

# Phasor 정보를 이용한 전압안정도 감시시스템

▣ 이병준, 남수철, 김우호 / 고려대 전기공학과

## 개 요

현대의 전력계통은 고도의 기술발전과 산업화에 따른 전력수요의 증가로 인하여 대규모 전력의 안정적인 공급과 고품질의 전력이 요구되고 있다. 그러나 전력계통은 점점 대형화, 복잡화되었으며 전력산업 구조개편의 환경 속에서 다양한 시장참여자의 등장으로 과거의 수직통합 체제에서와는 달리 계통운영에 대한 통합적인 관리의 어려움으로 계통운영측면에서 불확실성이 높아지고 있다.

이러한 변화 속에서 근래에 경험한 광역정전 및 심각한 계통고장 파급 현상은 계통 보호의 패러다임이 개별적인 설비보호의 개념에서 전체계통의 운전성(Integrity) 및 신뢰성(reliability)을 유지하는 계통 보호(SPS, System Protection Scheme)에 대한 개념으로 이동하게 하였다. 특히 WAMS(Wide area measurement system)와 WACS(Wide Area Stability and Voltage Control System)는 계통 동요에 따른 계통의 동적 응답 및 연속되는 계통 고장(Cascaded outages) 등에 대한 정보를 실시간으로 제공하고 그 제어방안을 제시하는 것으로써 이는 기존의 SCADA/EMS 데이터를 바탕으로 한 안전도 평가(Security assessment) 알고리즘에서 갖고 있던 동기 데이터 수집의 어려움과 장시간 계산의 단점을 보완한 실시간

On-line 계통 안정도 평가 및 보호 시스템이다.

## 실시간 광역계통 감시, 제어, 보호 기술

실시간 광역 계통 감시, 제어, 보호 기술은 CERTS(Consortium For Electricity Reliability Solution) 과 기타 기구에 의해 제시되어 최근 2년 사이에 세계적인 이슈가 되고 있다. WAMS와 WACS의 기술은 시각 동기화된 계통 정보를 얻는 Phasor 측정 기술과 새로운 하드웨어 기술, 데이터 통신, 응용 소프트웨어기술 등을 바탕으로 전력산업 현장과 연구실에서 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있으며 일부에서는 이미 프로토타입의 제품을 제작하여 현장에서 시험하고 있다.

여기서는 먼저 WAMS와 WACS 기술의 세계적 동향을 알아보고 기술 구현을 위해 필요한 하드웨어와 데이터에 대해 알아보도록 한다.[1]

### 실시간 Phasor 측정 기술의 활용사례[1]

#### · 미국

Virginia Tech에서 최초로 제안되었으며 후에 Macrodyne에 의해 상용화 되었다.

최초로 제안된 실시간 Phasor 측정 기술은 주기 당 48샘플링을 통해 전력계통의 주파수 변화와 순간의 전압과 전류를 필터링하고 디지털화 할 수 있으며 전압

과 전류의 Phasor 측정값으로 유효전력과 무효전력을 계산할 수 있었다.

GPS를 기반으로 시각 동기화 된 전력계통 측정은 1992년에 EPRI에서 전력계통 문제를 분석하기 위해 PMU를 이용한 Phasor 측정 프로젝트에서 처음 제안되었다.

이후 1995년 BPA와 Western Area Power Administration(WAPA)이 후원한 WAMS 프로젝트에서 실 계통에 GPS 동기 측정 장치를 처음 적용하고 BPA와 WAPA에 GPS기반의 측정 장치를 제안했다. 이 프로젝트는 1996년 미국 서부에서 발생한 광역 대 정전을 통해 실시간 측정이 유용함을 증명하였으며 이를 통해 2003년 8월에 발생한 광역정전의 분석과 평가에서 Phasor 측정은 더욱 유용하게 사용되었다.

• 북유럽

지리적으로 긴 송전선로와 송전용량 증대의 한계 때문에 북유럽은 Phasor 측정 적용의 효율성이 다른 지역에 비해 상대적으로 높다. 따라서 Phasor 측정을 기반으로 한 계통 제어를 통해 전력 송전 용량의 증대를 위한 송전선 신설을 대체할 목적의 연구와 활용이 진행 중이며 그 결과 Lunds Universitet의 후원으로 2000년에 수행된 Nordic 계통의 신뢰도 모니터링을 위한 WAMS 프로젝트에서는 PMU 기술 적용에 대한 효용이 입증되었다.

• 일본

일본의 긴 전력 계통의 구조는 다양한 시스템의 진동을 유발한다. 이런 비정상적인 운전 상태를 개선하기 위해 실시간 광역 모니터링을 위한 Phasor 모니터링 기술을 사용하게 되었다. 이에 따라 1990년대 초반부터 GPS 기반의 시각 동기화된 데이터 측정 및 응용에 대하여 관심을 가지기 시작하였으며 이는 시각 동기 Phasor 정보를 사용하여 일본 전력 계통의 동적 특성에 대한 온라인 광역 모니터링 시스템으로 발전되었다.

• 중국

중국의 전력계통은 계통이 광범위한 반면 발전지역

과 부하지역간의 송전망 구성이 취약한 특징을 가지고 있다. 따라서 1994년부터 GPS를 기반으로 하는 시각 동기화된 Phasor 측정시스템(Synchronized Phasor Measurement System: SPMS)의 개발과 실 계통 적용에 대한 연구를 진행해 왔다.

• 프랑스

프랑스의 계통 보호 계획의 개념은 애초에 전압 붕괴 상황을 피하거나 붕괴가 일어났을 경우 그 영향을 최소화하는 것이다. 이는 최근의 발전된 협조 보호 계획은 광역계통의 효율적 제어를 위해 PMU로부터 얻은 계통의 전압 위상각을 비교해서 계통의 안정성을 유지하고 있다.

