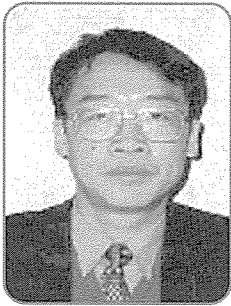


# 자동전압조절기



한전전력연구원  
발전연구실 I&C그룹  
책임연구원/공학박사  
임익현  
Tel : (042)865-5385

## 1. 자동전압 조절기 개요

여자 시스템의 기능은 전력계통에 안정적인 전력 공급을 위해서 발전기 전압을 일정하게 유지해야함은 물론 계통의 급격한 전압강하가 있을 때는 빠르게 회복시킬 수 있는 능력을 보유해야 한다. 안정적인 일정 전압 유지와 빠른 응답을 위해서는 페루프 제어회로를 갖게 되는데, 여기서는 자동전압 제어를 수행하는 아날로그 제어회로의 조절·연산기에 대해서 설명하고자 한다. 회로 설명에 앞서서 여자시스템의 자동전압조절기능을 간단히 설명하면 아래와 같다.

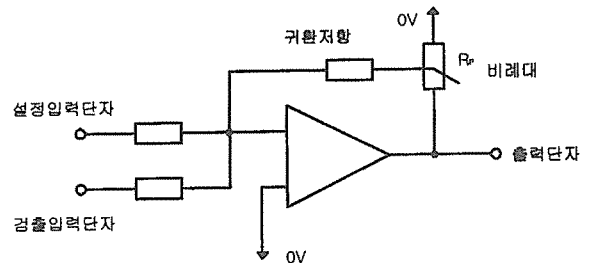
### 1.1 자동전압 조절기 AVR(Automatic Voltage Regulator)

자동 전압 조절기의 기능은 발전기의 운전 상황의 변화에도 불구하고 주어진 설정값에 일치하도록 발전기 단자 전압을 자동으로 조절하는 역할을 한다. 자동 전압 조절기의 형태는 고전적인 비례적분(PI) 제어기나 지상/진상 보상제어기의 형태이며 귀환된 발전기의 단자 전압과 자동전압 조절 설정치(AVR Set-point)의 출력과 비교해서 제어를 위한 편차 신호를 만든다. 생성된 편차신호(Error Signal)는 자동전압 조절 제어기 내의 PI 제어기 및 자동전압 조절 제어기 출력 제한기를 거쳐 최종 출력이 된다. 자동전압 조절 제어기의 최종 출력은 다시 과여자 제한기의 입

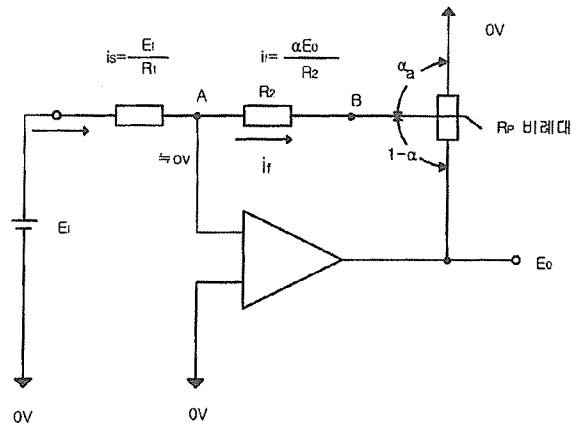
력으로 사용되어 과여자 제한기의 출력과 비교되어 실제의 SCR(Silicon Controlled Rectifier)을 점호하기 위한 값으로 사용된다. 여자의 운전이 수동 전압조절 운전일 경우 자동전압 조절 제어기의 적분기는 수동 전압 조절기의 출력을 추종하는데 이는 수동 전압조절 운전에서 자동 전압조절 운전으로 재 전환할 때 발생할 수 있는 충격을 최소화하기 위한 것이다.

그림 1은 여자시스템 제어기의 블록선도이다. 자동전압조절기는 기동시 발전기 단자 전압에 발생 할 수 있는 Over Shoot를 방지하기 위하여 무부하 계자 전압에 해당하는 초기값을 갖도록 기동시작 명령을 주던지, 설정기 자체를 완만한 기울기를 주어서 무부하 전압 목표치까지 서서히 끌어 올리는 완기동(Soft Voltage Build up) 방식을 사용한다.

