

# 새로운 전력계통 운용환경에서의 온라인 동적 안정도 평가의 역할

남해곤\*, 송성근\*\*

(\*전남대 공대 전기공학과 교수 \*\*전남대 공대 전기공학과 박사과정)

## 1. 서 론

동적 안전도평가 (dynamic security assessment, DSA)는 최악의 상정사고에 대하여 계통이 견딜 (tolerate) 수 있는지 여부와 또는 만약 견딜 수 없는 경우 계통이 붕괴되는 것을 방지하기 위하여 어떤 조치가 취해져야 하는지를 결정한다. 계통의 안전이 위협받는 상황에서 안전도를 향상하기 위한 조치를 결정하는 것은 조치시간, 비용, 위험의 정도 등의 매우 복잡한 함수로 주어진다. 따라서, DSA는 많은 계산시간과 노력을 필요로 하며, 전통적으로 off line 운전 계획에 의하여 수행되어 왔다. 즉, 단기예측 데이터에 의해 수많은 DSA 작업을 수행하여 얻은 결과를 look up table로 저장하고 실제 계통에서 이에 근접한 사고가 발생하면 조치를 취한다 [1].

현대 전력산업은 '적은 투자로 더 많은 일을 수행'해야 하는 난제에 직면하고 있다 [2]. 부하가 지속적으로 증가하고 조류의 패턴이 바뀌는데도 이를 뒷받침하여야 하는 송전선로는 환경과 재정상의 이유로 부하의 증가속도로 새로 건설하는 것이 어렵다. 즉, 발전력 대비 송전용량은 지속적으로 감소하여 안정도마진도 감소되어 왔다. 다행히 지금까지는 발전/송전/배전 시설이 한 전력회사에 의해 소유되고 운영되어 네트워크상의 제약을 극복하는 계획운전이 가능하였다. 그러나, 최근 전 세계적으로 진행되고 있는 전력산업의 구조개편 추세 하에서 발전/송전/배전 업무가 분리되어 소유되고 운영되는 상황하에서는 네트워크상의 제약을 극복하는 계획운전이 쉽지 않을 전망이다. 현재도 송전선로가 중부하로 운전되고 병목현상이 발생하여 안전도가 우려되는 상황하에서, 여기에 전력을 입찰에 의해 결정하게 되면 조류의 패턴은 예상할 수 없는 불확실성을 가지게 되고 계통의 안전도도 더욱더 위협받을 것으로 예상된다. 따라서, 지금까지는 계통의 DSA를 off-line으로 수행하여도 무방하였으나, 조류패턴이 수시로 바뀔 수 있는 전력계통의 새로운

운용환경 하에서는 적절한 신뢰도를 확보하기 위한 온라인 DSA의 역할이 증대될 전망이다.

안정도 문제는 다음과 같이 크게 5가지 유형으로 분류할 수 있다.

- (1) 열 안정도 (thermal stability)
- (2) 과도안정도 (transient stability)
- (3) 미소신호안정도 (small signal stability)
- (4) 전압안정도 (voltage stability)
- (5) Subsynchronous resonance (SSR)

열 안정도는 선로 또는 기기가 장시간 과부하로 운전되는 경우이다. 선로를 포함한 대부분의 전력기기는 보통 수분간 어느 정도의 과부하를 허용하므로 과부하 해소를 위한 시간적 여유가 있고, 따라서 상대적으로 느리고 계통운전을 중앙통제하는 EMS (energy management system)에 의해서 관리된다. SSR 현상은 선로의 리액턴스를 과다하게 직렬 캐패시터 보상할 때 인공의 발전기가 보통 10 Hz로부터 동기주파수인 60 Hz보다 낮은 주파수에서 축진동을 일으키는 현상을 말한다. SSR 현상은 비교적 높은 주파수대역의 진동이므로 멀리 전파되지 못하는 지역적인 현상이며, 상거리선로가 없고 직렬보상이 심각하게 고려되고 있지 않는 국내의 경우는 발생 가능성이 그리 높지 않다. SSR에 대한 대책은 발전기나 인공의 TCSC 등 지역적인 제어로 가능하다. 본 논문에서는 계통의 광역 안정도가 관심사이므로, 열 안정도와 SSR은 더 이상 기술하지 않는다.

과도안정도는 동기화토크의 부족에 의해 발전기가 계통으로부터 분리되는 현상이며 큰 외란이 발생한 후에 보통 1초 이내에 일파동요(first swing) 과도안정도 문제는 결정된다. 최근 '잘 개발된 (well developed)' 전력계통에서 제동토크의 부족에 의해 발전기가 0.1~2 Hz로 진동하는 미소신호안정도와 무효전력의 수급불균형에 의한 전압안정도 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이들 안정도문제는 계통의 안전도를 심각하게 위협하는 요소로 작용할 전망이다. 특히

구조 개편되고 있는 전력계통에서, 이들 안정도를 온라인으로 평가하고 대책을 마련하는 것이 계통의 안전 운전에 관련이 되고 있다. 본 논문에서는 1996년 8월 10일 WSCC 계통붕괴사고와 그로부터 얻을 수 있는 교훈, 그리고 IEEE의 Power Engineering Society (PES)의 1999년 하계 및 2000년 동계 학술회의에서 논의된 온라인 DSA 내용을 중심으로 DSA의 구성과 역할에 대하여 기술한다.

