

기술표준원 고시 제 2000 - 92 호  
( 제정 2000. 5. 29 )

# 전기용품안전기준

K 60034-16-3

[IEC 1996-01]

---

---

## 회전기

제16부: 동기기를 위한 여자계

3장 : 동작 성능

## 목 차

1. 적용범위 .....	11
2. 소신호 동작 .....	11
2.1 소신호 동작의 표현 방법 .....	11
2.2 시스템 안정도를 위한 여자 제어 영향 .....	13
2.3 전력계 안정기의 응용 .....	15
3. 대신호 동작 .....	17
3.1 일반사항 .....	17
3.2 대신호 동작의 특징 .....	17

표 1 - 여자 제어계의 전형적 범위. ....	13
----------------------------	----

### 그림

1. 단순화된 여자계와 동기기 .....	21
2. 스텝(Step)변화에 따른 단순화된 여자 제어계의 시간 응답. ....	23
3. 동기기 개회로(Open-circuit)의 단순화된 여자 제어계의 개루프(Open-loop) 주파수 응답. ....	25
4. 동기기 개회로(Open-circuit)의 단순화된 여자 제어계의 폐루프(Closed-loop) 주파수 응답. ....	27
5. 동기기 개회로(Open-circuit)의 단순화된 여자 제어계의 폴/제로선도(pole/zero plot), 개루프(Open-loop) .....	29
6. 루프 이득(Loop gain) $K$ 의 변화에 따른 동기기 개회로(Open-circuit)의 단순화된 여자 제어계의 루트 로커스 선도(root locus plot), 폐루프(Closed-loop) .....	31
7. 전력계 안정기의 전달 함수 .....	33
8. 선택적인 전력계 안정기의 전달 함수 .....	33

# 회전기

제 16부. : 동기기를 위한 여자계  
3장 : 동적 성능.

## 1. 적용 범위

이 장은 폐루프(closed-loop)여자 제어를 하는 동기기의 응답 특성을 조사하는데 이용될 수 있는 방법을 간략하게 살펴본다.

일반적인 여자계의 함수 블록선도(functional block diagram)은 (K 34-16-2의 그림1) 전력계의 안정도에 관한 연구에서 고려해야할 다양한 여자계의 구성 요소를 나타낸다.

## 2. 소신호 동작

### 2.1 소신호 동작의 표현 방법

#### 2.1.1 일반사항.

소신호 동작은 비선형성이 무시될 수 있고 시스템의 동작이 선형 모델로 표현할 수 있을 정도로 충분히 작은 신호에 대한 여자 제어와 동기기의 응답을 설명한다. 각 요소와 시스템의 소신호 동작은 다음으로 가장 잘 설명될 수 있다.

#### 2.1.2 시간 응답.

단순화된 여자계와 개회로(open-circuit)동기기를 그림1에 나타내었다. 피드백(Feedback)을 가진 폐회로(close-loop)에서 스텝(step)변화에 따른 시간 응답을 그림 2에 나타내었다. 관심이 있는 성능 지수는 상승 시간과 오버슈트(Overshoot)와 안정 시간(Setting time)이다.

#### 2.1.3 주파수 응답.

선형계에서, 주파수 응답은 정상상태(steady-state)에서의 정현파 입력과 그 결과인 안정계(steady-state) 정현파 출력사이의 위상차와 크기에 의하여 표현되는 주파수 의존적인 관계이다.

그림 1의 개루프(open-loop) 주파수 응답 특성을 동기기 개회로(open-circuit)를 가지는 단순화된 여자계에 대하여 그림 3에 나타내었다. 관심이 있는 지수로는 저 주파수 이득  $G$ , 각 교차 주파수(angular crossover frequency)  $\omega_c$ , 위상 여유도  $\Phi_m$ 과 이득 여유도  $G_m$ 이다. 그림 4에 폐루프(closed-loop) 주파수 응답 특성을 나타내었다. 관심이 있는 지수로는 대역폭  $\omega_b$ , 이득 특성의 최고 값  $M_p$ 와 최고 값  $M_p$ 에서의 각 주파수  $\omega_m$ 이다. 이 성능 지수는 상대적 안정도와 지수와 시간 응답 특성의 지수를 제시한다.

#### 2.1.4. 복소 주파수 영역.

제어계의 동작 특성은 복소 주파수 영역내의 라플라스 전달 함수의 고유치(Eigenvalue)를 사상(mapping)에 의하여 측정된다. 개루프의 피드백 단자 전압을 가지는 여자계와 개회로(open circuit)을 지나는 동기기의 일반해(Typical root)의 위치를 그림 5에 나타내었다.