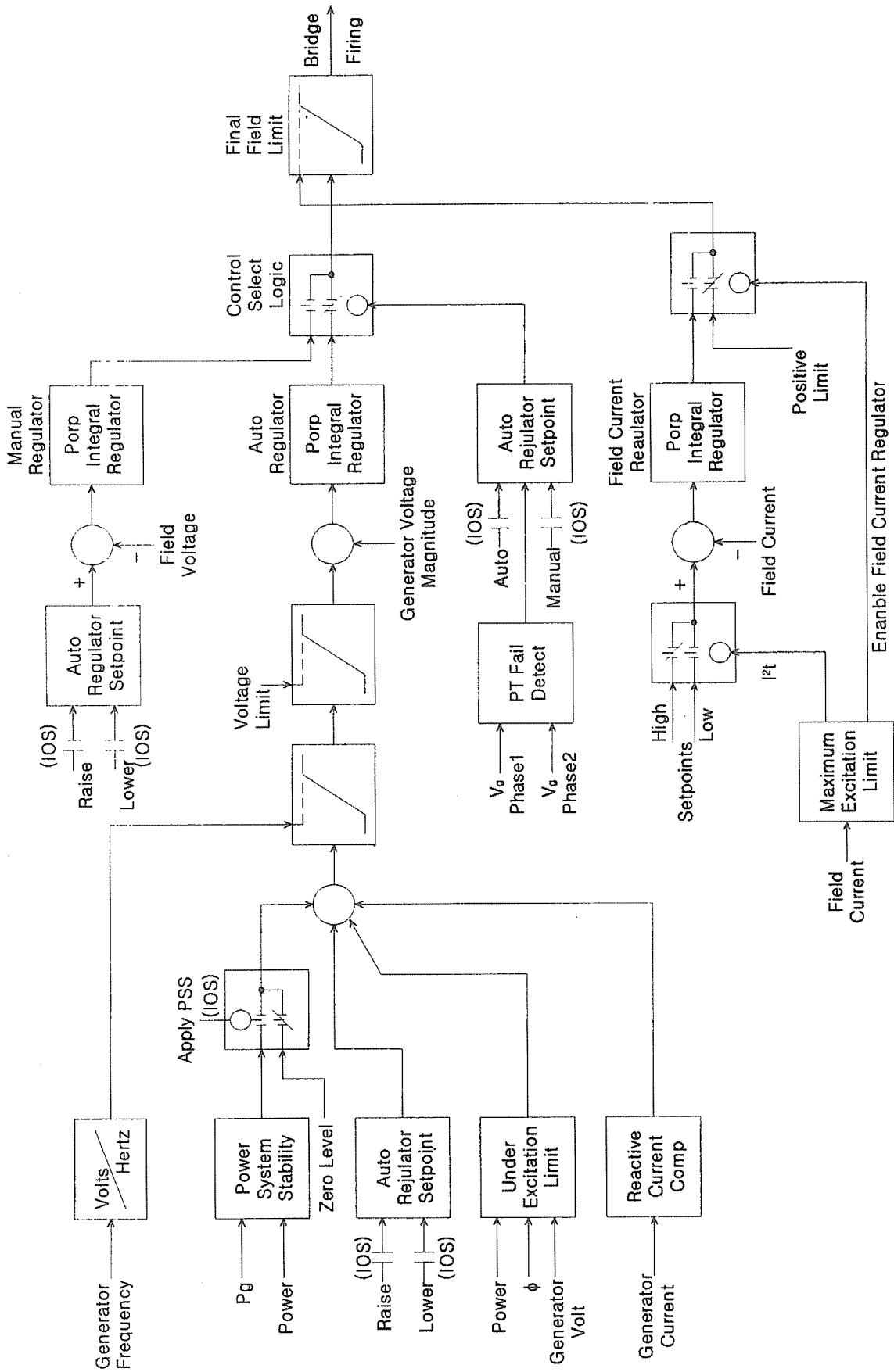
### 1.2 비례 조절기(P조절기)



[그림 2] P 조절기 기본 회로



[그림 3] P 조절기의회로



[그림 1] 여자시스템의 전체 블록도

Control One Line

비례 조절기는 부귀환 제어로, 설정량과 제어량과의 입력편차에 비례한 조작량을 출력하는 조절기를 말한다. 잔류편차가 상존하는 것이 필연적이고, 제어 결과가 진동적일 수밖에 없는 폐루프 제어의 일종이다.

비례 조절기는, 부귀환 증폭기의 귀환회로에 비례 동작의 강도를 조정하는 가변저항  $R_p$  를 붙이는 것이다. 이 가변저항으로, 폐 루우프의 감도를 조정해서 최적제어가 되도록 한다. 원래, 조절기는 최저 2개의 입력단자(설정 입력단자와 검출 입력단자)를 가진다. 여기서는 설명을 간단하게 하기 위해, 입력단자를 1개로 하고, 입력전압  $E_i$ 와 출력전압  $E_o$ 와의 관계를 구한다. 비례대 조정저항  $R_p$ 의 위치를 변경해서 조정하는데 0V에서 가변된 어느 위치까지의 분압비를  $\alpha$ 로 하고,  $R_p \gg R_1$ 에서는 그림3 B점의 전압은  $\alpha E_o$ 가 된다.

$$\text{입력전류 } i_s = \frac{E_i}{R_1} \text{ -----(1)}$$

$$\text{귀환전류 } i_f = \frac{\alpha E_o}{R_2} \text{ -----(2)}$$

가상접지(imaginary zero), 즉 A점에서 연산증폭기로 유입되는 전류값은 매우 작기 때문에 A점의 전류의 합은 영이다.