## 2. 1996년 8월 10일의 WSCC 사고 (3)

최근 전력선전국인 미국의 WSCC와 브라질 등에서 발생한 광역 정전사고는 시사하는 바가 크다. 특히 WSCC의 경우 계통구조와 조류패턴이 한진계통과 유사한데, 이 사고로 계통이 4개로 분리되고 우리나라의 총 부하와 비슷한 30,390 MW의 부하가 차단되었으며 약 750만 수용가가 영향을 받았다. [3]

### 2.1 사고전 상황 (3)

그림 1은 미국 Pacific Northwest (PNW) 계통의 주요 500 kV 선로의 단선도를 그리고 표 1은 사고전 주요 경로의 조류와 정격용량을 보여주고 있다. 이 계통은 캐나다와 Columbia 지역에서 발전된 전력을 California-Oregon Intertie (COI)와 Pacific HVDC Intertie (PDCI)를 통하여 부하밀집 지역인 캘리포니아로 전송하는 큰 남하조류로 특징지어진다. 사고 당일 PNW 계통의 발전양상은 캐나다로부터 많은 전력을 수입하고 북부 Columbia 지역의 Grand Coulee와 Chief Joseph 발전소가 고출력으로 운전되고 남부 Columbia 지역의 John Day와 Dalles 발전소가 저출력으로 운전되어, 발전력의 북부지역 편중현상이 심화된 상태였다. 여기에 그림 1에 점선으로 표시한 John Day-Marion-Lane 선로와 Big Eddy-Ostrander 선로가 개방되어 네트워크도 취약한 상태이었으며, Keeler 변전소의 500/230 kV 변압기가 정기보수 중에 있어 Keeler의 500 kV 모선이 230 kV 모선에 연결된 SVC로부터 전압제어를 위한 무효전력을 지원 받을 수 없는 상황이어 문제의 심각성을 더하였다.

### 2.2 사고의 전개 (3)

오후 3시 42분 경 Allston-Keeler 500 kV 선로가 나무와 접촉하는 사고로 Allston-Pearl 구간이 개방되었다. 이 경로를 통하여 흐르던 1,300 MW의 조류는 동쪽의 Hanford 모선을 경유하는 500 kV 우회 선로와 Allston-Keeler 500 kV 선로와 나란히 부설된 115 kV 및 230 kV 저압선로로 이동되었다. 이로 인하여 사고선로와 평행한 저압선로들이 약 115% 과부하로 운전되고 Hanford, John Day 그리고 McNary 등 남부 Columbia 지역의 모선전압이 저하되었다.

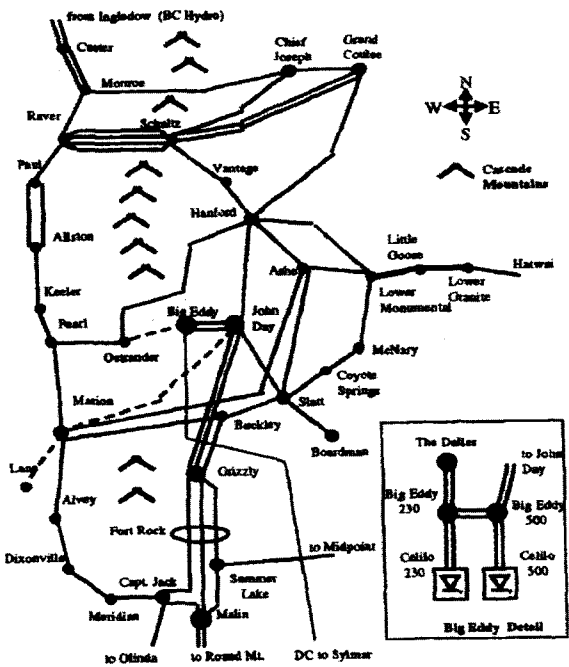


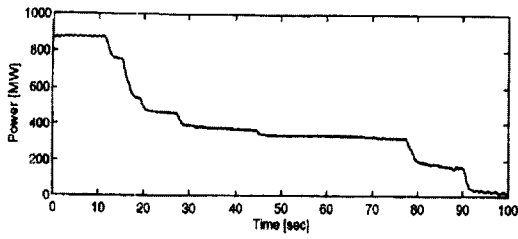
그림 1. PNW 계통의 500 kV 선로의 단선도

표 1. 사고전 PNW 계통의 조류

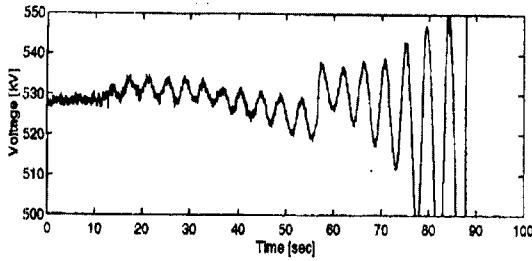
경로	조류 (MW)	방향	정격용량 (MW)	부하 (%)
COI	4,350	북남	4,800	91
HVDC	2,850	북남	3,100	92
B.C Hydro - PNW	2,300	북남	2,300	100
Midpoint - Summer Lake	600	동서	1,500	40

Allston-Keeler 500 kV 선로사고 발생 약 5분 후 이 선로와 평행한 115 kV 선로와 230 kV 선로가 과부하로 개방되고, 이와 거의 동시에 McNary 발전소의 13기의 발전기가 여자의 과여자 보호계통에 의하여 정지되었다. 이 시점부터 계통의 지역간 저주파진동 (inter-area low frequency oscillation)이 시작되고 이 진동은 점점 커져 계통이 붕괴된다. 그림 2는 McNary 발전소의 출력감소에 따른 500 kV 모선전압, COI 조류 (Captain Jack-Olinda 선로와 Malin-Round Mountain 선로 조류의 합), B.C. Hydro로부터의 수입전력인 Ingledow-Custer 선로의 조류, 그리고 PDCI 조류를 차례로 보여주고 있다.