• 이탈리아

이탈리아에서는 기 설치된 PMU기술을 지난 2003년 8월에 발생한 광역정전을 평가하고 미래의 사고를 분석하기 위해 사용하였다. 현재 이탈리아의 WAMS 타입의 설비는 가까운 미래의 실시간 모니터링과 방어, 보호를 위해 WACS 체계로 발전될 것으로 보인다.

• 브라질

전력 계통의 운전 상태를 모니터링하고 제어하기 위한 PMU 시뮬레이터를 개발하는 MedFassee프로젝트가 2004년에 시작되었다. 개발될 PMU 시뮬레이터는 세 개의 Phasor 측정 장치와 데이터 취득시스템, 광역 모니터링과 제어 설비가 포함될 것이다.

실시간 Phasor 측정 기술 구현을 위한 필수 장비들

• PMU(Phasor Measurement Unit)

측정되는 전류, 전압의 측정치에 GPS 위성이 제공하는 시각정보를 담아 전류나 전압의 크기와 위상각을 제공하는 장비로서 서로 다른 지역에서 측정된 정보로부터 두 지역 사이의 위상각 차이를 정확히 제공할 수 있는 장점을 갖고 있다. GPS 시각 정보가 1 $\mu$ s의 정확성을 갖는다면 PMU는 1Cycle당 46개의 위상각 정보를 제공할 수 있게 되어 계통의 동적인 변화를 세밀하게 측정할 수 있게 한다.

#### • PDC(Phasor Data Concentrator)

PMU에서 측정된 시각 동기화된 계통 정보나 다른 PDC에서 처리된 정보를 받아 보다 넓은 계통 정보를 구축하고 가공한다. 그리고 사고나 계통의 외란이 발생할 경우 PMU 정보를 저장하는 역할도 수행한다.

#### • WAN(Wide Area network)

일반적인 WAN과 같은 구성을 하고 각 기기간의 통신을 담당하는 역할을 하나 전력계통의 특성상 일반 통신용과는 다른 보다 강건한 신뢰성과 안정성이 요구된다.

#### • Real Time Database and Data Archiver

측정되거나 수집된 정보를 사후 해석 등의 유용한 활용을 위해 보관하거나 가공하는 역할을 한다.

이러한 기기들은 온라인 환경에서 구축되어 실시간 감시와 제어를 위한 다양한 계통기기들과 협조되어 운영되어 진다.

### 실시간 측정 기술의 활용

실시간 측정 기술은 사고의 파급방지와 송전용량의 증대, 송전 설비 활용 증대를 공통 목적으로 갖는 다음 세 가지 연구에 적용되어 진다.

- 실시간 광역 계통 감시 및 해석(WAMS)
- 실시간 광역 계통 제어(WACS)
- 실시간 광역 계통 적응형 보호(WAPS)

WAMS, WACS, WAPS는 각각 독립적으로 계통에 적용되어 활용될 수 있으나 일반적으로 WAMS를 통해 수집된 계통의 상태 정보와 해석 정보를 바탕으로 WACS와 WAPS가 동작하여 계통의 안정도를 향상시키는 계층적 관계를 갖는다. 각각의 기능은 계통 안정도의 모든 분야에 대해 감시, 제어, 보호가 가능하며 그 적용 범위가 굉장히 넓다. 측정되는 실시간 정보의 샘플링 시간과 정보의 종류, 축적된 정보의 양에 따라 상태 추정, 전압안정도 감시 및 제어, 과도안정도 감시 및 제어, 미소신호안정도 감시 및 제어와 같은 다양한 활용이 가능하다. 이와 관련하여 미국의 실시간 계통 감

시, 제어, 보호 기술에 대한 기술모임인 EIPP에서는 표 1.과 같은 활용 방안과 필요한 정보의 종류 및 요구 사항을 제시하고 있다.[1]

최근 우리나라에서도 위에서 검토한 여러 가지 방안 중에 현재 우리 계통이 처한 현실에 맞는 주제에 대한 연구 개발이 이루어지고 있다. 여기서는 계층적인 실시간 계통 감시, 제어, 보호 기술의 출발점이 되는 WAMS 중에서 우리나라의 계통에서 보이는 수도권 전압안정도 문제를 염두에 두고 실시간 전압 안정도를 감시하는 기술에 대해 알아보기로 한다.

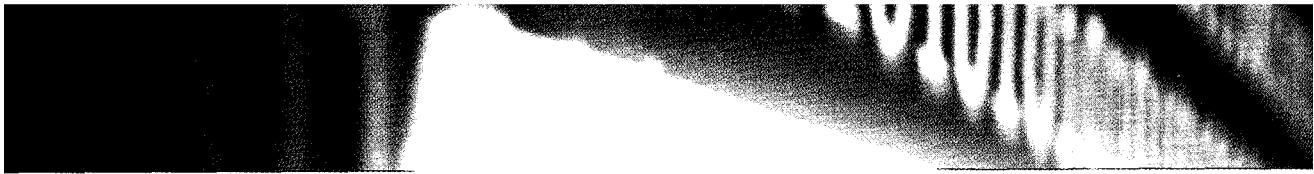
## 실시간 계통 전압 안정도 감시

전압안정도는 주어진 계통 상태에서 계통전압을 안정하게 유지하는 능력을 말하며 (IEEE 정의), 사고에 의한 계통 임피던스 증가 또는 부하증가 시 전력과 전압을 제어할 수 있는 것을 의미한다. 특히, 장기 전압 불안정 (Long-term voltage instability) 현상은 사고 후 OLTC (On-load tap changing transformers), 발전기의 무효전력 공급능력의 한계 및 부하 회복 (Load recovery) 특성등과 밀접한 관계를 갖으며, 계통 고장의 심각성에 따라 점차 전압붕괴에 이르게 된다.