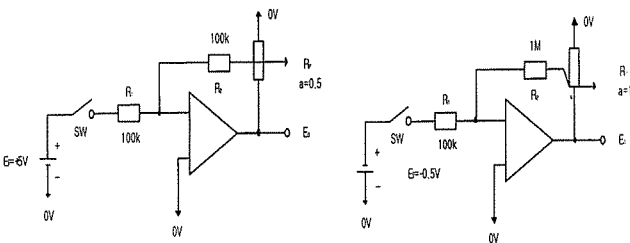
$$i_s + i_f = 0 \text{ -----(3)}$$

$$(1), (2)\text{식을 (3)식에 대입하면, } \frac{E_i}{R_1} + \frac{\alpha E_o}{R_2} = 0$$

$$E_o = \frac{-1}{\alpha} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot E_i \text{ -----(4)}$$

결국, P조절기에서의 이득(gain .감도)은 비례대 조정 가변저항  $R_p$ 의 값을 바꾸면 된다.

◎ 예 1)



예1의 계산

$$E_o = -\frac{1}{0.5} \times \frac{100 \times 10^3}{100 \times 10^3} \times 6 = -10(V)$$

$$E_o = -\frac{1}{1} \times \frac{1000 \times 10^3}{100 \times 10^3} \times (-0.5) = +5(V)$$

### 1.2.1 비례감도와 비례대

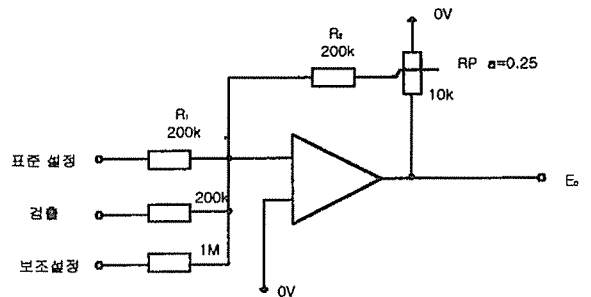
출력전압의 입력전압에 대한 비 즉, 전압 증폭도를 비례감도라 부른다. 또 비례대는 일반적으로 조작부의 전 조작범위에 대한 제어량의 범위를 말하고, 퍼센트로 비례대를 표시한다. 예를 들면 조작량이 10V이고 조절기에서 0~5V의 입력전압이고, 출력전압 0~10V의 경우, 비례대 50%가 된다.

$$\text{비례감도 } K = \frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

비례대

$$P(\%) = \frac{1}{K} \times 100 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{R_2}{R_1}} \times 100 = \frac{\alpha \cdot R_1}{R_2} \times 100(\%)$$

◎ 예 2)



[그림 4] 비례대 계산예

그림 4에서 비례대의 값을 구하는 경우는, 3개의 입력 신호중에 반드시 표준설정 입력단자를 기준으로 해서 비례대를 구해야 한다. 출력전압을 10V로 출력하는데 필요한 입력전압은, 출력전압의 50%인, 5V가 된다.

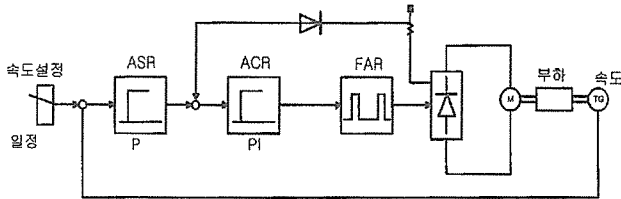
$$\text{비례대 } P = \frac{0.25 \times 200 \times 10^3}{100 \times 10^3} \times 100 = 50(\%)$$

### 1.2.2 잔류편차

비례조절기에서는 부하변동, 전원전압변동 등의 의

란이 있으면 목표치와 제어량과의 사이에 필연적으로 편차(이 편차를 잔류편차 또는 offset이라고 부른다)가 발생한다.