근궤적선도(Root locus plot)은 루프 이득(Loop gain)이 0에서 무한대로 변할때의 페루프 폴(pole)의 위치를 일반적으로 사상(map)한다. 페루프계의 폴(pole)은 이득 값 K의 변화를 사상(map)한다. 그림5와 6은 그림1의 단순화된 것보다 더 복잡하며, 대표적인 전달 함수를 나타낸다.

#### 2.1.5 소신호 동작 지표.

여자계와 동기기의 소신호 동작 지표의 전형적인 값의 범위를 표1에 나타내었다. 이 데이터들은 동기기 시정수의 극한 범위(최대치에서 최소치)와 여자계 시정수를 이용하여 수치적으로 나온것이다.

이러한 지표들은 상대적인 응답과 제어 동작의 안정도를 측정한 것이다. 대부분의 피드백 제어 시스템에서, 지표들은 출력이 제어 변수인 시스템 요소의 동작 특성에 의하여 결정된다. 여자 제어계의 경우, 동기기의 동적 특성(필드 시정수등)은 결정적 요소들이다.

소신호 동적 성능 지수		
성능 지수 (Performance index)	기호	기대치 범위
여자계 이득 (Excitation system gain)	K	단위당 30에서 800
이득 여유도 (Gain margin)	$G_m$	2dB에서 20dB
위상 여유도 (Phase margin)	$\Phi_m$	20°에서 80°
진폭 최대치 응답	$M_p$	1.0에서 4.0 (0dB에서 12dB)
대역폭(Bandwidth)	$\omega_b$	2에서 75 rads <sup>-1</sup>
오버슈트(Overshoot)	d	0%에서 80%
상승 시간(Rise time)	$t_r$	0.05에서 2.5s
안정 시간(Setting time)	$t_s$	0.2에서 10.0s
제동비(Damping ratio)	$\xi$	0에서 1

표 1 - 여자 제어계의 전형적 범위.

#### 2.2 시스템 안정도를 위한 여자 제어 영향

여자계의 여자 제어는 동기기의 단자 전압, 유효, 무효 전류, 필드 전류, 주파수 속도등

에 의하여 전력계와 연결된다. 이러한 복잡한 다중 루프(multi-loop), 다중 변수, 피드백 제어계의 동작은 그의 인자에 의하여 변화한다.

이러한 복잡한 시스템을 평가하기 위한 접근 방법은 상태공간(State-space) 기법을 사용하여 시스템을 모델링하는 법과 여자계, 동기기, 전력계의 관심있는 인자들의 범위에 대한 특성치(eigenvalue)를 계산하는 것이다. 상태공간(State-space)모델은 알고있는 전력 설비와 전력계 인자, 동작 조건과 이용할 수 있으면 실험한 주파수 응답 데이터를 사용하여 유도한다. 특성치(eigenvalue)의 계산은 선형계에 대한 시스템 안정도를 직접적으로 제시하며 대신호의 연구에서 필요한 선택된 인자들의 평가 전의 유효한 시작 단계를 제공한다. 상태공간(State-space) 모델을 이용하는 다른 지표들은 규정된 범주들을 만족하기 위한 다중 루프 제어 시스템(multi-loop control system)의 능력의 측정치로써 제시한다.

개회로(Open-circuit) 동기기는 계자 회로(Field circuit)의 시정수에 대한 전달 특성을 갖는다. 전력계에 연결될때, 추가적인 커플링(coupling)이 관성, 토크(torque), 회전자 각(rotor angle)과 함께 발생된다. 회전자 각(rotor angle)의 증가(부하)는 단자 전압 전달 함수에서 필드 전압내에서 발생하는 공명의 최대치(resonant peak)를 발생시킨다. 이러한 것들은 복소 주파수 영역에서의 복소제동 폴(damped complex pole)에 상응한다. 기기의 특성이 큰 회전자 각(rotor angle)에서 동작하면, 전압 정류기를 가진 페루프(closed-loop) 피드백 제어 시스템에서 동작시 안정도의 손실과 발진을 일으킨다.

여자계의 높은 이득과 빠른 응답은 전력계의 요란동안 토크(torque)의 동기화를 크게할 수 있다. 이와같은 특성들은 동기기가 큰 회전자 각(rotor angle)에서 동작할 시에 음의 제동(Negative damping)의 원천이 된다. 종종 전력계 안정기와 같은 안정도의 제한을 증가시키기 위한 추가의 제어가 필요하다.

발진은 일반적으로 전력계에서 관찰되는 주파수와 모드(mode)에 따라 세가지의 큰 범주로 구분할 수 있다.

#### 2.2.1 지역(Local) 장비간(inter-machine) 발진.

이러한 발진은 전형적으로 전력 설비나 전력 설비인근에서의 두개 이상의 동기기를 포함하며, 서로 반대 방향으로, 대체로 1.5 Hz에서 3 Hz로, 회전하는 것을 포함한다.

