



전력계통 안정도의 이론과 실제

오 태 규

(한국전기연구원 전력연구단)

1. 서 언

우리는 오늘날 일상생활에서 전기가 마치 공기와 물 같이 사용되는 시대에 살고 있다. 아침에 일어나 커피 메이커로 막 끓인 향긋한 커피를 마시거나 TV 리모콘을 켜서 밤새 일어난 뉴스를 보고 듣게 된 일이 세수하고 식사하는 일 만큼이나 일상적이 되었다. 또한 정보화 시대의 핵심이 되어 버린 컴퓨터의 인터넷 접속을 통해 수 만가지 정보가 넘실대는 사이버 공간을 넘나드는 일이 아주 당연한 그런 기술의 시대에 살고 있다. 이와 같은 현대 물질문명의 원동력으로서 전기를 안정적으로 공급하는 일이 경제 사회적으로는 대단히 중요한 일로 인식되고 있으나 이를 실행하는 전력계통에 관련된 기술이나 설비에 대한 사회적 인식은 상대적으로 저하되거나 타 기술의 그늘에 매몰되어 가는 현상을 나타내고 있다. 그러나 이와 같은 현상은 전기에 대한 수요 증가가 지속되어 2015년경에는 현재의 두 배를 넘는 규모수준으로 성장할 것으로 전망되는 전력계통의 합리적 계획과 안정적 운영에 상당한 문제를 초래하게 될 것으로 에너지 전문가들은 우려하고 있다.

전력수요 증가가 포화에 이른 선진국과는 다르게 비교적 높은 수준으로 성장하는 전력산업에서 전력계통의 안정적 운영을 통해 전기 공급 비용의 절감과 전기 품질 수준의 유지 관리를 위해 필요한 기술 개발과 전문인력 양성이 대단히 중요함에도 불구하고, 이에 대한 사회적 인식의 결여와 시장기능의 왜곡으로 현재 우리나라 전력계통 분야는 전환기적 위기 상황으로 진입하고 있다고 하여도 지나친 말은 아닐 것이다.

더욱이 전력산업의 효율성 제고를 목표로 추진되고 있는 전력산업 구조개편은 경쟁적 전력시장 체제에 적합한 전력계통기술을 확립할 것을 요구하는 새로운 도전을 제시하고 있다. 전력계통 기술의 발전이 경쟁적 전력시장 체제의 새로운 전력산업 구조의 태동을 가능하게 하였지만, 이를 수용해야 하는 우리로서는 전력계통 기술의 paradigm shift 적인 접근 방식을 적극적으로 모색하지 않을 수 없는 여건에 이르고 있다.

이와 같은 관점에서 본 논문에서는 전력계통의 계획과

운영의 핵심적 기술사항인 전력계통의 안정도의 이론과 실제에 대해 살펴보고 이의 발전 방향을 전망하고자 한다.

2. 전력계통 안정도의 개념

2.1 전력계통 안정도의 정의

전력계통 안정도는 IEEE의 전기 시스템의 안정도(Stability)에 대한 사전적 정의를 전력계통에 적용하여 다음과 같이 설명할 수 있다.

- 전력계통의 정상상태 운전조건 : 전력계통의 해석 목적을 위해 전력계통의 운영변수들이 일정한 상태에 도달한 운전상태
- 전력계통에서의 외란 : 전력계통의 상수 혹은 운영변수가 갑자기 변화하거나 이와 같은 변화를 초래하는 외적 요인

외란의 크기는 계통 해석을 위해 선형화 방법의 적용이 가능하면 소규모 외란이라 하고, 그 외의 경우를 대규모 외란이라 정의한다.

이와 같은 전력계통의 정상상태 운전조건과 외란의 개념을 이용하여 전력계통 안정도는 다음과 같이 정의된다.

- 전력계통 안정도 : 정상상태 운전조건에서 전력계통에 외란이 발생할 때 전력계통이 이를 극복하고 새로운 정상상태 운전조건에 도달할 수 있는 전력계통의 특성. 과도 안정도는 대규모 외란에 대한 전력계통안정도를 말한다.

전력계통 안정도 해석에서 전력계통의 운전조건과 외란의 규모, 형태, 및 위치가 변화하면 각각의 경우에 새로운 해석을 필요로 하게된다. 따라서 전력계통의 안정도 검토는 다양한 계통구성, 부하수준, 외란의 위치, 형태 등을 고려하여 수많은 안정도 해석을 필요로 한다.

전력계통 안정도 해석은 계통계획 단계에서는 계통확충 혹은 보강의 기술적 최적 대안을 선정하는 의사결정의 수단으로, 계통운영 단계에서는 계통의 안정운영체제를 파악하여 해당 운전조건에서 설비 이용의 최적화를 도모하기 위한 수단으로 활용된다.

2.2 불안정 현상

불안정 현상의 발생에 대한 이해를 위해 외란이 발생할 경우의 계통이 이에 대응하는 과정과 정상상태에 도달 여부를 살펴보도록 한다.

전력계통의 상태는 시시각각 부하의 변화에 따라 끊임없이 변화한다. 따라서 엄밀한 의미에서 일정한 운전 상태를 가정한 정상상태는 외란에 대한 전력계통의 응답 해석을 위해 설정한 수리모형이라 함이 더 정확한 것이다. 초기에 전력계통이 정상상태에서 운전되고 있다 가정한다. 이는 수리적으로 계통의 상수 및 운영변수 등이 일정한 상태에 있고, 주파수 및 전압이 정상범위에 있으며, 계통내의 각 발전기는 평형상태에서 운전하고 있음을 의미한다.

