

발전기/제어계의 모델링과 안정도 해석

한국전기연구원

문영환

발표 내용

1. 전력계통의 Dynamic 현상과 해석
2. 동기발전기의 모델링
3. 발전기 제어시스템의 모델링
 - AVR-여자시스템
 - 조속기-터빈시스템
 - 전력계통안정화장치 (PSS)

전력시스템의 **Dynamic** 현상과 해석

전력계통의 과도현상과 해석기법

시간 영역	시간 (초) 10 ⁻⁴ 10 ⁻³ 10 ⁻² 10 ⁻¹ 1 10 ¹ 10 ² 10 ³
계통 현상	전력계통 현상 Transient Overvoltages, Surges Harmonics, Resonances, Temporary overvoltages 정상상태 운전조건 Electromechanical oscillations Inter-area oscillations
상태변수	전력계통 해석 TOOL
실시간 3상 순시치	완전 디지털 전력계통 시뮬레이터 하이브리드 전력계통 시뮬레이터 Traditional TNA
비실시간 3상 순시치	Electromagnetic transients and electromechanical combined simulation program
비실시간 정상치 평형3상/단상	고조파 분석 프로그램 조류해석, 고장해석 프로그램 과도안정도 프로그램, 고유치해석 프로그램 장시간 전압안정도 프로그램

전력계통의 해석

- 정상상태 계산

정상 운전시의 계통 전압과 조류 상황을 계산

- 전력 조류계산 프로그램
- 고장계산 프로그램
- 고조파 계산 프로그램

- 시간영역 시뮬레이션 (실효치 사용)

터빈-발전기 미분방정식을 시간영역에서 풀어 전기기계적 과도안정도를 계산

- 전기기계적 (Electromechanical) 과도 안정도 프로그램 (1 ~ 20 초)
- 장기 (Long-term) 안정도 프로그램 (수 십분)

- 주파수 영역 계산

터빈-발전기 미분방정식을 선형화하여 고유치(Eigenvalue)를 계산

전력계통의 안정도 분류 (Old)

Power System Stability

Angle Stability

-동기화 유지능력
-동기기의 토오크 균형여부

Small-Signal Stability

-발전기/부하변동의 작은 동요
-계통방정식의 선형화

Transient Stability

-대형사고
-1차Swing 비주기성
-10초 이내의 현상

Mid-term Stability

-전압/주파수의 심한 변동
-Fast/Slow 동특성
-수분에 걸친 현상

Long-term Stability

-계통 주파수 일정
-Slow Dynamics
-수십분에 걸친 현상

Voltage Stability

-정상전압 유지능력
-무효전력의 균형여부

Large-Disturbance Voltage Stability

-대형사고
-개폐조작
-ULTC/부하의 동특성
-Relay, 제어기의 협조

Small-Disturbance Voltage Stability

-정상상태 P/Q-V 관계
-안정도마진, Q예비량

Non-Oscillatory Stability

-동기화 토오크의 부족

Oscillatory Stability

-제동토오크의 부족
-제어동작의 불안정

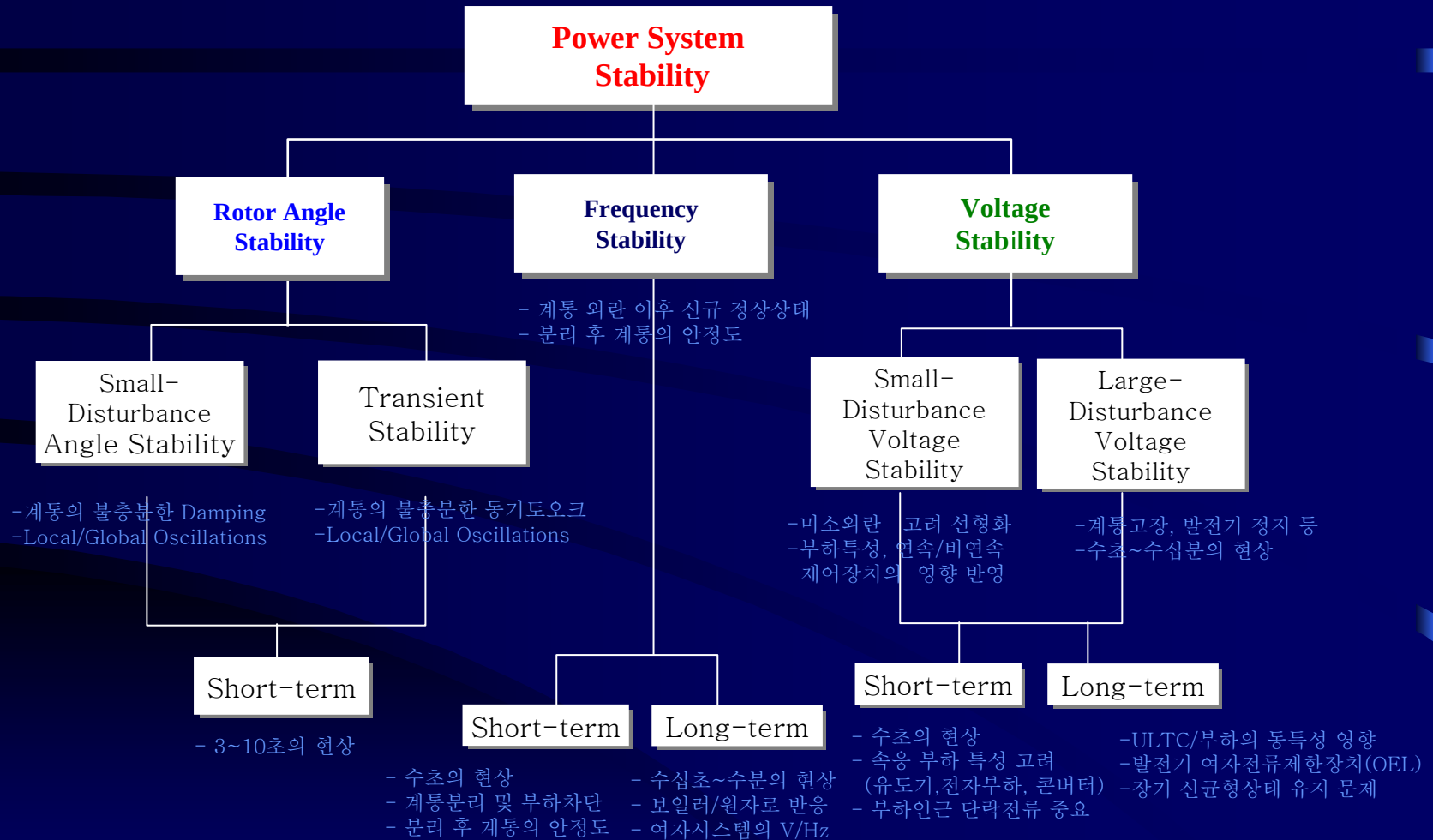
Local Plant Modes

Interarea Modes

Control Modes

Torsional Modes

전력계통의 안정도 분류* (New)



전력계통의 안정도

◆ 전력시스템에 외란이 발생했을 때, 이를 극복하여 새로운 정상 상태로 복귀하는 능력

(1) 위상각 안정도 (Rotor Angle Stability)

(2) 전압 안정도 (Voltage Stability)

(3) 주파수 안정도 (Frequency Stability)

Rotor Angle 안정도

◆ 발전기가 연계계통과 동기상태 유지하려는 능력

(1) 미소외란 안정도

소규모 외란에 대해 동기상태를 유지하려는 능력

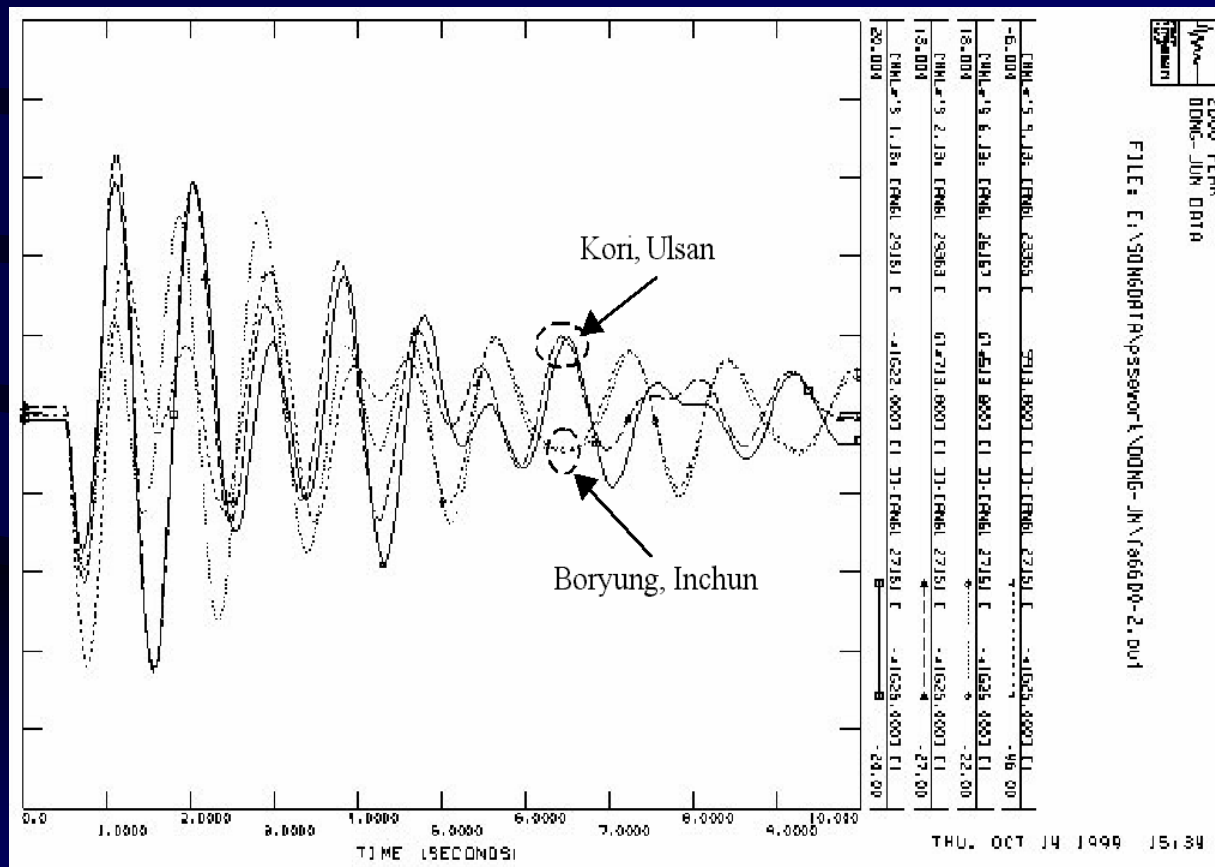
- Low frequency oscillation
- Subsynchronous resonance (SSR)

