

대형 계통동요시의 제주계통 특성 해석

최홍관, 문영환, 윤재영, 김동준  
한국전기연구소

추진부, 윤용방, 김용학  
전력연구원

진문림  
한전제주지사

A Study of Cheju Power System Characteristics at the Large Disturbance

H.K.Choi Y.H.Moon J.Y.Yoon D.J.Kim  
KERI

J.B.Choo Y.B.Yun Y.H.Kim W.L.JIN  
KEPRI KEPCO

**Abstract** - This paper presents the analysis of Cheju power system characteristics by performing modeling/simulation in order to match the field recorded data. The comparisons between simulation results and recorded data does not show good match due to the incorrect supposed data, but it is believed that this study is enough to simulate the Cheju power system characteristics.

었다는 점이다.

표 2.1 고장 직전의 제주계통 운전상태

|                 |   |
|-----------------|---|
| 계통부하<br>301.0MW | ○ 전력연계선 : 148.0(MW)<br>(#1T/L: 74.0MW, #2T/L: 74.0MW) |
|                 | ○ 남제주내연(4대) : 36.0(MW)                                |
|                 | ○ 남제주기력(2대) : 18.0(MW)                                |
|                 | ○ 북제주기력 #1 : 9.5(MW)                                  |
|                 | ○ 북제주기력 #2 : 74.0(MW)                                 |
|                 | ○ 한림 C/C(2대) : 15.5(MW)                               |

1. 서 론

제주 시스템은 약소 교류계통으로 특히 HVDC 선로와 연결된 대표적인 예로서 제주지역의 단락비가 작아 보호협조에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 제주계통에서의 외란을 측정 분석하고, 사고재현을 위한 수리 모델링함으로써 향후 계통 시뮬레이션을 위한 정확한 수리 모델 작성과 교류계통 응답특성 및 발전기 응답특성을 얻어내는 것은 매우 중요하다. 특히 정전의 예방과 대책 수립을 위하여 제주계통의 실제 계통 응답특성을 관측함으로써 다양한 현상을 보다 정확하게 예측할 수 있는 제주계통의 모델 검증의 기반이 절실하다.

본 연구에서는 동요측정장비(DSM)을 활용하여 HVDC 계통의 운전정지 직후 제주계통의 주파수 전압 변동 특성과 함께 부하차단으로 인한 발전단 출력증가와 주파수 회복특성 및 부하모델 적용을 고찰하였다. 현실 여건상 모든 제주 발전기들을 특성시험하는 것이 불가능하므로 실제 현장 측정 데이터를 이용하여 발전기 전체를 하나의 발전단으로 보고 이러한 발전단에서의 조류 및 동특성을 분석하여 발전 제어 특성을 모의하여 표준적인 모델에서의 파라미터를 결정하는 기법을 적용하였다. 적용은 한림복합화력발전소를 대상으로 하였으며, 제주계통에 설치되어 있는 DSM/6 장비(계통동요 계측장비)를 통하여 취득되어진 계통 고장시의 동특성 데이터를 이용하였다. 이러한 기법을 통하여 여러 발전기들이 혼재된 전력계통에서의 실측을 통한 해석 기법을 제시하였으며 이의 유용성을 입증하였다.

2. 대상 계통 분석

2.1 분석 대상

제주계통 실측결과 중에서 본 연구의 분석대상이 되는 계통외란은 다음과 같다. 실측일시는 2000년 8월 7일 월요일 14:45분 경이며, 사고 직전 제주계통의 운전상태는 표 2.5.1과 같이 전체부하가 301.0 MW이었고 북제주 기력 #2 발전기가 신규로 완공되어 운전중이었다. 고장은 제주계통 301.0MW(전력연계선 주파수 운전 모드: 150MW)운전중 한라#1.2 T/L 낙뢰발생에 의한 파급으로 연계선#1.2 T/L TRIP되면서 UFR 4단계 동작되어 정전된 것이다. 특이한 사항은 연계선 운전 모드 각 Pole 당 25MW까지는 정전력 모드로 운전하고 나머지 전력에 대하여 정주파수 모드로 운전하고 있

