

Chapter 31. Basic Process Control Strategies

기본 공정제어 전략

용어 정의 → 적용 전·후 도면 → SP·PV·MV 분석

Tony R. Kuphaldt, *Lessons in Industrial Instrumentation*, version 2.32

문서 구성: Chapter 19 CSS HTML 최종본의 문구·표·적용 전/후 그림을 그대로 Overleaf로 이식했습니다. 원서에 적용 전 도면이 없는 경우에는 “학습용 재구성”임을 표기했습니다.

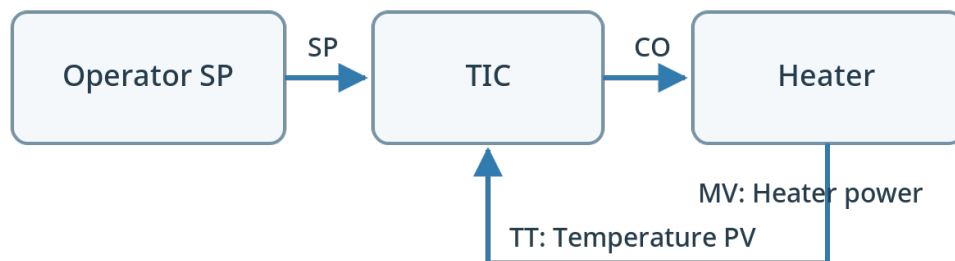
1. 용어 정리

용어	의미
SP (Setpoint)	제어 목표값
PV (Process Variable)	실제 공정 측정값
CV (Controlled Variable)	제어 대상 변수
MV (Manipulated Variable)	공정에 작용하는 조작변수
CO (Controller Output)	제어기의 출력 명령. MV와 구분
DV (Disturbance Variable)	제어에 영향을 주는 외란
RSP (Remote Setpoint)	다른 제어기·연산 블록이 전달하는 설정값
FCE (Final Control Element)	밸브·구동기 등 최종 제어요소

도면 정정: 원서에서 같은 공정의 적용 전·후를 보여주는 경우 두 원본 그림을 사용했다. 원서에 적용 전 그림이 없는 경우에는 해당 사실을 밝히고 별도의 학습용 구조도로 재구성했다. 각 페이지는 책 본문 인쇄 페이지를 기준으로 표시했다.

2. 31.1 Supervisory control — 감시 제어

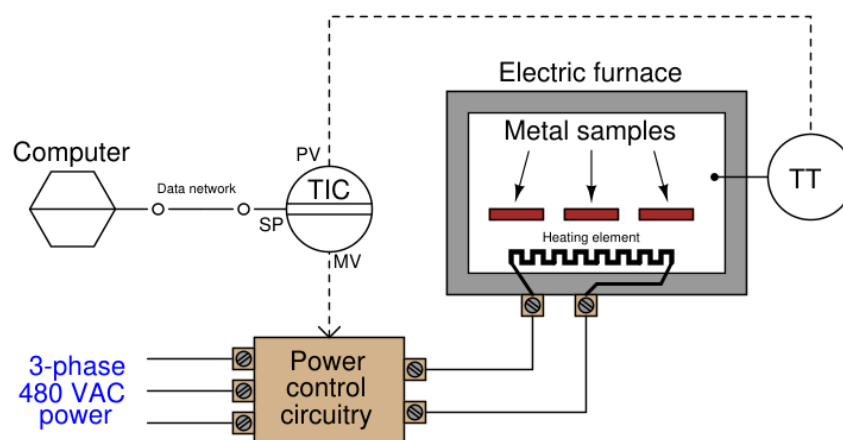
적용 전



Reconstructed schematic (not from textbook)

운전자가 TIC의 로컬 SP를 직접 지정하는 단일 루프 학습용 재구성 · 원서에 동일한 적용 전 비교 그림 없음

적용 후



Here, a computer “supervises” the furnace’s temperature by communicating setpoint values to the

상위 컴퓨터가 TIC에 원격 SP를 전송 교재 원본 · 인쇄 p.2504 (PDF p.2531)

제어구조 변화: SP의 공급원이 운전자에서 상위 컴퓨터로 바뀐다. PID의 PV와 MV 제어 구조는 유지된다.

