

# Phasor 정보를 이용한 실시간 시계열 데이터에서 미소신호안정도 해석과 평가

□ 남해곤 / 전남대학교 공과대학 전기공학과 교수  
□ 심관식 / 전남대학교 공업기술연구소 선임연구원

## 서 론

오늘날 인류가 만들어낸 가장 거대하고 복잡한 구조물 중에 하나인 전력계통은 부하와 송전용량은 점점 증가하는데 비하여 송전설비 증대는 환경적, 경제적인 이유로 제약받고 있다. 또한 전력시장의 경쟁체제 도입으로 초기 설계 단계에서 예측하지 않았던 조류의 흐름을 만들어 내고 있어 전력계통을 포함한 전력산업은 전에 없이 복잡한 상황에 놓여 있다.

많은 발전기와 부하, 장거리 송전선로로 구성되어 있는 전력계통은 항상 전기 기계적 진동에 노출되어 있고, 제동특성을 향상시키기 위한 효과적인 제어 동작이 없으면, 진동은 점점 심하게 되고 계통분리나 붕괴를 일으킬 수 있다. 2003년 8월 미국 동부에서 발생한 대정전을 비롯하여 최근 발생한 일련의 계통붕괴에서 계통을 안전하게 운용하기 위해서 계통의 운용자의 역할이 매우 중요하다는 것을 인식하였으며, 운전자에게 효과적으로 운용의 위험을 다룰 수 있는 일관된 해법의 필요성이 대두되었다. 그리고 750만 수용가에 영향을 준 1996년 8월 WSCC 계통에서 발생한 광역의 정전 사고는 계통의 동적 안전성에 대한 많은 관심을 집중시켰는데, 725초 동안 지속된 불안정한 진동으로 많은 보호기기들이 그 한계치에서 동작하고 결과적으로 대규모 계통붕괴로 이어졌다[1]. 사고 후 기록 분석에서 계통의 안정도가 한계치에 근접하였을 때, 계통의 안

전성을 유지하기 위해서 진동문제의 해결은 필수적이고, 문제가 될 수 있는 잠재적인 진동은 충분히 예측 가능함을 확인하였다.

가까운 미래에 전력계통은 경제적, 환경적인 이유로 그 한계치에서 운용될 것이다. 극한점에서 계통운전은 다양한 문제를 야기할 수 있으나 가장 중대한 사항은 사소한 고장에 따른 계통붕괴로 연결되는 것이다. 이때 계통붕괴를 방지하기 위한 계통운용 결정에 있어서 핵심적인 요소는 신속성과 정확성으로 전통적인 오프라인(offline) 해석에 근거한 운용결정 보다는 최근 급격히 발달한 컴퓨팅 기술과 통신네트워크 및 저장기술을 이용한 온라인(online)이나 실시간 계통 해석 정보에 의존해서 중요한 운용 결정을 신속히 내릴 필요가 있다. 최근 국내외에서 개발이 활발한 WAMS(wide area measurement system)는 계통 동요에 따른 계통의 동적 응답이나 연속되는 계통 고장 등에 대한 정보를 제공할 수 있는데, 이를 이용한 계통고장의 파급 현상을 온라인에서 평가하기 위한 새로운 개념의 복합적인 안전도 평가 기술이 요구되고 있다.

계통의 수학적 모델링에 기반을 두고 있는 전통적인 오프라인 해석에서는 설계범주를 넘어서는 고장에 대해서 계통의 특성을 예측하는 것은 불가능하고, 모델링 과정에서의 오류를 배제할 수 없다. 그러나 상세한 모델링과 다양한 가정을 필요로 하지 않는 온라인 계통 해석은 계통의 동적상태를 연속적으로 모니터링하고

동시에 계통에서 발생하는 고장에 대응하는 것으로 측정에 기반을 둔 동적안전성 해석의 한 형태로 볼 수 있다. 계통 고장 측면에서 계통의 동적상태의 연속적인 모니터링을 통하여 네트워크와 부하, 발전기들 사이에 안전성을 판단하여 고장을 초기에 검출하고 이에 대응 가능케 하며, 계통 운용 측면에서 온라인 해석 정보로부터 계통 계획, 운용 및 기기 제어에 대한 정밀도 향상할 수 있고, 송전용량을 실시간으로 결정하여 설비 운용을 운전비용과 안정도 마진 사이에서 최적으로 이용할 수 있게 한다.