2.2 측정 결과

상기 절에서 기술한 고장 상황에 대한 측정결과를 나타내면 아래 그림 2.2-2.3과 같은데, 각각 한림복합화력발전소의 한림 T/L 154kV측(그림 2.1의 윗점 표시) 및 한주 T/L 154kV 단(그림 2.1의 아랫점)에서 취득한 데이터이다. 이외의 지역에 대한 측정결과는 동일하므로 생략한다. 취득 장소를 청색 화살표 부분으로 표시한 제주계통에 대한 계통 단선도는 그림 2.1과 같다.

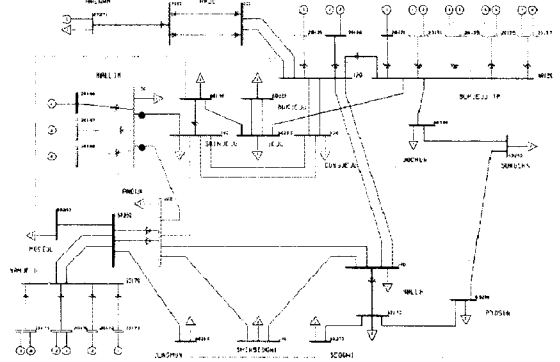


그림 2.1 제주계통 단선도 및 측정 위치

그림 2.2-2.3은 한림 복합 화력발전소의 측정결과를 나타낸 것인데, 각각의 그림에서 윗 부분의 3개의 그래프는 상전압(kV), 중간부분은 상전류(A), 아랫부분은 각각 Real Power(MW), Reactive power(MVars), 주파수(Hz)의 실측결과이다. 또한 횡축의 단위는 취득된 데이터 수이고, 이 데이터들은 초당 60개의 데이터가 기록되므로 점선부분 각각의 한 칸을 초로 환산하면 약 3.3초가 된다. 그림 2.2-2.3을 살펴보면 10초가 되는 시점에서 주파수가 59.4 Hz 이므로 모든 경우에 주파수 제한조건에 의해서 트리거 되었다는 것을 알 수 있다.

실제 측정된 주파수는 그림 2.4와 같고, 이 그림은 제주계통 주파수 60Hz에서 연계선로 #1, #2 Pole이 트립되어 주파수가 강하하기 시작하여 59.0Hz에서 58.0Hz까지 UFR 4단계 동작하면서 부하차단이 되었

다.