도면과 SP·PV·MV의 연결

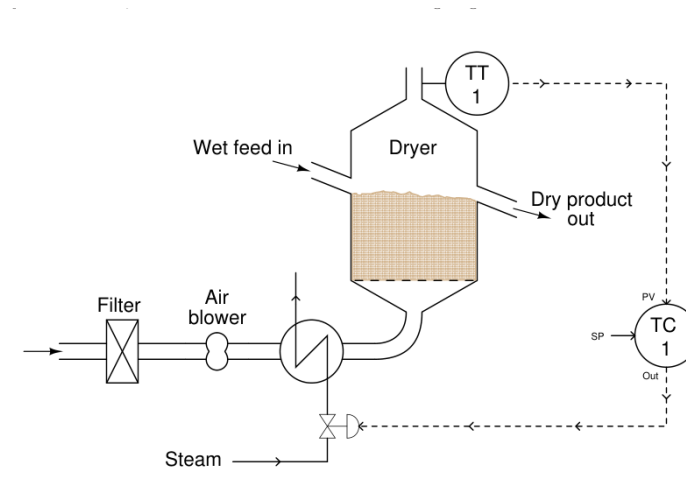
상위 컴퓨터가 TIC의 SP를 변경하고 TIC가 실제 PV에 따라 가열 전력을 조작한다.

SP · PV · MV · CO · DV	SP: 상위 컴퓨터의 온도 목표 / PV: 가열로 온도 / MV: 가열 전력
왜 사용하는가	반복 운전의 설정값 자동화
장점	기존 PID 재사용 · 일정표 운전
단점	상위 SP 오류 · 통신장애 · 추종한계

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산 블록 → 출력 CO → 밸브 · 구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

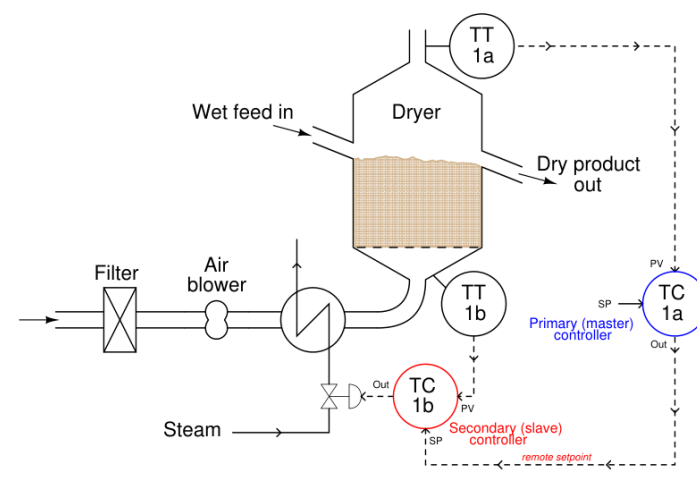
3. 31.2 Cascade control — 캐스케이드 제어

적용 전



출구 TT-1 → TC-1 → 증기밸브: 출구 온도 단일 제어 교재 원본 · 인쇄 p.2508 (PDF p.2535)

적용 후



출구 TT-1a → TC-1a → TC-1b의 원격 SP; 입구 TT-1b가 2차 PV를 제공 교재 원본 · 인쇄 p.2509 (PDF p.2536)

제어구조 변화: TC-1a의 CO가 TC-1b의 RSP가 된다. TC-1b가 입구 온도 외란을 먼저 보상한다.

도면과 SP·PV·MV의 연결

출구 온도 1차 TC의 CO가 입구 온도 2차 TC의 원격 SP가 된다.