(2) 과도 안정도

대규모의 외란에 대해 동기상태를 유지하려는 능력

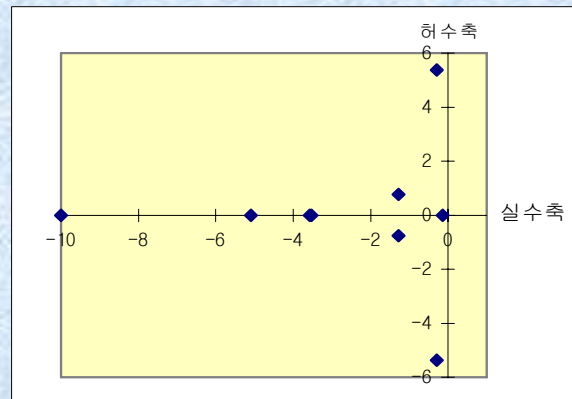
- First swing 불안정 현상
- Multi swing 불안정 현상

과도안정도 해석 예



고유치 해석 예 (미소신호안정도)

MODE	고 유 치	상태 변수	ω_d	ζ
λ_1, λ_2	$-0.2941 \pm j5.3732$	$\Delta \omega$	0.85Hz	0.055
λ_3, λ_4	$-1.2565 \pm j0.76986$	E'_q	0.16Hz	1.265
λ_5	-49.922	V_t		
λ_6	-35.438	Ψ_{kd}		
λ_7	-31.973	Ψ_{kq}		
λ_8	-10	조속기 출력		
λ_9	-5.1145	E'_d		
λ_{10}	-3.5835	V_R		
λ_{11}	-3.5714	Turbine Integrator		
λ_{12}	-0.1333	Governor Integrator		



전압 안정도

- ◆ 정상 운전 조건에서, 또는 외란 발생 후에 모든 계통 모선 전압을 운전 가능한 범위로 유지하는 계통의 능력

(1) 대규모 외란 전압 안정도 (Large-disturbance voltage stability)

고장, 부하 탈락, 발전기 탈락등과 같은 대규모 외란에 대해 계통 전압을 제어할 수 있는 능력

- Short-term voltage stability
- Long-term voltage stability

(2) 미소 외란 전압 안정도 (Small-disturbance voltage stability)

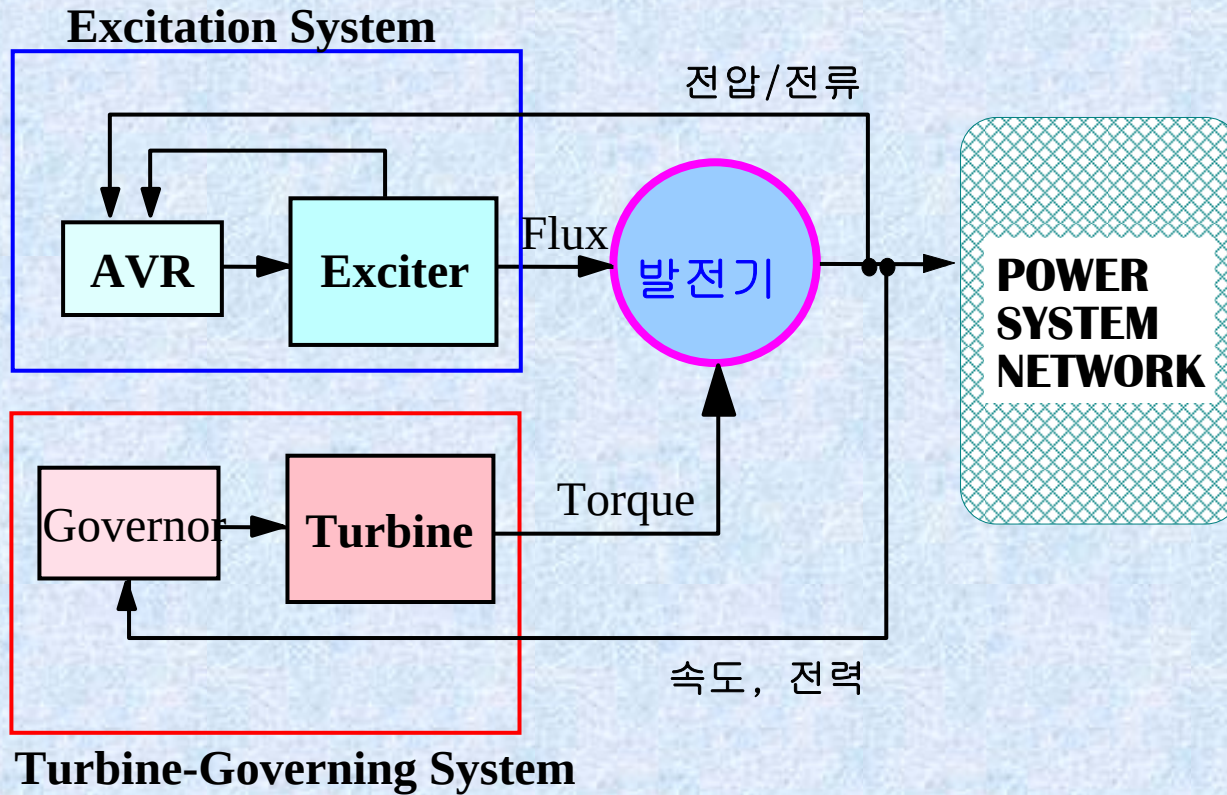
점진적인 부하 변동과 같은 소규모 외란에 대해서 계통전압을 제어할 수 있는 능력

(3) 전압 붕괴 현상

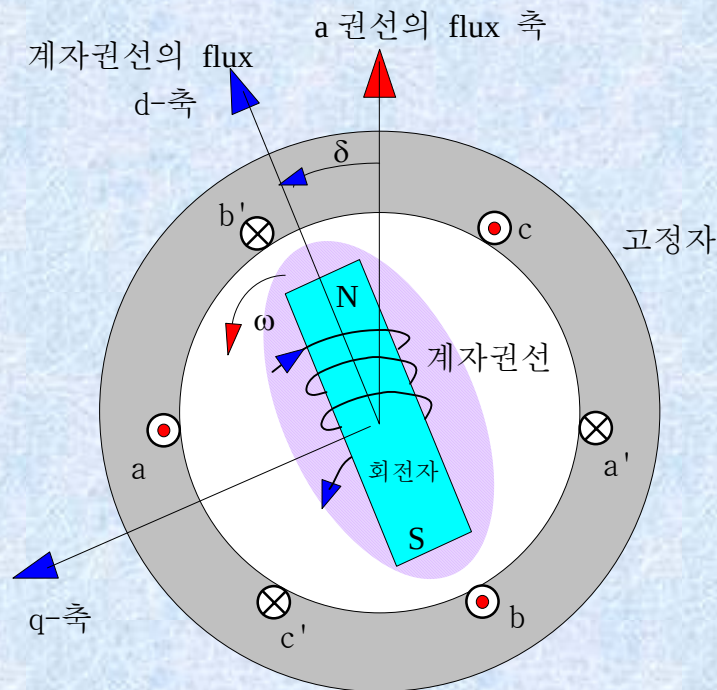
특정 모선에서의 전압 불안정 현상으로 말미암아 지역적인 저전압 현상이 발생하는 일련의 현상