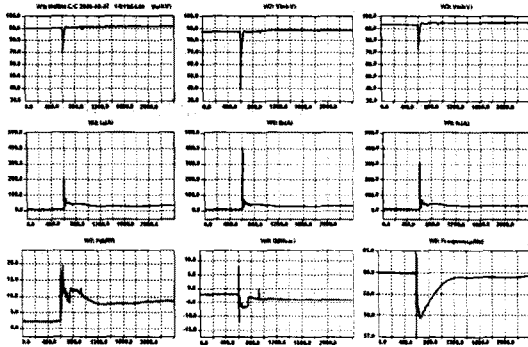


그림 2.2 한림 C/C 한주 T/L 154kV 실측결과

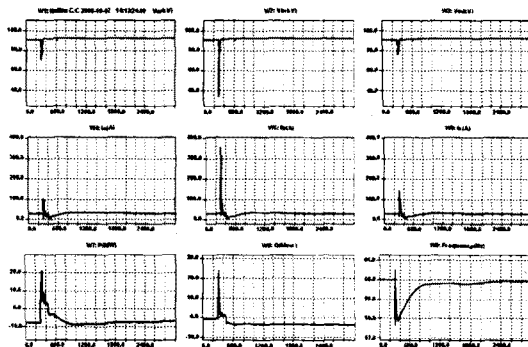


그림 2.3 한림 C/C 한림 T/L 154kV 실측결과

표 2.2 UFR 차단 D/L별 부하현황

| 단계 (%)<br>(총차단부하)        | 주파수<br>(Hz) | 변전소명   | D/L명 | 차단부하<br>평균(kW) |
|--------------------------|-------------|--------|------|----------------|
| 1 단계 (11%)<br>(26,070kW) | 59.0        |        | 신제주  | 명 주 5.756      |
|                          |             |        | 성산   | 성 수 3.355      |
|                          |             |        | 삼달   | 삼 달 1.127      |
|                          |             |        | 안덕   | 상 대 신 평 2.207  |
|                          |             |        | 동계주  | 부 두 8.922      |
| 2 단계 (11%)<br>(18,780kW) | 58.8        |        | 해안   | 해 안 2.267      |
|                          |             |        | 복계주  | 오 동 4.118      |
|                          |             |        | 한라   | 한 남 1.881      |
|                          |             |        | 위미   | 위 미 3.524      |
|                          |             |        | 신서귀  | 신 반 5.403      |
| 3 단계 (11%)<br>(22,562kW) | 58.4        |        | 달라   | 달 라 1.587      |
|                          |             |        | 복계주  | 복 평 3.175      |
|                          |             |        | 동계주  | 용 담 4.327      |
|                          |             |        | 일도   | 일 도 4.982      |
|                          |             |        | 민속   | 민 속 1.449      |
| 4 단계 (11%)<br>(18,088kW) | 58.0        |        | 한라   | 대 성 2.119      |
|                          |             |        | 조천   | 조 천 6.510      |
|                          |             |        | 안덕   | 호 근 2.634      |
|                          |             |        | 이도   | 이 도 5.497      |
|                          |             |        | 동계주  | 서 문 959        |
| 5 단계 (7%)<br>(19,897kW)  | 57.6        |        | 신촌   | 신 촌 3.141      |
|                          |             |        | 제동   | 제 동 3.110      |
|                          |             |        | 김녕   | 김 녕 2.747      |
|                          |             |        | 장진   | 장 진 8.423      |
|                          |             |        | 신애   | 신 애 6.630      |
| 합계                       |             | 8개 S/S | 29   | 105,397        |

이후 발전기들의 응답과 부하차단으로 인하여 주파수를 회복하는 과정을 지나 정상상태로 복귀하는 상황이다. 그림을 자세히 관찰해 보면 UFR 동작시점에서 미세한 뒤틀림이 나타난 것을 확인할 수 있으며, 이 점의 시간을 알아보면 초로서 UFR이 동작하는 시간을 알 수 있다. 또한, 그림 2.2와 그림 2.3에서 전압을 살펴보면 3상 중 b상이 훨씬 많은 순간적인 전압강하가 발생한 것으로 보아 b상에서 고장이 발생한 것을 알 수 있다.

## 2.3 실측 결과 모의

### 2.3.1 case 구성

다이나믹 모의를 위한 HVDC 모델은 'cdc4' 모델을 이용하였으며 UFR에 의한 부하 차단 스킴은 표 2.2의 데이터를 이용하였다. 또한 발전기 다이나믹 모델은 발전기 특성시험을 통하여 확인된 신뢰성 높은 데이터를 활용하였다.

고장 모의는 HVDC 연계선로 두 Pole 모두를 blocking 함으로서 구현하였으며 부하 구성은 정전력, 정전류, 정임피던스 부하를 각각 33%씩 구성하였다.

### 2.3.2 모의 결과 분석

고장 시점부터 주파수가 최저점에 이르는 시간은 실제 측정치가 0.8초이고 모의 결과는 1.1초이다. 또한 최저점까지의 주파수는 58.9Hz와 58.7Hz이고 정상상태로 복귀하는 시간은 10.1초와 6.1초로서 차이를 보이고 있다. 이와 같은 차이가 발생하는 이유는 실제 고장 당시의 현장상황을 정확히 파악할 수 없고, 특히 고장 당시의 부하 상황은 더욱 알 수 없기 때문이다.