SP·PV·MV·CO·DV	SP1: 출구 온도 / PV1: 출구 온도 / SP2: 1차 CO / PV2: 입구 온도 / MV: 증기유량
-----------------------	--

왜 사용하는가	느린 출구 온도보다 빠른 내부변수를 제어
---------	------------------------

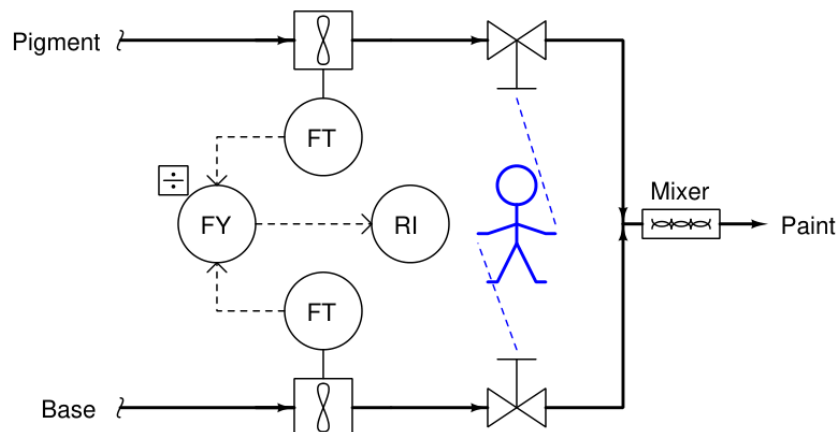
장점	내부 외란 조기 억제
----	-------------

단점	내부 루프가 충분히 빨라야 하고 튜닝 필요
----	-------------------------

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산블록 → 출력 CO → 밸브·구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

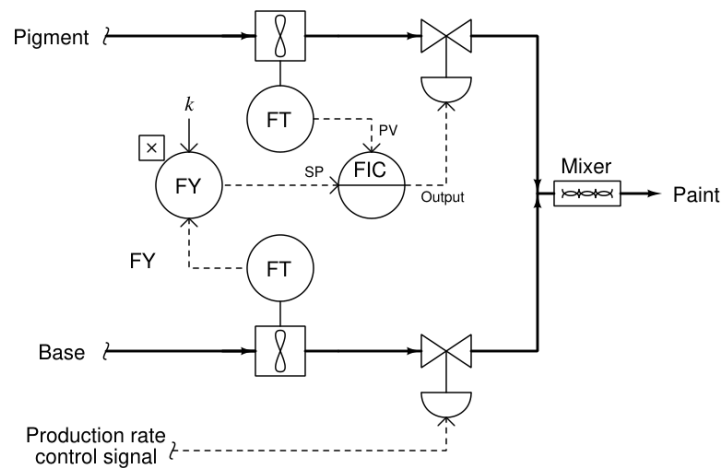
4. 31.3 Ratio control — 비율 제어

적용 전



FT 두 개와 비율 지시기 RI를 참고하여 사람이 안료밸브를 조작 교재 원본 · 인쇄 p.2514 (PDF p.2541)

적용 후



기본 액체 $FT \times \text{비율 } k \rightarrow$ 안료 FIC의 SP; 안료 FT는 PV 교체 원본 · 인쇄 p.2518 (PDF p.2545)

제어구조 변화: 수동 혼합비 조절을 FY 비율 곱셈 연산과 종속 FIC의 자동 제어로 바꾼다.

도면과 SP·PV·MV의 연결

기준 유량(Wild flow)의 PV와 목표비 R을 이용해 종속 유량의 SP를 산출한다.