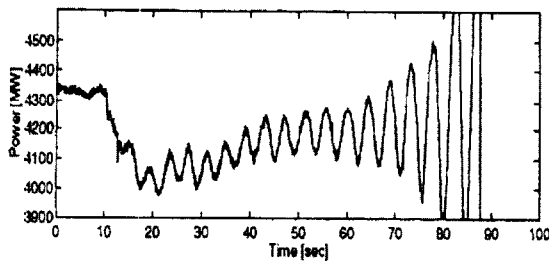
McNary의 발전기들이 정지되자 계통주파수가 저하되고 AGC (automatic generation control)에 의해 Grand Coulee, Chief Joseph, 그리고 John Day 발전소의 출력이 증가하고 캐나다로부터의 수입전력도 증가한다. 이로 인하여 남북선로의 부하가 더 증가되고 남부 Columbia 지역의 무효전력 공급능력이 감소되어 이 지역의 평균 전압이 지속적으로 감소되었다. 그림 3은 남부 Columbia 지역의 John Day 및 Big Eddy 500 kV 모선의 전압강하를 보여주고 있다.



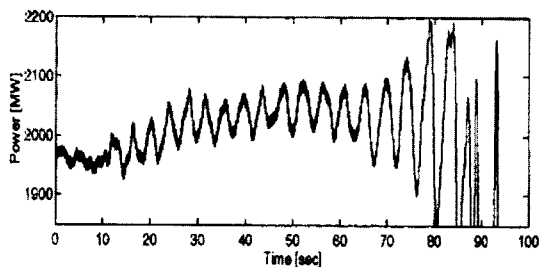
(a) McNary Power House Output



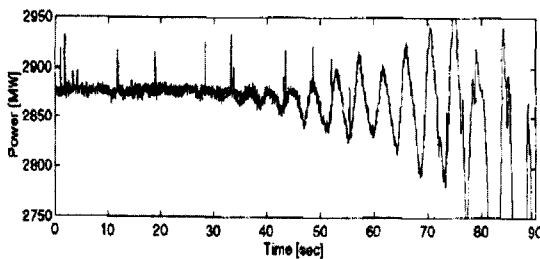
(b) Malin 800 kV Bus Voltage



(c) California-Oregon Intertie Power



(d) Ingledow-Custer Power



(e) Pacific HVDC Intertie Power (Total at Celilo)

그림 2. WSCC 사고기록

Celilo에 위치한 PDCI의 변환기는 전압이 정상수준인 초기 단계에서 일정전류 (일정전력) 모드로 운전되고 있었다. 그러나 변환소의 AC 전압이 진동함에 따라 전압의 높은 쪽에서는 일정전류모드를 유지되고 낮은 쪽에서는 최저 점호각 한계에 도달하여 PDCI 전력도 진동하게 된다. 그림 2.e는 Celilo 변환소에서의 총 직류전력을 보여주고 있다. PDCI의 조류가 진동하자 AC 계통의 연계선 조류의 진동도 증폭되어 COI가 분리되게 된다.

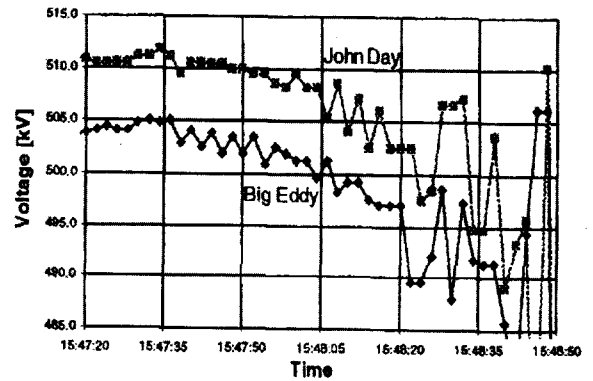


그림 3. 남부 Columbia 지역의 전압

결론적으로, 계통붕괴 초기에는 두 기간 선로를 정지 보수하기 위해 개방하여 계통이 취약한 상태에서 다른 기간 선로가 사고로 개방되자, 이에 나란히 설치된 저전압 선로가 과부하로 개방되고, 우회 선로를 통한 조류의 증가로 무효전력 소비가 급증되고 저전압 현상을 유발하여 인근 발전소가 과여자로 정지되는 전압문제였다. 발전소가 정지되자 최종적으로 저전압과 함께 저주파진동이 발생하고 전압의 진동에 기인한 HVDC의 진동이 저주파진동을 더 악화시켜 계통을 붕괴에 이르게 하였다.

### 2.3 정확한 모델의 중요성 [3]

계통붕괴의 정확한 원인을 규명하고 사후조치를 강구하기 위해서는 simulation으로 사고를 재현하는 것이 필수적이다. BPA에서 SCADA의 자료를 기초로 사고전 상태를 정확히 구성한 후 EPRI의 ETMSP 프로그램으로 외란을 simulation 한 결과 중에서 Malin 모선의 전압과 COI 조류를 그림 4와 5에 나타내었다. 그림에서 계통을 붕괴시킨 주된 원인인 연계선의 저주파진동이 simulation에서는 전혀 재현되지 않고 계통이 안정한 것으로 나타났다. 실제 기록과 simulation 결과의 차이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지역간 진동: simulation에 의한 모의계통에서는 진동이 발생하지 않고 안정하였다.
- (2) 평균전압: 실제계통에서는 전압이 강하하였으나 모의계통에서는 그렇지 않았다.
- (3) 연계선 조류: 실제계통에서는 평균 COI 조류가 초기에 감소한 후에 AGC에 의해 다시 증가하는 추세이나,

모의 계통에서는 AGC를 고려하지 않았으므로 이 현상이 재현되지 않았다.