외란이 발생하면, 기본적으로 발전기의 전기적 출력이 갑작스레 변화하고, 이에 따라 발전기 회전자속이 가속 혹은 감속하게 되며, 각 발전기에 미치는 외란의 영향이 다르기 때문에 발전기의 운동이 다르며, 발전기들은 새로운 정상상태 운전점을 향해 이동하게 된다.

이 과정에서 계통이 새로운 정상상태 운전조건에 도달하게 되면 "안정하다"고 하고, 그렇지 않은 경우를 "불안정하다"고 한다. 불안정한 계통은 다음과 같은 현상을 수반하게 된다.

- 발전기 회전자속의 위상각이 지속적으로 증가하여 동기탈조 한다.
- 동요가 감소하지 않고 증가하여 결국 동기탈조에 이르게 된다.
- 동요가 직접적으로 동기탈조를 초래하지는 않으나, 동요 과정에서 보호계전시스템이 동작하여 계통분리 혹은 동기탈조에 이르게 한다.

이와 같은 전력계통의 불안정 현상을 파악하기 위한 안정도 검토는 다음과 같은 절차로 이루어진다

- 1) 전력계통의 수리모형 수립
- 2) 초기조건 설정 및 외란 모의
- 3) 계통상태변수의 시간모의에 의한 과도 특성해석
- 4) 정상상태 도달 여부 확인
- 5) 다른 운전조건 및 외란에 대해 2)-4) 과정 반복

한편 IEEE에서는 계통의 계획과 운용 분석에서 가장 중요하게 다루어야 할 전력계통 안정도 문제를 다음과 같이 제시한 바 있다.

- 발전소 인근지역에서의 Credible 상정사고의 선택과 이에 대한 안정운전 유지
- 검토대상 외란 영향 하에서의 여자시스템의 제어특성과 안정화 기능
- 외란 후 지역 간의 전력 수송 한계의 결정
- 안정도 유지를 위한 대응량 발전기의 순서차단 또는 계획차단
- 고장의 차단지연시 발전기/전력계통의 특성과 송전선로의 relay 성능
- 대형 산업체 부하의 영향 및 부하차단의 적용 방법
- 주요 연계 송전선로의 전력 동요 현상 및 과급방지

2.3 전력계통 안정도의 분류

참고문헌[2]에서 Dr. Kundur는 온타리오 하이드로 전력계통을 중심으로 한 북미 지역의 연계 계통을 대상으로 안정도 해석 프로그램 개발연구와 이를 이용한 안정도 검토를 통해 축적된 경험으로 그림 1과 같은 안정도 분류를 제시하였다. 여기서 전력계통 안정도는 발전기간 동기유제가

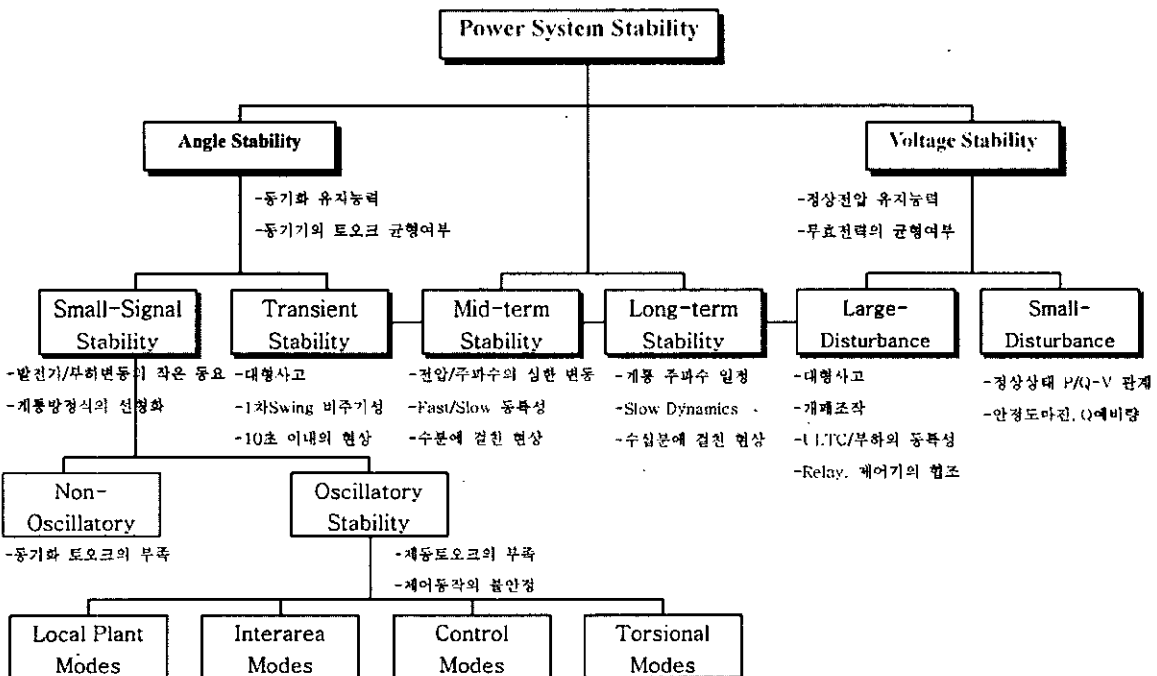


그림 1. 전력계통 안정도의 분류

일차 목표인 위상각 안정도(angle stability)와 적정 전압유지를 목표로 하는 전압 안정도(voltage stability)로 구분되며, 외란의 크기, 분석 대상 시간의 범위에 따라 안정도 별로 검토 대상이 되는 전력계통의 주요 특성에 대해 기술하였다. 이와 같은 안정도 분류는 IEEE Standards에서 정의한 Terminology와는 달리, 전력계통 안정도의 실제적인 문제를 검토하기 위한 해석 Tool 개발에서 적용된 알고리즘과 접근 방법을 중심으로 구분된 것으로 학술적 분류체계라기 보다는 실용적 분류체계라 함이 적절할 것으로 여겨진다.