#### 2.2.2 시스템 발진에 대한 지역 장비(Local machine).

이러한 발진은 일반적으로 발전소에서 하나이상의 동기기가 상대적으로 큰 전력시스템과 부하 센터(centre)를 0.7Hz에서 3.0Hz의 주파수 범위를 지니며, 반대로 회전하는 것을 포함한다. 이러한 발진은 높은 리액턴스 전송 시스템(High reactance transmission system)을 가지는 설비의 부하가 클 때 문제를 일으킨다.

#### 2.2.3 시스템간(Inter-system) 발진.

이러한 발진은 일반적으로 전력계의 한 부분에서의 많은 동기기의 조합이 다른 시스템의 장비와 반대로 회전하는 것을 포함한다. 면적간(Interarea) 발진은 일반적으로 낮은 주파수( $\leq 1.0$ Hz)이다

#### 2.3 전력계 안정기의 응용

전력시스템 안정기는 동기기로 구성된 복잡한 시스템이 좀 더 양의 제동(Positive

damping)을 가지기 위한 추가의 입력 신호를 이용한다. 전력계 안정기는 전력계의 요란으로부터 발생하는 회전자 발진을 고 이득과 여자제어의 응답과 높은 회전자 각 (rotor angle)의 원하지 않는 특성을 보상함으로써 회전자 발진의 제동(damping)을 개선한다. 전력계 안정기 루프(loop)의 필터는 축(shaft)의 마모와 심각한 기계적인 손상의 원인이되는 비틀림 주파수(torsional frequency)와 비틀림 발진(torsional oscillation)의 자극을 피하기 위하여 요구된다.

전력계 안정기의 두 가지 예를 그림 7과 8에 나타내었다.

### 3. 대신호 동작

#### 3.1 일반적인 것들

대신호 동작은 비선형성이 중요해질 만큼 큰 신호의 응답이다.

대신호 동작 범주의 목적은 동기기 고정자 전압, 동기기 고정자 전류와 유도된 동기기 계자(Field) 전류내의 많은 변화를 포함하는 급격한 천이에 대해 여자계의 성능을 측정하기 위한 수단을 제공하기 위한 것이다. 동기기의 성능을 향상하기 위한 여자계의 능력을 평가하기 위해서 범주는 현실적인 전력 시스템의 요란(disturbance)하에서의 동작을 반영하여야 한다.

대신호 동작을 평가하는 범주로는 천이 응답, 정상 전류와 전압, 시간 응답에서 유도되는 가명 응답등이 있다. 이러한 인자는 K60034-16-1에서 정의하였다: 이들 인자의 유용성은 후에 더 논의될 것이다.

#### 3.2 대신호 동작의 특징

##### 3.2.1 일반적인 것들.

다음의 대신호 동작의 범주는 응용 가능한 여자계와 그의 구성 요소들과 관련이 있다. 설계와, 제조 그리고 여자 장비의 응용에서 최고의 유연성을 허용하기 위해서, 약간의 동작 범주는 규정된 조건하에서 정의된다. 응용가능한 조건은 제조업체 또는 대부분의 경우 장비 구입자에 의하여 규정된다.

계자(Field) 전류와 계자(Field) 전압의 예에 대한 몇 가지의 다음 고려사항의 일반적인 특성은 다른 적용 예에 대해 다른 목적을 달성하는데 사용될 수 있다. 결과적으로, 잘못된 응용 예에 사용되면 혼란스런 결과를 야기할 수 있다. 규정하'란 절은 적용 예에 부합하게란 의미로 사용되고 있음을 주의하여야 한다.

##### 3.2.2 정상 전류

과부하에 견디거나 요란을 유지할 수 있을때, 정상 전류는 최대 출력 전류와 요구되는 지속 시간(time duration)을 정의하는 여자계 열적 듀티(duty)에 기초를 둔다. 어떤 응용예에는,

정상 전류는 동기가 규정한 시간내에 정상상태(steady-state) 3상 단락회로(short-circuit) 전류의 규정한 값을 생산하는 요구에 의하여 정의된다.

높은 정상 전압이 강제로 인가(forcing action)될때, 여자계 전류 제어 회로는 실제적인 정상 전류를 정의한다.

### 3.2.3 정상 전압

정상 전압은 정상 전류 값에 대한 계자(field) 전류를 얻기 위한 여자계의 인가 능력을 평가 하는데 사용된다. 정상 전압은 계자(field) 전류를 정격 부하 계자 전류에서 정상 전류로 인가하기 위해 사용되는 전압의 지표를 제공한다. 정상 전압과 정격 부하 계자 전압의 차가 클수록, 인가 능력은 커지게 된다. 높은 정상 전압은 천이 안정도를 높이게 된다.