일반적으로 전압불안정 현상은 정상상태에서 운전 중인 계통에 다중 계통고장이나 초기 사고에 따라 파급되는 설비 탈락 등으로 인해 발생된다. 따라서 계통은 검토단계에서 모든 발생 가능한 상정 사고(일반적으로 N-1 상정사고)에 대해 검토를 하여 계획하고 설계하며 검토된 상정사고에 대해서는 사전에 필요한 예방조치와 복구 동작을 명문화하여 대비하게 된다. 그러나 대정전의 경우 보통 발생 확률이 적은 사고가 연속으로 발생하는 것이 원인이며 대부분의 경우 하나의 사고가 발생한 직후의 전압불안정성의 감지는 할 수 없으며, 앞으로 계속 발생할 고장 및 설비 탈락에 대한 예상을 하는 것은 더욱 어렵기 때문에 사고 초기에 적절한 전압불안정 예방 동작의 결정은 불가능하게 된다.[2]

표 1 실시간 측정기술의 활용 및 데이터 요구 조건

활용 방안	측정 주기 (per second)	측정 기간	활용 영역	적용 범위	SCADA 활용여부
Frequency monitoring and rate of change	Short term : 30회 Long term : 1회	Short term : 24시간 Long term : 2년	Action	광역 계통	
Phasor assisted state estimation	1회	Short term or Long term : 1시간	Monitoring/ Forecasting	-	○
State measurement-open phase detection	30회	Memory buffer (수초)	Protection	지역 계통	
Disturbance monitoring	30회	Event archive (사고 전후 5분)	Post Disturbance analysis	지역 및 광역 계통	
Pattern recognition	Short term : 30회 Long term : 1회	Short term : 24시간 Long term : 1년	Forecasting	광역 계통	○
Short term stability monitoring, detection and control	30회	Memory buffer (1시간)	Action	지역 계통	
Long term stability monitoring, detection and control	30회	Memory buffer and Short term : 24시간	Action	광역 계통	○
Stress detection -alariming, forecasting, GIS location	30회	Memory buffer and Short term : 24시간	Action	광역 계통	○
Oscillation monitoring (system & machine)	30회	Memory buffer and Short term : 1시간	Action	지역 및 광역 계통	
Islanding and reconfiguration	30회	Memory buffer and Short term : 1시간	Action	광역 계통	
Flow gates and interface monitoring	30회	Memory buffer and Short term : 24시간	Action	광역 계통	○
Voltage/VAR monitoring	30회	Memory buffer and Short term : 24시간	Action	광역 계통	○
Spectral analysis on frequency, MW, MVAR, Voltage signals	30회	Memory buffer and Short term : 1시간	Monitoring/ Forecasting	지역 및 광역 계통	
Dynamics thermal rating	30회	Short term : 24시간	Action	지역 계통	○
Distributed analysis (Fast simulation modeling)	30회	Memory buffer and Short term : 1시간	Monitoring/ Forecasting	지역 및 광역 계통	○
System probing	30회	Memory buffer and Short term : 1시간	Maintenance	지역 계통	
Power system equipment failure detection	30회	Memory buffer and Short term : 1시간	Monitoring/ Maintenance	지역 계통	○
Machine, line and load characterization	30회	Memory buffer and Short term : 1시간	Maintenance	지역 및 광역 계통	
Measurement system performance monitoring	30회	Memory buffer and Short term : 24시간	Monitoring	광역 계통	



이러한 문제는 다중 상정사고 (N-x)에 대한 감시와 해석이 기존의 Off-line 전압안정도 평가를 수행하는 것으로는 해결할 수 없는 복잡성을 가지고 있기 때문이며, 시간 축에 대한 모의를 위해 전력계통의 동적 모델의 시적분에 의한 계통 상태의 감시 및 설비 탈락 모의를 통해 어느 정도의 예측이 가능할 수 있다. 그러나 기존의 방법들은 장기 전압안정도에 대한 판단을 위한 긴 계산시간으로 인하여 On-line 적용에 한계가 있으며, 더욱이 현재의 SCADA/EMS 데이터는 계통 고장 후 동적 응답 상태에서 수집된 데이터가 시각 동기화 되지 않아 그 정확성을 신뢰할 수 없게 되며, 이러한 계통 상태 정보의 시간 차이는 전압안정도 측면에서 중요한 문제가 된다.

이런 면에서 볼 때 WAMS에서 사용되는 시각 동기화된 Phasor 측정 기술은 기존 시스템이 갖고 있는 측정데이터와 계통 상태의 시간 차이에서 발생하는 문제를 해결하여, 실시간 계통 감시와 해석을 가능하게 하였다. 특히 아래에 제시하는 VIP와 VIP++ 알고리즘은 기존의 알고리즘과 달리 PMU 정보를 이용하여 측정데이터와 계통 상태의 시간 차이를 해결하여 실시간 전압안정도의 판단이 가능하다.

## 지역 및 시스템 정보를 이용한 전압안정도 평가 알고리즘

### VIP (Voltage Instability Predictor)

VIP는 모션에서 측정되는 전압과 전류로부터 계통

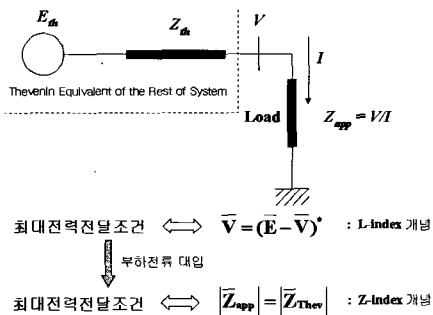


그림 1 VIP 알고리즘 기본 원리

의 전압안정도 여유를 계산하여 필요시 부하차단을 시행할 수 있는 알고리즘이다. VIP는 기존의 전압안정도 감시 알고리즘과 달리 계통 정보 없이 설치 지역에서 측정된 정보만으로 전압안정도 여유를 계산할 수 있어, 전압안정도 감시와 필요시 부하차단을 스스로 시행할 수 있는 고도로 지능화 된 알고리즘이다.[3] 미국 AEP 시스템에 최초로 설치되었으며, 성능 개선을 위한 연구가 계속 이어지고 있다.