모든 전력계통에는 고유진동이 존재하는데, 여기에는 발전기와 부하가 서로 네트워크를 통하여 연결되어 있다. 작은 외란에 대해서 이러한 고유진동은 여차 되고, 정상적인 운전 상황에서 진동은 잘 제동되어 계통은 안정운전을 한다. 그러나 중부하나 특이한 네트워크 구조, 또는 설비 오작동이나 부적절한 제어기 설정, 비정상적인 조류분포 등의 상태에서 계통은 불안정한 상황에 직면하게 될 수도 있다. 이와 같은 상황에서 발생하는 비정상적인 진동은 많은 발전기들로 구성되어 있는 계통에 빠르게 과파되고, 발전기 동기탈조나 국부 또는 광역의 전압붕괴, 계통분리, 광역의 부하차단과 같은 결과들을 유발할 수 있다.

따라서 안정하고 효율적인 계통 운용을 위해서는 잠재적인 동적시스템의 초기 경고 기능이나 계통운용의 위험을 운용자에게 미리 지시하는 기능이 부가된 실시간 계통해석 알고리즘 개발의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

## 실시간 진동 모드 추정과 알고리즘

### 실시간 진동 모드 추정

실시간이나 저장된 온라인 시계열 데이터에서 저주파 진동 모드 추정은 선형해석에서 고유치/고유벡터와 같은 정보를 계통 운용자에게 제공하므로 계통 계획과 운용 및 제어기설계, 고장원인 파악과 대책 등 전반적인 계통의 안전운전과 효율적인 운용에 적용할 수 있다.

전력계통에서 발생하는 진동은 발전기 고유진동에 외란이 작용한 후, 계통의 제어능력에 의하여 진동이 감쇠되어 정상상태로 운전되거나 그렇지 않고 제동능력을 상실하여 동기탈조로 이어지는 일련의 시퀀스를 가지고 있다. 그림 1에는 실제 계통에서 발생한 불안정한 진동의 시간응답을 나타내고 있는데, 수분 동안 진동이 지속된 후, 발전기가 동기 탈조됨을 알 수 있다. 이와 같은 진동은 온라인으로 예측 가능하고, 진동을 제동하기 위한 적절한 대책을 수립할 수 있다.

실시간 시계열 데이터의 진동모드 추정에서 그림 2와 같은 다양한 파라미터를 추정할 수 있다. 외란에 대해서 발전기의 동적특성을 지배하는 중요모드에 대한 제동특성과 주파수를 추정할 수 있고, 각 모드에 대한 신호의 residue와 그 위상각을 얻을 수 있다. 이와 같은 추정된 파라미터들은 계통운용에 있어서 중요한 정보로 활용할 수 있는데, 만일 일정 시간간격으로 연속적으로 추정된 모드의 제동이 감쇠되지 않고 설정값 이상이면 운용자에게 경고나 위험 신호를 발생하여 진동을 감쇠시킬 수 있는 대책을 수립하게 할 수 있으며, 다수의 발전기나 선로의 멀티신호의 파라미터 추정에서 서로 상관관계를 파악하여 제어기 설치위치나 설계 등을 할 수 있다.