가. 위상각 안정도 (Rotor Angle Stability)

위상각 안정도는 발전기간 동기운전 유지에 관련된 안정도이며, 발전기 회전자 입력과 출력의 차이에 의해 변화하는 발전기의 관성 회전체의 속도(Speed)와 연관이 있다. 정상상태에서는 기계적 입력 에너지와 전기적 출력 에너지가 서로 같은 평형상태를 이루게 되어 회전자의 속도는 일정하게 된다. 만약 계통에 외란이 발생하고 평형상태가 교란된다면, 회전체는 운동법칙에 따라 가속되거나 감속된다. 회전자 위상각 안정도는 앞에서 분류와 같이 과도 안정도와 미소신호 안정도 혹은 정상상태 안정도의 2가지 안정도로 분류된다.

1) 과도 안정도(Transient Stability)

과도 안정도는 계통에 발생하는 대규모 외란에 대해서 회전자 위상각 안정도의 유지 여부에 관한 계통 능력을 말한다. 큰 외란이 발생 시 회전자 위상각은 크게 중요하고, 출력(Power)과 회전자 위상각 사이의 비선형 관계에 따른 운동을 하게 되고, 위상각이 지속적으로 증가하면 동기탈조가 발생하여 안정도 상실을 초래할 수 있다. 과도 안정도는 외란 전의 운전 조건과 외란의 심각한 정도에 따라 달라진다.

그림 2는 외란에 따른 발전기 회전자 위상각의 운동을 보여준다. Case 1은 회전자 위상각이 사고 후 크게 진동하나 동요가 감쇠되어 정상상태로 수렴됨을 보여준다. Case 2는 회전자 위상각이 1과에서 지속적으로 증가하여 탈조에

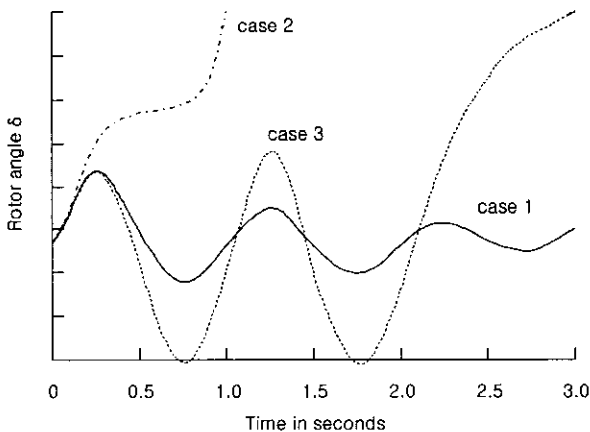


그림 2. 큰 과도 외란 시 회전자 위상각 응답

이르는 것을 보여주고 있다. 이러한 불안정 현상은 발전기의 동기화 토오크가 부족해서 발생한다. Case 3은 외란에 따른 위상각 진동이 감쇠하지 않고 확대되어 탈조에 이르는 것을 보여준다. 이러한 경우는 댐핑 토오크가 부족한 경우 나타난다.

2) 미소신호 안정도(Small Signal Stability)

미소신호 안정도는 그림 3에서와 같이 선형화된 방정식으로 표현되는 전력계통의 안정도를 말한다.

그림 3의 K상수 회전자의 위상각과 여자기 출력과 토오크 및 단자전압간의 관계를 나타내는 중요한 상수들이다. 위의 1기 무한 모션 선형 블록도의 전기적 루프에서, 미소 외란에 대한 전기적 토오크의 변화는 아래의 두 성분으로 분해할 수 있다.

$$\Delta T_e = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega \tag{1}$$

여기서,

- $T_S \Delta \delta$ 는 회전자 위상각 변위 $\Delta \delta$ 과 위상이 일치하는 토오크 변화 성분이며, 이것을 동기화 토오크 성분이라고 하고, T_S 를 동기화 토오크 상수라 한다.
- $T_D \Delta \omega$ 속도 변위 $\Delta \omega$ 과 위상이 일치하는 토오크 변화 성분이며, 이것을 댐핑 토오크 성분이라고 하고, T_D 를 댐핑 토오크 상수라 한다.

회전자 위상각 안정도는 두 개의 토오크 성분의 존재에 따라 달라진다. 동기화 토오크가 부족한 경우는 발전기 회전자 위상각이 단조함수(aperiodic drift)적으로 발산하여 불안정해지며, 제동 토오크가 부족한 경우는 회전자 위상각 진동이 감쇠하지 않고 그 크기가 확대되어 불안정해진다.

오늘날의 대규모 계통에서는 동기화 토오크 부족으로 발생하는 불안정 현상과 아울러 속응성 여자시스템과 자동전압제어기(Automatic Voltage Regulator, AVR) 등 제어 요소에 기인하여 발생하는 제동 특성 저하에 따른 미소신호 안정도 역시 발전소의 안정운전을 위해 주요 관심사가 되고 있다. 계통의 제동특성을 개선하기 위해서 일반적으로 그림 3에 나타나 있는 PSS(Power System Stabilizer)를 사용한다. 다음은 미소신호 안정도에서 분류하는 안정도 문제이다.