위와 같이 등가 전원이 부하에 전달할 수 있는 최대 전력은 테브닌 임피던스와 부하 임피던스가 같아질 때이다. 이 법칙을 전력계통에 적용해 보면 계통이 부하 모션에 공급할 수 있는 전력의 한계 값은  $|\bar{Z}_{app}| = |\bar{Z}_{Th}|$  라는 조건이 성립할 때의 부하전력이다. 이 이론은 부하특성에 관계없이 성립하므로 임피던스 평면상에서 정적인 전압불안정 현상을 설명할 수 있다. 어떤 지역에서  $|\bar{Z}_{app}|$ 와  $|\bar{Z}_{Th}|$  값을 추적하는 것은 임피던스 평면 위에서 두 값의 거리를 실시간으로 추적하고 있는 것이 되고 계통의 전압안정성을 감시하는 지수로서 활용할 수 있게 된다. 계통의 전압안정도는 실시간으로 추적되는  $|\bar{Z}_{app}|$ 와  $|\bar{Z}_{Th}|$ 의 비율인 Z-index로써 판별되고, 안정조건을 수학적으로 표현하면 아래와 같은 조건이 된다.

### VIP++ (Voltage Instability Predictor ++)

VIP 알고리즘의 정확성 향상을 위해서 데이터 창을 구성하고 사용되는 각 스텝의 데이터는 부하의 변화에 대하여 충분히 다른 값을 가져야 하며, 구성된 등가 계통은 연산 과정 중에 변화하지 않고 일정하여야 한다. 따라서 VIP는 변화하는 계통 환경에 의해 오차가 발생하게 되며 정확성 향상을 위한 데이터 창 구성 시간으로 인해 일반적으로 SCADA와 같은 수분대의 시간 지연이 발생하게 된다.

위와 같은 단점을 극복하는 방안으로 제시한 것이 바로 VIP++ 알고리즘이다. VIP++ 알고리즘의 기본개념은 VIP 알고리즘과 같이 최대전력전달법칙에 두고 있으나 최소자승법의 연산 없이 서로 다른 2곳 이상의 계통 정보를 통해 등가 계통을 구성하여 테브닌 임피

던스를 구하는 것이 다른 점이라고 하겠다.

VIP++ 알고리즘은 먼저 감시 하고자하는 선로를 선정하고 선로 양단의 모선에서 계통의 정보를 측정하여 그림 2와 같이 T-등가회로를 구성한다. 등가회로의 각 파라미터들은 측정된 계통정보와 전류방정식을 이용하여 쉽게 계산이 가능하며, 모든 파라미터의 계산이 끝나면 옴의 법칙을 이용하여 테브닌 등가회로를 구성할 수 있다. 구성된 등가회로의 테브닌 저항을 이용하여  $|Z_{app}|$ 와  $|Z_{th}|$  두 값의 거리를 실시간으로 추적하여 계통의 전압안정성 감시 지수로 활용할 수 있는 Z-index를 제공한다. [4]

VIP++ 알고리즘은 가상모선과 가상 선로의 개념을 이용하면 감시 범위를 확장하여 광역계통 감시에 적용이 가능하다. 그림 3의 (a)와 같이 독특한 전압 안정도 특성을 가진 전압 제어지역으로 미리 구분되어진 계통

이 있다. 각 제어지역에서 전력 조류가 흘러 나가고 들어오는 각 모선과 선로를 통해 가상 모선과 가상 선로를 구성할 수 있으며 이것을 통해 그림 3의 (b)와 같은 등가회로를 구성하여 VIP++ 알고리즘을 적용하면 광역 계통의 전압안정성을 실시간으로 감시할 수 있다.

### 시뮬레이션을 통한 알고리즘의 검증

현재 동특성 해석을 위한 시간영역 시뮬레이션 들은 주파수 파형을 상세히 표현할 수 있는 전자기적인 과도현상 해석 툴 (EMTP, EMTDC, HYPERSIM)과 실효치 데이터 기반의 시간모의 툴(ETMSP, EUROSTAG, PSS/E, TSAT)로 나눌 수 있다. 전자는 전자기적인 과도현상 해석을 통해 설비 보호 모의에 중점을 두어 대규모 계통을 다루기에는 적합하지 않으며, 후자는 전자기적인 과도현상은 고려하지 않으나 시뮬레이션 시간을 몇 초에서 몇 시간까지로 확대하여 제어기 동작까지 포함하는 대규모 계통의 동특성 해석에 적합하다.

현재 연구 중인 전압 안정도 알고리즘을 검증하기 위해 실시간 시뮬레이터인 HYPERSIM과 시간 모의를 할 수 있는 TSAT을 사용하고 있다. HYPERSIM은 다른 과도현상 해석 툴과 달리 병렬 연산을 통해 실시간으로 계통의 변화를 감지할 수 있어 실제 계통을 모의하는 것과 같은 환경을 조성할 수 있다. TSAT은 전압 붕괴를 모의하는 시모의 방법에서 기존과 다른 장점을 보여준다. 전압붕괴 현상은 계통이 가진 정적인 특성 뿐만 아니라 복잡한 동적인 특성과도 깊은 관련이 있다. 따라서 발전기나 선로의 사고와 같은 큰 외란 이후 계통의 변화에 대해서 정확하게 모의하기 위해서는 동적 모의 (dynamic simulation)를 수행하여야 한다. 이 동적 모의는 일반적으로 계통 과도안정도 해석에서 적용하는 빠른 dynamics 및 장기 시 모의를 위한 느린 dynamics를 포함하는 계통 전체 DAE (Differential-Algebraic Equations)에 대한 시모의가 가능하여야 하며, TSAT (Transient Stability Assessment Tool)은 이러한 Stiff한 문제를 해석할 수 있도록 구성되어 있다.