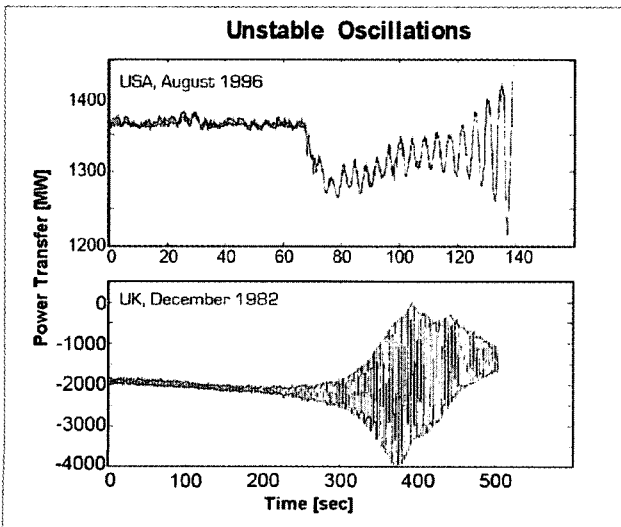


그림 1 전력계통에서 발생한 불안정한 진동

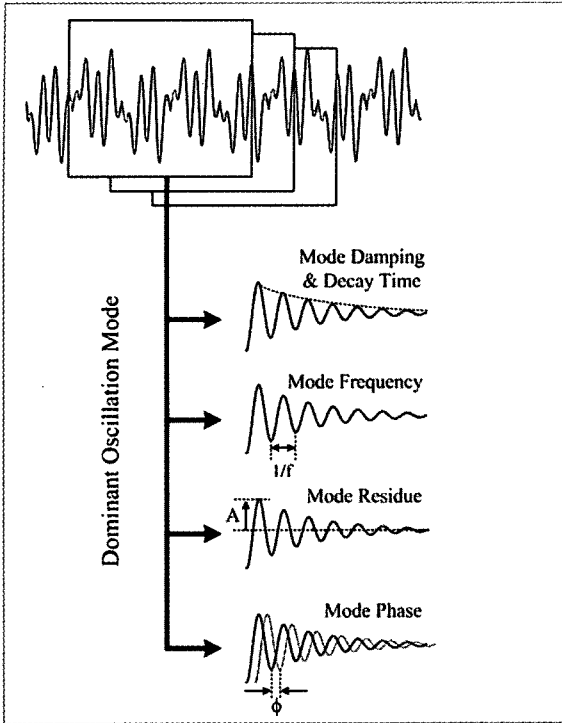


그림 2 시계열데이터의 진동모드 추정

### 이산푸리에변환과 진동모드 추정

지금까지 시계열데이터에서 진동모드를 추정하기 위하여 제안된 다양한 알고리즘들 중에서 전력계통 해석에 적용된 대표적인 알고리즘으로 Prony 해석법[1-4]과 이산푸리에변환법[5-6]이 있다. 그러나 계통의 시계열데이터에서 파라미터 추정 방법은 고속 푸리에변환(FFT, fast Fourier transform)의 장점을 이용할 수 있는 이산푸리에변환(DFT, discrete Fourier transform)법 보다 Prony 해석법이 우수한 것으로 평가되고 있고, 이를 전력계통 해석에 응용한 다양한 사례들이 보고되어 있다.

신호의 주파수 검출이나 분석에 이용되고 있는 푸리에변환(Fourier transform)은, FFT 알고리즘이 개발되면서 다양한 산업 분야에서 널리 적용되고 있다.

구간  $0 \leq n \leq N-1$ 에 정의된 이산신호  $x[n]$ 의 이산푸리에 변환은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (1)$$

이산신호의 샘플링 간격을  $T$ 라하고 시간영역  $T_0$ 시간 안에 있는 비주기 신호를  $N$ 개로 샘플링 하였을 때,  $T_0=NT$ 초로 표시된다. 즉, 이 신호의 스펙트럼은 주파수 영역에서  $1/NT$ [Hz] 또는  $2\pi/NT$ [rad/sec]로 나타난다.

전력계통에서 푸리에 변환을 이용한 시계열데이터의 파라미터를 추정 방법은 푸리에 스펙트럼 진폭의 감쇠정도를 동일한 시간구간에 연속적으로 계산하여 모드를 추정하는 것으로 그림 3과 같은 슬라이딩 윈도우(sliding windows) 방법을 적용할 수 있다. 그림 3에서 등간격 시간구간 (a), (b), (c)에 대해서 각각 푸리에 변환을 하여 각각의 스펙트럼을 계산하고 각각의 스펙트럼의 첨두치(peak value)를 지수감쇠함수로 적합하여 모드를 추정한다. DFT와 지수함수 적합만 수행하므로 모드 추정의 계산속도는 빠르나 시간에 따라 변화하는 주파수 해상도에 따라서 계산 결과에 많은 차이가 발생하므로 결과에 대한 신뢰도가 낮다.