- (4) PDCI는 실계통에서 최저 점호각에 도달 모드의 전환이 발생하나, 모의계통에서는 일정전류모드를 유지한다.
- (5) 모의계통에서 McNary 발전소가 정지한 후에 최대 주파수편차는 실계통에서 기록된 편차의 60%에 불과하다.

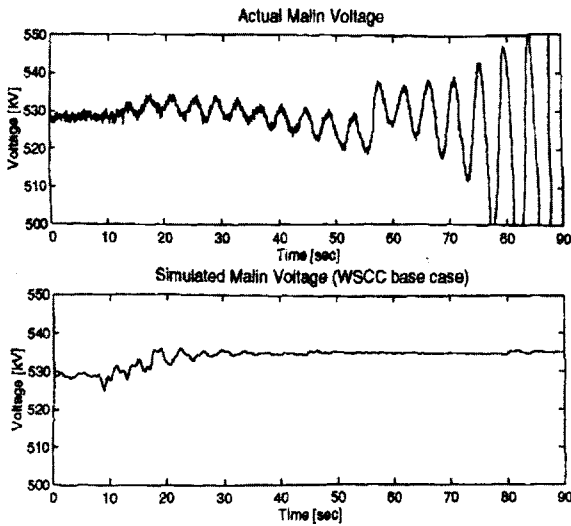


그림 4. Malin 500 kV 모션전압

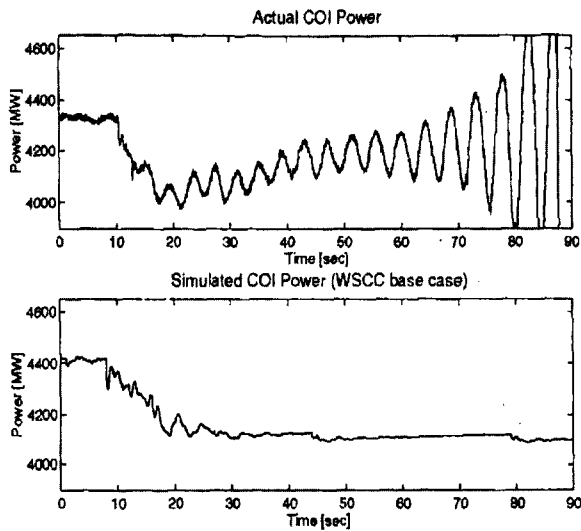


그림 5. COI 조류

BPA에서 실계통 측정자료와 simulation 결과의 차이를 고정하기 위한 작업이 진행되었으며, 이 노력의 결과 사고를 정확히 재현하는 것이 가능하였다. 모델수정의 주요 내용은 아래와 같고 상세한 내용은 문헌 [3]에 기술되어 있다.

- (1) 상세한 HVDC 모델의 구현
- (2) BPA의 AGC를 simulation 모델에 포함

- (3) Governor droop의 정확한 모델 구현
- (4) 수력발전의 전압제어 알고리즘을 모델에 반영
- (5) 동적 부하모델 추가

## 2.4 WSCC 사고가 주는 교훈

WSCC는 1996년 7월 2일에도 사고의 발생 위치와 전파 경로는 다르더라도 선로의 개방에 의해 초기에 저전압 현상이 발생하고 뒤에 연계선의 저주파동요로 발전하는, 8월 10일 사고와 양상이 같은 사고를 겪었다 [6]. 발전원이 캐나다와 북부 Columbia 지역에 편재되고 부하는 남쪽 캘리포니아에 집중되어 계통구조가 우리와 비슷하고 두 계통 모두 소위 “well-developed system”이라는 점에서 WSCC 계통의 사고는 우리에게 시사하는바가 크다.

- (1) 1996년 WSCC 계통에서 발생한 두 사고는 처음에 사고로 선로가 중부하로 운전되어 전압문제가 발생하고 후에 지역간 저주파진동이 발생하여 계통을 붕괴하게 하였다. 전압과 저주파진동 문제가 ‘well-developed’ 계통에서 전송능력을 제한하는 가장 중요한 요인이라는 것은 잘 알려진 사실이다. 우리 나라도 충청/호남 지역의 전압이 취약하고 저주파진동의 발생가능성이 잠재하는 것으로 보고되고 있다 [7-8].
- (2) 1996년 WSCC의 두 사고에서 계통붕괴에 결정적 역할을 한 0.2-0.3 Hz 대역의 지역간 저주파진동은 약 10년 전부터 그 가능성이 보고되었음에도 불구하고 [4-5] 이의 억제에 위한 노력이 부족했던 것 같다. 지역간 저주파진동 억제에는 여러 가지 방법이 있을 수 있다. 예를 들면, 속도가 느린 구형 여자기를 신형 고성능 여자기로 교체하고 기존의 analog PSS를 가속력을 입력으로 사용하는 디지털 PSS로 교체하는 등이다. Powertech Labs Inc.의 연구에 의하면 [4] 8월 10일 계통을 붕괴시키는데 결정적 역할을 한 COI의 저주파진동은 남부 캘리포니아의 3개 발전소에 설치된 PSS를 수정하여 충분히 제거될 수 있었다. 그러나, 지역간 모드의 억제를 위해선 HVDC의 power를 modulation하거나 [9] AC 선로에 TCSC를 설치하여 보조제어(supplementary control)을 수행하는 것이 [10-11] 더 효과적이고 근본적인 대책이 될 수 있다.
- (3) 사고발생 전까지 사용하던 simulation 모델이 전압문제와 저주파진동을 정확하게 예측할 수 없어 운용계획 단계에서 DSA를 수행했다라도 대규모 사고의 잠재성을 경고할 수 없었다. BPA가 사고 후 모델을 검증하고 해석한 결과, remedial action으로 이미 설치되어 있는 직렬 capacitor를 투입하여 남북간의 전기적 거리를 줄이고 Hanford와 John Day에 설치되어 있는 병렬 capacitor를 투입하여 무효전력을 보강하기만 하였어도 750만 수용가에 전력공급이 중단되는 최악의 사고는 막을 수 있었다는 결론은 정확한 simulation 모델의 중요성을 단적으로 말해준다. 또한, 계통해석