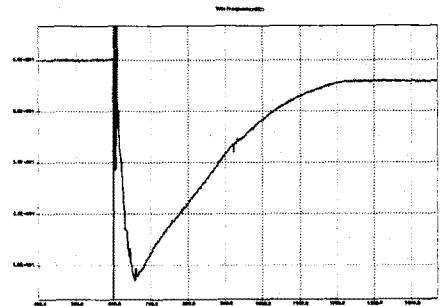


그림 2.4 한림 C/C 한주 T/L 154kV 주파수 실측결과

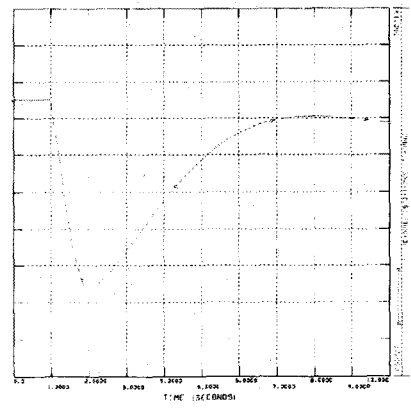


그림 2.5 주파수 모의 결과

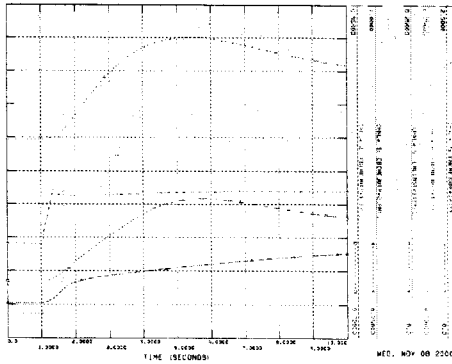


그림 2.6 발전기 기계적( $P_{mec}$ ) 결과

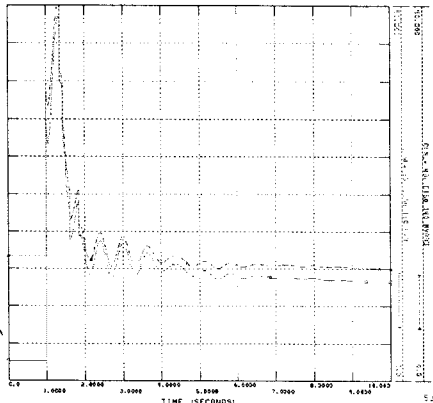


그림 2.7 유효 출력(한주 T/L) 결과

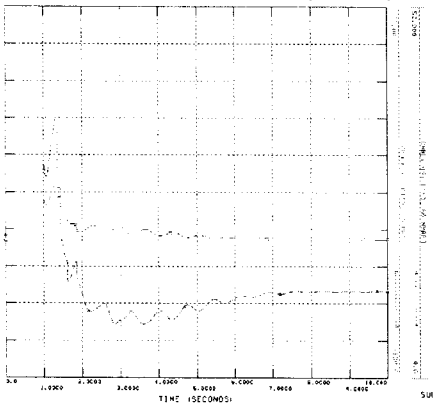


그림 2.8 유효출력(한림 T/L) 결과

표 2.1에 나타난 한림복합발전소의 발전현황 및 그림 2.2와 2.3의 실측결과를 통하여 한림복합화력발전소 발전단의 발전력과 그림 2.7과 그림 2.8의 simulation 결과와 비교하면 거의 유사함을 알 수 있다.

## 2.4 제어특성 해석

### 2.4.1 여자시스템 모델의 영향

여자시스템과 관련된 모델의 정수들은 수많은 요소의 함수로 나타난다. 그 중에서 중요한 정수중의 하나가 AVR 이득이며, 이때 두 가지를 고려하여야 한다. 하나는 정상상태 이득이고 다른 하나는 과도상태의 이득이다. 정상상태의 최소값은 전체 부하수준에 걸친 전압조정요의 요구조건으로 결정한다. 일반적으로 무부하에서 전부하까지의 범위에 대하여 0.5%의 전압조정율을 이루려면 이득이 200pu 이상이 되어야 한다.