### Prony 해석법

Prony 법은 임의의 신호를 복소 모드의 선형결합으로

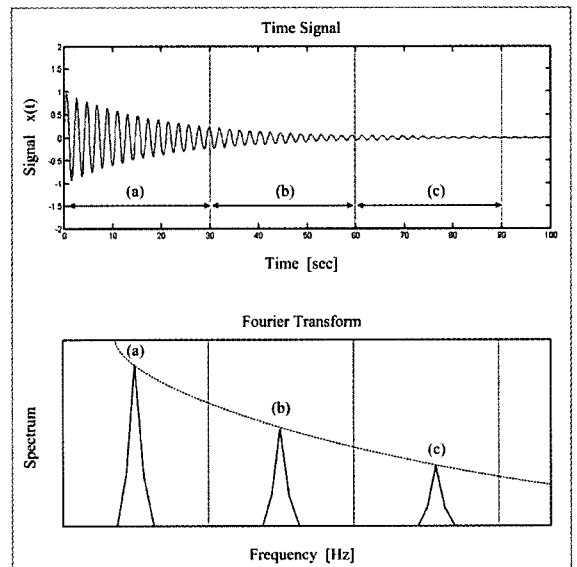
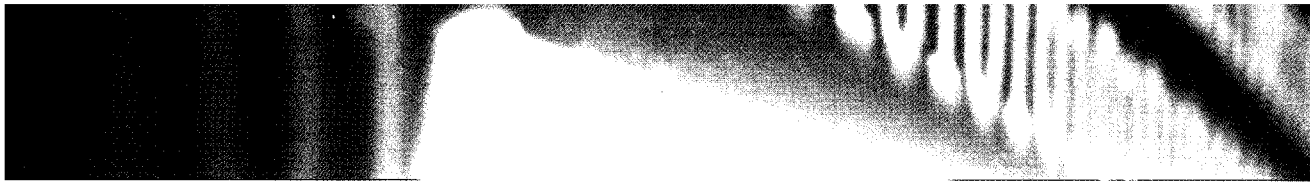


그림 3 이산푸리에변환과 모드 추정



로 적합(fitting)해서 파라미터를 추정 방법으로 계통의 시험이나 외란에 의해서 발생한 신호를 측정된 데이터나 계통 해석 프로그램의 출력데이터에서 계통의 지배적 진동모드를 추정한다.

복소 모드  $z_i=e^{s_i T}$ 라 하고,  $B_i$ 를 이산신호의 residue라 할 때, 등간격주기  $T$ 로 샘플링 한 이산신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(kT) = \sum_{i=1}^m B_i z_i^k \quad (2)$$

Prony 법은 이산신호의 선형예측방정식  $A'_i=0$ 에서 미지수를 계산하고, 이 미지수를 계수로 하는 선형예측다항식(linear prediction polynomial)으로부터 이산신호의 극점을 계산한다.

$$A(z) = \sum_{i=0}^k a_i z^{-i} = 0 \quad (3)$$

선형예측다항식  $A(z)$ 에서 이산 신호를 발생하는 모드의 주파수와 제동계수를 결정하고, 신호의 나머지

파라미터인 residue의 크기와 위상각은 각 요소가 복소모드  $z_i$ 로 구성된 Vandermonde 행렬  $V$ 로 나타낸 모드방정식  $y=VB$ 에서 결정한다.

그림 4에는 시계열 데이터의 Prony법의 과정과 결과를 나타내고 있다.