◎ 예 : 속도조절기로서 비례조절기를 사용한 경우



$$y = K_1 \cdot x = K_1(s-z) \quad \text{----- (1)}$$

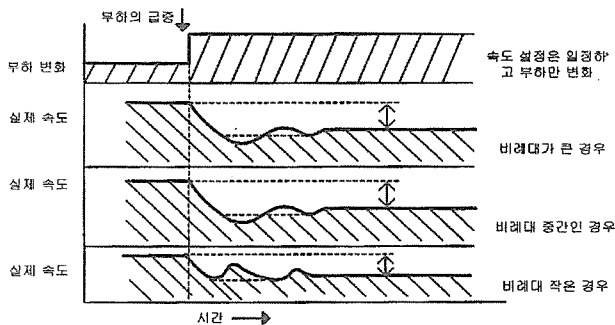
$$z = K_2(y+u) \quad \text{----- (2)}$$

(1), (2)식에서 y를 소거하면

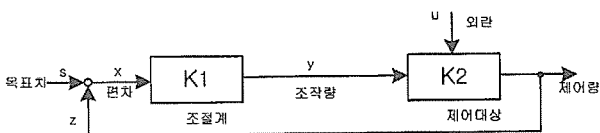
$$z = \frac{K_1 K_2}{1 + K_1 K_2} s + \frac{K_2}{1 + K_1 K_2} u$$

$$\therefore s - z = \frac{1}{1 + K_1 K_2} s - \frac{K_2}{1 + K_1 K_2} u$$

$$\approx -\frac{1}{K_1} u \quad (K_1, K_2 \gg 1) \quad \text{----- offset}$$



[그림 5] P조절기의 응답



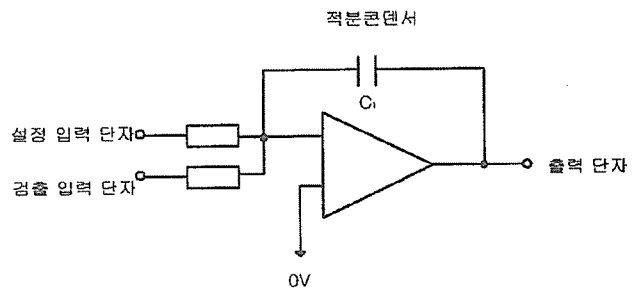
[그림 6] P조절기 페루프

### 1.3 적분 조절기(I 조절기)

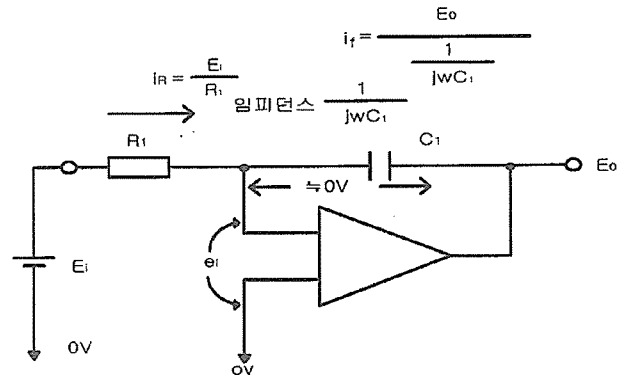
큰 시정수를 갖지 않는 제어대상(프로세스)에 적용된다. 비례조절기에서 볼 수 있는 잔류편차(offset)가 발생되지 않는다.

그림 7 과 같이 귀환회로에 적분 콘덴서가 들어있는 것을 적분 조절기라고 한다. 이 회로가 연산기로서 사용되는 경우에는 Miller 적분기, 또는 밀러 적분

회로라고 부른다.



[그림 7] I 조절기 기본회로



[그림 8] I 조절기의 회로

그림 8의 회로에서, 출력전압  $E_o$ 는 적분 콘덴서  $C_1$ 이 입력전류  $i_R = \frac{E_i}{R_1}$ 로 충전된다고 생각하면 되니까,

$$E_o = -\frac{1}{jwC_1} \cdot \frac{E_i}{R_1} \quad \text{----- (1)}$$

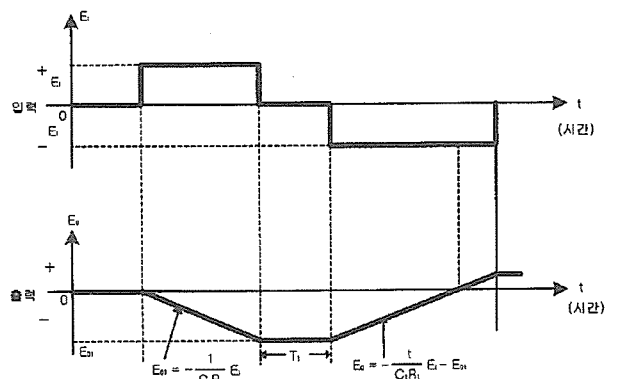
$C_1 \cdot R_1 = T_I$  (적분시간이라고 부른다)로 하면,