동기발전기의 모델링

발전기 제어시스템 구성

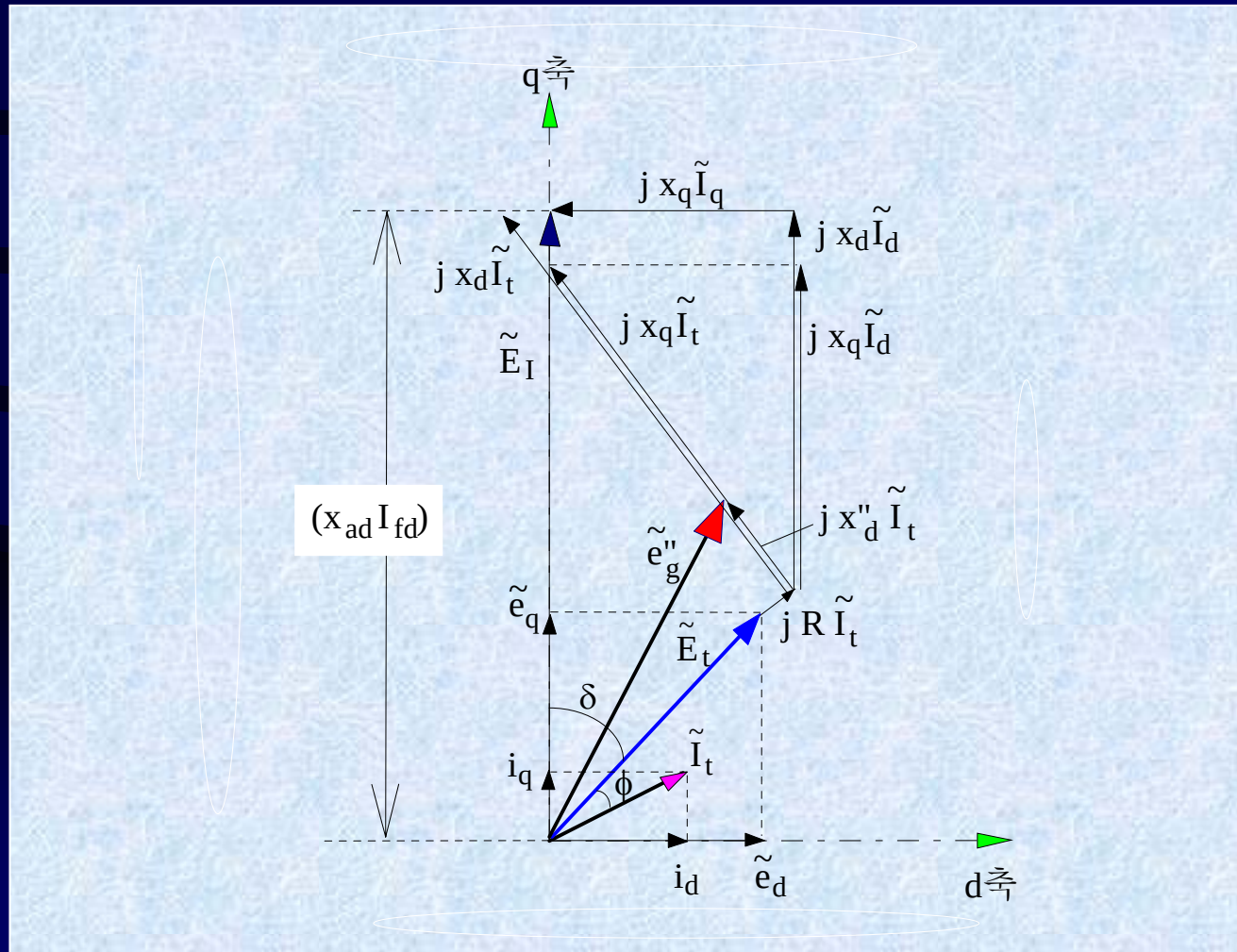


동기발전기의 원리



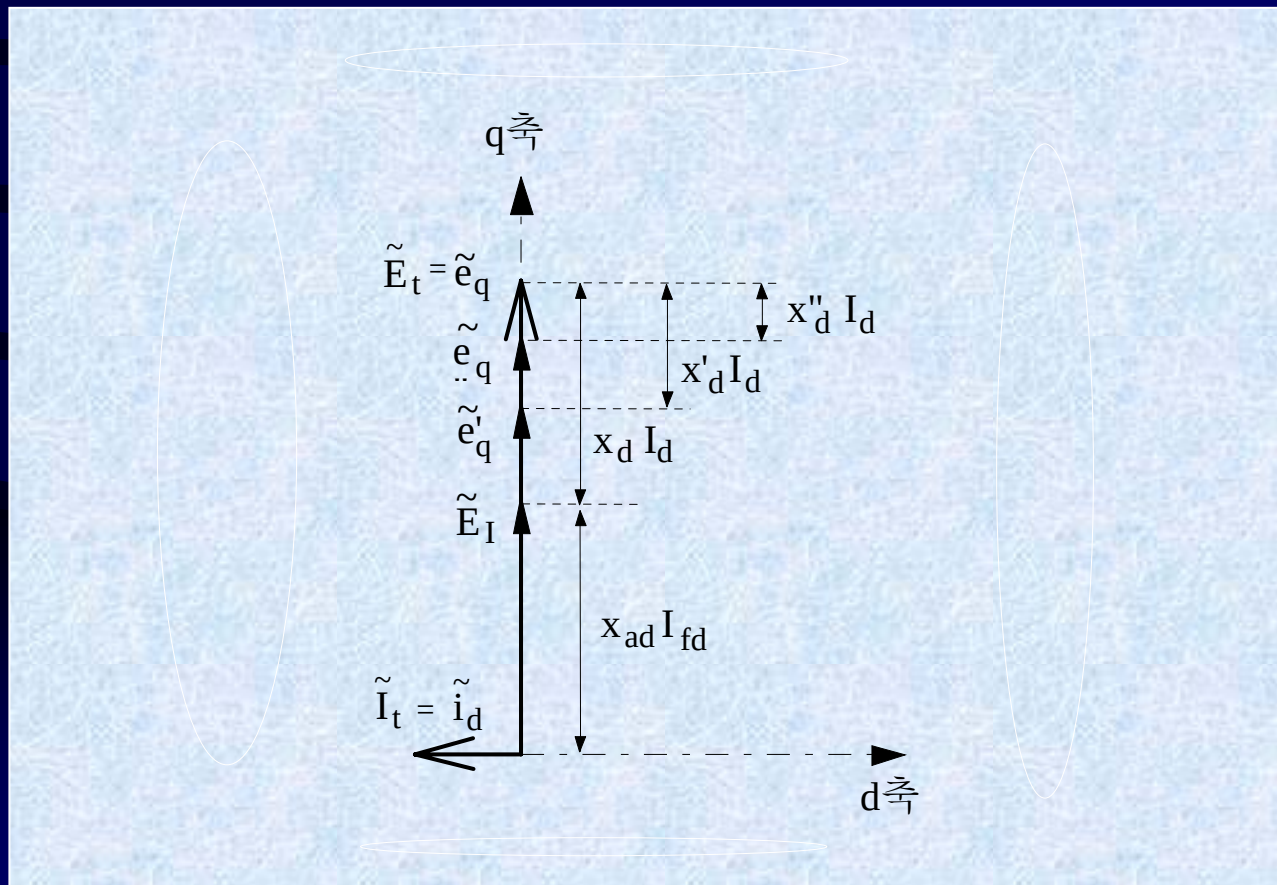
- **지상부하** ⇒ **지상 전기자전류** ⇒ **감자작용** ⇒ **전압저하** ⇒ **여자전류 올림**
- **진상부하** ⇒ **진상 전기자전류** ⇒ **증자작용** ⇒ **전압상승** ⇒ **여자전류 내림**

발전기 단자전압/전류와 내부전압 (정상운전상태)



