

산업용 플랜트 및 상업용 시설물 전력계통의 안정도에 대한 연구

김기택/윤덕로  
(주) 나라기술단

A STABILITY STUDY FOR INDUSTRIAL PLANTS AND COMMERCIAL FACILITIES

Kim, Ki-Taek / Yoon, Duck-Ro  
NARA ENGINEERING CONSULTANT INC.

**Abstract**—The purpose of power system design is ,in a word, to provide a good quality of electric power. The design of reliable industrial and commercial power distribution system is important because of the high costs associated with power outage. Three major factors for realization of the purpose are:

- (1) To hold system frequency at or very close to a specified nominal value(e.g. 60Hz) by control of frequency-effective power.
- (2) To maintain the correct value of interchange power between power and local generators.
- (3) To hold system voltage at or very close to a specified nominal value by control of voltage-reactive power. Within the past decade, numbers of industrial and commercial facilities installed with local generation, large motors or both, are increasing. This means that system stability is of concern to a growing number of industrial plant electrical engineers and consultants.

1. 머리말

전력시스템설계의 궁극적인 목표는 양질의 전력을 공급하는 것이다. 좋은 품질의 전력이라는 의미는 한마디로 주파수와 전압의 적정성유지 및 전력공급의 신뢰성 확보이다. 오랫동안 이 문제는 전력공급회사 엔지니어들만의 문제로 인식되어져 왔지만, 최근에는 산업용플랜트 및 상업용 시설물이 늘어나고, 전원공급용 발전기 및 대형전동기가 설치되므로, 시스템안정도등 계통제어의 문제가 플랜트 및 상업용 시설물에 관련되는 엔지니어들의 관심사가 되고 있다는 것을 의미한다.

2. 전력시스템 안정도 기본 사항

2.1 안정도의 정의

기본적으로 전력시스템의 안정도는 2 또는 3대 이상의 동기기를 가지는 전력 시스템의 고유 특성(Property)이며, 어떤 시스템이 안정하다는 것은, 현재 시스템상의 모든 동기기가 정상 운전되고 있다면, 어떤 특정상태에서 안정하다고 할 수 있다. 특정 상태라고 한 것은, 현 상태에서 안정된 시스템이 다른 상태 조건에서는 불안정해질 수 할 수 있다는 점을 강조한 것이다.

2.2 정태 안정도(Steady-State Stability)

2.2.1 정태안정도

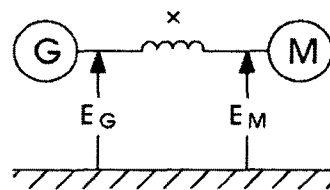
부하의 변화가 극히 미미한 경우의 정적특성을 의미한다. 그러나 언제나 외란에 의하여 불안정한 상태로 될 수도 있다는 점을 염두에 두어야 한다.

전력계통에 연결된 발전기의 안정운전을 위해서는 동기 운전(synchronism)이 필요한데, 어떠한 원인으로 발전기가 가속이 되어도 회전자의 위치가 원래의 위치로 되돌

아오려는 힘이 필요하게 되는데 그 특성이 안정도 판정의 기준이 된다.

2.2.2 공급가능 전력 방정식

<그림1> 가장 단순한 시스템 계통도



단순한 시스템의 해석은 좀 더 복잡한 안정도문제해결의 기초가 된다. 상기 시스템은 발전기 1대와 대용량 전동기 1대가 연계된 가장 간단한 시스템의 계통도이다.

