

위성망을 이용한 온라인 광역 동기위상 및 전압안정도 감시 시스템 개발에 관한 연구

권대윤\*, 김태진\*, 윤상현\*, 정광균\*\*, 오규환\*\*  
(주)프로컴시스템\*, 전력연구원\*\*

A Study on Development of Online Wide Area SynchroPhasor and Voltage Stability Monitoring System using Satellite Network

Dae-Yun Kwon\*, Tae-Jin Kim\*, Sang-Hyun Yoon\*, Gwang-Gyun Jung\*\*, Gyu-Whan Oh\*\*  
Procom Systems\*, KEPRI\*\*

**Abstract** - Recently, the most wide-area blackout in North America, Canada and Europe had shown us indirectly the importance of Wide-Area Power System Protection and had influence on the direction of domestic electric power industry. After reorganization of the electric power industry in 2001, market incentives controls the power generation, transmission and distribution rather than stability of power grid, and moreover it produce bad results like inefficient facility management and too much competition. In addition, we can easily predict the massive loss of social and economic when the wide-area outage occurs by north direction load flow which is a pending problems of domestic power system and in a changed industry likes hi-tech manufacture and information technology industries. This paper introduces the development of infra systems for prevent wide-area blackout in situations of the power system operations.

1. 서 론

최근 북미, 캐나다 그리고 유럽의 대규모 정전사태는 광역전력계통보호의 중요성을 간접적으로 보여주었으며, 특히 국내 전력산업의 행보에 큰 영향을 주었다. 2001년 전력산업 구조 개편 이후 계통의 안정성보다는 발전 및 송·배전에 시장논리가 지배적이며 이는 비효율적인 설비의 운영, 그리고 과도한 경쟁 등 오히려 역 효과의 결과를 가져왔다. 또한 국내 전력계통의 미결 과제인 북상조류와 전력설비의 복잡성은 계통 보호의 큰 복병으로 자리매김하고 있으며, 첨단제조 그리고 정보산업과 같이 변화된 산업수요구조로 인해 광역정전 발생 시 천문학적인 사회적, 경제적 손실을 쉽게 예상할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 계통운영 상황에서 대규모 광역정전을 사전에 예방하기 위한 인프라 시스템 구축 및 개발에 관한 내용을 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 동기위상 감시 시스템 개발 개요

2001년 북미 광역정전 사고는 전 세계 전력산업에 큰 충격을 안겨주었다. 특히 자국 국민들은 미국 계통의 후진성에 불안감을 표출 했고 전력계통 전문가들 또한 힘없이 무너진 계통에 대해 당혹감을 감추지 못했다. 하지만 대규모 정전 사태가 발생하지 수년이 지났고 그 동안 계통 안정화를 위해 수많은 인력과 자금이 투입되었지만 아직도 대정전의 위험은 그대로 도사리고 있으며, 이에 대해 정부는 광역정전을 막기 위한 대규모 프로젝트를 현재 까지 수행해 오고 있다.

북미 계통의 주요 위치에 동기위상측정장치(PMU:Phasor Measurement Unit)를 약 75대 정도 설치해 시범 운영을 하고 있으며, 미 전력연구원(EPR:Electric Power Research Institute)에서는 Intelli-grid 및 Smart Grid 인프라 구축을 위한 장기적인 계획을 세워 미래지향적 전력계통 운영을 준비하고 있다. 유럽 및 중국에서도 동기위상측정의 중요성을 인식하고 꾸준히 장비 설치를 늘려가고 있으며, 컨트롤을 위한 다각적인 연구가 진행되고 있다.

물론 북미 계통사정과 국내 계통은 정책적 또는 환경적으로 많은 차이가 있다. 꾸준한 전력 설비 보강과 유지보수, 적절한 수요예측으로 안정된 전력 공급, 그리고 독립적이고 진문화 된 급전운영 등으로 국내 계통은 강인한 안정된 전력 수급을 유지하고 있다. 하지만 계통의 대형화와 비효율적인 전력설비 운영 그리고 해마다 증가하는 전력수요는 전력품질 저하와 직결되며, 예측하지 못한 과부하로 인해 불안정한 전압상태에서 과도안정도를 해치는 사고가 발생했을 때, 전력계통은 회복되지 못하고 광역정전으로 이어질 가능성이 있다.

동기위상 측정은 위와 같은 광역계통의 위기상태를 감시하는 시스템의 기초 작업이며, 이 작업은 PMU 장치로 계측 및 전송이 된다. 본 논문에서는 이미 국내기술로 개발 완료 된 PMU 장치를 이용해 동기위상을

감시하는 시스템 개발 내용에 대해 소개하고자 한다.

2.1.1 동기위상 데이터의 계측 및 연산

국내에서 개발한 sPMU는 계통의 주요 모선 송/수전단의 전압, 전류 소스를 입력 받아 GPS 위성에서 수신한 시간정보와 동기신호(1pps : 1 pulse per second)를 이용해 시간동기(Time Synchronization)와 함께 동기위상(SynchroPhasor)을 계측해, 상위 데이터수집 장치(DB Server)로 위성망과 지상망 양방향으로 통해 실시간으로 전송하는 기능을 가진 장치이다. 먼저 동기위상 데이터, 즉 페이저 데이터의 계측 및 연산을 위해서는 우선 전압, 전류소스에서 벡터 값을 분리해야 한다. 전압, 전류의 사인파는 진폭(amplitude: A)과 상각(phase angle: δ) 그리고 주파수(f), 시간(t)요소를 통해 아래와 같은 식(1)을 계산한다.

$$v(t) = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \delta) \quad \text{식(1)}$$