과도상태 이득은 과도적인 진동이 발생하였을 때 전압

조정기는 0.1~2Hz의 주파수 범위에서 이득을 감소하도록 동작한다. 과도상태 이득이 크면 전압조정기는 작은 전압편차에 대해서도 여자시스템으로 하여금 Ceiling에 이르도록 하여 보다 적극적인 동작을 취하게 된다. 이는 동기화 토크를 증가시켜 과도안정도를 향상시킨다. 한편으로는 과도 이득이 증가하면 정상상태 불안정을 초래할 수 있다. 일반적인 발전기에서 PSS가 적용되지 않은 경우 과도 이득은 20pu 정도이다. 이는 예상되는 모든 운전조건에 걸쳐 양호한 과도특성과 동적안정 운전을 고려한 값이다.

### 2.4.2 조속기/터빈의 영향

발전기의 출력과 주파수제어를 목적으로 하는 조속기-터빈계통은 여자시스템 운동에 비하여 상대적으로 느리므로 실제 측정된 주파수 값들을 모의하는데 유용하게 사용될 수 있다. 일반적으로 전기적 고장과 같은 일시적인 외란에 대해서 원동기의 기계적 출력은 거의 일정하다. 그 이유는 사고시의 짧은 순간에는 터빈의 응답시간이 길어서 기계적 출력이 크게 변하지 않기 때문이다. 그러나 발전기 가스터빈같은 고속밸브 작용이 가능한 발전소에서는 수 초간이라도 원동기에 의한 주파수 제어 특성은 매우 크다. 이것은 그림 2.6의 발전기 기계적 운동과 이러한 운동의 모의 결과인 그림 2.8의 주파수 분석을 통해서 알 수 있었다. 실제 차단부하가 117.9MW이고 연계선로 트립으로 인한 발전력 부족분 30.1MW의 공급에 대하여 한림복합화력의 가스터빈이 가장 영향력있는 운동을 보이고 있다. 운동이 빠른 내연 발전기들도 있었지만 이미 정격출력 가까이 발전하고 있었기 때문에 실제 사고시의 운동은 상대적으로 적은 값들이었다. 나머지 발전기들도 기력이나 스태터빈이어서 실제 운동은 대단히 미미하였다. 또한 계통의 동요로 인하여 발전량과 부하량 사이에 심한 불균형을 일으키는 경우 수 초에서 수 분에 걸친 원동기의 응답은 계통의 특성에 큰 영향을 줄 수 있다. 즉 측정된 데이터 중 주파수는 앞의 설명에서처럼 급격한 변화로 감소하고, 부하차단이 이루어진 후 완만한 경사를 이루며 정상상태로 복귀하는 형태를 보이고 있다. 이러한 형태를 모의하기 위해서는 터빈-조속기 시스템의 모델을 튜닝하는 것이 가장 좋은 대안이 될 수 있다.

### 2.4.3 부하모델의 영향

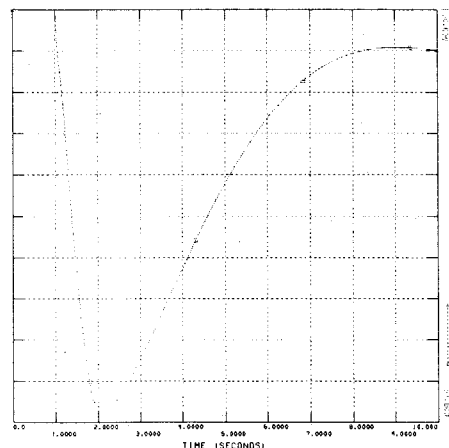


그림 2.9 부하모델 고려 모의 결과

앞서 언급한 것처럼 모의에 사용된 부하모델은 정전력, 정전류, 정임피던스 부하를 각각 33%씩 구성하여 모의 하였으나 주파수 강하시간 및 회복시간에 있어서 많은 오차를 보였다. 이러한 오차의 원인은 실 계통에서는 전압 및 주파수 변화로 인한 부하량의 변화가 일어났

음에도 불구하고 constant 부하로 처리한 영향에 따른 것으로 판단된다.