- 지역 모드(Local Modes)는 한 개의 발전기가 전력계통에 대해서 동요하는 것과 연관이 있다. 이때의 동요 주파수는 1.0~2.0Hz 사이로 발전기의 동요 방정식의 고유 주파수와 비슷하다.
- 광역 모드(Interarea Modes)는 많은 발전기 그룹이 다른 발전기 군과 동요하는 것과 관련이 있다. 광역모드의 주파수는 0.1~0.80Hz대로 지역모드의 주파수 보다 적다.
- 제어 모드(Control Modes)는 발전기의 여자 시스템, 조속기, HVDC 컨버터, 그리고 SVC 와 같은 제어기가 제대로 튜닝되지 않아서 나타나는 동요와 관련이 있다. 이때의 동요 주파수는 2.0Hz 이상으로 지역모드나 광역모드보다 대부분 큰 주파수대에서 나타난다.

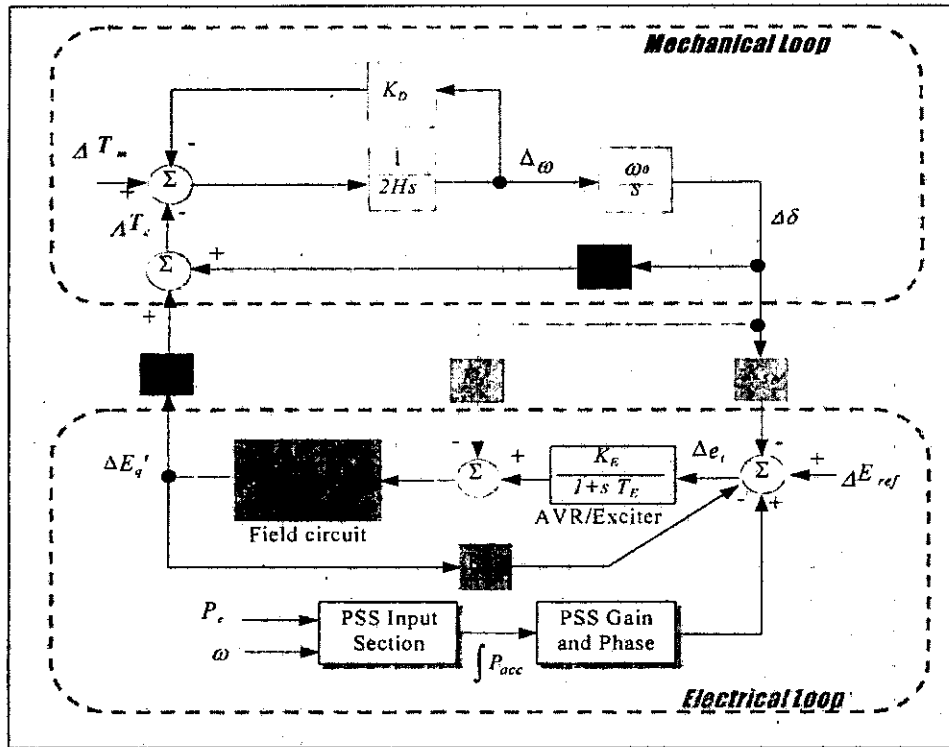


그림 3. 1기 무한 모선 선형 블록도

나. 전압 안정도 (Voltage Stability)

전압 안정도는 계통의 모선 전압이 정상상태 및 외란 후에도 수용할 수 있는 정상적인 전압을 유지할 수 있는가 어떤가를 나타내는 능력이다. 만약, 부하 단에서 부하가 증가하거나 외란이 발생했을 때 계속적으로 전압이 떨어진다 면 계통은 전압불안정 현상을 나타낸다. 전압 불안정은 본질적으로 국부적인 현상문제이나 전 계통의 안정운용에 큰 영향을 준다. 이와 같은 전압 안정도는 다음과 같이 두 개의 분류로 나누어진다.

- 대 외란 전압 안정도(Large-disturbance Voltage Stability)는 삼상 단락사고 같은 큰 계통 외란이 발생한 후 모선 전압이 다시 정상상태로 복구될 수 있는가 어떤가를 나타내는 계통의 능력을 말한다. 이 능력은 계통의 부하특성, 디지털/아날로그 제어기와 보호기의 상호동작에 의해서 결정된다. 대 외란 안정도를 검토하기 위해서는 변압기의 ULTC와 발전기 OEL(Overexcitation Limit)과 같은 장치 등의 응답특성이 나타나는 시점까지 모의 해석할 필요가 있다. 따라서, 시뮬레이션 시간은 수 초에서 수 십분까지 확장될 수 있어 보통 장기 동특성 시뮬레이션을 요구한다.
- 미소 외란 전압 안정도(Small-disturbance Voltage Stability)는 부하 단에서 미소 외란이 발생했을 때 모선 전압이 안정할 수 있는가 어떤가를 나타내는 능력을 말한다. 만약 미소 외란 전압 안정도가 안정하다면, 모선에 무효전력을 주입했을 때 모선전압은 상승한다. 그렇지 않고, 모선 전압이 감소하는 경우는 불안정한 경우가 된다.

3. 전력계통 안정도 해석

전력계통의 안정도 해석은 일반적으로 발전기-제어계의 동특성을 나타 내는 미분방정식과 이를 대수적으로 연계하는 조류계산식으로 표현되는 수리모형에 대한 컴퓨터 모의 해석을 통해 이루어진다.