결과 McNary 발전소가 정지되지 않았거나 [3] 캘리포니아에 3개의 PSS만 수정하였다면 [4] 계통붕괴는 발생하지 않았다는 연구결과는, 정확한 모델에 기초한 DSA로 사고를 예방할 수 있고 그 대책도 여러 가지가 있을 수 있음을 의미한다.

- (4) 온라인 DSA의 필요성: 그림 6은 Keeler-Allston 선로사고 직전부터 계통붕괴까지 COI를 구성하는 선로 조류의 진동을 보여주고 있다. 지역간 저주파진동에 의해 계통이 붕괴되기 전에도 외란이 발생할 때마다 제동특성이 불량한 지역간 저주파진동이 2회 있어, 수분 후 곧 닥칠 사고를 암시하고 있었다. 온라인 DSA가 구비되었더라면 운전원에게 경보를 울리고 운전원은 북부지역의 발전출력 저하와 HVDC의 출력저하 등 사고예방을 위한 적절한 조치를 취할 수 있었을 것이다.

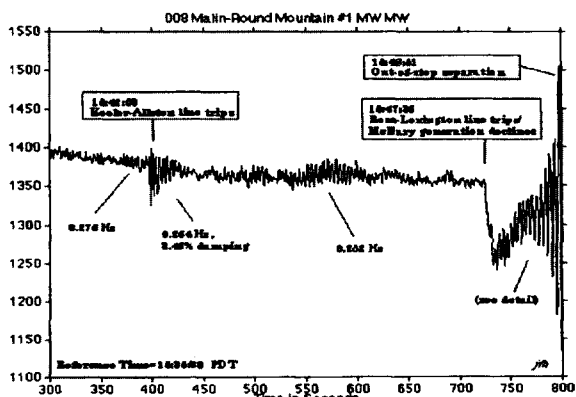
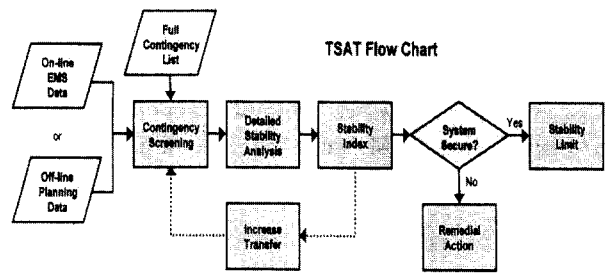


그림 6. WSCC 사고에서 저주파진동의 발전과정

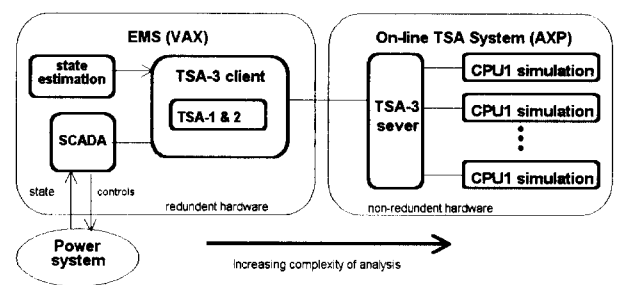
### 3. 온라인 DSA의 구조

최근 전력산업계가 WSCC와 브라질 등에서 광역 정전사고를 겪고 구조개편으로 계통운전조건이 더 열악해지는 환경으로 인하여, 선진국을 중심으로 광역의 온라인 DSA를 구축하고자하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 북미와 일본에서 개발되고 있는 주요 DSA 구조는 그림 7과 같다 [1-2, 12-18].

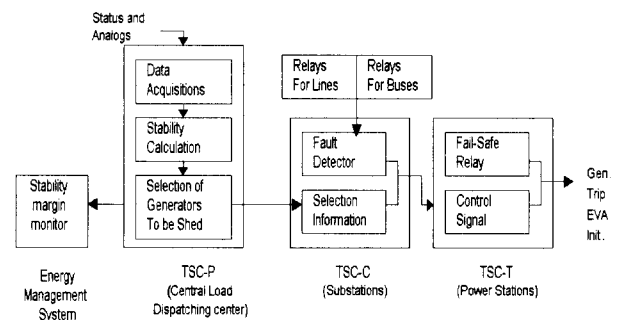
이 예들을 종합하면, DSA가 EMS로부터 계통데이터를 받아 안정도 평가를 수행하도록 설계되었고, 이들 DSA가 다루는 안정도 유형은 온라인 과도안정도 평가 (transient security assessment, TSA)가 주된 내용을 이루고 있다. 이에 비하여 전압안전도평가 (voltage security assessment, VSA)는 상대적으로 소홀히 취급되고 있으며, Powertech이 "VSAT (voltage security assessment tool)"을 개발했고 [12,17], BPA가 지역별 무효전력의 여유를 전압안전도 평가 기준으로 현재 사용하고 있고 Powertech이 개발한 VSAT를 설치하고 있는 정도이다. 종합하면, 모든 DSA가 TSA를 주로 다루고 있으며 상대적으로 VSA 기능은 취약하고, 미소신호안정도는 다루고 있지 않다.