동기기 전압과 전류에 의해 공급되는 전압원과 복합적인 전원에 대해서, 전력계의 요란과 여자 제어계의 규정한 설계 인자들은 여자계 출력에 영향을 준다. 이러한 시스템에 대해, 정상 전압은 규정한 공급 전압과 전류에 기준 하여 정의한다.

어떠한 여자계는 정상 전압이 양과 음의 값을 지닐 수 있다. 또한, 특별한 응용에에서는, 여자계는 동기에 대해 양과 음의 필드 전류를 공급하도록 요구될 수도 있다.

### 3.2.4 여자계 공칭 응답.

공칭 응답(K60034-16-1의 2.18)은 여자계의 비교를 허용하고, 천이 요란에 응답하기 위한 여자계의 능력에 관련된 특성으로써 사용된다. 1/2초 간격이 여자계가 첫번째 스윙(swing), 천이 안정도에 기여하는 가명응답과 관련하여 선택된다.

공칭 응답을 결정하는 시작 점은 요란이 시작되는 시간이다; 즉, 여자계 공칭 응답은 현재에 있을 수 있는 지연 시간을 포함하여야 한다.

공칭 응답은 최초에 동기의 정격 계자(Field) 전압에서의 여자계의 동작에 의하여 결정된다, 그후 여자계 전압이 정상(ceiling)으로 가기 위하여는 급격히 단자 전압 입력 조건이 필요하게 된다. 만약 공칭 응답이 다른 형태의 여자계와 비교되며, 다른 형태의 제한기, 또는 동기기 인더턴스의 값을 잘못 사용한다면, 잘못된 결과를 초래할 수 있다.

### 3.2.5 천이 응답.

대신호 동작의 많은 범주가 단일 값을 가지고 있다. 여자계 정상 전압과 공칭 응답이 두 가지 예이다. 이러한 범주들은 다른 시스템의 능력을 비교 하는데 유용하며, 제조자가 규정에서 요구하는데로 검증하는데 사용하는 설계 범주로 가치가 있다. 그러나 이러한 단일 값은 모델 인자의 선택과 검증에 대해 모든 예에 충분한 정보를 제공할 수 없다. 다른 모델 인자들의 조합의 경우 모델내의 특별한 응답을 얻을 수 있다. 비록 천이 응답이 종종 소신호 해석에 사용되지만, 대신호 동작의 평가, 특히 개선과 컴퓨터 모델의 검증을 포함하는

응용분야에는 유용한 인자이다.

대신호 천이 응답은 시간의 함수로써 평가되는 요소의 입력과 출력 변수에 대한 시간 응답이다. 비록 천이 응답이 일반적으로 입력 변수의 스텝(step) 변화를 하지만, 입력 변수에 있어서, 출력에서의 응답이 유용한 결과를 가지는 대신호 응답으로써 분류되기 위해서는, 그 변화는 충분히 크고 빨라야만 한다.