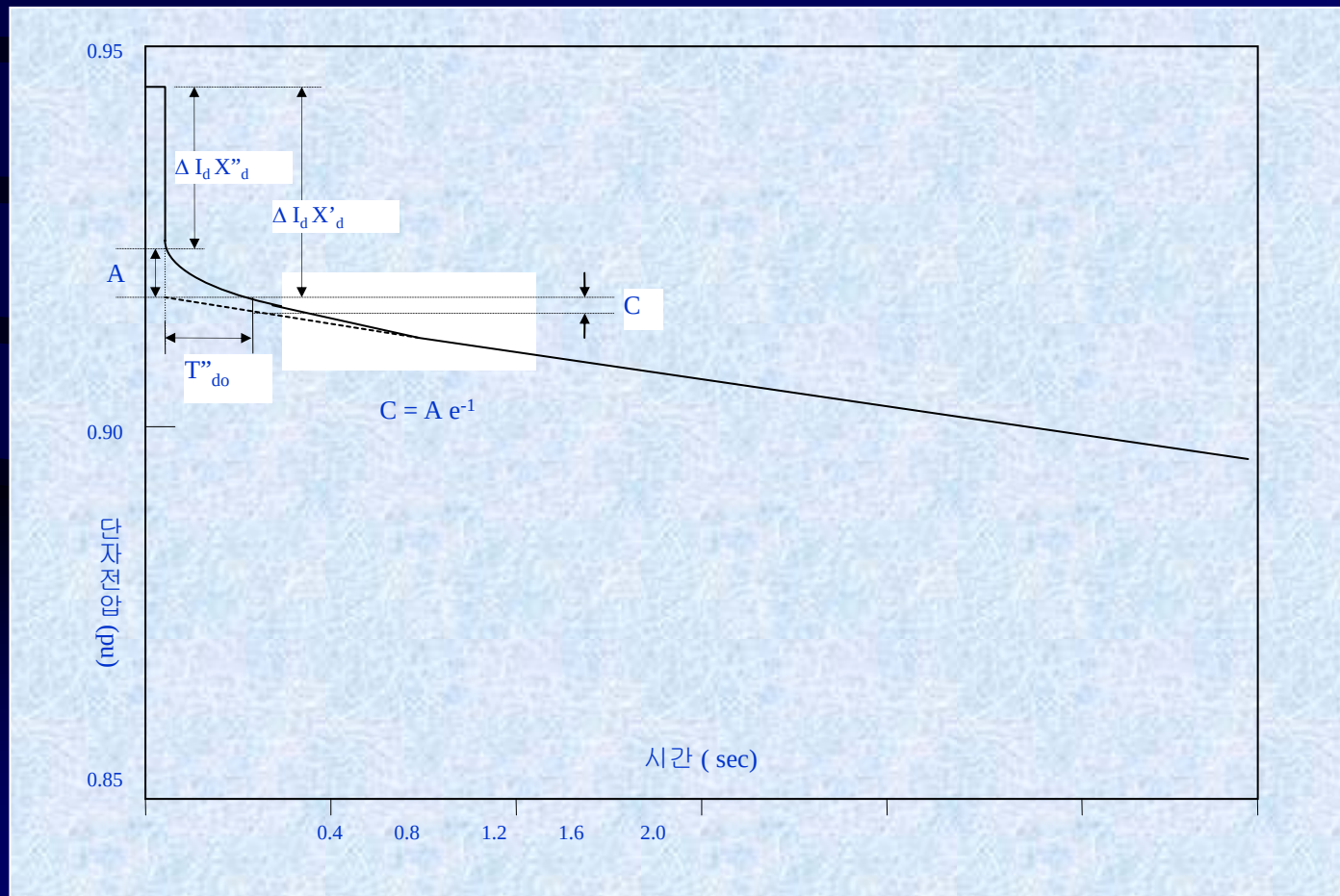
부하 차단시험

- ◆ 발전기 정격부하의 10-20% 차단시 응답특성



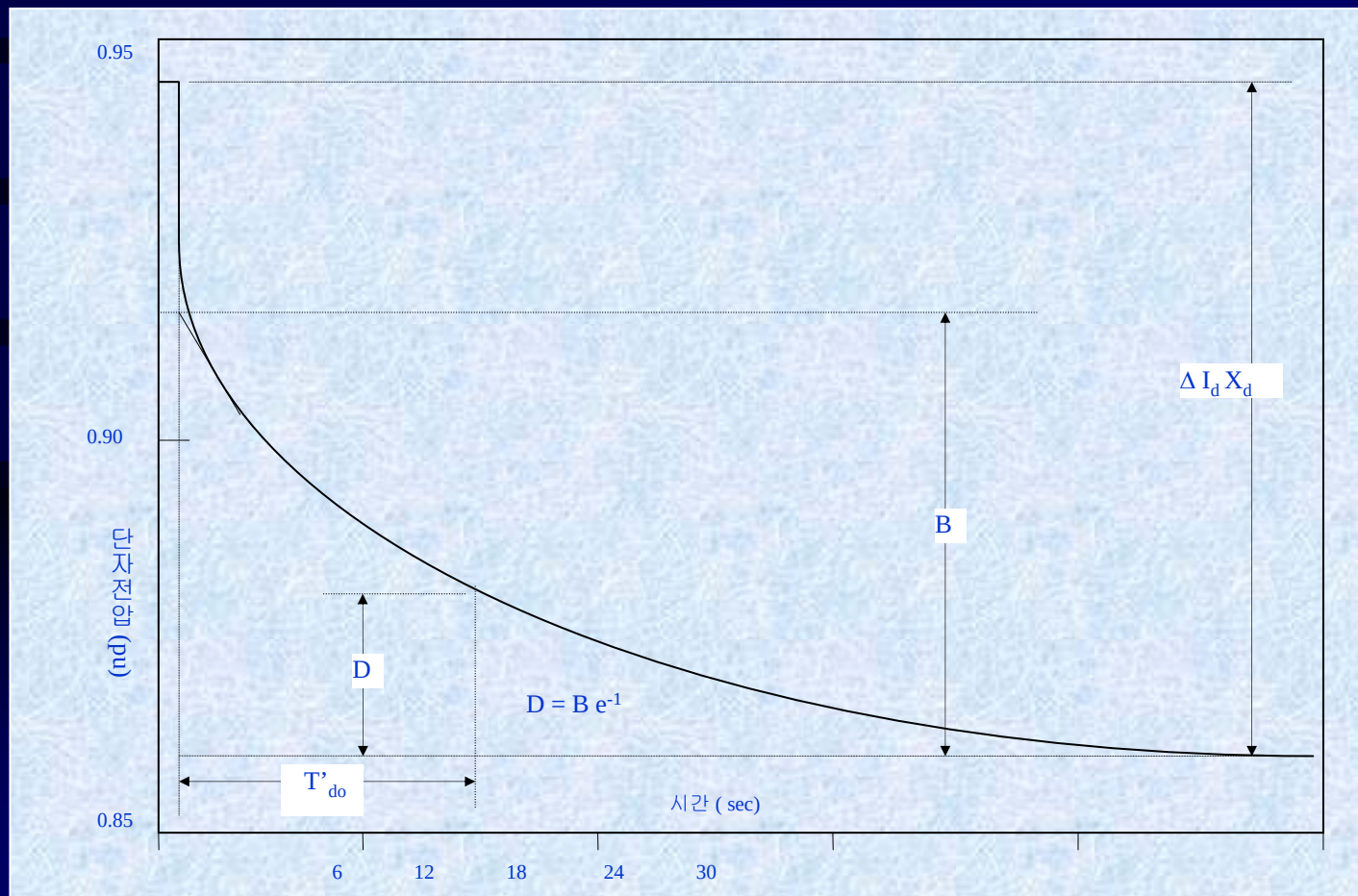
d축 리액턴스와 시정수 결정

- ◆ 순수 진상 무효전력 부하 차단시 발전기 단자전압의 변화 (초기과도 정수)



d축 리액턴스와 시정수 결정 (계속)

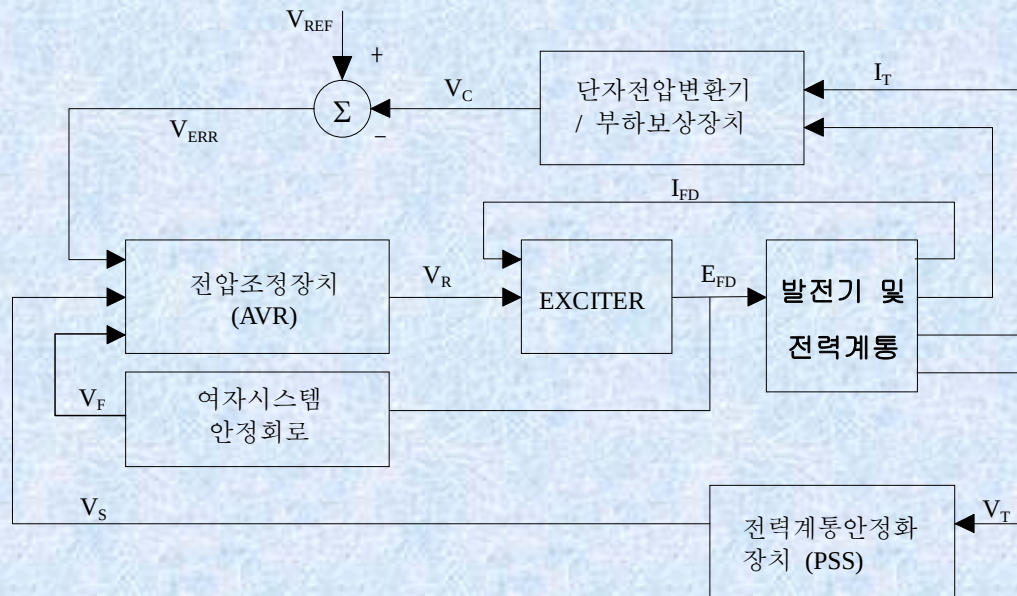
- ◆ 순수 진상 무효전력 부하 차단시 발전기 단자전압의 변화 (과도 정수)