\* 실제 송전전력 P

$$P = \frac{E_G E_M}{X} \sin\theta \quad (1)$$

\* 안정극한전력(최대 송전가능전력): Pmax

$$P_{max} = \frac{E_G E_M}{X} \quad (\theta = 90^\circ \text{ 일때}) \quad (2)$$

θ: 상차각(전력각: phase angle)

2.2.3 정태안정도에 영향을 주는 요소

- (1) 발전기 내부 전압: EG
- (2) 동기기와 선로의 리액턴스 합: X
- (3) 전동기 내부 전압: EM

따라서 EG, EM은 클수록, X는 작을수록 더 큰 전력을 정태 안정도상태에서 전송 가능

2.3 과도안정도 및 동태 안정도

Transient & Dynamic Stability

2.3.1 과도안정도

과도안정도는 외란의 상태(단락, 부하의 차단 등)의 급격한 변화에 동기화력(synchronizing power)을 유지할 수 있는 능력을 의미한다. 동태 안정도는 제어장치의 동적응답특성까지 고려한 과도상태 안정성을 말한다.

2.3.2 과도안정도와 동태안정도의 차이점

과도안정도는 전통적으로 동기기와 회로의 중요한 기계적 특성과 전자기적(electromagnetic)특성에 의하여 결정되어 왔는데, 동태안정도는 자동여자기 및 엔진의 거버너(governor)의 응답을 고려하여 결정된다.

결국 전력계통과 관련된 기술의 진보가 안정도의 전통적인 해석을 퇴보시키며, 명확하게 규정되기 어려운 동태안정도라는 가정을 제공하게 되었다고 할 수 있다.

먼저 언급된 정태안정도의 3가지 영향요소는 과도안정도에서도 같이 작용하므로, 정태 안정상태안에서 안정한 시스템은 과도 외란이 생길 때 꼭 안정하지 않게 되는 것이다.

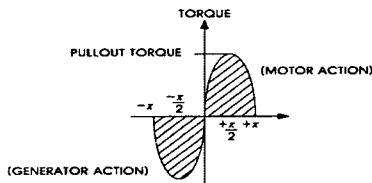
### 2.3.2 정태안정도 토크 방정식

$$T = \frac{\pi p^2}{8} \Phi_{SR} F_R \sin \delta_R$$

- T: 기계축 토크 (shaft torque)
- p: 회전기극수
- $\Phi_{SR}$ : 공극자속 (air gap flux)
- $F_R$ : 회전자기자력 (magnetomotive force)
- $\delta_R$ : 회전자와 고정자 사이의 기계각

공극의 자계가 상수라면 회전자 기계각  $\delta_R$ 의 변화에 따라 축토크의 크기 T가 변화하게 된다.

<그림2> 정상상태 동기기의 토크와 기계각의 관계



- \* 발전기: 기계각의 (+)영역에서 까지 토크증가
- \* 전동기 기계각의 (-)영역에서 까지 토크증가

## 3. 계통불안정을 유발하는 외란 (Disturbance)

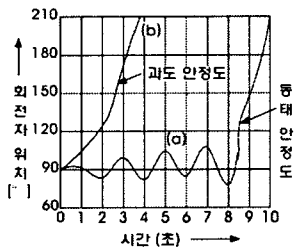
### 3.1 산업 Plant 시스템에서 불안정을 유발하는 대부분의 일반적인 외란

- (1) 회로의 단락
- (2) 공중 계통망의 연결회로의 손실
- (3) 현장 발전기의 일부 고장손실
- (4) 계통발전용량에 비해 상대적으로 큰 모터의 기동기
- (5) 차단기 개폐
- (6) 전동기 충격 부하
- (7) 발전기상 부하의 감소

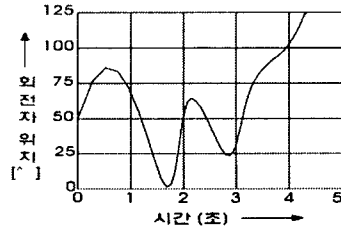
- \* 항목 (1)~(5)는 전압을 감소시키므로, 궁극적으로는 부하를 감소시켜 기계각을 증가시켜야 한다
- \* 항목 (6)~(7)은 해당 발전기의 회전자 기계각을 직접 증가시킴.