## 해석 도구

### DITPak[1]

BPA(Bonneville Power Authority)에서는 종합적인 계통의 동적 정보를 얻기 위해서 통합된 모니터링 및 해석 프로그램인 DITPak(Dynamic Information Technology Package)을 개발하였다. DITPak은 LabVIEW를 이용한 가상계측(virtual instrumentation) 기능, 측정 장비의 네트워크 지원, 공학에서 널리 이용되고 있는 Matlab 작업 환경에서 간편하게 데이터를 분석할 수 있는 소프트웨어를 포함하고 있으며 기능적으로 크게 세 개의 부분으로 구성되어 있다.

- (1) PPSM(Portable Power System Monitor)
  - 연속적인 가상 기록과 쌍방향 측정 기능
  - 시각동기화와 멀티데이터 취득 기능
- (2) PSITools(Power System Identification Toolbox)
  - Matlab을 이용한 GUI 환경
  - Prony 해석법 적용
  - 푸리에 해석 적용
  - 모드해석에 의한 제어기 설계 및 모델 수정
- (3) PDADS(Portable Dynamic Analysis and Design System)
  - Matlab 스크립트에 기반을 둔 사용자 인터페이스와 통합된 해석 툴 제공
  - 모든 Matlab 툴 박스 공유

DITPak은 계통의 외란이나 시험신호(랜덤신호, 네트워크 스위칭, high-level 펄스 또는 스텝 입력)에서 계통의 동적 정보를 추정한다. 패키지의 기본 구조는 그림 5에 나타나 있는데, 기능적인 측면에서 시각동기화 기능을 비롯한 다양한 Matlab의 툴박스와 LabVIEW를 포함하고 있어 온라인 모니터링과 계통해석 도구로 사용될 수 있으나 독립적인 MMI로 구성되어 있지 않

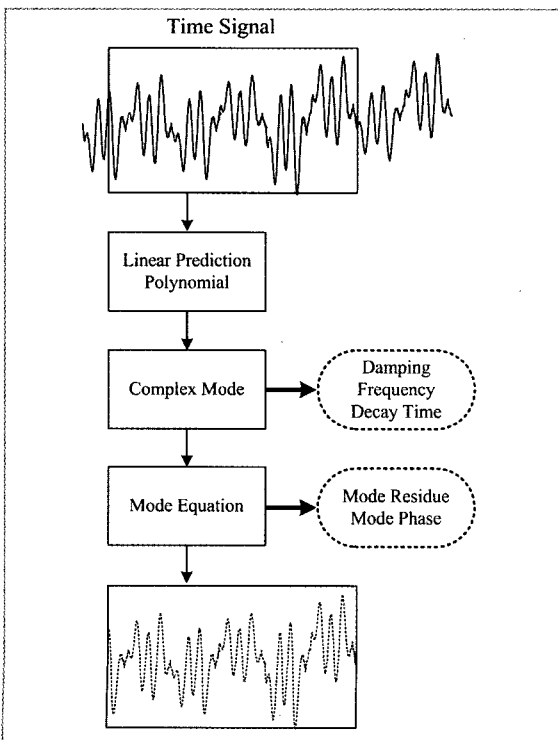


그림 4 시계열데이터의 Prony 해석

기 때문에 많은 실시간 데이터와 멀티 신호들의 해석이 요구되는 광역 해석에서 계산 속도에 제약이 있다.

**SYSID[2]**

SYSID(system identification)는 GE(General Electric Company)에서 개발한 시스템 identification 프로그램으로 EMTF와 같은 상용화된 안정도 해석 프로그램에

서 얻은 시계열데이터에서 계통의 등가모델과 제어기 설계를 할 수 있는 기능이 포함되어 있다. SYSID에서 적용한 시스템 identification 기법으로 Prony 법에 기초하여 전달함수적합(transfer function fitting)과 Hankel matrix 법을 포함하고 있다. 또한 기본적인 신호처리와 모드해석, 제어기 성능 시험 기능을 가지고 있으며, GUI환경에서 모든 기능은 구현된다.

이 프로그램은 온라인 데이터 처리기능은 없고, 오프라인 데이터에 등가모델과 PSS, TCSC와 같은 제어기 설계에 주안점을 두고 있다. 그림 6에는 SYSID의 전체적인 구성과 기능을 나타내고 있다.