결국 복합구성 부하모델인 'CLODAR' 모델을 활용하여 대용량모터, 소용량모터, 변압기 포화특성, 방전 램프류, 정전력 부하 및 전압의존 부하 등을 표현하였다. 이렇게 구성하여 모의한 결과 그림은 그림 2.9와 같고 주파수가 최저점에 이르는 시간은 1초, 회복시간은 7.5 초로서 실측치의 값에 상당히 접근하였다.

#### 2.4.4 활용

앞 절에서 이미 언급한 것처럼 실측결과를 활용하여 발전단 제어특성 및 부하특성 분석 등에 적용하기 위해서는 먼저 계통상황과 주변 발전기들의 모델링이 정확하게 작성되어야 하며, 최소자승오차로 구해진 파라미터들은 실제 적용할 정도로 높은 신뢰성을 가지고 있지는 않다. 그러나 이를 활용하여 응답특성이나 제어특성 등의 경향을 파악하고, 제작처에서 제공한 파라미터값을 기준으로 튜닝할 수 있다. 또한 향후 정확한 정수 유도를 위해 실제 발전기 특성시험을 통한 발전기 정수 유도 선정에 가장 확실한 자료로 활용할 수 있다. 그리고, 현재 측정된 다수의 데이터를 같은 방법으로 튜닝한다면 보다 현실적이고 신뢰성이 높아진 발전플랜트 정수 선정이 가능하다. 또한 HVDC를 포함한 제주 실계통 전체에 대해서 외란에 대한 동특성을 구현하였다는 점도 중요하며, 향후 많은 수리모델 작성과 응답특성연구에 기여를 할 것이다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 제주계통 특성에 대한 기본적인 분석작업으로서 동요측정장비(DSM)을 활용하여 HVDC 계통의 운전정지 직후 제주계통의 주파수 전압 변동 특성과 함께 부하차단으로 인한 발전단 출력증가와 주파수 회복 특성 및 부하모델 적용을 고찰하였다. 제주 시스템은 약소 교류계통으로 특히 HVDC 선로와 연결된 대표적인 예로서 제주지역의 단락비가 작아 보호협조에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 제주계통에서의 외란을 측정 분석하고, case 모델링함으로써 향후 계통 시뮬레이션을 위한 정확한 수리모델 작성과 교류계통 응답특성 및 발전기 응답특성을 얻어내는 것은 매우 중요하다. 특히 정전의 예방과 대책수립을 위하여 제주계통의 실계통 응답 특성을 관측함으로써 다양한 현상을 보다 정확하게 예측할 수 있는 제주계통의 모델 검증의 기반이 절실하다.

본 연구의 결과는 제주계통의 안정도 해석을 위한 발전기 발전기 모델의 데이터의 검증과 함께 향후 보호협조를 위한 기본 자료로 활용이 기대된다.

#### (참 고 문 헌)

1. Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1993
2. IEEE 1110-1991, "IEEE Guide for synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analysis"
3. EPRI Final Report, EL-1424, Vol.3, "Determination of synchronous machine Stability study constants"
4. EPRI Final Report, EL-1424, Vol.2, "Determination of synchronous machine Stability study constants"
5. Power Technology Institute, "PSS/E Application manual", PSSE-24
6. Ainsworth J.D., "Power Limit Instability (voltage instability) in a DC link connected to a weak AC system", ibid.
7. J Y Yoon, Y H Moon, D W Park, "A basic

qualitative analysis of AC-DC interactions for Haenam-Cheju HVDC link", 1999, IERE Conference

8. IEEE WG on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, "Dynamic Models for Combined cycle Plants in Power System Studies", Trans. on Power Systems, Vol. 9, No.3 Aug. 1994
9. 일본전기학회 기술보고, 제536호, "동기기 여자계의 사양과 특성", 1995.2
10. 일본전기학회 기술보고, 제405호, "동기기 사양과 설계 및 기기파라미터에 대한 영향", 1992.1