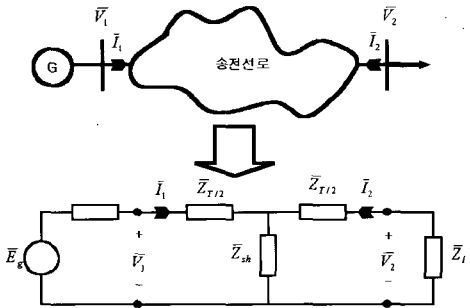


그림 2 감시모선 양단에서 측정된 정보를 이용한 T-등가회로의 구성

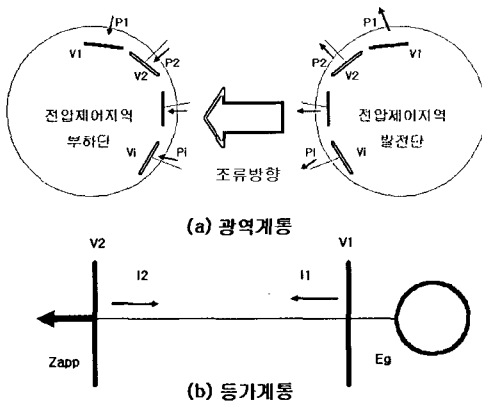


그림 3 가상모선을 이용한 VIP++의 광역계통감시 적용 방안

### HYPERSIM을 통한 검증

HYPERSIM의 경우 순시치 환경에서 모의가 이뤄지기 때문에 실 계통에서 발생할 수 있는 문제를 인지하고 해결 할 수 있는 여건을 만들어 준다. 그림 4는 현재 연구에서 사용하는 HYPERSIM 모의 계통도이다.

시험 계통은 3기 10모선으로 Dynamic Load Model

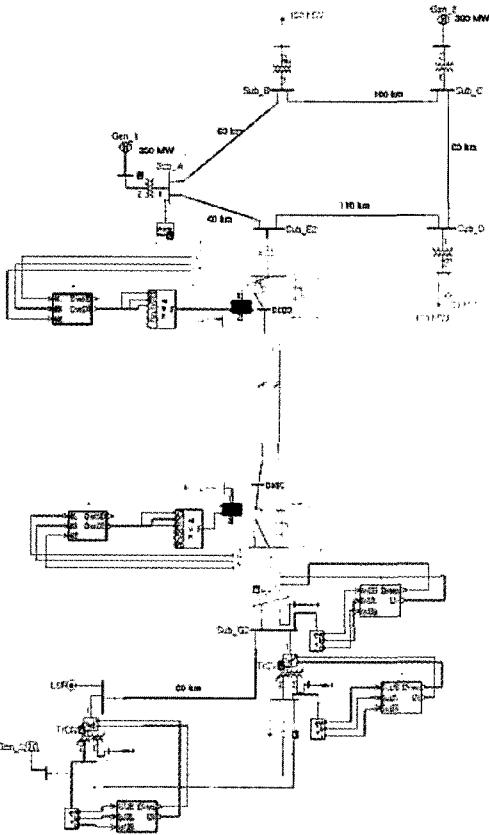


그림 4 HYPERSIM 모의 계통

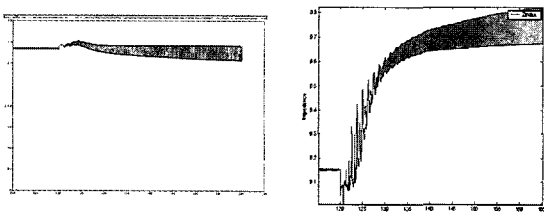


그림 5 계통 모의 시 전압과 Z-index의 추이

로 표현된 4개의 부하와 3개의 ULTC로 이뤄져있다. 정상상태에서 계통의 총 발전용량은 790MW, 부하량은 680MW이며 Sh. C는 128.88MVar가 설치되어 있다. 계통은 크게 발전단과 부하단으로 나뉘지며 전력 조류는 위에서 아래 방향으로 흐르고 있다.

총 감시 시간은 모의 시작 후 110초부터 160초까지 50초간이며 사고는 모의 시작 후 120초에 2번 발전기 탈락을 가정하였다. 2번 발전기는 300MW의 출력으로 전체 발전량의 약 40%를 감당하고 있어 사고를 인가하면 계통에 심각한 문제를 발생할 것으로 생각된다. 주요 감시 선로는 발전단과 부하단을 연결하는 2회선 Tie 라인이다.

그림 6.의 모의 결과 계통 내에 존재하는 여러 가지 제어 기기들의 동작과 부하의 회복 특성에 의해 계통의 운전 전압이 붕괴에는 이르지 않으나 Z-Index는 1에 가까울수록 계통의 전압 불안정성을 나타내며 모의 결과를 살펴보면 Z-Index가 점차 1에 가까워지고 있어 사고가 계통에 심각한 영향을 미치고 있음을 보여준다.