3.1 과도안정도 해석

과도안정도 유지 여부는 대부분 첫 동요(First Swing)에서 판별되나 그 이후의 제어시스템 영향 평가를 위하여 3-10초 정도의 시뮬레이션을 실시한다. 계통 고장으로는 3상단락과 선로차단, 부하차단 등을 고려하여 각 경우에서의 발전기 상차각과 모선전압, 그리고 주파수 변동 등을 검토한다. 계통요구조건에 맞는 발전기 기술규격을 결정하기 위해서는 정상운전시와 외란 발생 시에 주로 나타나는 계통 상황을 근거로 하여야 하며 발전소 사업운전 시점부터 수명기간 동안에 일어날 수 있는 계통 여건을 고려하여야 한다.

3.2 정태안정도 해석 (고유치 해석)

고속응성 여자계통을 적용할 때 계통의 구성 및 운전조건에 따라 발전기의 출력 또는 위상각이 진동(Oscillation)하는 불안정현상이 생길 수 있으므로 발전기 제어계통을 고려한 정태안정도 해석 역시 필요하다. PSS/E 프로그램을 이용할 경우 데이터 작성을 다시 할 필요 없이 과도안정도 해석용 데이터를 그대로 사용하여 고유치와 고유벡터를 산출할 수 있다.

정태안정도 판별 기준은 고유치의 실수부에 해당하는 제동계수가 음인 경우는 안정이며 양으로 되는 경우가 불안정에 해당한다. 고유치 해석에서는 시간 축에서의 상태변수 동특성을 파악할 수는 없으나 안정도 마진을 알 수 있고 고유벡터(Eigenvector)와 기여율(Participation Factor)을 이용하면 불안정 주요 상태변수를 찾을 수 있는 장점이 있다. 그러므로 불안정 요인에 해당하는 요인에 대한 조치를 강구함으로써 대책을 세우는 것이 가능하다. 즉, 계산된 고유치는 각 진동모드의 주파수 및 시정수를 나타내므로 동요 특성 분석과 AVR과 PSS등 발전기 제어계통 Setting에도 활용되고 있다. 정태안정도는 전력계통의 구성과 초기 운전 상태에 매우 민감하므로 단순 모델계통보다는 실제계통 데이터를 사용한 해석을 실시하는 것이 중요하다.

3.3 전압안정도 해석

계통의 전압은 발전기의 출력, 전압, 운전역률, 부하의 소비전력/역률 및 계통구성과 조상설비의 운전상황 등에 의해 결정된다. 계통에서 외란이 발생할 경우 전압이 새로운 평형점으로 도달하는 계통의 능력 또는 이와 관련한 특성을 계통의 전압안정도라 한다. 전압안정도는 부하의 전압특성에 영향을 받는다. 계통에서 전압불안정으로 되는 과정은 크게 다음의 2가지를 고려할 수 있다.

- 전력 수요가 증가하여 계통전압 특성의 송전한계를 초과하여 저전압 해의 영역으로 이전하는 경우
- 송전선 사고 등에 의해 계통의 리액턴스가 증대하는 경우 또는 수요지 근처의 대응량 발전기의 정지에 의해 무효전력원의 손실이 증가하여 송전한계가 외란 전의 운전 수요를 밑도는 경우

이 중에서 첫 번째의 원인은 부하의 점진적 증가이기 때문에 전압이 서서히 저하하지만 둘째의 경우는 계통상태의 급변에 따라 전압이 급격히 저하한다. 계통전압의 해석을 통하여 안정한계의 추정, 다근 해석, 근의 존재 판정 등이 가능하므로 이러한 기능들을 이용하여 전압안정도를 평가한다.

3.4. 안정도의 지표

전력계통의 안정도는 계통의 성능지수 만족 여부를 검토하여 계통확충 혹은 보강의 대안의 기술적 특성을 분석하는데 주로 사용된다. 안정도의 평가는 어느 기준 상태에서의 계통을 선정하여 이에 관련된 지표(Index)를 비교하게 된다. 정상상태 안정도의 경우는 고유치(Eigenvalue)의 제동계수와 진동주파수 등을 이용한 정량적 비교가 용이하며 안정도 마진을 검토할 수 있다. 반면에 과도안정도 해석의 경우 시간 시뮬레이션으로는 한번 계산으로 지표를 정량적으로 구하는 것이 어려우나 다음의 두 가지 지표들을 사용하여 비교 평가한다.

- 1) 고장의 임계차단시간 (Critical Clearing Time: CCT)
과도 안정도를 유지할 수 있는 최대 고장지속 시간을 말하며, 검토 대상의 운전조건에서 계통보강의 대안 비교에

사용된다.

2) 최대 송전 안정한계

검토 대상 발전소 혹은 송전선로에 일정한 상정사고(고장 위치, 고장제거시간, 및 고장제거 방법이 동일한 상정사고)를 적용하여 외란으로 탈조하기 직전의 출력을 과도안정도 출력한계로 한다. 같은 방법으로 정태안정도에 대해서도 대상 발전소의 출력을 증가시킬 때 실수부가 (+)인 고유치가 출현하기 직전의 출력을 정태안정도 한계로 평가한다.