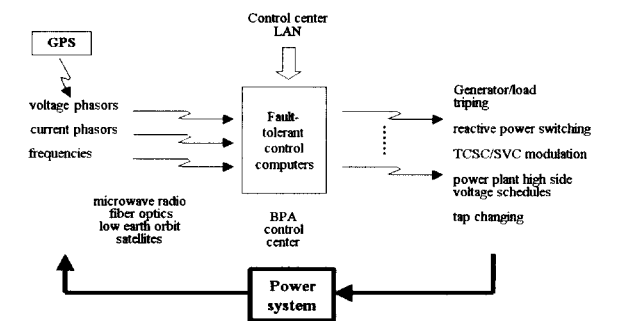
(a) Powertech Lab.



(b) B.C. Hydro/Alstom ESCA



(c) 일본 중부전력



(d) BPA

그림 7. 주요 DSA 들의 구성도

여기서 특기할 점은, BPA의 DSA는 다른 회사의 DSA가 TSA에 중점을 두고 있는데 반하여 VSA에 더 무게를 두고 있으며, EMS와 동기화된 위상각 측정 시스템을 통합하여 중앙(centralized) 또는 광역 제어로 안전도 문제에 대처하고자 하는 “Advanced Stability and Voltage Control” 프로젝트를 진행중이라는 점이다 [2]. WSCC 사고가 초기의 전압문제가 저주파진동문제로 발전한 것을 고려할 때, VSA 기능을 강화한 것은 적절하다고 생각된다. WSCC와 한진계통은 계통구조와 조류패턴이 유사하여, 현재 이와 유사한 PSDM (Power System Dynamics Monitor) 시스템을 구축 중인 한진에 좋은 참고자료가 될 수 있을 것이다. BPA 프로젝트의 주요 기능은 다음과 같다.

- (1) 발전기 정지와 무효전력보상 등의 빠른 제어
- (2) 발전기전압 scheduling 신호를 발전소에 빠르게 전송 (전압 비상상태 시 발전기 무효전력을 최대한 활용하고자 함)
- (3) ULTC와 다른 저속 응답 무효전력 기기의 자동제어
- (4) 안정도의 신속한 중앙제어를 위한 유연한 platform을 저비용으로 마련함.

#### 4. 온라인 TSA

전통적으로 과도안정도해석은 시영역 simulation (time-domain simulation, TDS)에 의해 off-line으로 수행되었다. TDS 방법은 현대의 고성능 컴퓨터를 사용하더라도 매우 느리고, 전송능력한계 (power transfer limit)와 remedial control action을 결정하는데 필요한 안정도 마진과 감도에 관한 정보를 제공하지 못하는 단점이 있다. 전형적인 온라인 TSA는 다음과 같은 기능으로 이루어진다[1,12].

##### 4.1 상정사고 선택 및 screening

지금까지 보고된 TSA는 엔지니어에 의해 선택된 많은 상정사고 목록에 대해서 TSA를 수행하여 안정도마진을 계산하고, 경미한 상정사고를 여과하여 (screening out) 순위를 정하고 주요 상정사고 (critical contingency)만을 선택한다. 많은 상정사고를 screening 하여야 하므로, 계산시간의 단축을 위해 발전기의 고전모델 같은 간략한 모델을 사용하고 안정도마진의 계산은 DSA에 따라 서로 다른 방법을 사용한다. 예를 들면 Powertech의 경우 Dynamic Extended Equal-Area Criterion (DEEAC)을 [1,12,16], B.C Hydro/Alstom은 Transient Energy Function (TEF)을 [13,15], 그리고 일본 중부전력의 Transient Stability Control (TSC) System은 감속력 (deceleration power) 지표를 [14,18] 정의하여 사용하고 있다.

##### 4.2 주요 상정사고의 정밀해석

선택된 주요 상정사고는 정밀한 해석을 필요로 한다. 안

정도 마진을 계산하는 모든 방법이, 발전기를 포함한 기기의 상세 모델을 사용한 TDS 결과를 DEEAC, TEF 그리고 감속력 지표 등 직접법으로 mapping하여 안정도마진을 추출한다. 안정도지표 추출방법은 상정사고 screening 에서 사용한 방법과 동일하다. TDS는 많은 시간을 필요로 하므로 simulation tool은 다음 특성을 가지는 것이 바람직하다.

- (1) 다양한 모델 (comprehensive model library)을 갖출 것
- (2) 빠른 simulation을 위해 trapezoidal rule이나 Gear 법 같은 가변 step-size 수치적분법을 사용할 것
- (3) Simulation 중 계통의 안정/불안정을 조기에 결정하여 simulation을 조기에 종결할 것 (early termination)

상정사고 정밀해석에는 TDS가 사용되므로 그 부산물로 진동의 제동비 (damping ratio)와 과도상태의 전압 violation도 검사하는 것도 가능하다 [1].

##### 4.3 최대 전송전력 탐색 (Power Transfer Limit Search)

TSA는 과도안정도 관점에서 한 지역에서 다른 지역으로 전송할 수 있는 최대전송전력 (total transfer capacity, TTC)을 결정하는 기능도 수행할 수 있다 [1]. 두 지역의 경계에서 한 지역에 발전여력이 존재하면, 이 지역에서 발전력을 증가시키고 다른 지역에서 부하를 증가시키거나 발전력을 감소시켜 두 지역을 연결하는 조류를 증가시키면서 안정도 마진을 계산한다. 그림 8은 문헌 [1]에서 4655-모선과 155-기의 발전기로 구성된 대규모 계통의 TTC를 계산한 결과를 보여주고 있는데, 일단 두개 이상의 부하 수준에서 안정도마진이 계산되면 TTC는 계산된 마진의 interpolation 또는 extrapolation에 의해 빠르게 계산된다.

