POWERLINK and openSAFETY)

### ETA 시스템(ETA system)



ETA 시스템(ETA system)은 훈련, 교육 및 실험실에서 사용하기 위해 실제와 같은 구조를 제공합니다. 두가지 이상의 다른 기구 구조가 선택될 수 있습니다. ETA light system 은 높은 자유도, 공간 절약 및 연구소 작업에 적합합니다. ETA standard system 은 튼튼한 기구 구조와 사전에 와이어링된 센서와 액추에이터를 포함합니다.

### 더 알아보기!

추가적인 교육이 필요하시나요? B&R Automation Academy 가 제공하는 것에 흥미가 있으신가요? 맞게 찾아오셨습니다.

상세한 정보는 아래 링크에서 확인하실 수 있습니다:

[www.br-autoation.com/academy](http://www.br-autoation.com/academy)