<그림3>

난조를 일으키며 동태안정도가 상실되는 경우



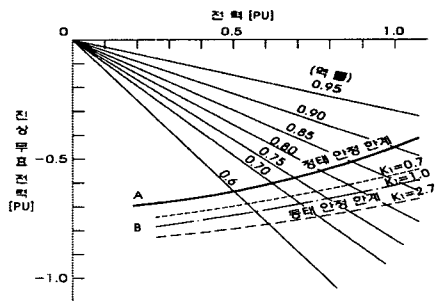
<그림4> 안정도가 바로 무너지는 경우



## 4. 안정도 문제의 해법

- ① 보통 과도외란(Transient disturbance)을 감소시키는 것이 안정도에 기여.
- ② 동기기의 관성모멘트(의 moment of inertia per prated kVA)의 증가는 안정도 한계를 향상시켜 줌.

<그림5> 동태안정운전 한계의 예



## 4.1 System 설계

### 4.1.1 선로임피던스

낮은 Impedance Bus에 연결된 2대의 발전기는 계차 상실, 과부하 및 단락의 경우를 제외하고는 동기유지에 유리할 것임.

두 기계사이의 Impedance가 클수록, 탈조에 이르는 외란의 값이 적어진다. 즉 모든 동기기는 가능하면 공동 무한대 모선에 가깝게 접속하여야 한다.

### 4.2 회전기기의 설계 및 선정

동기기를 사용할 때 안정도는 기계 계통의 관성을 증가시킴으로써 증대될 수 있다. H상수(단위정격 kVA 당 축적된 에너지)는 속도의 제곱에 비례하기 때문에 동기 속도(Synchronous)의 작은 증가도 더 높은 관성에 있어 주목할 만한 효과를 제공한다.

대용량펌프의 기동토크특성을 고려하여 적절한 전동기 기동방식 채택한다.

### 4.3 보호시스템 (Relay coordination)

산업전력계통에 있어, 동기화력(Synchronous)의 손실방지 또는 개인의 위험 및 장비의 피해를 제한하기 위한 단락전류는 가능한 한 빨리 분리되어야 한다.

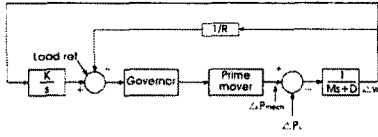
### 4.4 전압조정기와 여자기 특성 조정

전압조정기와 여자기 특성은 안정도에 영향을 미친다. 왜냐하면 같거나, 더 높은 계차의 여자는 작은 회전자 각을 필요로 한다. 결과적으로 안정도는 과도현상에 빠르게 응답하는 전압조정기와 여자기를 적절히 응용함으로써 증가될 수 있다.

최근 이런 면에서 전력전자 전압조정기와 반도체 소자에 의한 여자는 안정도의 개선에 큰 공헌을 하고 있다.

#### 4.5 AFC (Automatic Generation Control 자동급전제어)

<그림 6> 발전기 제어 보조회로도



자동발전제어는 시스템 주파수를 적정수준으로 유지하며, 가장 경제적으로 단위발전기를 운영하기 위한 목적으로 도입된다.

#### 5. 모의실험(simulation)에 의한 과도안정도의 해석

##### 5.1 개요

안정도 시험을 실제의 전력계통(the actual system)에서 하는 것은 현실적으로 불가능하므로, 다수의 정상 및 비정상 상태의 다양성 아래서 시뮬레이션을 하는 방법이 필요할 것이다.

##### 5.2 모의실험 (Simulation of the System)

현대의 대규모 안정도 프로그램은 다음의 회전기의 특성을 Simulation할 수 있다.