$$E_o = -\frac{1}{jwT_I} E_i \quad \text{----- (2)}$$

$E_o$ 는 시간계수가 되고 입력  $E_i$ 에서 1초 후에는

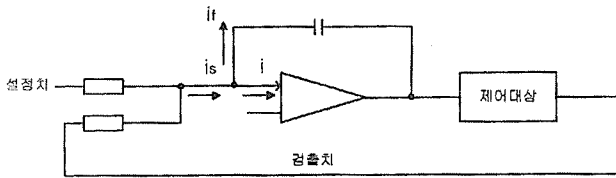
$$E_o = -\frac{1}{T_I} \cdot E_i$$

식(3)을 그림으로 나타내면

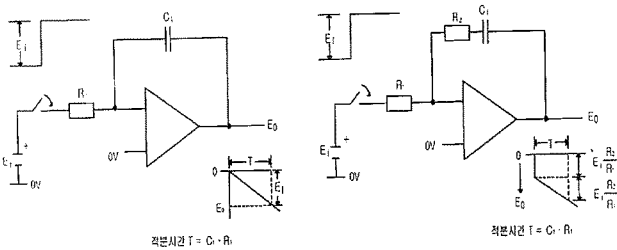


[그림 9] I 조절기의 입출력 관계

그림 9의  $T_I$  구간은  $i_s=0$  ( $i_s = \frac{E_i}{R_i}$  이기 때문에,  $E_i=0$ 일 때  $i_s=0$ ), 따라서  $i_f=0$ 이 되고, 충전전류는 흐르지 않는다. 증폭기의 증폭도  $K_R=\infty$ 라면, 콘덴서  $C_I$ 의 전하는 방전회로가 아니기 때문에 그대로 충전된 상태를 유지하지만, 실제로는  $K_R$ 은 유한하기 때문에 서서히 방전이 일어난다. 적분조절기는 출력이 입력의 적분값에 비례한 것이다. 따라서 입력이 0, 즉 목표치(설정치)와 실제값(검출치)의 편차가 0이 될 때까지 제어동작이 일어나기 때문에 비례동작에서와 같은 잔류편차(offset)는 남지 않는다.



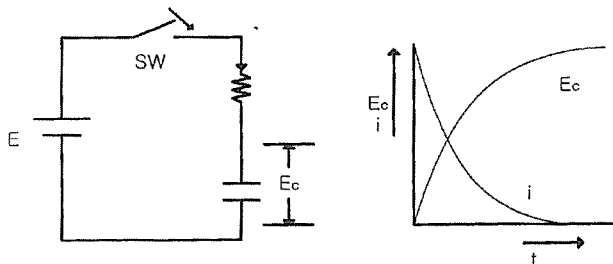
[그림 10] 조절기 블록도



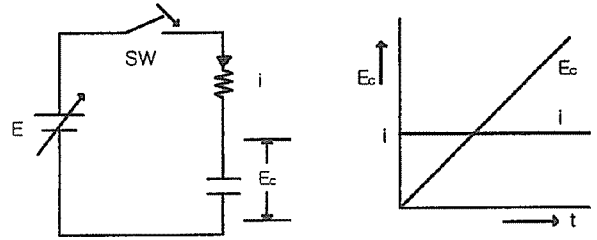
[그림 11] 적분동작 설명

적분 동작의 크기를 결정하는 데에는 적분시간이 있지만, 이것은 P동작에 의한 결과 변화에 종속적으로 작용하는 경우가 많다.

◎ 주, 콘덴서 전류  $i$ 와 충전전압  $E_c=0$ 의 관계를 고찰하면 다음과 같다.



(가) E = 일정하게 SW ON의 경우

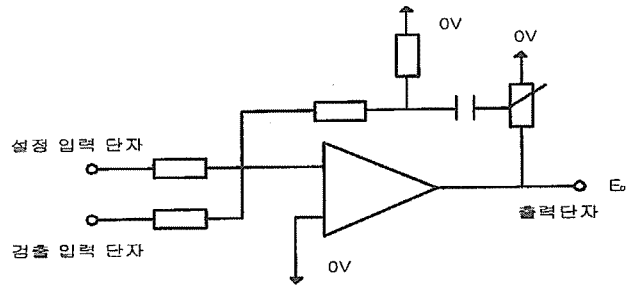


(나)  $i$  = 일정율로 전압 E를 증가시킬 경우  
(이와 같은 동작을 하게 하는 것이 Mirror 적분회로이다.)

[그림 12] Mirror 적분기의 원리 설명도

### 1.4 비례적분 조절기(PI 조절기)

제어대상에 큰 시정수를 포함하지 않는 경우에 적용되는 조절기이다.