**PDM[3]**

가장 최근에 개발된 Psymatrix의 PDM(Power Dynamics Manager)은 계통에 진동특성을 온라인으로 분석할 수 있다. PDM은 연속적으로 취득한 데이터에서 0.04~4Hz 사이의 모드의 주파수와 크기, 제동계수를 추정하고, 3분 동안의 시계열데이터 이용하여 파라미터를 추정하며 매 5초마다 데이터를 갱신한다. 또한 실시간 표시, 경고 보고 기능 및 이전 기록들의 리뷰 기

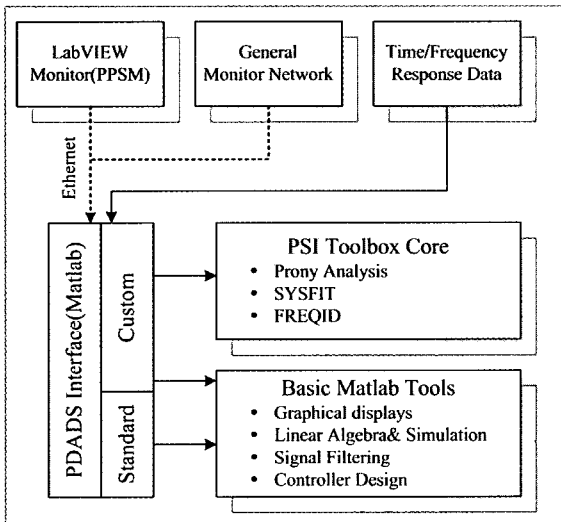


그림 5 DITPak architecture

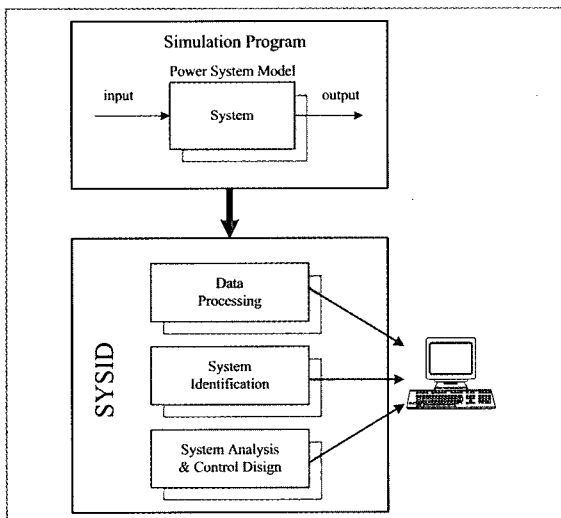


그림 6 SYSID 구조

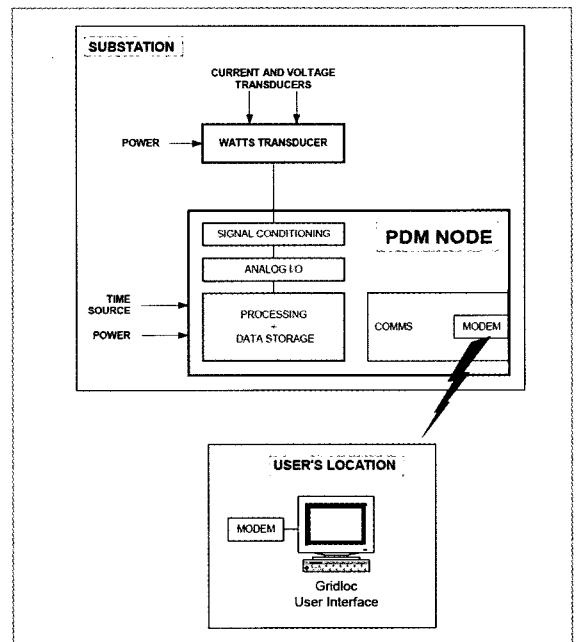


그림 7 PDM 구조

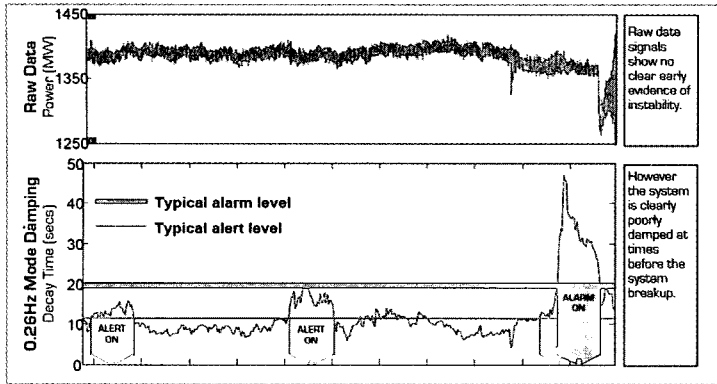


그림 8 PDM의 실시간경고 기능 예

능이 포함된 사용자 인터페이스를 제공하고 있다. PDM은 계통의 운용적인 측면에서 이용할 수 있는 다음과 같은 기능을 제공한다.

- 잠재적인 동적 문제에 대한 초기 경고 기능
- 계통 운전 시 위험을 감소시키기 위한 지시 기능
- 실행 결과의 피드백 기능

그림 7에는 PDM의 기본 기능과 구조를 나타내고 있고, 그림 8에는 1996년 8월 발생한 대정전에 대해서 PDM에서 분석한 경고 기능의 한 예를 나타내고 있다.

## 결 론

경제적인 문제가 주요 이슈가 된 오늘날 계통 운영 환경에서 계통은 다양한 안정도 문제를 내포하고 있다. 특히 한계치에서 근접하여 운전되고 있는 상황에서 작은 외란은 계통에 잠재되어 있는 저주파진동의 동요를 공진시킬 수 있고 적절한 제어동작으로 제동특성을 개선하지 않으면 진동은 점점 심하게 되고 계통 분리나 붕괴를 일으킬 수 있는 위험이 있다.

따라서 해석적인 측면보다 운용적인 측면에서 정확하고 신속하게 운전 결정을 내릴 수 있는 실시간 운용 정보가 필요하다. 이와 같은 목적으로 전통적인 오프라인 계통 해석 기술에 최근 급격히 발달한 컴퓨터 네트워킹 기술을 접목한 온라인 계통 해석기술의 개발이 필요하다. 온라인 모니터링을 통해서 계통 운전자에게 계통의 안전성과 고장에 대한 신속한 대응과 적절한

대책을 수립하는 것이 가능할 뿐만 아니라 축적된 온라인 데이터로부터 계통 계획, 운용 및 제어기 설계 등 다양하게 계통의 안전성 향상과 운용에 적용할 수 있다.