3) 전압안정성 지표

전압안정성의 지표는 전력계통의 어느 부하상태에 대한 전압안정성의 정도를 나타내는데 예를 들면 전압안정성의 면에서 본 계통의 송전능력 여유를 정량적으로 평가하는데 모선별, 지역별, 또는 전체계통에 대해 주어진다. 이들 지표로서 현재 제안되고 있는 전압안정도 지표를 기법 면에서 분류하면

- 가) 무효전력과 전압의 증감 또는 감도에 기초한 것
- 나) 부하량과 전압의 여유량에 기초한 것
- 다) 1쌍의 전압 다근 해의 접근도에 기초한 것
- 라) 조류해속에서 Jacobian 행렬에 기초한 것

3.5 부하모형의 영향

계통구성이 복잡 고도화하고, 계통제어 요소에 대한 의존도가 높아지면서 부하모형은 안정도 해석 결과에 상당히 중요한 영향을 미치게 되는 것으로 인식되고 있다. 이는 부하의 전압 특성이 동요기간 동안에 발전기간의 동기화 토오크에 영향을 주고, 외란 발생 지점 인근에서의 부하 특성이 고장 지속기간에서의 전류-전압 관계와 고장 제거후의 발전기 응답에 미치는 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 또한 과도기간 동안의 전압변동에 따른 부하변화는 발전기 여자제어에 대한 영향을 통해 계통동요의 계통특성을 변화시키기도 한다. 그리고 부하의 주파수 특성은 계통 주파수 변화로부터 영향을 받기도 하지만 계통 주파수 변화에 직접 영향을 주기도 한다.

따라서 안정도 해석에서 부하모형에 대한 중요성이 강조되고 있으나, 정확한 부하특성을 고려한 모형의 수립과 모의해석에의 정확한 적용을 전제로 하므로, 실제의 대규모 계통의 안정도 검토에서는 해석 목적에 적합한 부하모형을 경험적으로 선택하여 적용하는 방법이 일반적이다.

4. 전력계통 안정도 향상 기술

전력계통의 안정도 향상을 위한 전형적인 방법은 외란의 영향을 최소화하여 동기탈조의 위험을 방지하는 것이다. 이를 위한 방법으로 고장검출의 신속 및 제거시간의 단축, 고장에 의해 영향을 받는 송전설비의 최소화를 위한 송전계통의 보강 등이 전통적으로 사용되어 왔다. 그러나 이와 같은 전통적인 방법은 송전설비 건설에 따른 비용의 급격한



증가와 환경계약 등 사회경제적인 이유로 여러 가지 제약이 따른다.

한편 국내 전력계통 구성 측면에서 살펴보면 단위 발전기 용량은 유연탄 화력은 500 MW, 원자력은 1000 MW 규모가 일반적이며, 특히 전원입지 개발의 제약에 따라 전원 단지가 대규모화하여 6,000-10,000 MW 규모의 전원 단지가 출현하고 있다. 이는 발전기의 안정도에 영향을 주는 설계기술의 발전 및 여자제 및 조속기계 등 제어 기술의 발전에 따른 결과이기도 하다. 이와 같은 대규모 발전단지 출현은 전체 계통의 안정운용을 위한 방안으로 불안정을 방지하기 위한 안정도 향상 기술을 필요로 한다. 안정도 향상을 위한 대표적인 실용적 기술로 여자 제어, 직렬보상, 병렬보상, SPS(Special Protective System)을 들 수 있으며, 직렬 및 병렬 보상기술은 FACTS(Flexible AC Transmission System)기술로 발전하고 있다. 이들에 대해 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

4.1 여자 제어(Excitation Control)

여자 제어는 소규모 외란의 영향하의 발전기 안정도 향상에 효과적으로 적용되고 있다. 특히 여자 제어 효과에 의한 계통 특성 개선으로 지속적인 진동(sustained oscillation)이나 점점증하는 진동(growing oscillation)의 안정화에 크게 기여하였다.

속응 여자계(High Initial Response Excitation System)는 고장제거 초기에 발전기 단자 전압유지를 통해 동기화 토오크 향상에 기여하여 과도 안정도 향상 효과를 가져왔으며, 계통안정화장치(Power System Stabilizer)는 과도후 계동특성 개선으로 정상상태 안정도 향상에 크게 기여하는 효과가 있음을 보여주었다.

4.2 직렬보상

송전선로의 직렬보상은 일반적으로 송전선로에 직렬로 Capacitor를 삽입하여 송전선로의 리액턴스를 작게 함으로써, 전력-상차각 곡선의 크기를 증대하여 안정도를 향상시킨다. 전기 회로적 측면에서는 등가 임피던스를 감소시켜 송전선로 보강과 같은 효과를 나타낸다.

그러나 기존의 직렬 Capacitor에 의한 직렬보상은 SSR(Sub-synchronous Resonance) 현상을 초래하여 실계통 적용에 상당한 제한을 초래하였다. 최근 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기술의 발달에 의한 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)는 SSR 현상 발생을 억제하고, 직렬 삽입 리액턴스를 연속적으로 제어하여 안정도 향상과 송전용량 증대에 적용되고 있으며, 또한 VSC(Voltage Source Converter)기술의 발달에 따른 인버터형 직렬 보상장치의 실용화는 전력계통 구성 및 운용제어에 상당한 유연성을 제공할 것으로 기대되고 있다.

4.3 병렬보상

동기 조상기와 전력용 콘덴서에 의한 무효전력 보상은 병렬보상의 한 예이다. 기본적으로 병렬보상은 무효전력보

상을 통해 모선 전압을 적정하게 유지하여 안정도 향상에 기여한다. 정지형 무효전력 보상장치(SVC, Static Var Compensator)는 TCR(Thyristor Controlled Reactor)와 TSC(Thyristor Switched Capacitor)의 조합으로 이루어진 무효전력 공급장치로서 제어에 의해 진상 혹은 지상 전류를 공급하여 모선 전압을 제어하고, 적정한 제어 신호에 의해 송전선로의 전력동요에 대한 계통을 제공함으로써 동요억제를 통해 안정도 향상에 기여한다. 이와 같은 응용특성에 의해 SVC는 전압안정도 및 정상상태 안정도 향상 목적으로 다양하게 적용되고 있는 계통제어설비이다. 또한 FACTS 설비의 하나인 STATCOM(Static Synchronous Compensator, 정지형 동기 조상기)는 VSC(Voltage Source Converter)를 이용한 무효전력보상 장치로서 SVC에 비해 제어속도가 빠르고, 제어 범위가 모선전압 변동에 크게 구애를 받지 아니하여 Dynamic Voltage Regulation 및 계통안정도 향상을 통한 송전용량 증대 목적을 위해 적용이 빠르게 확산되고 있다. 또 다른 형태의 병렬보상은 발전단에 설치되어 발전기의 가속을 억제하여 안정도를 향상하는 Dynamic Braking Resister가 있다.