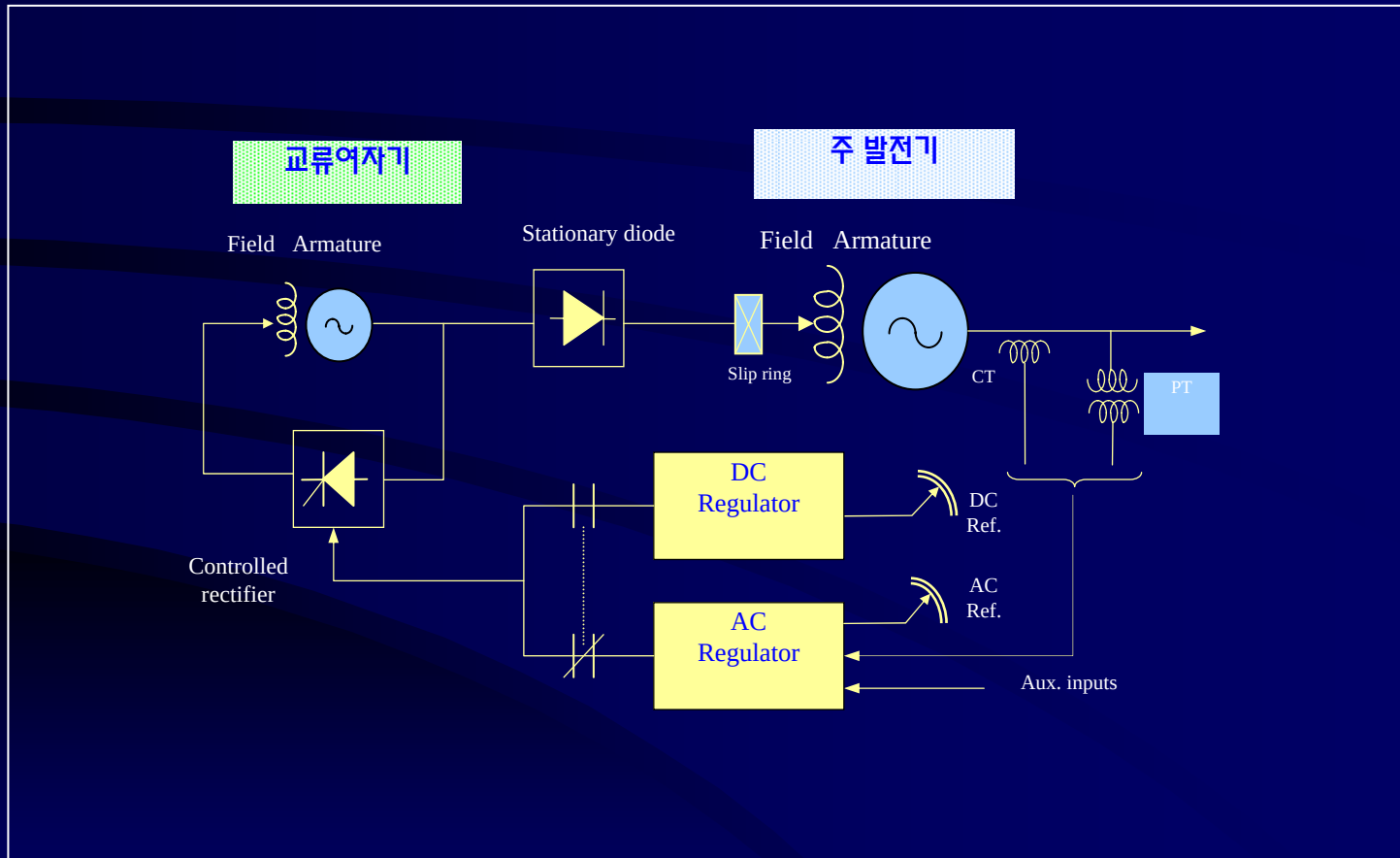
AVR-여자시스템

구성요소

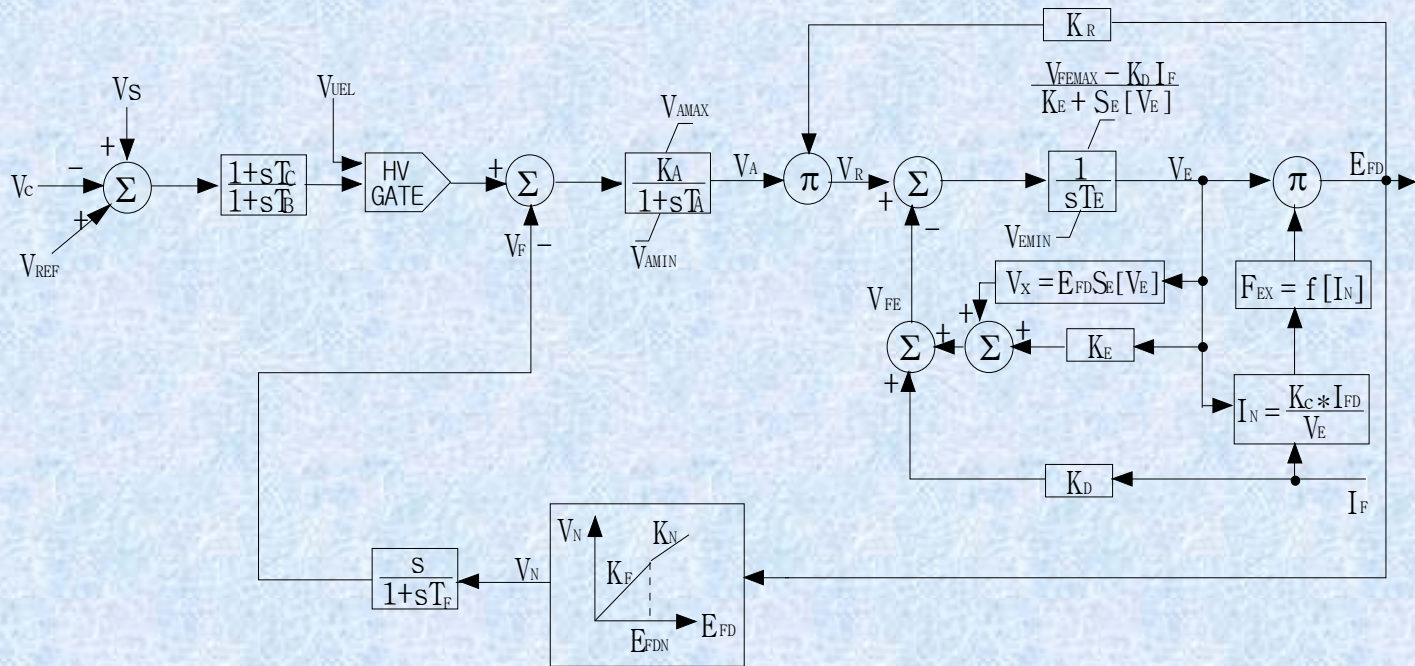
- 단자전압변환기 및 부하보상장치(Terminal Voltage Transducer and Load Compensator)
- 전압조정장치 (Voltage Regulator)
- 여자시스템 안정회로(Excitation System Stabilizing Elements)
- 전력계통안정화장치 (Power System Stabilizer)