SP·PV·MV·CO·DV	$SP2 = R \times PV1 / PV2$: 종속 유량 / MV: 종속 밸브 유량
-----------------------	---

왜 사용하는가	혼합비 유지
---------	--------

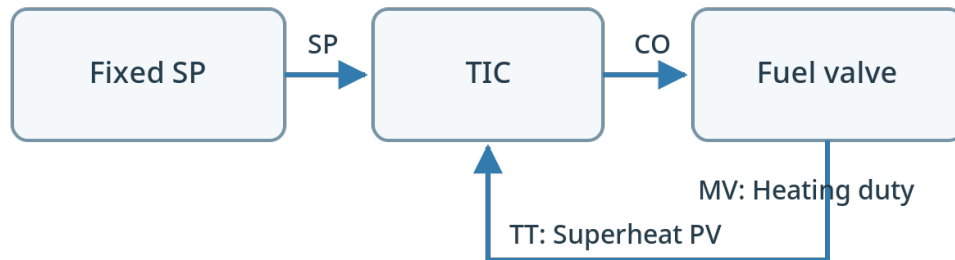
장점	기준 유량 변화에 자동 추종
----	-----------------

단점	유량계 오차·저유량 구간 관리
----	------------------

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산 블록 → 출력 CO → 밸브·구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

5. 31.4 Relation control — 관계 제어

적용 전



Reconstructed schematic (not from textbook)

과열증기 TIC에 고정 온도 SP를 설정하는 단순 루프 학습용 재구성 · 원서에 동일한 적용 전 비교 그림 없음

적용 후

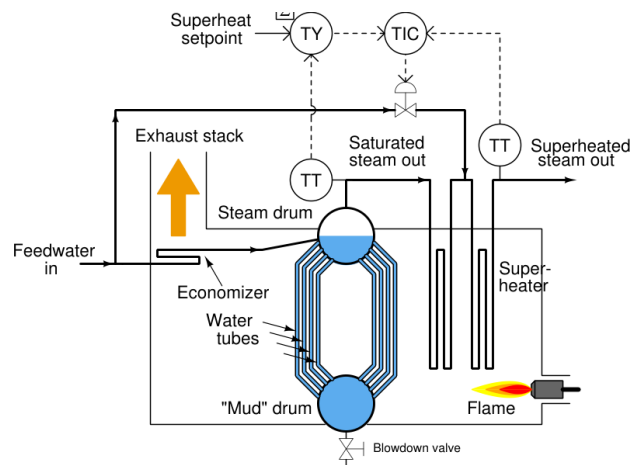


Figure 31.4. Schematic diagram of a boiler system showing the temperature control loop for superheated steam.

드럼의 포화증기 TT + 과열도 설정값 → TY → 과열증기 TIC의 SP 교체 원본 · 인쇄 p.2522 (PDF p.2549)

제어구조 변화: 고정 SP 대신 포화증기 온도의 PV에 일정 오프셋을 더한 SP를 사용한다.

도면과 SP·PV·MV의 연결

기준 공정변수에 일정한 Offset을 더하거나 빼서 종속 제어기의 SP를 만든다. 원서의 보일러 계통도이다.

SP · PV · MV · CO · DV

SP2 = PV1 + Offset / PV2: 종속 온도 / MV: 온도 조절량

왜 사용하는가

비율이 아닌 차이 유지

장점

온도차·압력차 목표 유지

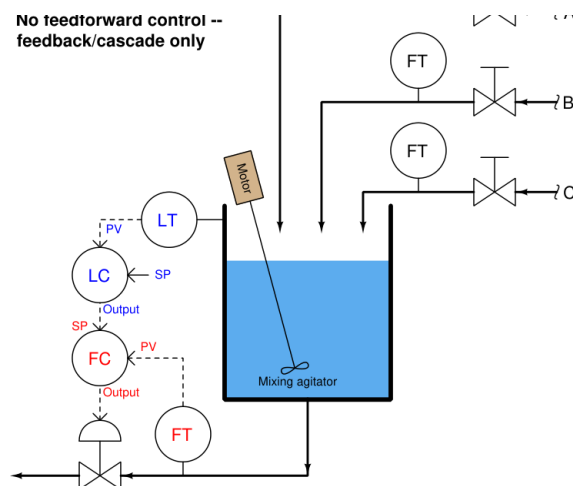
단점

기준 센서 오차가 SP로 전달

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산 블록 → 출력 CO → 밸브·구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