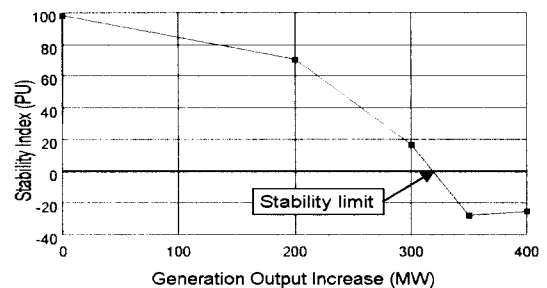


그림 8. Total transfer capacity의 탐색

##### 4.4 과도안정도 제어

TSA가 만약 특정 상정사고를 과도불안정이 우려되는 비상상태 (emergency state)로 판정하면 과도안정도 향상을 위하여 다음과 같은 비상제어 수단의 사용이 가능하다 [1].

- (1) 발전기 trip
- (2) Steam turbine fast valving/generation runback



- (3) Load shedding
- (4) Dynamic braking
- (5) Transient excitation boosting
- (6) HVDC link rapid power ramping

### 5. 온라인 VSA

앞에서 기술한대로 전압 안정도는 많은 전력계통에서 전송능력을 제한하는 중요한 요인으로 작용하고 있고 전력산업의 구조개편은 앞으로 이 경향을 심화시킬 것으로 예상된다. VSA의 과정은 TSA와 매우 유사하다. 즉, 많은 상정사고 목록 중에서 주요상정사고를 PV-곡선 또는 QV-곡선의 iterative filtering에 의해 screening하고 reactive support index (RSI)를 정의하여 상정사고의 ranking을 수행한다 [12,17]. 또한 선택된 주요 상정사고는 fast TDS 또는 quasi-dynamic simulation에 의해 상세히 분석된다. TSA와 다른 점은, 상정사고 screening 및 ranking이 TSA에서는 발전기 고전모델 등 간략화된 기기 모델을 사용한 TDS에 기초하는 반면 VSA에서는 조류계산을 사용한 PV-곡선 또는 QV-곡선에 기초하며, 주요상정사고의 정밀해석을 위해 TSA와 VSA 모두 TDS를 사용하나 TSA에서는 기기의 상세 모델을 사용하는 반면 VSA에서는 long-term dynamics를 관찰하여야 하므로 long-term simulation에 적합한 S/W를 사용하거나 모델에서 빠른 동특성을 무시한 quasi-dynamic 모델을 사용한다.

### 6. 온라인 DSA에서 정확한 모델구축의 중요성

앞에서 온라인 DSA 기술이 상당히 진척되었고 곧 실제 통에 적용될 수 있음을 기술하였다. 그러나 모델이 부정확한 경우 모델에 기초한 DSA의 결과는 무의미한 수치일 뿐이며 WSCC 사고는 이를 단적으로 잘 대변하고 있다. 따라서 정확한 DB의 구축은 DSA의 필수조건이다. 최근 DSA가 EMS를 통하여 네트워크 모델을 실시간으로 취득하고자 하는 추세는 변화하는 네트워크 configuration과 부하 등 DSA를 위한 DB의 정확성 향상에 크게 기여할 것이다. 그러나, 동기 및 부하 모델 등 EMS에 의해 취득할 수 없는 영역에서는 모델의 정확성을 높이는 노력이 지속되어야 한다. 예를 들면, 그림 9.a는 한전계통의 한 상정사고에 대하여 simulation한 결과를, 그림 9.b는 DEEAC에 의하여 일기무한모선 계통으로 mapping 하고 안정도마진을 계산하기 위하여  $P\delta$ -곡선을 그린 것이다. 여기서 발생할 수 있는 오차는, TDS 과정에서 모델의 부정확성에 의해 발생하는 오차와 일기 무한모선으로 모델을 축약하는 과정에서 발생하는 오차이다. 따라서, TSA로 안정도마진을 결정하고 remedial action을 취하는 것이 가능하더라도, 모델이 부정

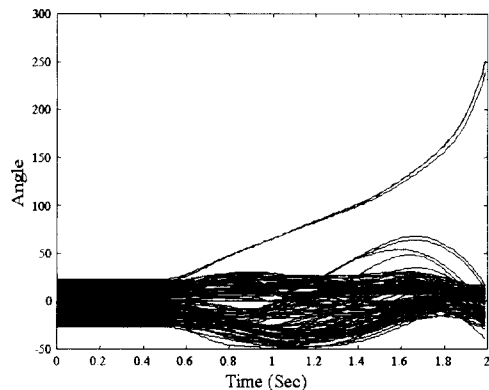
확하여 simulation 결과가 부정확하거나 모델을 축약하는 과정이 많은 오차를 유발하면 TSA의 신뢰도는 결여된다. 따라서, 이 두 과정에서 발생하는 오차를 줄이는 노력이 TSA 신뢰도와 직결된다.

모델 정확성의 필요성은 미소신호 안정도의 예로도 보일 수 있다. 1999년 한전계통의 미소신호안정도를 Hessenberg 법을 [7] 사용하여 해석하면, 아래와 같이 고유치의 실수부가 양의 값을 가지어 진동이 커지는 2개의 지배적 고유치가 계산되어 계통이 미소신호안정도 측면에서 불안정할 가능성을 보여주고 있다.