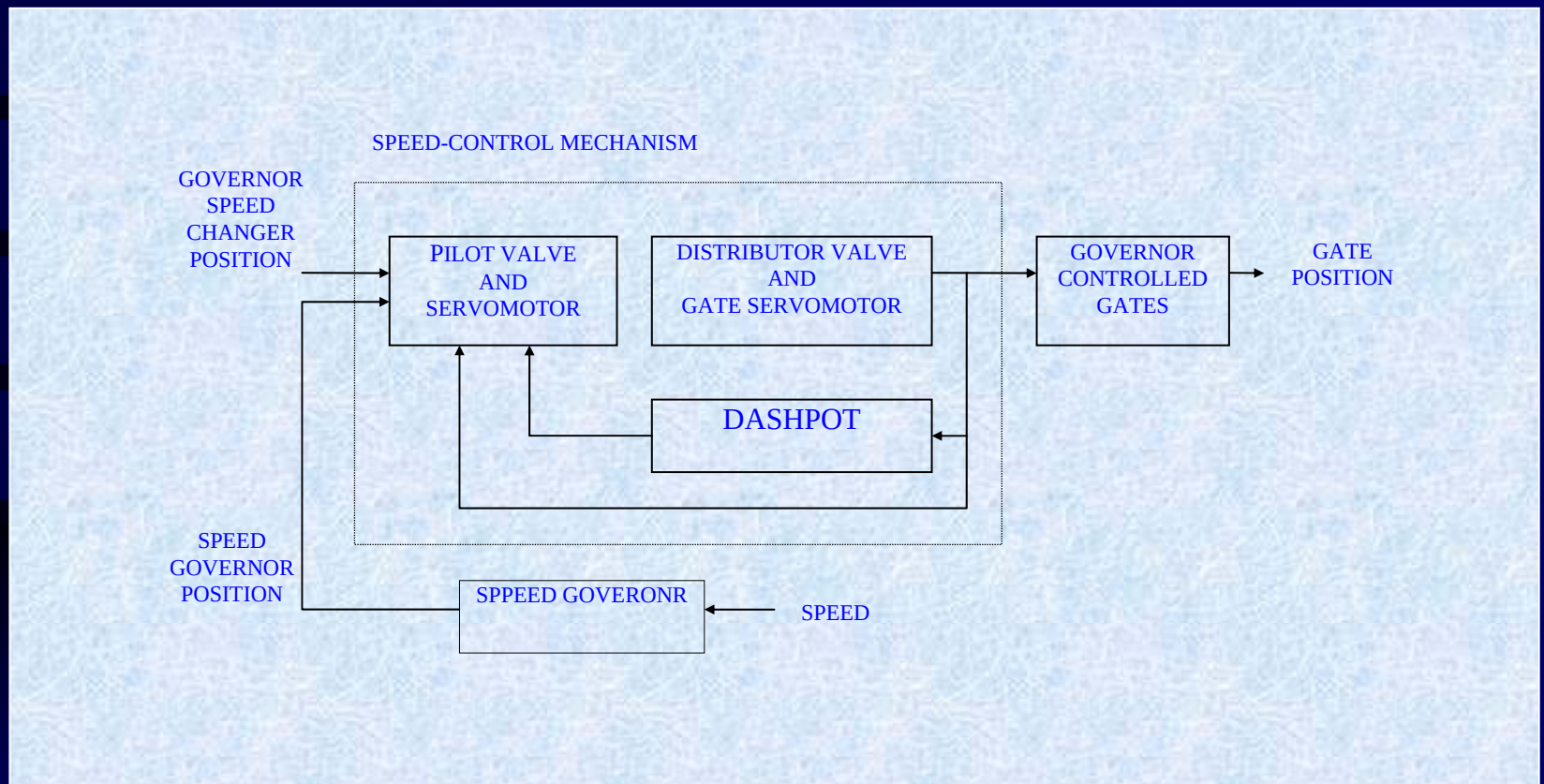
교류 여자제어시스템



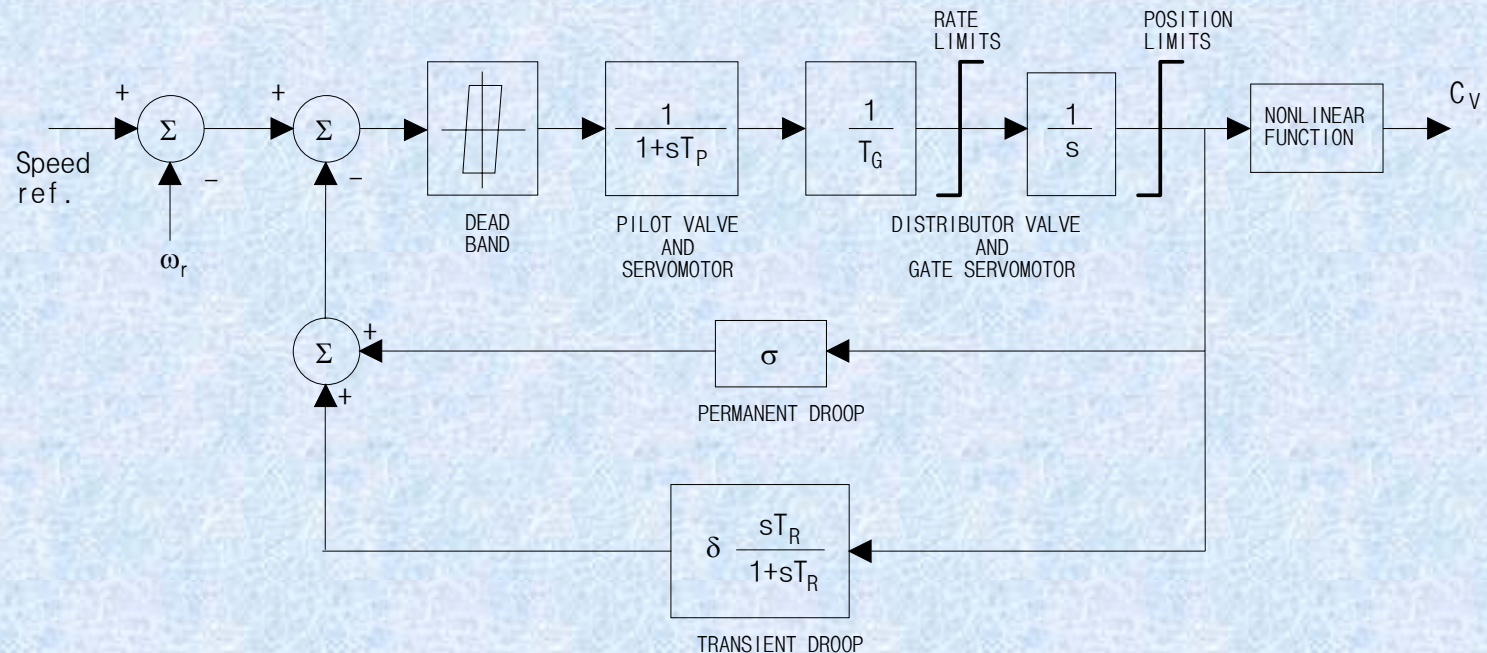
교류여자시스템 모델



수력 발전기 조속기-터빈 제어시스템



기계유압식 조속기-터빈 모델

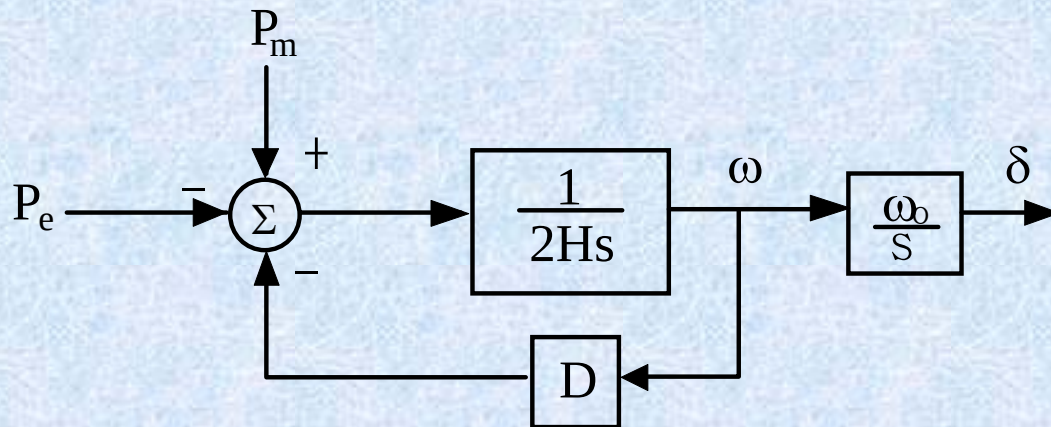


동기발전기의 모델링

(1) 動搖 方程式 (Swing Equations)

$$\frac{d^2}{dt^2} \delta = \frac{\omega_0}{2H} (T_m - T_e - D\omega)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \delta \approx \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e - D\omega)$$



동기발전기의 모델링

(2) 磁束鎖交數 方程式 (Flux Linkage Equations)

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{a1d} i_{1d}$$

$$\psi_{fd} = -L_{afd} i_d + L_{ffd} i_{fd} + L_{f1d} i_{1d}$$

$$\psi_{1d} = -L_{a1d} i_d + L_{f1d} i_{fd} + L_{11d} i_{1d}$$

$$\psi_q = -L_q i_q + L_{a1q} i_{1q} + L_{a2q} i_{2q}$$

$$\psi_{1q} = -L_{a1q} i_q + L_{11q} i_{1q} + L_{12q} i_{2q}$$

$$\psi_{2q} = -L_{a2q} i_q + L_{12q} i_{1q} + L_{22q} i_{2q}$$

동기발전기의 모델링

(3) 電壓 方程式 (Voltage Equations)

$$e_d = \frac{d}{dt} \psi_d - \psi_q \left(\frac{d}{dt} \Theta \right) - R_a i_d$$

$$e_{fd} = \frac{d}{dt} \psi_{fd} + R_{fd} i_{fd}$$

$$0 = \frac{d}{dt} \psi_{1d} + R_{1d} i_{1d}$$

$$e_q = \frac{d}{dt} \psi_q + \psi_d \left(\frac{d}{dt} \Theta \right) - R_a i_q$$

$$0 = \frac{d}{dt} \psi_{1q} + R_{1q} i_{1q}$$

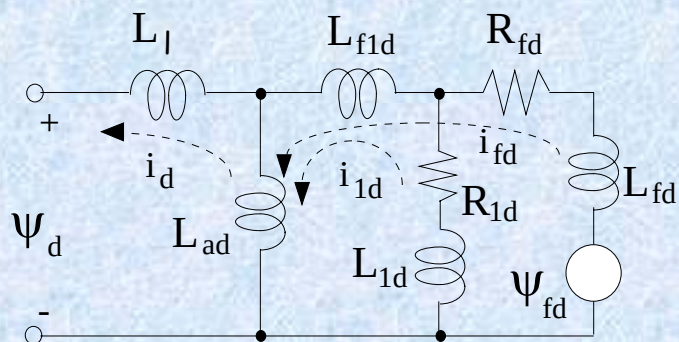
$$0 = \frac{d}{dt} \psi_{2q} + R_{2q} i_{2q}$$

(4) 토크 方程式 (Torque Equation)

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d$$

자속쇄교수 등가회로와 파라메터

(1) 고정자/회전자의 d-축 등가회로



$$L_d = L_\ell + L_{ad} \quad : \text{d-축 동기 인덕턴스}$$

$$L'_d = L_\ell + \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}}} \quad : \text{d-축 과도 인덕턴스}$$

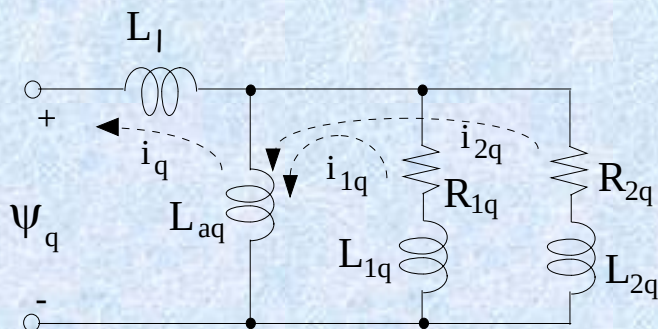
$$L''_d = L_\ell + \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} \quad : \text{d-축 초기과도 인덕턴스}$$

$$T'_{do} = \frac{1}{R_{fd}} (L_{fd} + L_{ad}) \quad : \text{d-축 과도 개방회로 } (R_{1d} \Rightarrow \infty)$$

$$T''_{do} = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}}} \right) : \text{d-축 초기과도 개방회로시정수 } (R_{fd} \Rightarrow 0)$$