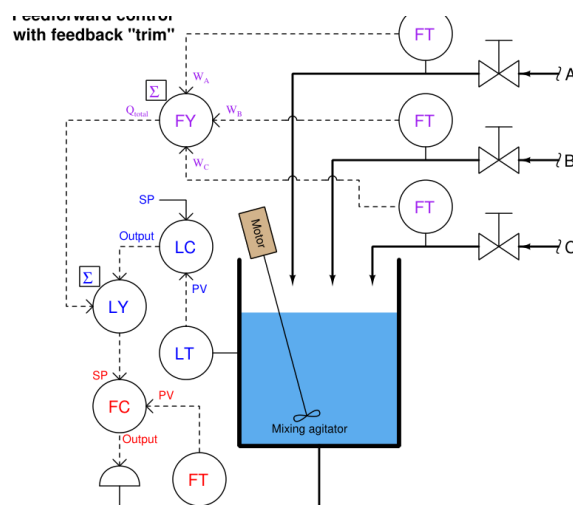
6. 31.5 Feedforward control — 피드포워드 제어

적용 전



혼합탱크 LT→LC→FC→유출밸브: 레벨 피드백만 사용 교재 원본 · 인쇄 p.2529 (PDF p.2556)

적용 후



원료 유입 유량 FT의 합산을 유출 유량 SP에 반영하고 LC가 피드백 Trim 교재 원본 · 인쇄 p.2532 (PDF p.2559)

제어구조 변화: PV가 변한 뒤 대응하던 구조에 외란(유입 유량)의 측정과 선제 보상을 추가한다.

도면과 SP·PV·MV의 연결

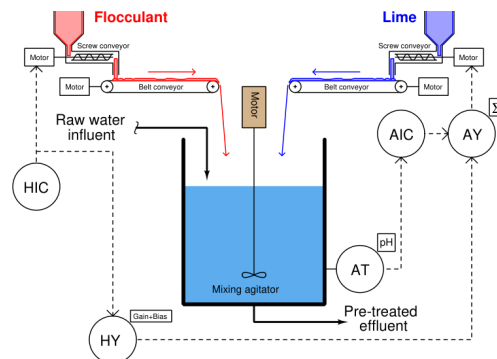
원서의 혼합탱크 P&ID. 외란으로 작용하는 유입 유량을 측정하여 출구 유량 조작에 반영한다.

SP·PV·MV·CO·DV	SP: 탱크 목표 레벨 / PV: 탱크 레벨 / DV: 측정 유입 유량 / MV: 배출 유량
왜 사용하는가	PV가 변하기 전에 외란 보상
장점	외란 선제대응
단점	외란 측정과 모델이 필요

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산 블록 → 출력 CO → 밸브·구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

7. 31.6 Feedforward with dynamic compensation — 동적 보상 피드포워드

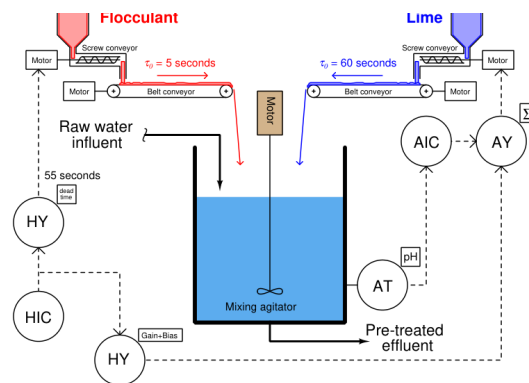
적용 전



Here, the hand controller's signal gets added to the pH controller's output signal to directly influence lime feed rate in addition to acting as a control signal to the flocculant screw conveyor motor drive. If an operator changes the flocculant feed rate, the lime feed rate will immediately adjust to compensate, *before* any change in pH value takes place in the water. Ideally, the pH controller need only make minor "trim" adjustments to lime feed rate, while the feedforward signal does most of the work in maintaining a steady pH value. The proper proportioning and offset between flocculant and lime feed rates is established in the gain/bias function, which is "tuned"¹⁹ to ensure the feedforward signal does not over- or under-react, calling for too much (or too little)

응집제와 석회 분말 공급에 비율 FF를 적용하나 이송 지연 차이를 보정하지 않음 교재 원본 · 인쇄 p.2545 (PDF p.2572)

적용 후



With this dead time relay in place, any change in flocculation feed rate initiated by a human operator will immediately adjust the feed rate of lime powder, but delay an adjustment to flocculant powder feed rate by 55 seconds, so the two powders' feed rate changes arrive at the mixing vessel simultaneously.