### TSAT 모의

모의 계통은 4기 11모선으로 총 발전량은 6,665 MW 이고 총 부하량은 6,455 MW이다. 모의 시간은 140초이며 20초에 Bus 6과 7 사이의 1회선이 Open되는 사

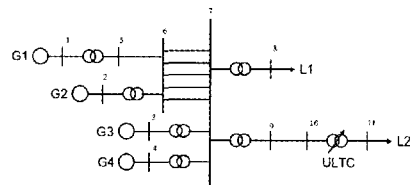


그림 6 TSAT 4기 11모선

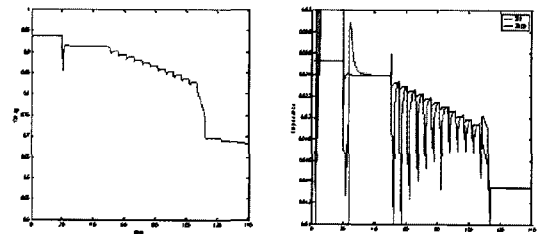


그림 7 계통 모의 시 전압과 VIP에 의한 임피던스 추이

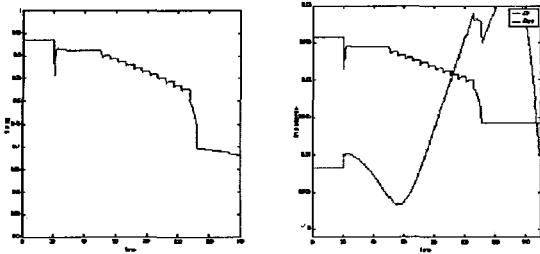


그림 8 계통 모의 시 전압과 VIP++에 의한 임피던스 추이

고를 모의 하였다. 계통 전압을 유지하다 사고로 인해 50초부터 계통이 점점 불안정해 지며 결국 붕괴한다.

그림 7.과 그림 8. 은 각각 VIP와 VIP++ 알고리즘을 수행한 후의 임피던스 추이를 보여주고 있다. 결과를 살펴보면 두 경우 모두 전압 불안정 현상이 나타나는 시점에서 테브닌 임피던스가 부하 임피던스에 접근 것을 볼 수 있다.

### 데이터 샘플링

측정된 데이터는 중앙에 모아 연산을 하게 되는데

데이터양이 많을 경우 한정된 통신 용량으로 인해 병목 현상이 발생하게 된다. 때문에 알고리즘 설계 시 이러한 통신 용량 문제를 해결하기 위해 데이터양에 대한 고려가 필요하다. 여기서는 이를 고려하여 RMS 데이터의 주기 당 입력 회수를 16회에서 0.5회로 변화하여 모의 결과의 해석에 어느 정도 차이가 있는지를 확인하였다.

그림 9.와 그림 10.에서 보듯이 주기 당 데이터 입력 횟수가 많을수록 정확한 결과를 얻을 수 있으나 2주기 당 1회(초당 30회)의 데이터 입력 경우에도 인덱스 표현에는 많은 차이가 나지 않았다. 결과적으로 통신 용량을 고려할 경우 최소 2주기에 1회 정도의 데이터만으로도 우리가 원하는 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

현재까지는 실제 계통 데이터의 부재와 실시간 시뮬레이터의 문제점, 그리고 장시간 모의를 위한 정확한 계통데이터와 모델이 구비되어 있지 않아 시험계통이나 Off-Line 해석을 통한 알고리즘의 검증조차 미비한 상황이다. 특히 실시간 시뮬레이터의 경우 실제 계통

과는 다른 작은 시험 계통의 모의만 가능할 뿐이며, TSAT 환경은 계통 제어기와 부하에 대한 정확한 모델이 없어 실 계통 데이터에 대한 모의에 한계가 있는 실정이다. 앞으로의 계획은 실시간 시뮬레이터의 경우 시험계통의 튜닝과 SCADA 환경 구축을 통해 좀 더 실제와 가까운 환경

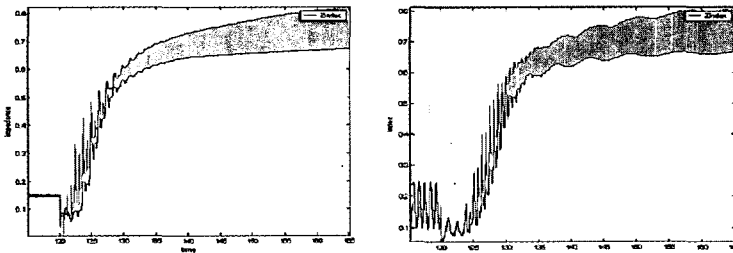


그림 9 주기당 16회와 주기당 4회

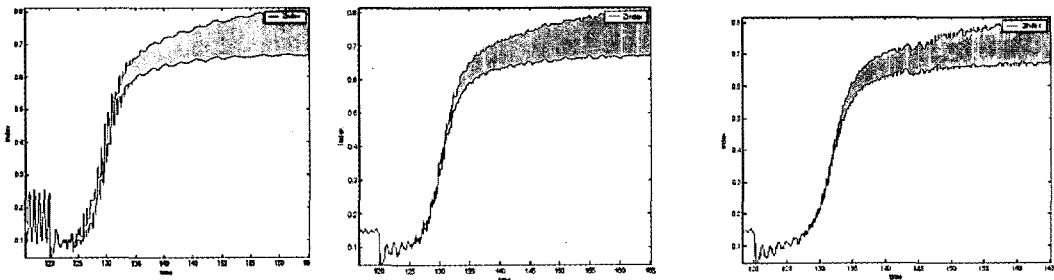


그림 10 주기당 2회, 주기당 1회, 2주기당 1회



에서 모의를 할 수 있는 여건을 마련하는 것이다. TSAT 등의 실효치 모의 틀의 경우 실시간 시뮬레이터가 제공하지 못하는 우리나라 계통에 대한 Off-Line 알고리즘 검증 환경 구축을 위해 ULTC나 OEL등 장시간 전압안정도에 영향을 미치는 각종 모델의 구현할 계획이다.