자속쇄교수 등가회로와 파라미터

(2) 고정자/회전자의 q-축 등가회로



$$L_q = L_\ell + L_{aq} \quad : \text{q-축 동기 인덕턴스}$$

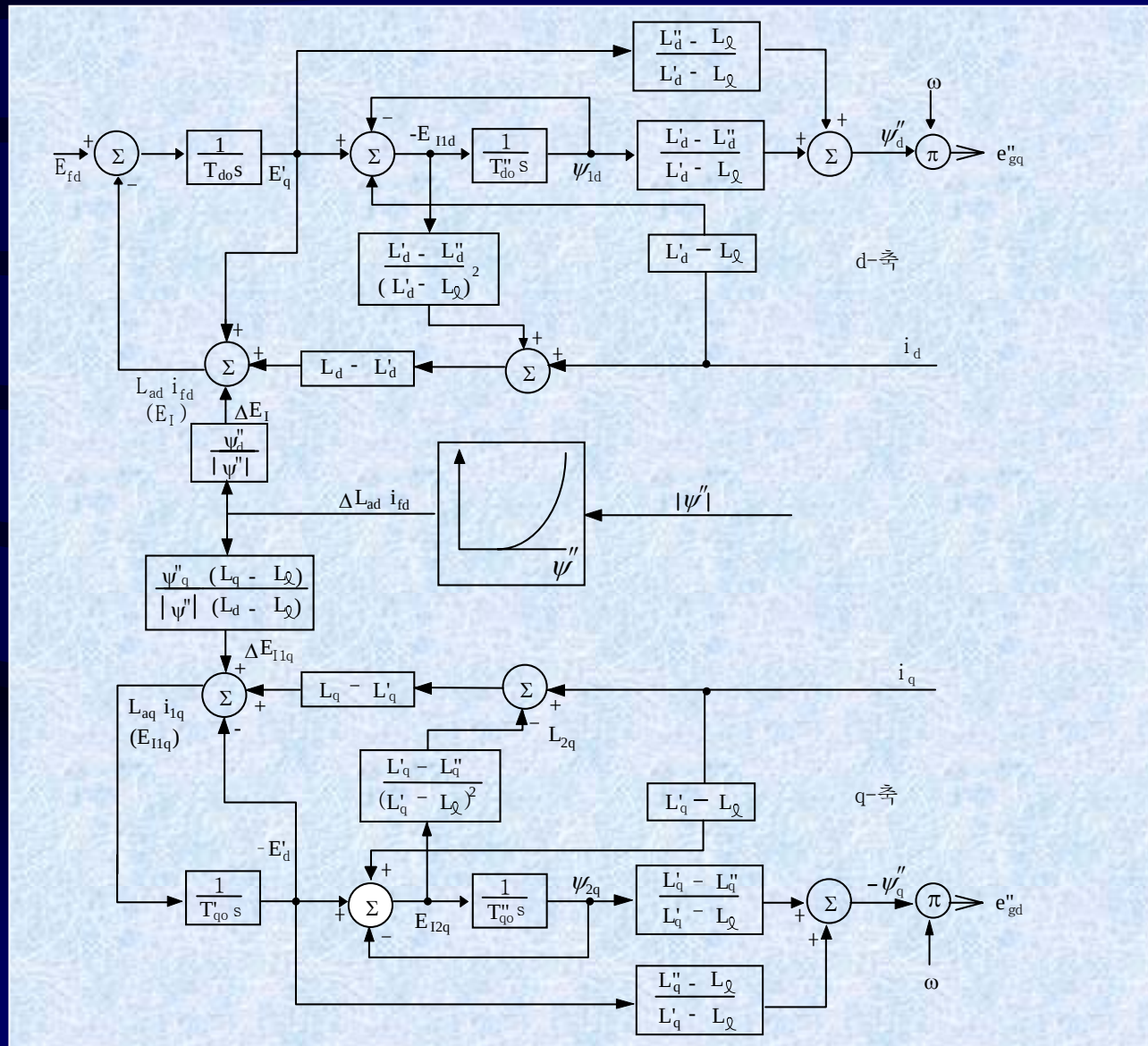
$$L'_q = L_\ell + \frac{1}{\frac{1}{L_{aq}} + \frac{1}{L_{1q}}} \quad : \text{q-축 과도 인덕턴스}$$

$$L''_q = L_\ell + \frac{1}{\frac{1}{L_{aq}} + \frac{1}{L_{1q}} + \frac{1}{L_{2q}}} \quad : \text{q-축 초기과도 인덕턴스}$$

$$T'_{qo} = \frac{1}{R_{1q}} (L_{1q} + L_{aq}) \quad : \text{q-축 과도 개방회로 시정수} (R_{2q} \Rightarrow \infty)$$

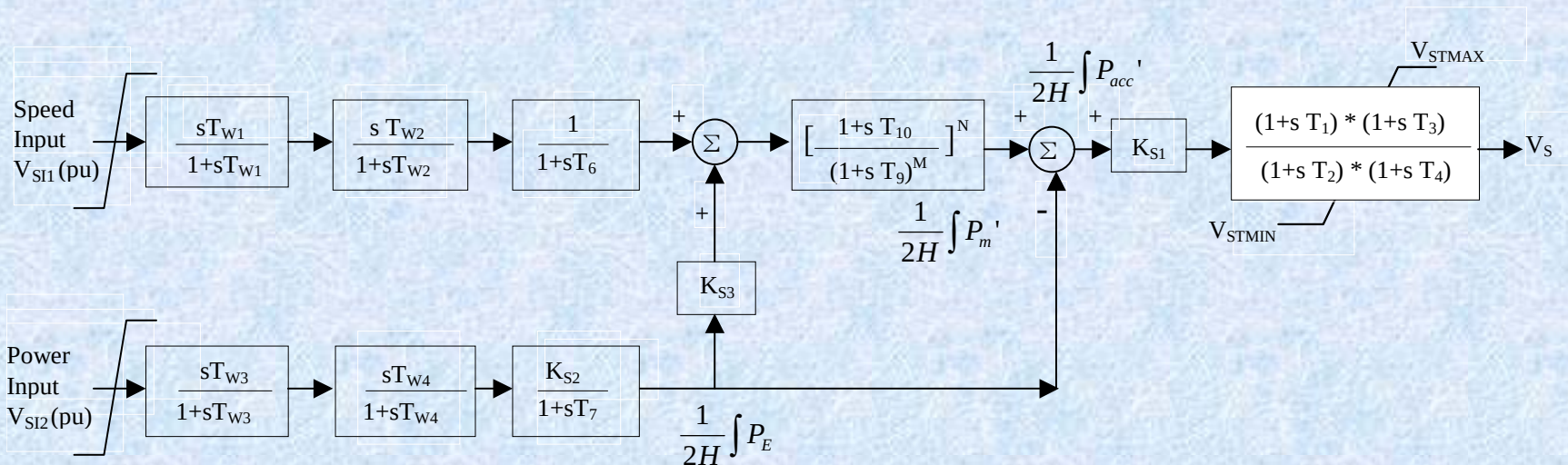
$$T''_{qo} = \frac{1}{R_{2q}} \left(L_{2q} + \frac{1}{\frac{1}{L_{aq}} + \frac{1}{L_{1q}}} \right) : \text{q-축 초기과도 개방회로 시정수} (R_{1q} \Rightarrow 0)$$

원통형 발전기의 Electromagnetic Model (GENROU)

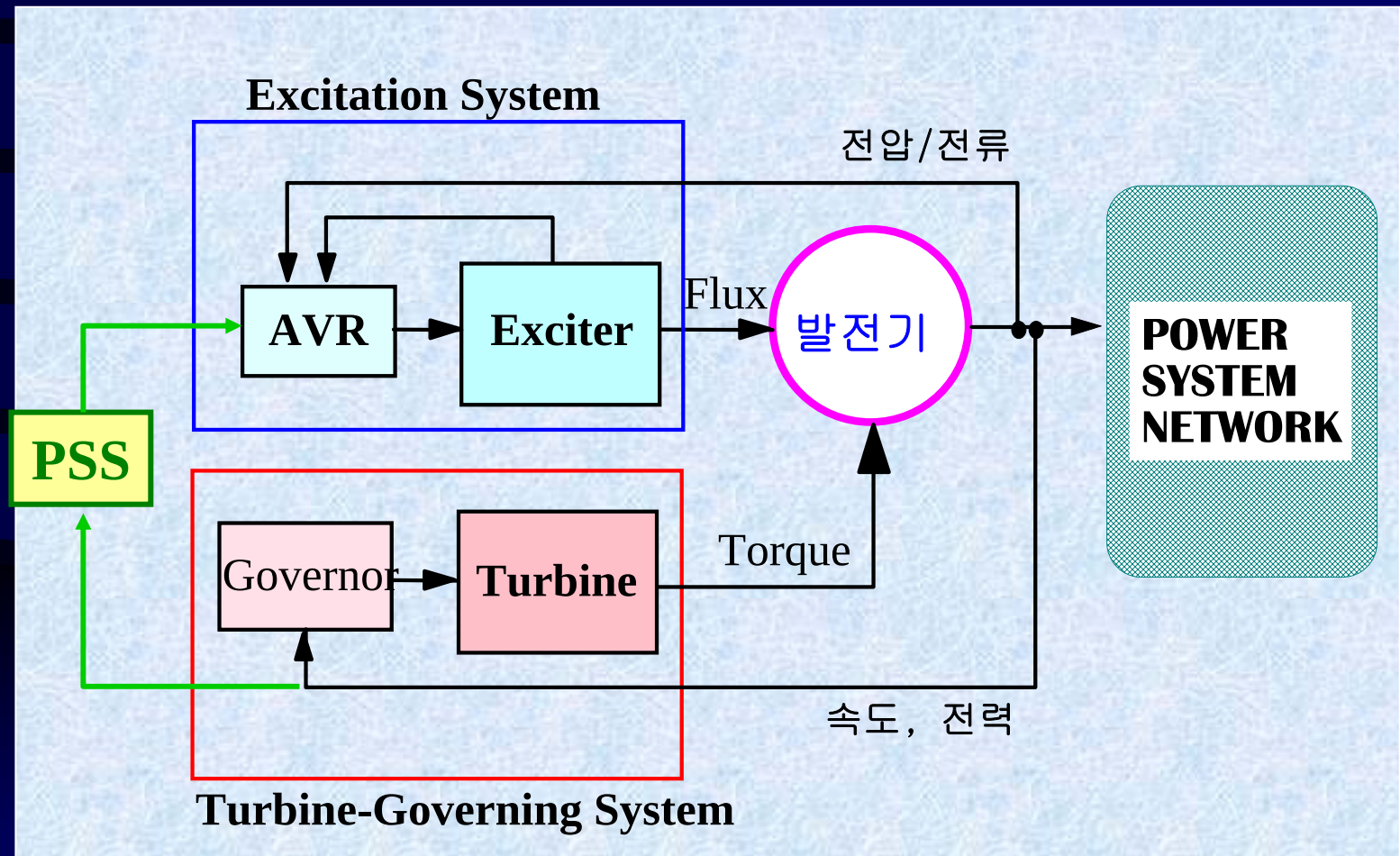


Power System Stabilizer (PSS)

GE의 PSS 제어회로 (IEEE-PSS2A 모델)