Bear in mind that this solution will really only work in a system like this where the major load

응집제 보상 경로에 55초 Dead time 보상 블록을 추가 교재 원본 · 인쇄 p.2549 (PDF p.2576)

제어구조 변화: 두 분말의 실제 혼합조 도착 시간이 일치하도록 FF 신호의 시간 특성을 보정한다.

도면과 SP·PV·MV의 연결

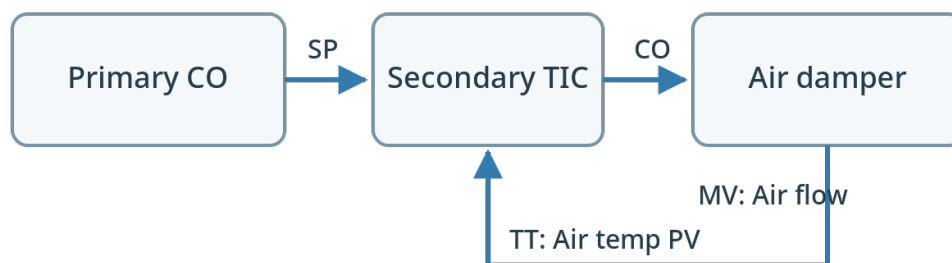
원서의 응집제·석회 주입 P&ID. 외란 경로와 보상 경로의 시간 지연을 비교하여 FF 신호에 지연·진상/지상 보상을 적용한다.

SP·PV·MV·CO·DV	SP: 품질/투입 목표 / PV: 측정 공정변수 / DV: 보상에 사용되는 외란 / MV: 약품 주입량
왜 사용하는가	외란 및 조작 경로의 시간 차 보상
장점	과도응답 개선
단점	동특성 추정 오차·시차 문제

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산 블록 → 출력 CO → 밸브·구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

8. 31.7.1 Limit control — 제한 제어

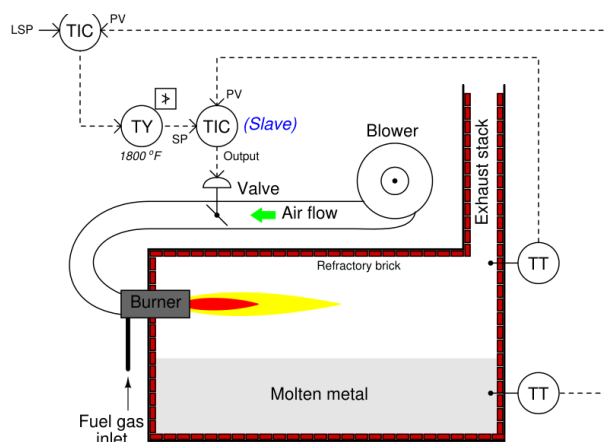
적용 전



Reconstructed schematic (not from textbook)

Primary TIC의 CO가 제한 없이 Secondary TIC의 RSP가 되는 캐스케이드 학습용 재구성 · 원서에 동일한 적용 전 비교 그림 없음

적용 후



It should be noted that although the different functions are drawn as separate bubbles in the P&ID, it is possible for multiple functions to exist within one physical control device. In this example, the TIC (Slave) is a single controller able to perform the function of both TIC and PID control blocks.

Primary TIC의 CO에 상한 1800°F 제한을 적용한 다음 Secondary TIC에 전달 교재 원본 · 인쇄 p.2570 (PDF p.2597)

제어구조 변화: 1차 제어기의 과도한 요구가 2차 SP로 그대로 전달되지 않도록 제한한다.