## 우리나라 계통에서의 적용방안

기본 원리의 설명과 시험계통의 모의에서 살펴본 지역 계통 정보를 통한 전압 안정도 감시 알고리즘은 특정한 전압안정도 특성을 통해 명백하게 나누어지는 전압제어지역, 또는 Radial 선로 구성을 통해 명백하게 부하단으로 구분되는 계통에서 효과적인 적용이 가능하다. 전자는 광역계통 감시 적용에 해당하며 후자는 부하모선을 감시하는 지역 계통 감시에 해당한다. 그러나 우리나라 계통의 특성상 Meshed 계통 구성으로 인해 명백한 전압제어지역의 설정이 어려울 뿐만 아니라, 부하단 역시 Radial 선로 구성을 쉽게 찾을 수 없다. 특히 수요는 많으나 발전단과 원거리에 위치하여 전압 불안정성을 내포하고 있는 수도권 지역의 경우 계통의 구성이 더욱 복잡한 실정이다. 따라서 알고리즘의 우리나라 계통 적용을 위해서는 몇 가지 사항을 검토하지 않을 수 없다.

먼저 주요 관심 대상을 수도권 일대로 한정한다. 북상조류의 영향으로 인해 전압안정성 문제가 수도권에 주요한 문제이기도 하며 수도권과 비수도권의 구분을

통해 전압 제어지역의 구분을 아주 Rough하게 접근하는 방법이다.

다음으로 수도권 내부 선로의 Radial 여부를 확인한다. 지역 계통의 전압안정성 감시의 효과적 적용을 위해서는 Radial 선로가 유리하므로 345kV 주요 모선을 중심으로 154kV 선로를 검토한다.

수도권 환상망 주변의 조류 흐름을 검토한다. 처음에 가정된 수도권, 비수도권의 지역구분이 과연 가능

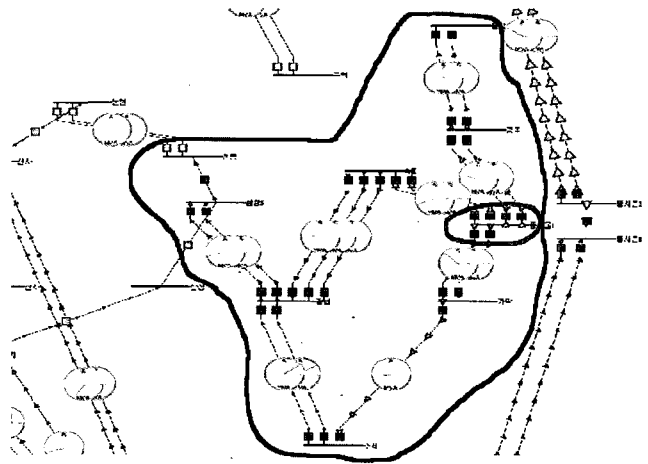


그림 11 동서울 345kV 모선에서 본 부하단

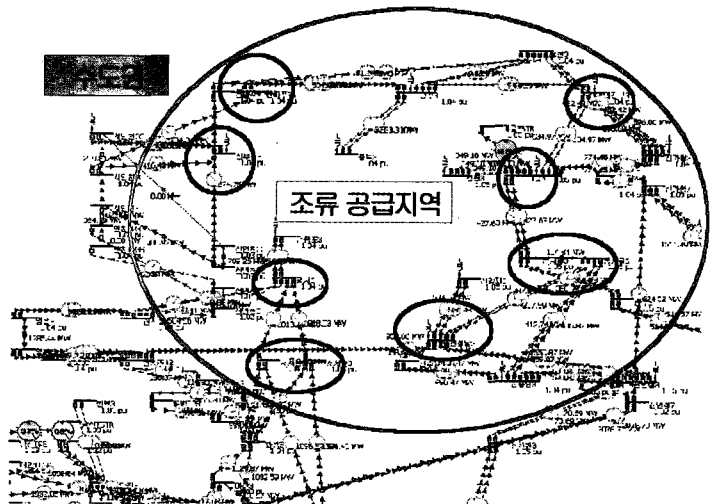


그림 12 수도권 환상망 주변의 조류 흐름 검토

한 것인지 환상망 주변의 조류흐름을 검토하여 광역계통의 감시의 적용 가능 여부를 확인한다.

이렇게 3가지 사안 위주로 수도권 계통의 검토를 실시한 결과 다음의 두 가지 유용한 정보를 얻을 수 있었다. 첫 번째, 수도권의 주요 345kV 모선을 기준으로 들여다본 모든 154kV 선로의 구성이 그림 11.과 같이 Radial 구성을 하고 있었다. 그림 11.은 동서울 345kV 모선을 기준으로 들여다본 경우로 동서울을 비롯하여, 의정부, 미금, 영등포, 양주 등 주요 모선을 기준으로 한 검토에서 모두 Radial 구성을 하고 있었다. 이러한 특성을 바탕으로 하여 345kV 모선 이하의 선로를 부하 단으로 가정하면 지역 계통 전압안정성 감시를 위한 VIP의 적용이 가능하다.

두 번째, 수도권 환상망 주변의 조류를 검토한 결과 환상망 내부의 계통을 하나의 전압제어지역으로 구성할 수 있었다. 그림 12.에서 보듯이 수도권 환상망 위에 위치한 신파주, 의정부, 미금, 동서울, 신성남, 서서울, 영서, 신부평 모선들은 환상망 외부로부터 주요 유통선로를 통해 조류를 공급받아 환상망 내부의 모선으로 조류를 공급하고 있다. 외부에서 공급된 조류는 다시 외부로 다시 흘러 나가지 않고 내부에서 모두 소모된다. 이를 바탕으로 환상망 내부를 묶어 하나의 부하 단으로 가정하여 주요 모선들을 하나의 가상모선으로,

주요 유통선로들을 하나의 가상 선로로 구성하면 광역계통 감시를 위한 VIP++의 적용이 가능하다.