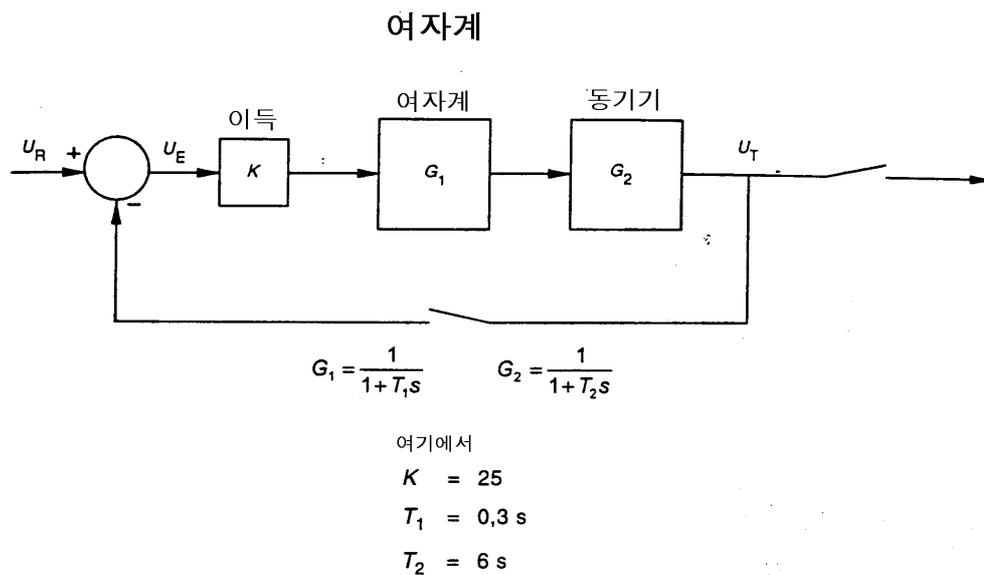
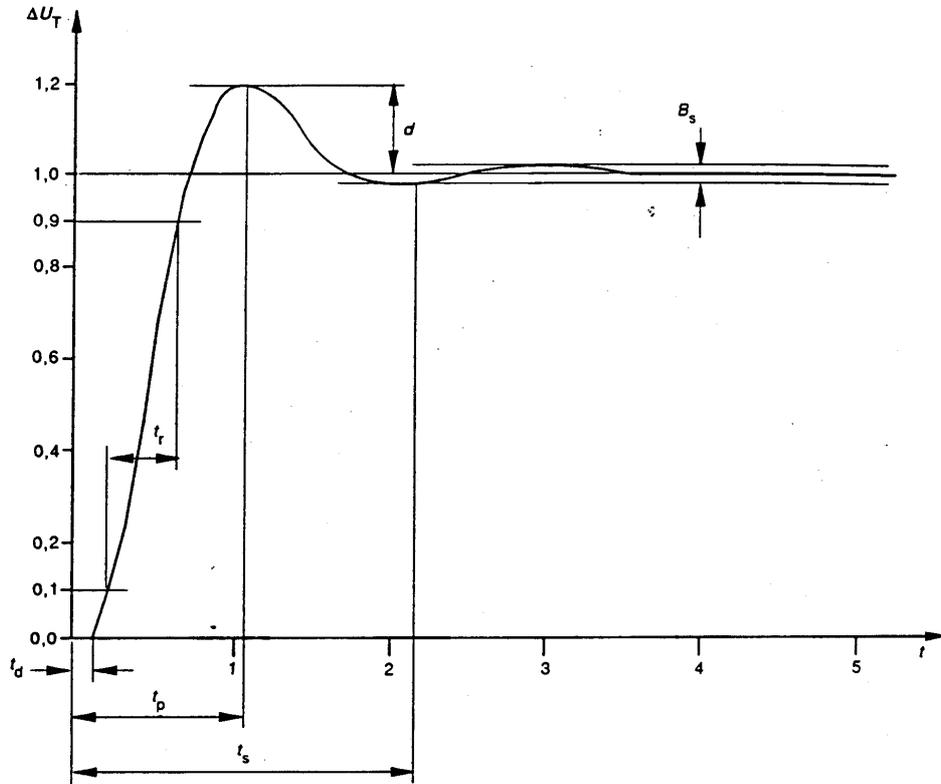