이외에도 VSC 형 직렬 및 병렬 보상장치를 통합하여 선로 조류와 모선 전압을 종합적으로 제어하는 통합전력제어기(UPFC, Unified Power Flow Controller), VSC 형 병렬 보상장치를 Back-to-Back 형태로 구성한 연계장치 등의 FACTS 설비가 안정도 향상을 통한 송전전력 향상에 적용되고 있다.

4.4 SPS(Special Protective System)

안정도 향상을 위한 SPS로는 사고과급방지장치, Controlled Generator Tripping 시스템 등을 들 수 있다. 이와 같은 안정화 제어 시스템 기술은 보호계전시스템기술에 고속 안정도 판별기법을 부가하여, 적정 제어량 연산 및 통합제어를 시행하는 방향으로 발전하고 있으며, 장기적으로는 Phasor Measurement Unit를 이용한 동기위상측정기술을 적용하여 광역계통의 안정화 제어 보호시스템으로 구현될 것으로 예측되고 있다.

5. 전력계통 안정도의 실제적 문제

전력계통의 안정도에 관한 문제는 초기의 발전기 hunting 및 Oscillation 방지를 위한 회전자 제동권선의 적용, 여자기 및 조속기 등 발전기 제어계가 안정도에 미치는 영향의 해석, 디지털 시뮬레이션 프로그램의 개발을 통해 동기기 및 제어계 모델링 정립, 계통해석 이론 및 기법의 확립 등 안정도 이론 및 해석 기법이 정립되어 왔다. 1970년대 PSS에 의한 안정도 향상이론이 제시되었을 때 전력계통안정도 해석이론은 완성된 체계를 이룩한 듯 보였다. 그러나 1980년대 전압붕괴에 따른 계통안정도 문제가 대두되면서 전압안정도 해석의 수리적 모형 및 기법 개발에 관한 이론적 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 1990년대 들어 앞서 그림

1에서 제시한 것과 같은 안정도 분류체제로 자리잡아 가고 있는 과정에 있다.

그러나 전력계통 안정도 이론 및 해석기법의 체계화가 전력계통에서 발생하는 안정도 문제를 모두 해결하고 있다는 것을 뜻하지는 않는다. 시스템으로서 전력계통에는 안정도 한계가 있음은 분명하나 비선형 대규모 시스템으로서의 전력계통의 특성상 이를 분명히 계산하기가 쉬운 일은 결코 아니다. 더욱이 전력계통 안정도는 분석대상 계통의 초기조건, 계통구성, 적용 상정사고에 따라 각각 다르게 되어 계통분석가의 분석 목적에 적합한 결과를 도출하기 위해서는 수많은 반복 계산을 필요로 한다.

가장 대표적인 전력계통 안정도 해석에 관련된 문제로 미국의 경우 뉴욕주의 동서간 송전한계를 결정하는 Total East Interface를 구성하는 송전선로 및 주요 병목지점인 Macy 변전소 부근에서의 Central Interface를 구성하는 송전선로의 위상각 및 전압 안정도 안정한계 조류(Stability and Voltage Limited Power Flow) 계산을 들 수 있다. 서부 및 북부 지역으로부터 남부 맨해튼 지역의 부하 중심지로 전력을 수송하는 송전선로의 조류한계는 2001년 현재 열용량 한계 3,150 MW, 전압제약 한계 2,860 MW, 안정도 한계 3,200 MW로 계산되고 있다. 여기서 특이한 점은 열용량 한계가 안정도 한계보다 낮게 설정되어 있다는 점이다. 이는 열용량 한계 계산시 동일 송전 통로(Corridor) 상의 어느 한 선로라도 열용량 제약에 도달하면 이때의 송전선로 조류 한계가 열용량 한계가 되며, 안정도 한계 계산 시에는 열용량 한계를 전혀 고려하지 않고, 독립적으로 계산하기 때문이다. 전압제약 한계 계산 역시 전압 문제로 국한하여 독립적으로 계산한다. 이 때 중요한 점은 적용 사고의 선택과 상정사고 모의 절차이다. 또한 특기할 만 사항은 안정도 향상 방안으로 Macy 변전소에 설치한 200 MVar 용량의 Convertible STATCOM에 의해 전압에 송전제약 한계를 60 MW 증대시켰다는 점이다.

우리나라의 경우는 흔히 이야기하는 남북 조류 한계를 들 수 있다. 남북 조류 한계는 수도권과 중부서해안 지역, 수도권과 영동권을 연계하는 송전선로상의 조류 한계를 말한다. 이 조류 한계는 계통운영의 경제성 측면에서 상당히 중요한 뜻을 내포하고 있다. 즉 조류한계는 남쪽 지방의 발전기 보다 수도권 근방의 연료비가 비싼 발전기 투입을 요구하여 전체 계통의 경제성을 저하시키는 방향으로 작용한다. 따라서 남북 조류 한계의 증대시키는 일은 전체 계통운영의 경제성 향상에 주요한 사항이고, 이를 위한 안정도 향상 방안의 기술성 및 경제성 검토가 필요한 것으로 여겨진다.