## 앞으로 나아갈 방향

지금 까지 우리는 기존의 전압안정성 감시 체계가 현대 계통에 부족한 점을 인식하고 실시간 계통 감시 기술이 적용된 WAMS를 소개하고 실제 계통 적용을 위한 배경 기술인 지역 계통정보를 이용한 전압안정성 감시 알고리즘에 대해 살펴보았다. 여기서 한 가지 짚고 넘어가야 하는 것은 SCADA/EMS를 이용한 기존의 감시 체계가 실시간 감시에 제약이 있을 뿐이지 전혀 쓸모없는 기술이 아니라는 것이다. 우리가 살펴본 Phasor 측정기술과 기존의 SCADA/EMS를 이용한 기존의 감시 체계가 접목되면 보다 효과적인 감시 기술의 개발이 가능하다. 최근 더욱 발달한 통신과 하드웨어 기술과 접목하여 원거리에 위치한 주요 발전기들에 실시간 측정기를 설치하여 중앙에서 정보를 수집, 실시간으로 계통의 무효전력 한계를 감시하는 연구가 한 예라고 하겠다.[5]

WAMS를 통해 수집되고 해석된 정보는 궁극적으로 WACS와 WAPS에 활용되어진다. [6][7]

그림 13.은 BPA에서 연구하고 현재 적용중인 WACS의 개념도이다. 실제 계통에 대한 WACS와 WAPS의 적용은 단순 기기에 대한 적용에서부터 SVC (Secondary Voltage Control) 또는 TVC(Tertiary Voltage Control)과 같은 광역계통의 지능형 전압제어로도 적용이 가능하다.

만일 WAMS를 통한 계통의 정보가 WACS와 WAPS를 통해 계통에 적용된다면 실시간 측정 기술은 다시 Closed Loop Control의 개념으로 적용되어 계통의 퍼포먼스 향상에 도움을 줄 수 있다.[8]

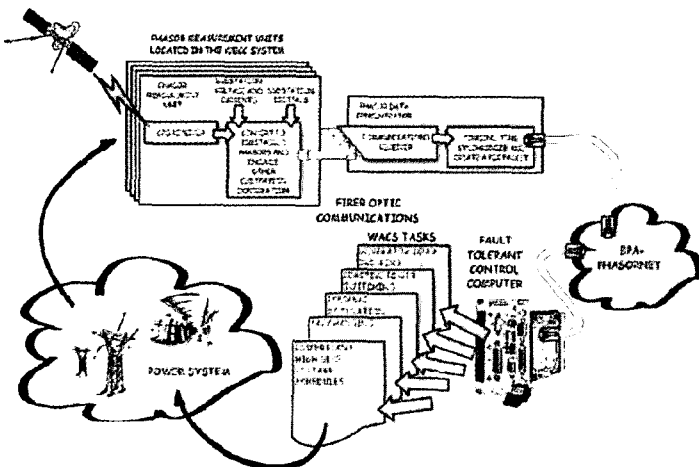


그림 13 BPA(Bonneville Power Administration)의 계통 보호제어 시스템



## 맺 음 말

전력 산업 분야의 급속한 환경 변화와 세계 여러 나라에서 발생한 대규모 정전 사태를 경험하면서 WAMS와 WACS는 계통 안정성 확보라는 전제 아래 이미 새로운 전력 산업의 대세가 되어 가고 있다. 우리나라의 경우도 점점 계통의 운전이 한계점에 다다르고 있는 시점에서 보다 적극적인 계통 안정도 확보를 위해 WAMS와 WACS의 적용을 검토가 필요하고 생각한다. 더구나 세계적인 IT 인프라를 구축하고 있는 우리나라는 WAMS와 WACS의 기반이 되는 통신과 정보 처리 면에서 상당히 유리한 위치에 있다. 이러한 이점을 잘 활용한다면 그동안 선진 기술을 수용만 하던 수동적인 기술 수입국을 벗어나 핵심 기술의 선점을 통한 전력 산업 강국으로의 한 단계 도약도 가능하다고 생각된다.

여기서는 WAMS와 WACS의 간략한 소개와 현재 진행 중인 배경기술에 대한 간략한 소개를 하였다. 앞으로 이 분야의 연구에 전력인들의 많은 관심과 노력을 바라는 바이다.

### [참고문헌]

- [1] White Paper-Final Draft, "Phasor Data Requirements For Real Time Wide-Area Monitoring, Control and Protection Applications" EIPP-Real Time Task Team Jan. 26, 2005
- [2] V. Madani, D. Novosel, A. Apostolov, S. Corsi, "Innovative Solution For Preventing Wide Area Cascading Propagation" Bulk Power System Dynamics and Control-VI August 22-27, 2004, Cortina d' Ampezzo, Italy
- [3] K.T Vu et al. "Voltage Instability Predictor(VIP) - Method and system for performing adaptive control to improve voltage stability in power systems", United State Patent No. US6,219,591 B1, Apr. 17, 2001
- [4] Mats Larsson, Christian Rehtanz, and Joachim Bertch, "Real-time voltage stability assessment of transmission corridor", Proceedings of IFAC-Symposium of Power Plants & Power Systems Control 2003, Sept. 15-19, 2003, Seoul, Korea.
- [5] Lixin Bao, Zhenyu Huang, Wilsun Xu. "On-line Voltage Stability Monitoring Using Var Reserves"
- [6] C.W. Taylor, R.E. Wilson. "BPA's Wide Area Stability and Voltage Control System (WACS):Overview and Large - Scale Simulations", IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (IX SEPOPE), 23-27 May 2004.
- [7] C. Rehtanz, D. Westermann. 2002. "Wide Area Measurement and Control System for Increasing Transmission Capacity in Deregulated Energy Markets", 14th PSCC, Sevilla, 24-28 June 2002, Session 17.
- [8] Carson W. Taylor, C. Erickson, Ken E. Martin, Robert E. Wilson, Vaithianathan Venkatasubramania "WACS - Wide-Area Stability and Voltage Control System : R&D and On-Line Demonstaration", Paper 04-002. Final submittal for Proceedings of IEEE special issue on Energy Infrastructure Defense Systems, May 2005.