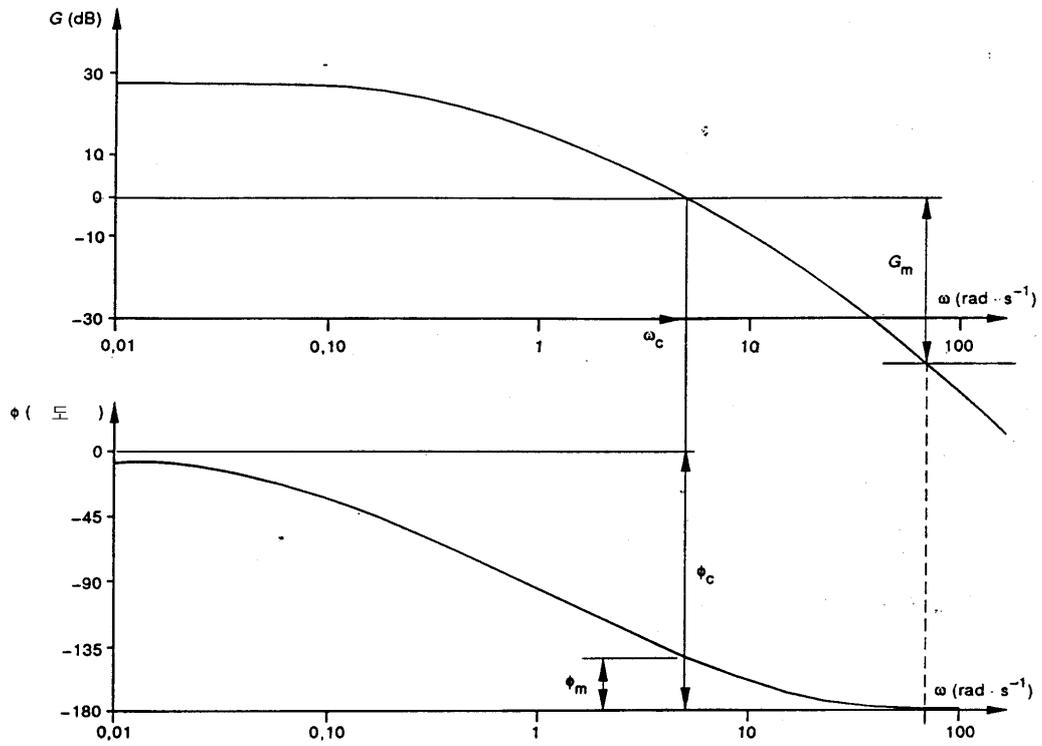
그림 1. 단순화된 여자계와 동기기



성능지수

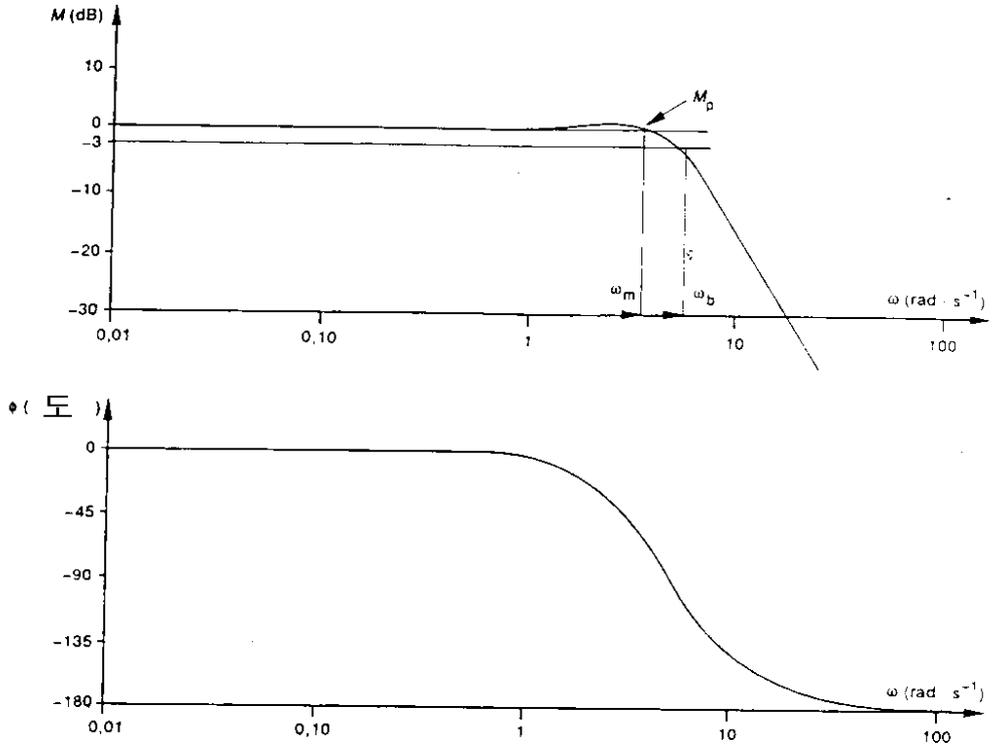
- $t_r$  = 상승 시간
- $d$  = 오버슈트
- $t_s$  = 안정 시간
- $B_s$  = 안정 시간에 대한 규정된 밴드
- $t_d$  = 지연 시간
- $t_p$  = 최대치 도달 시간

그림 2. 스텝(Step)변화에 따른 단순화된 여자 제어계의 시간 응답.



성능 지수  
 $\phi_m = \text{위상 마진} = (180 - |\phi_c|) @ \omega_c$   
 $G_m = \text{이득 마진} = (0 - G) @ \phi = -180^\circ$   
 $\omega_c = \text{단위 이득}(G=0)\text{에서의 교차 주파수}$

그림 3. 동기기 개회로(Open-circuit)의 단순화된 여자 제어계의 개루프(Open-loop) 주파수 응답.



**성능 지수**

- $M_p$  = 진폭 응답의 최대치
- $\omega_m$  =  $M_p$ 가 발생하는 주파수
- $\omega_b$  = 대역폭( $M=-3$ dB)

그림 4. 동기기 개회로(Open-circuit)의 단순화된 여자 제어시스템의 폐루프(Closed-loop) 주파수 응답.