[그림 13] PI 조절기의 기본회로

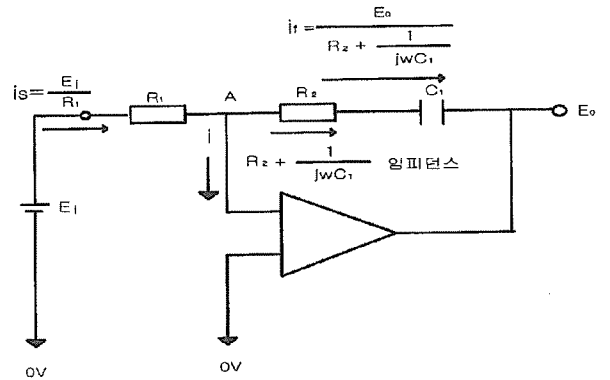


그림 14 PI 조절기의 회로

PI 조절기는 부귀환 증폭기의 귀환회로에 저항(귀환저항이라고 부름)과 콘덴서(적분 콘덴서라고 부름)가 직렬로 들어간 것이다. 출력전압  $E_o$ 를 구하면, 입력전류  $i_2$ 가 그대로 귀환회로의 전류  $i_1$ 로 되기 때문(왜냐하면  $i \approx 0\mu A$ )이다.

$$i_R = \frac{E_i}{R_1}, \text{ 귀환회로의 임피던스는 } R_2 + \frac{1}{jwC_1}$$

따라서, 귀환회로의 전압강하  $E_0$ 는,

$$E_o = -\frac{E_i}{R_1} \cdot (R_2 + \frac{1}{j\omega C_1 R_2}) = -\frac{R_2}{R_1} (1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_2}) \cdot E_i$$

위 식에서, 출력전압  $E_0$ 은 시간에 관계없이, 입력전압  $E_i$ 에 비례하는 항( $-\frac{R_2}{R_1} \cdot E_i$ )와 입력전압을 적분하는 항( $-\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{j\omega C_1 R_2} \cdot E_i$ )을 더한 것이 된다.

여기에서, 비례항  $\frac{R_2}{R_1}$ 를 K, 적분시간을  $T_1$ 으로 하면,

◎ 비례감도 K :  $K = \frac{R_2}{R_1}$

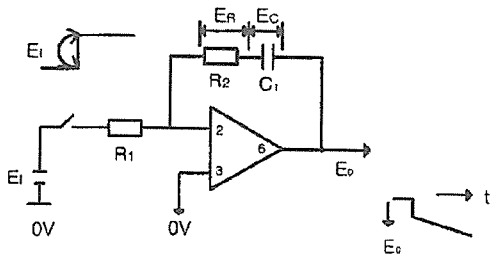
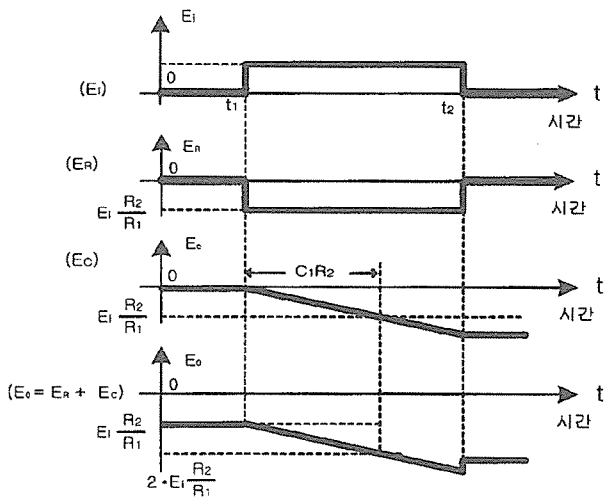
◎ 적분시간  $T_1$  :  $T_1 = C_1 R_2$ (초)

◎  $E_o = -K(1 + \frac{1}{j\omega T_1}) \cdot E_i$

입력전압  $E_i$ 를 인가한 후, 1초 후의 출력전압  $E_0$ 는,

$$E_o = -\frac{R_2}{R_1} (1 + \frac{1}{C_1 R_2}) \cdot E_i$$

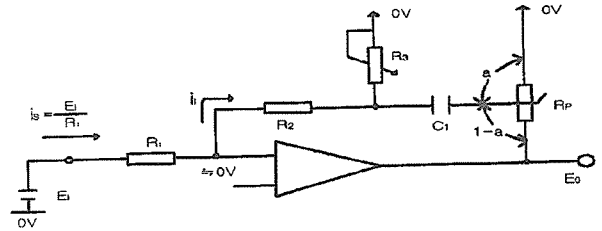
이 식의 관계를 그림으로 나타내면 그림 15가 된다.



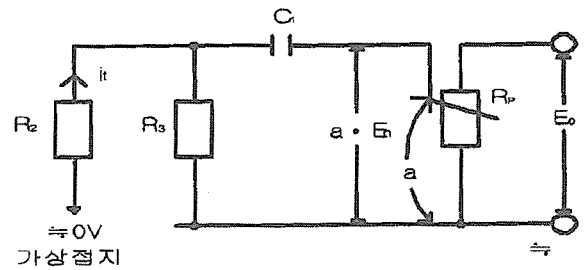
[그림 15] 그림 PI 동작 설명도

주 : 콘덴서  $C_1$ 에는 시각  $t_1$  이전에 전하가 충전되어 있지 않음

실제의 PI 조절기에서는 비례대와 적분시간을 조정하기 위해, 각각에 가변저항  $R_p$ ,  $R_3$ 를 삽입한다[그림 16(a)].