또한 특정 지역에서 고장전류 크기의 증가는 차단기 정격을 초과하는 경향을 나타내어 계통운영의 안전성 확보를 위해 불가피하게 고장전류 억제 대책으로 모선 분리 운전 을 하게 된다. 이와 같은 모선 분리는 계통구성의 변화를 초래하여, 계획 당시의 안정도 유지 기준을 충족하기가 어렵게 한다. 따라서 이와 같은 계통구성 변경에 따른 안정도 저하를 보완하기 위한 안정도 향상 대책이 필요하고, 이에 대해 FACTS 기술은 경제적 해결 방안을 제시할 수 있을

것으로 기대된다.

한편 구조개편에 의한 경쟁적 전력시장 체제의 도입은 계통구성 및 운용에서의 불확실성이 증가하여 계통혼잡의 원인으로 작용할 수 있다. 이에 대한 대책으로 계통운용 조건 및 계통구성 변화에 따른 혼잡한계의 정확한 계산과 이를 완화(relief)할 수 있는 대책 수립은 계통운영의 유연성 확보 측면에서만뿐만 아니라 시장운영의 효율성 제고 측면에서도 대단히 중요한 사항이다.

이와 같이 전력계통 안정도 해석은 전력계통이 당면하게 되는 실제적 문제를 해결하는데 주요한 의사결정 수단이 되며, 특히 송전제약에 의해 계통의 안정성과 경제성이 문제가 되는 경우 안정도 향상 기술은 이를 합리적(기술적 경제성 확보하며)으로 해결하는데 대단히 유용한 수단이 된다.

6. 맺음말

최근 전 세계적으로 전력산업 구조개편이* 추진되고 있다. 전력산업 구조개편은 각 나라가 처한 전력산업 구조에 따라 다양한 형태로 진행되고 있으나, 핵심적인 사항은 송전망 개방을 통한 발전부문의 경쟁촉진 및 소비자 선택권 제고를 기본 목표로 한다. 이를 위해 기존의 전력회사는 발전부문을 분리하여 판매하여야 하고, 송전망 운영의 공정성 및 안정성 확보를 위해 송전회사와 Independent System Operator의 역할 및 기능이 각기 처한 여건에 적합하도록 정립되고 있다.

우리나라의 경우는 2001년 4월 시작한 원가반영 전력시장에서 발전경쟁 부문도입을 시작으로 2003년 1월 도매경쟁 전력시장의 개설, 2009년까지 소매경쟁 전력시장의 도입을 목표로 전력산업 구조개편이 진행되고 있다. 이러한 구조개편 과정에서 전력계통 부분을 분리하여 생각하면, 계통계획과 송전설비 확충 및 유지관리를 담당할 송전회사와 경쟁적 전력시장 및 전력계통의 운영을 담당하는 전력거래소로 구분할 수 있다. 이러한 변화는 비단 조직의 분리 측면에서만뿐만 아니라 통합된 계통계획 및 운영 체제에서 각기 분리된 체제로 변화하여, 계획과 운영에서 추구하는 전력시장의 효율성 제고라는 목적은 동일하나 이에 접근하는 방법과 수단은 크게 다를 수 있다. 특히 송전 혼잡에 대한 정의와 이에 대한 대책에서 상당한 의견 차이를 보일 수 있는 여지가 있다.

송전 혼잡은 본질적으로 시장가격 결정에 참여한 발전기 대신 시장 가격보다 비싼 발전기의 운전을 강요하여 전력거래의 정산 가격을 높이는 것을 말한다. 물리적으로는 계통의 안전성 유지를 위한 송전 한계에 기인하는 것으로 열용량, 전압, 안정도 제약에 따른 송전조류 한계 계산을 필요로 한다. 결국 송전혼잡에 의한 비용 증가를 방지하기 위해서는 송전조류 한계 계산의 정확성 향상을 위한 안정도 해석 기술의 고도화를 요구하고, 송전혼잡 한계에 의한 제약을 완화하기 위해 전력계통 안정도 향상기술이 기술적 및 경제적 타당성을 갖게 된다.

이와 같은 전력계통 여건 변화에 대응하여 전력계통의 안정성 확보와 송전혼잡 제약의 최소화를 위해서는 안정도 해석기술에 능한 전문가가 적정한 대우와 함께 시장에서의 계통운영의 효율성 제고를 위해 적극적으로 참여할 수 있는 여건이 성숙해야 한다.

또한 송전혼잡의 최소화 및 송전설비의 효율적 이용을 위해 필요한 안정도 향상에 대한 신기술 개발에 대한 투자도 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Proceedings of the Workshop on Power System Security Assessment, Ames, Iowa, 1988
- [2] P. Kundur, 'Power System Stability and Control' McGraw-Hill, 1993
- [3] W. D. Stevenson Jr, 'Elements of power system analysis'
- [4] P. Anderson and A. A. Fouad, 'Power System Control and Stability
- [5] Sally Hunt and Graham Shuttleworth, 'Competition and Choice in Electricity', Wiley, 1997

[6] FACTS에 의한 송배전 계통의 용량증대 기술 개발, 최종보고서, 과학기술부

[7] 실시간 시스템을 이용한 계통 안정화 제어·보호 시스템 개발, 최종보고서, 1998, 전력연구원/한국전기연구소

저자 소개



오 태 규 (吳 泰 圭)

1951년 4월 30일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 Iowa 주립대 전기공학과 졸업(공학박). 1987년 4월-현재 한국전기연구소 책임연구원(전력연구단장).