PSS의 안정화 기본원리



계통의 불안정 동요 Mode와 PSS 효과

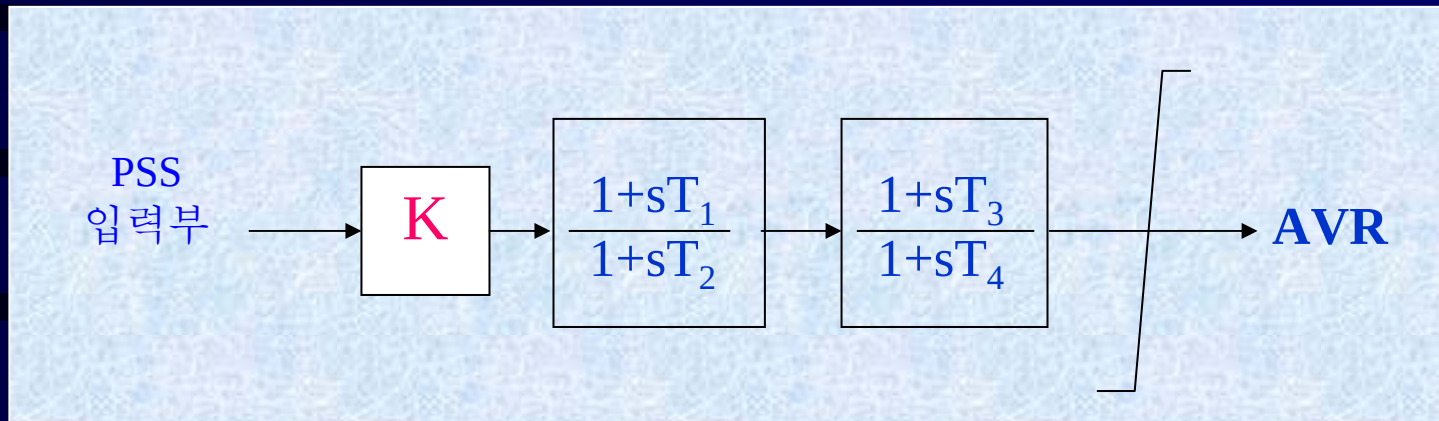
미국의 경우

- 광역 모드 (Inter-area mode) 0.1~0.9 Hz
- 지역 모드 (Local mode) 1.0~2.0 Hz
- 발전기간 모드 (Intra-unit mode) 1.5~3.0 Hz
- 축진동 모드 (Torsional mode) 4 Hz 이상

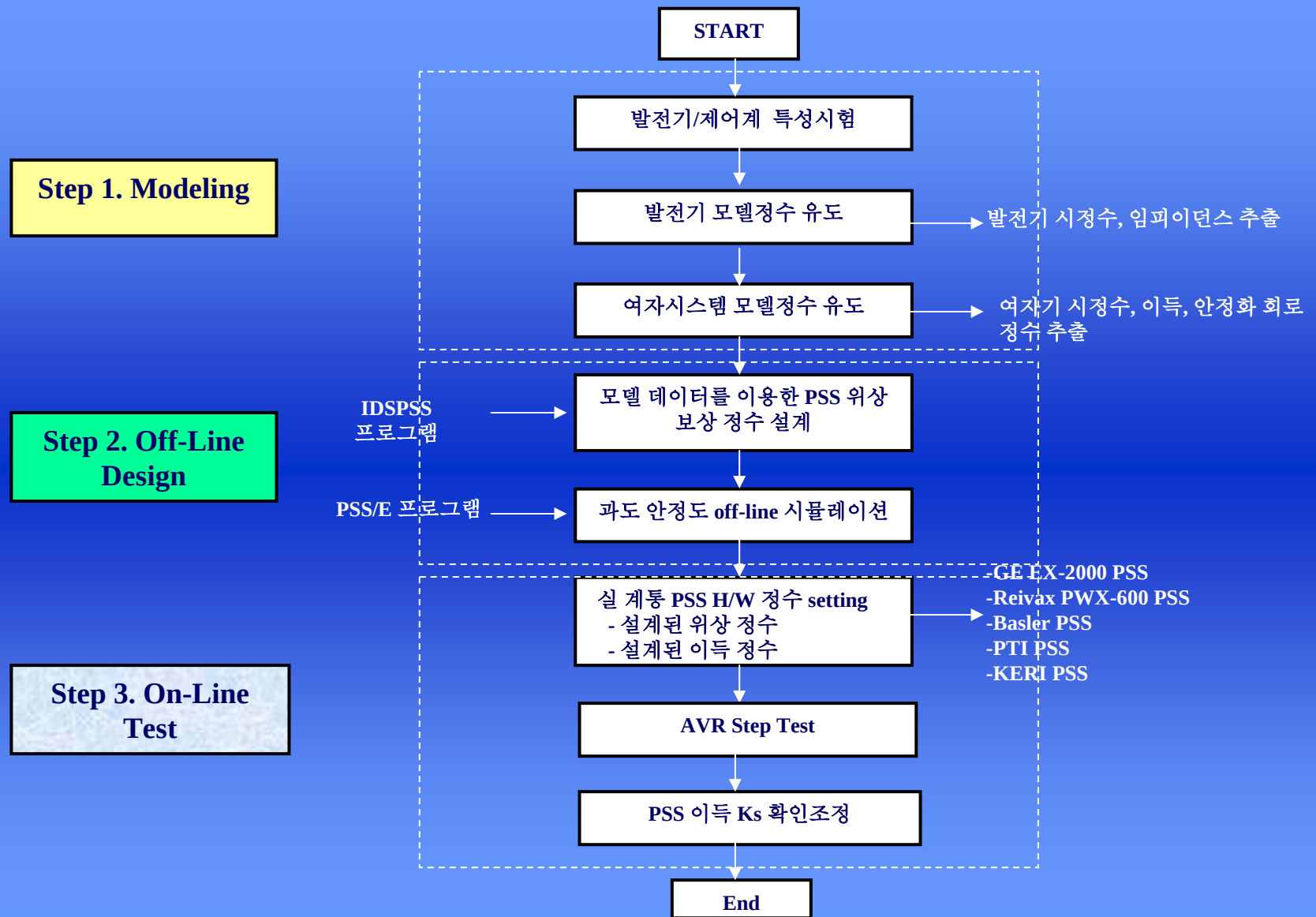
✓ PSS를 적용하는 동요주파수 대역

0.2 ~ 2.0 Hz

PSS의 튜닝

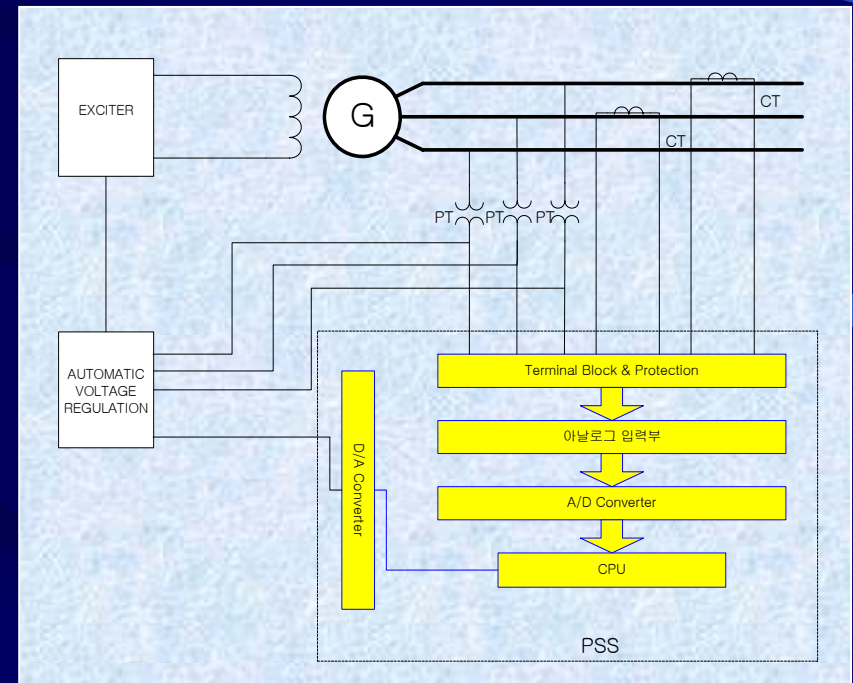


PSS 튜닝 절차



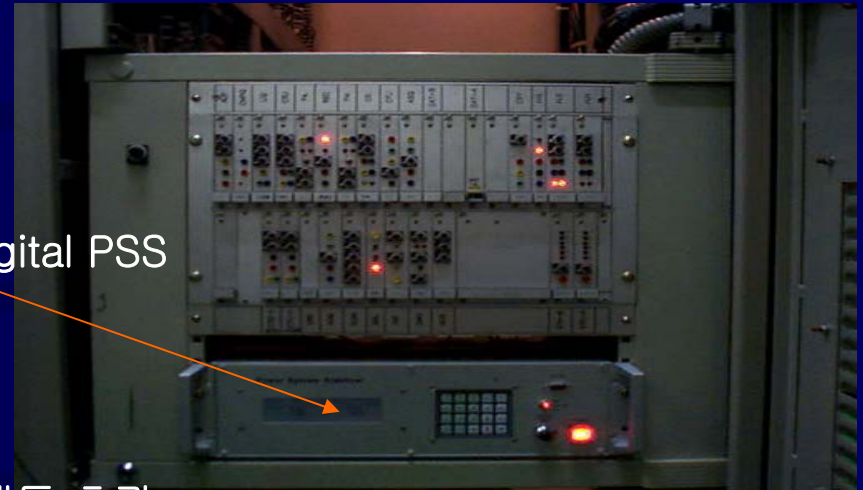
디지털 PSS

- 제어장치
 - CPU: DSP320C32, 50MHZ
 - 통신포트: RS484(1 port), RS232(1port)
- Analog 입출력
 - 입력: PT신호 3개(0-120V), CT신호 3개
 - 출력: AVR의 Error Summing Junction, 0-10V 제공
- 공급전원
 - 전원전압: 직류 125 V
 - 소비전력: 최대300W



디지털 PSS 무주양수 발전소 운전

운전 중인 Digital PSS



무주양수 발전소



PSS 운전시 제동 효과