도면과 SP · PV · MV의 연결

원서의 용융 금속 가열로 P&ID. 1차 TIC의 CO로 생성된 2차 SP가 허용범위를 넘지 않게 제한한다.

SP · PV · MV · CO · DV

SP2 = limit(CO1) / PV1 · PV2: 각 온도 / MV: 연료 조작

왜 사용하는가

위험한 2차 설정값 방지

장점

운전 상·하한 보호

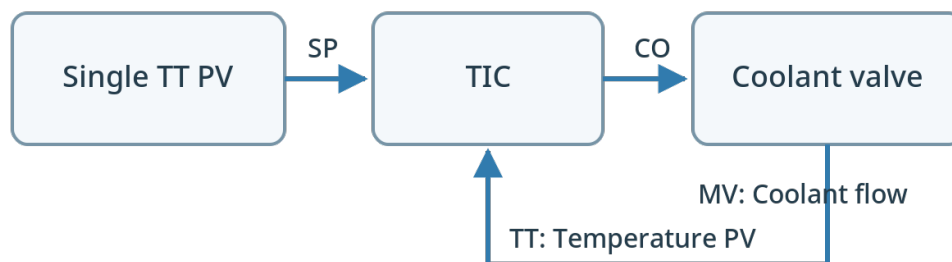
단점

1차 목표 미달·적분 포화 대책

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산 블록 → 출력 CO → 밸브·구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

9. 31.7.2 Selector control — 선택 제어

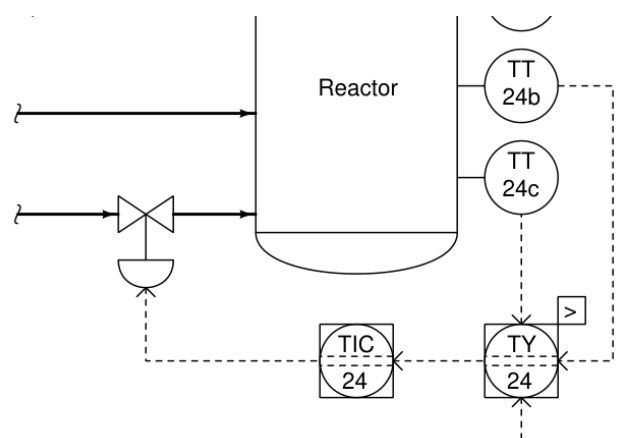
적용 전



Reconstructed schematic (not from textbook)

반응기의 온도센서 한 개의 PV로 TIC가 냉각수 밸브를 제어 학습용 재구성 · 원서에 동일한 적용 전 비교 그림 없음

적용 후



The high-select relay (TY-24) sends only the highest temperature signal from the three transmitters to the controller. The other two temperature transmitter signals are simply ignored.

반응기 TT-24a,b,c 중 High Selector TY-24가 최고 온도 PV를 TIC-24에 전달 교재 원본 · 인쇄 p.2575 (PDF p.2602)

제어구조 변화: 단일 센서 PV 대신 여러 PV 중 위험도에 맞게 선택한 측정값을 사용한다.

도면과 SP·PV·MV의 연결

원서의 발열 반응기 P&ID. 여러 온도센서의 측정값 중 가장 높은 PV를 선택하여 TIC에 전달한다.

SP·PV·MV·CO·DV SP: 온도 목표 / PV = max(TT24a, TT24b, TT24c) / MV: 냉각유량

왜 사용하는가 다지점에서 가장 위험한 측정값 제어

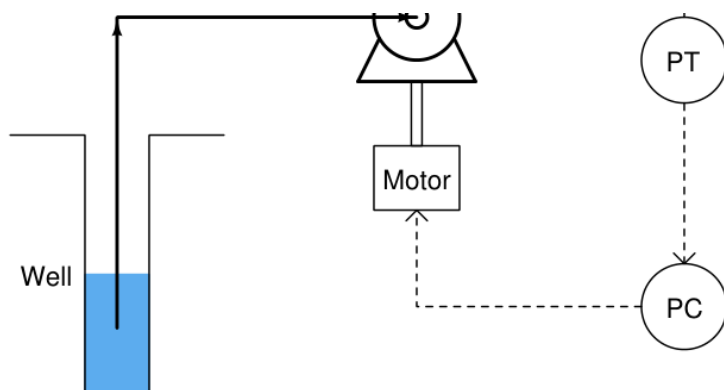
장점 고온 영역 우선 관리

단점 센서 고장·선택 전환 시 PV 점프

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산 블록 → 출력 CO → 밸브·구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