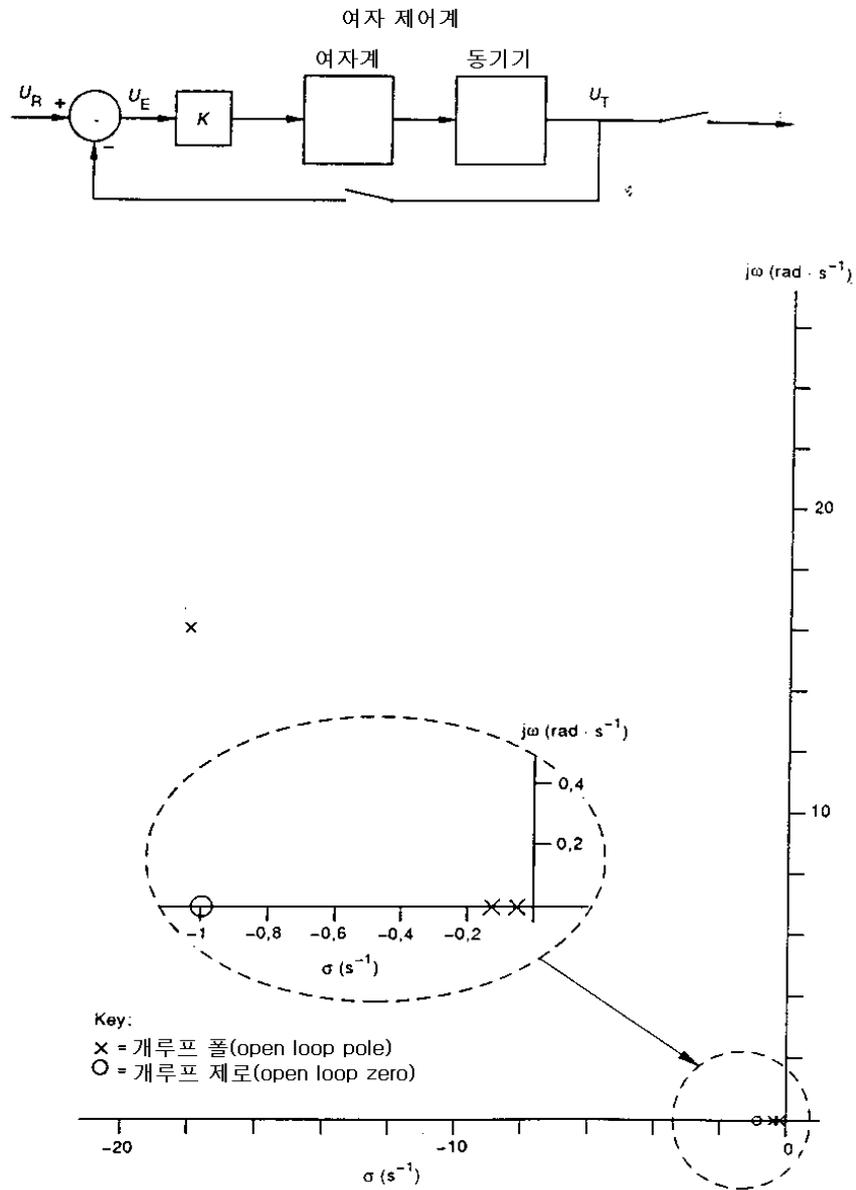


그림 5. 동기기 개회로(Open-circuit)의 단순화된 여자 제어시스템의 폴/제로 선도(pole/zero plot)개루프(Open-loop)