(a) PI 조절기의 실제 회로



(b) PI 조절기의 귀환회로

[그림 16] PI 조절기의 실제회로와 귀환회로

비례대 · 적분시간을 산출하기 위해 귀환회로만을 꺼내면, 그림 16(b)가 된다.

$$\begin{aligned} i_f &= \frac{aE_o}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \\ &= \frac{aE_o}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_2 \cdot R_3} \\ &= \frac{a \cdot E_o}{1 + \frac{1}{j\omega C_1 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}}} \end{aligned} \quad (1)$$

$i_s + i_f = 0$ 에 의해

$$\frac{E_i}{R_1} + \frac{\frac{a \cdot E_o}{R_2}}{1 + \frac{1}{j\omega C_1 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}}} = 0 \quad (2)$$

$$E_o = -\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{1}{j\omega C_1 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} \right) \cdot E_i \quad \text{-----(3)}$$

(3)식에 의해

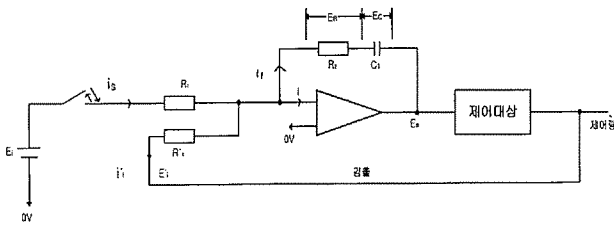
$$\text{실례감도 } K = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{비례대 } P = \frac{1}{K} \times 100 = \alpha \cdot \frac{R_1}{R_2} \times 100(\%)$$

$$\text{적분 시간 } T_1 = C_1 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad (\text{초})$$

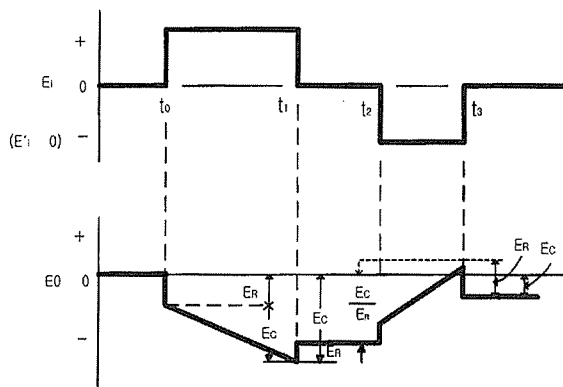
결국, 비례대는 가변저항  $R_p$ 로 조정할 수 있고( $R_3$ 는 비례대, 비례감도에 관계없음), 적분시간  $R_3$ 은 에 의해 단독으로 변한다.

(가) 귀환(feedback)제어계가 구성된 경우의 PI조절기의 입력전압 · 출력전압의 관계



[그림 17] 동작 설명도

검출하지 않는 경우



[그림 18] PI조절기의 검출이 없는 입출력

검출이 있는 경우

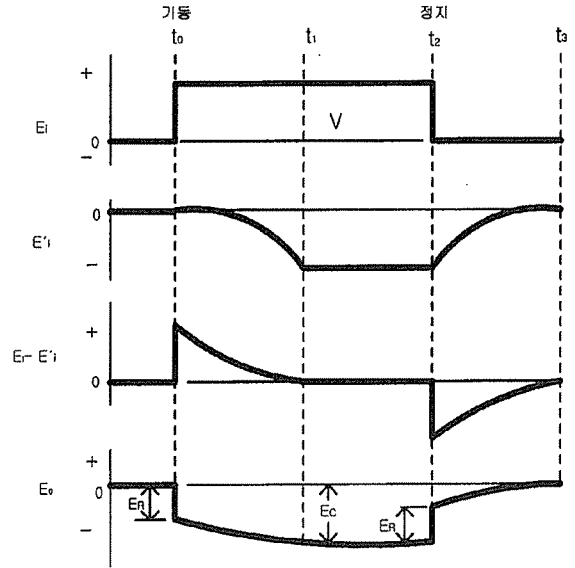
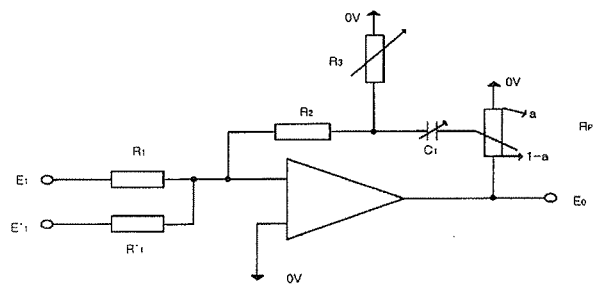