- (1) 전압 조정기 및 여자기 (Voltage regulator and Exciter)
- (2) 거버너(governor)를 포함하는 Steam 시스템 또는 다른 원동기
- (3) 기계 부하(Mechanical Load)
- (4) Damper Winding
- (5) 돌극(Salient Pole)
- (6) 포화(Saturation)

##### 5.3 외부교란의 시뮬레이션(Disturbance Simulation)

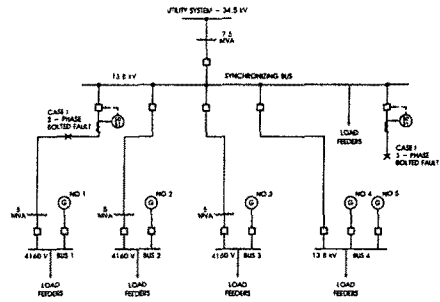
전력계통의 가장 심각한 외란은 3상 단락이며, 따라서 이 고장전류가 시스템의 안정도 시험 데이터로 채택된다.

##### 5.4 안정도 연구를 위한 요구 데이터(Data)

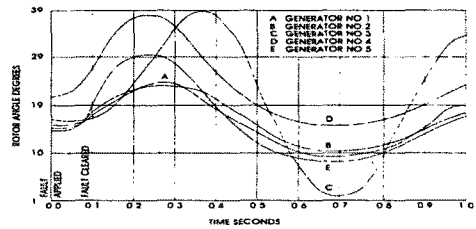
안정도 연구를 위한 필요 데이터는 다음과 같다. 지면 관계로 주요한 사항만 언급한다.

- (1) 시스템 데이터(System Data)
  - a. 전송로, 케이블, 리액터 등 직렬 연결 임피던스
  - b. 변압기 사양(변압기 포함)
    - kVA 용량(kVA Rating)
    - Impedance(Impedance)
    - 전압비(Voltage Rating)
    - 결선방식(Winding Connection)
  - c. 단락용량값(Short-Circuit Capacity)
  - d. 콘덴서 용량(kVAR of Capacity banks)
  - e. 계통내 차단기설정(Switch arrangement)
- (2) 부하 데이터(Load Data) : 모선에 연결되어 있는 주요 부하
- (3) 회전 기기 데이터(Rotating machine data)
  - a. 동기기 대용량
  - b. 소용량 동기기군(group)
  - c. 대용량 유도 전동기
- (4) 외란 데이터(Disturbance data)
- (5) 연구 데이터
  - 연구 기간
  - 자료출력 시간 간격
  - 자료 종합 기간
  - 요구되는 출력 결과물

#### <그림7>시뮬레이션 해석대상 계통도

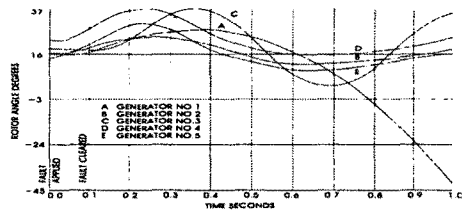


<그림8> 외란에 대하여 안전한 시스템의 동요 곡선 (swing curve) 사례



<그림9>

외란에 의해 발전기 (No.5) 1대가 트립 되는 경우의 동요 곡선(Swing Curves)



#### 6. 결론

좋은 품질의 전력공급을 위해서는 주파수-유효전력 제어(AFC)를 통하여 주파수를 안정적으로 유지하고, 전압-무효전력제어를 통하여 적정수준의 전압을 유지시키는 것이 매우 중요하다. 아울러 전력계통의 안정도에 관한 이해의 증진을 통하여 전력계통설계의 궁극적인 목적인, 공급신뢰도의 향상을 실현할 수 있을 것이다.

#### [참고문헌]

- (1) M. Shon Griffith, Douglas W. Durand, Stability Studies. IEEE Std 399-1997. IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis(ANSI). page 195-210
- (2) Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, 9. Control of Generation. Power Generation, Operation and Control 1996. page 328-330
- (3) 송길영, 제 10장 전력계통의 안정도, 전력계통의 해석 a 및 운용, 1991, page 479-519
- (4) 한국전력공사 송변전처, 기술용어해설집, page 131-151
- (5) Torishima Pump Mfg. Co., Ltd. Torishima Pump Handbook, 1990, Pump starting torque characteristic, p59. Motor start system and starting characteristic, p139-141