### [참고문헌]

- [1] J. Hauer, D. Trudnowski, G. Rogers, B. Mittelstadt, W. Litzenberger, J. Johnson, "Keeping an Eye on Power System Dynamics," IEEE Computers Applications in Power, vol. 10, pp.50-54, Oct. 1997.
- [2] J. J. Sanchez-Gasca, K. Clark, N. W. Miller, H. Okamoto, A. Kurita, J. H. Chow, "Identifying Linear Models from Time Domain Simulations," IEEE Computers Applications in Power, vol. 10, pp.26-30, Apr. 1997.
- [3] I. Fernando, L. Chung, L. Midford, A. Silk, R. Coish, A. Golder, K. Hay, D. Wilson, "Real Time Online Evaluation of Small Signal System Damping Applied to Power System Stabilizer Commissioning and Testing," International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003 in New Orleans, pp.1-6, Sep. 28-Oct.2, 2003.
- [4] J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf, "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, pp.80-89, Feb. 1990.
- [5] Peter O' Shea, "The Use of Sliding Spectral Windows for Parameter Estimation in Power System Disturbance Monitoring," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, pp.1261-1267, Nov. 2000.
- [6] D. R. Ostojic, "Spectral Monitoring of Power System Dynamic Performances," IEEE Trans. on Power Systems," vol. 8, pp.445-451, May 1993.