10. 31.7.3 Override control — 오버라이드 제어

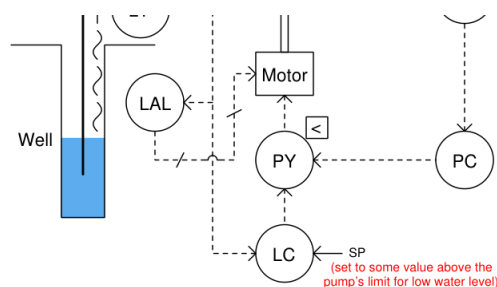
적용 전



Incidentally, this is an excellent application for a variable-speed motor as the final control element rather than a control valve. Reducing pump speed in low-flow conditions will save a lot of energy over time compared to the energy that would be wasted by a constant-speed pump and control valve.

토출압력 PT→PC→펌프 모터 속도: 압력 단일 제어 교재 원본 · 인쇄 p.2585 (PDF p.2612)

적용 후



In order that these two levels of pump protection work in the proper order, the level controller's (LC) setpoint needs to be set to a higher value than the low level alarm's (LAL) trip point.

A very important consideration for any override control strategy is how to manage integral windup. Any time a controller with any integral (reset) action at all is de-selected by the selector function, the integral term of the controller will have the tendency to wind up (or wind down) over time. With the output of that controller de-coupled from the final control element, it can have no effect on the process variable. Thus, integral control action – the purpose of which being to constantly drive the output signal in the direction necessary to achieve equality between process variable and setpoint – will work in vain to eliminate an error it cannot influence. If and when

수위 LT→LC를 추가하고 Low Selector PY가 압력 PC와 레벨 LC의 CO 중 선택 교재 원본 · 인쇄 p.2588 (PDF p.2615)

제어구조 변화: 저수위에서는 레벨 제어기가 펌프 속도 제한에 우선권을 가지며, LAL 저수위 정보도 구비된다.

도면과 SP·PV·MV의 연결

원서의 수위 지하 보호를 포함한 펌프 제어 사례. 정상 명령보다 보호 조건이 우선하도록 조작권을 전환한다.

SP·PV·MV·CO·DV	SP: 정상 제어 목표 / PV: 정상 및 보호 변수 / MV: 펌프 조작·정지
왜 사용하는가	운전 한계 도달 시 보호 기능 우선
장점	공정 손상 위험 감소
단점	제어권 전환·비선택 제어기 적분 포화

도면 읽기: 측정기기(FT·TT·LT) → 제어기(FIC·TIC·LIC) 또는 계산 블록 → 출력 CO → 밸브·구동기 → 조작변수 MV 순으로 확인한다.

11. 암기용 구조 비교

유형	신호 관계
SP 생성	Supervisory: 상위 시스템→SP / Cascade: Primary CO→Secondary SP / Ratio: 기준 PV×R→SP / Relation: 기준 PV+Offset→SP / Limit: SP 제한
외란 보상	Feedforward: DV→MV 보상 / Dynamic FF: DV→시간특성 보정→MV 보상
신호 선택	Selector: 여러 PV 중 선택 / Override: 여러 CO 또는 보호 로직의 조작권 선택

교재 출처: Tony R. Kuphaldt, Lessons in Industrial Instrumentation, version 2.32, Chapter 31. 도면은 사용자가 제공한 원서 PDF에서 추출하였으며, 설명은 학습용 요약이다.