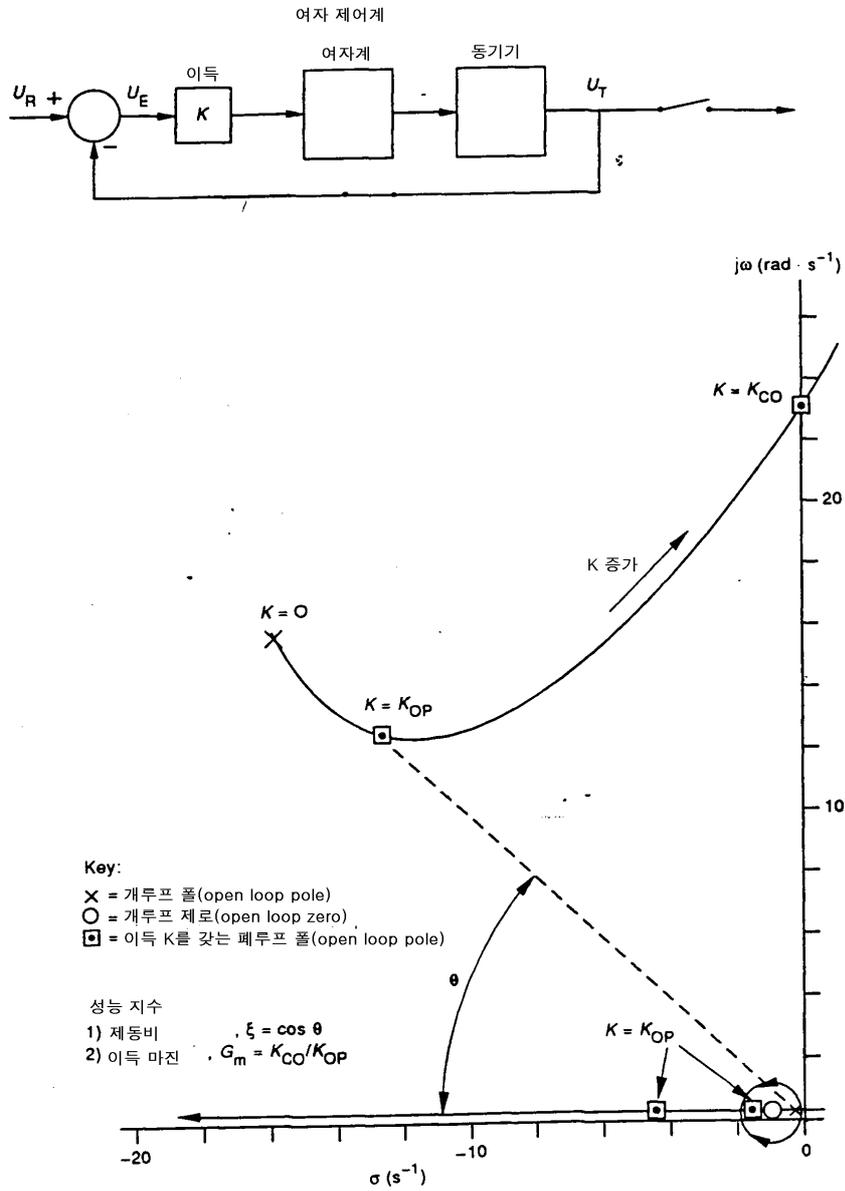


그림 6. 루프 이득(Loop gain)  $K$ 의 변화에 따른 동기기 개회로(Open-circuit)의 단순화된 여자 제어계의 근궤적 선도(root locus plot), 폐루프(Closed-loop)

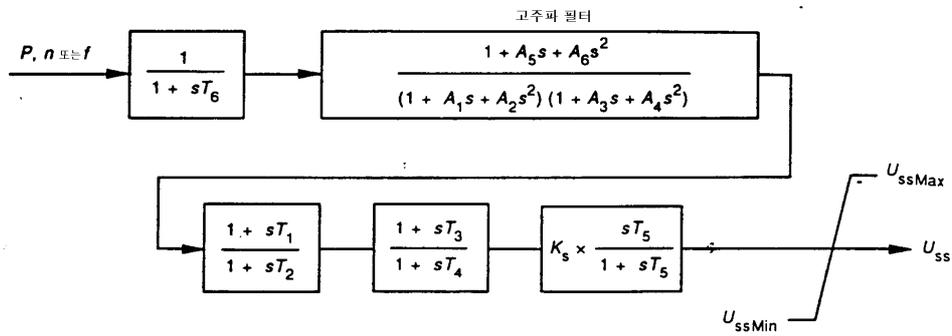


그림 7. 전력계 안정기의 전달 함수

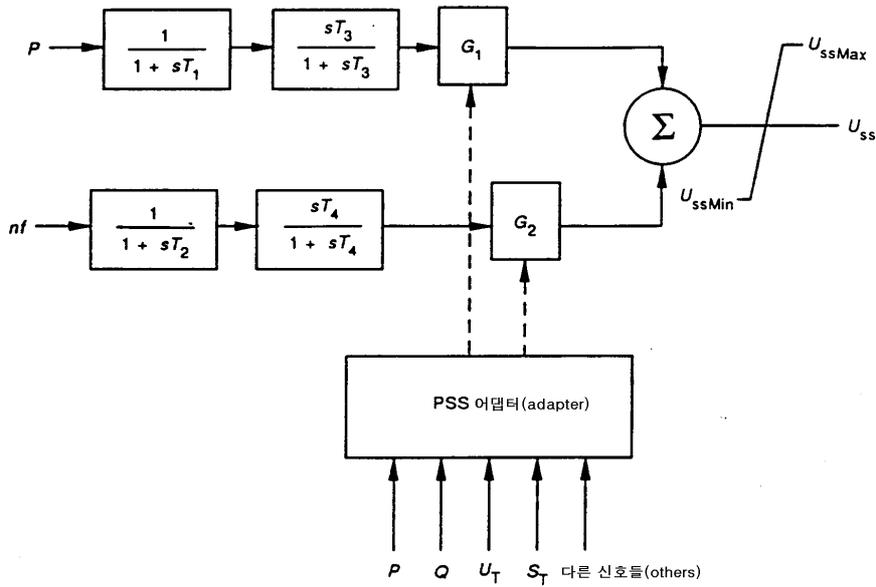


그림 8. 선택적인 전력계 안정기의 전달 함수