그림 19 PI조절기의 검출이 있는 입출력 응답

### 1.5 정수를 가변 할 수 있는 조절기

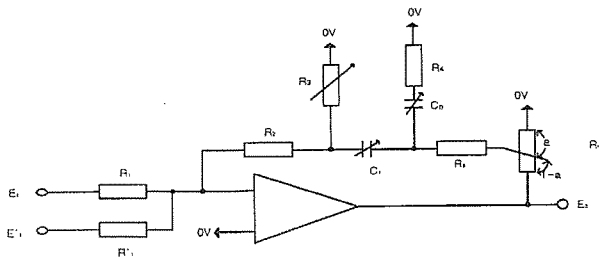
조절기가 그의 기능을 충분히 다하기 위해서는 PID의 정수가 적절해야 한다. PID는 필요에 따라 어느 정도 가변 할 수 있게 되어있고, 각각은 서로 간섭하지 않고, 독자적으로 값을 바꿀 수 있게 배려되어 있다. 저항치의 상호관계는  $R_2 \gg R_D$ ,  $R_D \gg R_d$ ,  $R_2 // R_3 \gg R_D \gg R_P$ 이다.



$$\text{비례대 } P(\%) = \alpha \cdot \frac{R_1}{R_2} \times 100,$$

$$\text{적분시간 } T_1(\text{초}) = C_1 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

(a) PI조절기



$$\text{비례대 } P(\%) = a \cdot \frac{R_1}{R_2} \times 100$$

$$\text{적분시간 } T_1(\text{초}) = C_1 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

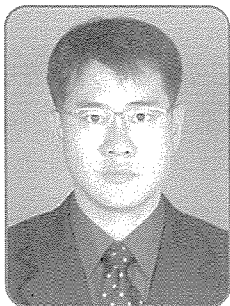
$$\text{미분시간 } T_D(\text{초}) = C_D(R_D + R_d)$$

(b) PID 조절기

[그림 20] 정수를 가변 할 수 있는 조절기

비례대를 변경할 경우  $R_p$  값 변경한다.  $R_2$  값을 바꾸면 적분시간( $T_1$ )까지 바뀌어 버린다.  $R_1$  값을 바꾸면 설계신호와 검출신호의 감도까지 바뀌게 되어서  $R_2$  도 동시에 바뀌어야 하는 번잡함을 동반한다. 적분시간을 바꾸는  $C_1$  또는  $R_3$  를 바꾼다.  $R_2$  를 바꾸면 비례대(P)까지 바뀌어져 버린다. 미분시간을 바꿀 경우  $C_D$  또는  $R_d$  를 교환한다.  $R_D$  를 바꾸면 비례대(P), 적분시간( $T_1$ )까지 바뀌어 버린다.

## Nano-Core 합금 기술을 활용한 내마모 및 내부식성 코팅용재 소개



(주)써머텍코리아  
기술영업팀  
윤 석 조 과장  
Tel : (055)260-2489

### 1. 서론

Nano-Core 합금 기술은 금속 기지 파우더와 나노 사이즈의 입자를 집적(Agglomerated) 시킬 수 있기 때문에 전통적인 심지형(cored) 와이어 기술을 뛰어넘는 매우 진보된 기술이다. 나노 사이즈의 입자들은 WC 혹은 CrC 같은 세라믹 형태이고 사이즈와 분포

는 최종 코팅의 조직, 밀도와 작동 기능에 그대로 영향을 미친다. 현재 Nano-Core 합금으로 만들어지는 제품은 4개군으로 분류된다. : Wear X, Ash X, Corrode X와 Custom X. Wear X는 Fe 계열 재질, Ash X는 텅스텐-니켈 계열 재질, Corrode X는 니켈-크롬 계열 재질이고 Custom X는 이들을 혼합한 재질이다. Nano-Core 합금 기술은 저비용 용사 기술인 Twin Arc Wire Spray에 적용할 수 있도록 1/16" 직경의 Wire 형태로 만들어지며 이들 와이어는 용접과 Single Wire Arc Spray, Wire Flame Spray와 PTWA 장치에 의한 코팅이 가능하다.

그러나 Nano-Core 합금 기술을 적용하는 주된 방법은 Twin Arc Wire Spray이다. 이 방법은 용사 공정 중에 일어나는 반응에 의해 옥사이드 층을 최소로 할 수 있다. 그 이유는 보다 미세한 입자는 우선적으로 산화되고 그 결과로 이런 산화 반응이 일어나는 주변은 부분적인 환원성 분위기가 만들어지기 때문에 중