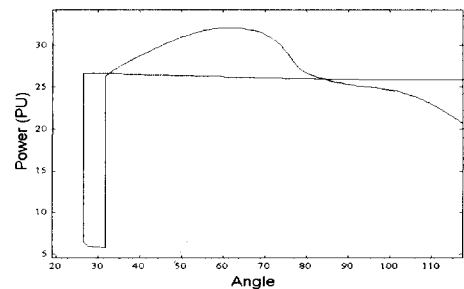
$$\text{모드 1 : } 0.1991 + 5.1217i$$

$$\text{모드 2 : } 0.0713 + 5.6266i$$

고유벡터를 계산한 결과 두 모드 모두 주로 울진과 영광 원자력 발전소간의 지역간 저주파진동모드임을 알 수 있고, 과도안정도 simulation 결과도 미소신호안정도 해석결과를 뒷받침한다. 따라서 모델에 기초한 해석은 지속적인 저주파진동의 위험을 보여주고 있으나, 실제 계통에서 이러한 동요가 발생하지 않았다면 이는 모델의 부정확성에 기인한다고 말할 수 있다.



(a) 한전계통의 time simulation



(b) 등가 일기무한모선 계통의  $P\delta$ -곡선

그림 9. 한전계통의 DEEAC

## 7. 결 론

“적은 투자로 더 많은 일을 수행”해야하는 현대 전력산업에서 온라인 DSA는 중요한 역할을 수행할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 1996년 8월 10일 WSCC 사고와 이 사고로부터 얻는 교훈, 그리고 세계의 온라인 DSA 개발노력을 소개하였다. 보고된 온라인 DSA 알고리즘은 EMS와 연계하여 TSA와 VSA를 수행하도록 설계되었으며, 개선의 여지는 있으나 실제통에 설치하여 운용할 수 있을 정도로 진척되었고 계통의 안전운용에 큰 도움이 될 것으로 생각된다. 그러나, DSA의 신뢰도와 성능향상을 위하여 정확한 모델 DB 구축과 DSA 알고리즘의 개선을 위한 노력도 계속되어야 할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

[1] P. Kundur, G. K. Morison, L. Wang, "Techniques for On-line Transient Stability Assessment and Control," IEEE 2000 PES Winter Meeting, January 24-27, 2000, Singapore

[2] C. W. Taylor, "The Future in On-line Security Assessment and Wide Area Stability Control," IEEE 2000 PES Winter Meeting, January 24-27, 2000, Singapore

[3] D. N. Kosterev, C. W. Taylor and W. A. Mittelstadt, "Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, No. 3, 1999, pp. 967-979

[4] K. Morison, S. Yirga and P. Kundur, discussion of reference 3

[5] J. F. Hauer, discussion of reference 3

[6] C. W. Taylor and D. C. Erickson, "Recording and Analyzing the July 2 Cascading Outage," IEEE Computer Applications in Power, Vol. 10, No. 1, pp. 26-30, January 1997.

[7] 남 해곤, 송 성근, 심 관식, 문 채주, 김 동준, 문 영환, "대규모 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 위한 Hessenberg 법," 대한전기학회 논문지 투고중.

[8] 남 해곤, 김 동준, 송 충기, 문 영환, 김 태균, 이 효상, 전압붕괴 임계점 계산을 위한 효율적 통합법, 대한전기학회 논문지, 48A권, 8호, pp 951-957, 1999. 8.

[9] C. Gama and R. Tenorio, "Improvements for Power Systems Performance: Modeling, Analysis and Benefits of TCSC," IEEE 2000 PES Winter Meeting, January 24-27, 2000, Singapore

[10] 심 관식, 남 해곤, 김 용구, 송 성근, 전 영환, "TCSC의 H $\infty$  제어에 의한 대규모 전력계통의 지역간 저주파진동 억제 Part I : 설치지점 선정." 대한전기학회 논문지 투고중.

[11] 김 용구, 전 영환, 송 성근, 심 관식, 남 해곤, "TCSC

의 H $\infty$  제어에 의한 이용한 대규모 전력계통의 지역간 저주파진동 억제, Part II : H $\infty$  제어가 설계," 대한전기학회 논문지 투고중.

[12] G. K. Morison, H. Hamadanizadeh and L. Wang, "Dynamic Security Assessment Tools," IEEE 1999 PES Summer Meeting, June 18-22, 1999, Edmonton

[13] E. Vaahedi, K. W. Cheung, "Evolution and Future of On-line DSA," IEEE 2000 PES Winter Meeting , January 24-27, 2000, Singapore

[14] M. Koaizawa, K. Omata, M. Nakane, Y. Kokai, "Actual Operating Experience of On-line Transient Stability Control Systems (TSC Systems)," IEEE 2000 PES Winter Meeting , January 24-27, 2000, Singapore

[15] Y. Mansour, et al., B.C. Hydro's On-line Transient Stability Assessment (TSA): Model Development, Analysis, and Post-processing, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, No. 1, 1995, pp.241-253

[16] Y. Xue and M. Pavella, "Extended Equal Area Criterion: An Analytical Ultra-fast Method for Transient Stability Assessment and Preventive Control of Power Systems," Int. J. Electric Power &Energy Systems, Vol. 11, No. 2.

[17] E. Vaahedi, et al., "Voltage Stability Contingency Screening and Ranking," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 1, February 1999, pp. 256-265

[18] H. Ota, et al., "Development of Transient Stability Control System(TSC System) Based on On-line Stability Calculations," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 3, August 1996, pp. 1463-1472

## 저 자 소 개



### 남해곤(南海鯤)

1950년 10월 16일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사). 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(공학박사). 1975년-88년 한국전력 원자력건설부 근무. 1988년-현재 전남대 공대 전기공학과 부교수



### 송성근(宋成根)

1975년 9월 16일생. 1998년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정.