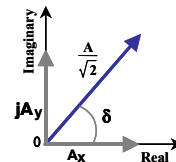
위 식(1)을 오일러의 등식을 이용해 유도하면,

$$v(t) = A \cdot \operatorname{Re}\{e^{j(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \delta)}\} = \operatorname{Re}\{e^{j(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)} \cdot A \cdot e^{j\delta}\} \quad \text{식(2)}$$

가 되며, 위상(phasor)을  $v(t)$ 라고 할 때 표기를 간단히 하면,

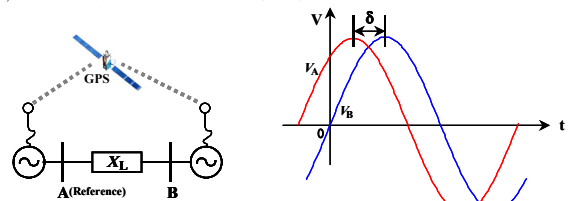
$$\vec{V} = \frac{A}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\delta} \quad \rightarrow \quad \vec{V} = \frac{A}{\sqrt{2}} \angle \delta \quad \text{식(3)}$$

가 된다. 위 식을 벡터도로 나타내면 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 복소평면에서의 phasor 표시

동기위상을 측정해 서로 떨어진 지점의 위상각을 측정하기 위해서는 동시에 계측된 위상각을 기준위상에 비교해야 한다. 기준위상은 해당 계통 내 위상기준점의 전압 a상으로 선정하며, 그 외의 위상각은 모두 기준위상과의 상차 각도로 표시를 한다. <그림 2>는 거리가 있는 두 지점 (A,B) 간 전압 위상차(δ)를 보여준다.

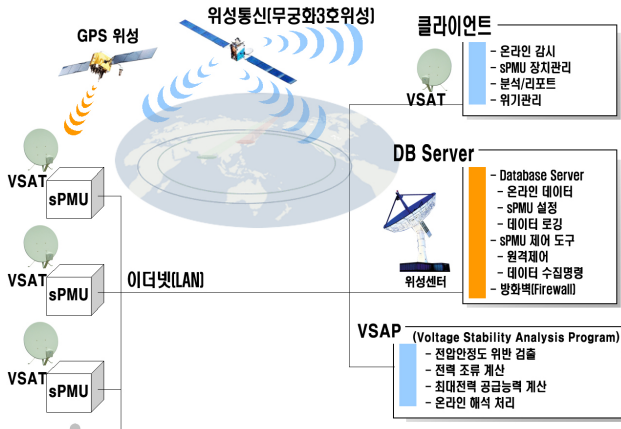


<그림 2> 거리가 있는 두 지점 간 전압 위상차이

2.1.2 동기위상 데이터의 실시간 전송 및 감시

매 초마다 수신되는 1pps신호에 동기화 된 위상데이터는 위성망과 지상망으로 동시에 상위 데이터수집 장치로 실시간 전송이 된다. 위성망의 경우 36,000km 상공에 있는 무궁화3호 위성을 통해 송, 수신할 때 때문에 데이터 전송에 지연(송신:약250ms, 수신:250ms)이 발생하지만 모든 동기위상 데이터에는 시간정보(Time tag)가 각 패킷의 헤더부분에 있어 위상 비교에는 전혀 무리가 없다. 계통의 주요 모선을 감시하는 sPMU는 VSAT(Very Small Aperture Terminal)이라는 위성모뎀 장치와 안테

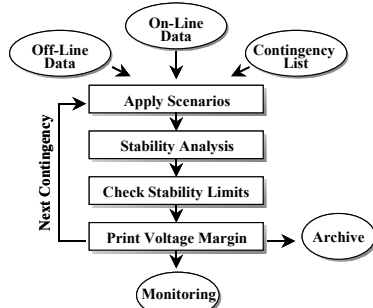
나를 통해 위성센터로 데이터를 송신하며 지상망 네트워크를 사용할 수 없는 경우에도 위성망은 안전하게 데이터 송, 수신 가능한 장점이 있다. 매 초 실시간으로 전송되는 데이터는 위성센터 내의 데이터 집중 서버에서 수집관리가 되며, 이 데이터를 가공해 위상각을 비교하거나 전압, 전류, 주파수 및 유·무효 전력 상태를 감시할 수 있다. <그림 3>은 본 시스템의 전체 구성도이다.



<그림 3> 전체 시스템 개요도

## 2.2 온라인 전압안정도 감시 시스템 개발

온라인 전압안정도는 데이터 집중서버인 DB서버에서 온라인 전력 조류계산을 위한 필요 데이터를 가져와서 안정도 평가해석을 통해 결과 값을 출력한다. 다음의 <그림 4>는 전압 안정도 평가 프로그램의 순서도이다. 프로그램은 on/off-line data, contingency list를 입력받아 미리 정의된 시나리오에 의해 상정사고 리스트 순으로 안정도 해석을 수행한다. 그 다음 안정도 한계 값을 계산한 후 전압안정도의 여유도를 출력하는 시퀀스로 이루어져 있다.



<그림 4> 전압 안정도 프로그램 순서도

### 2.2.1 전압안정도 해석 기능

전력 조류 방정식을 구성하려면 계통에 대한 모델링이 필요하다. 전력 계통에서 모선은 발전기, 콘덴서뱅크(무효전력 보상기), 부하가 연결되는 분기점이다. 일반적으로 콘덴서 뱅크는 발전기와 같은 기능을 하므로 모선은 콘덴서 뱅크를 포함한 발전기와 부하로 구성되었다고 할 수 있다.

전압안정도 실행주기에서 가장 먼저 실행하는 해석기능은 Base case 해석이며 기본적으로 조류계산을 수행한다. 일반적으로 식(4), 식(5)와 같은 모선의 전력방정식을 풀어 수렴 값 계산을 하게 된다. 본 시스템에서는 응답특성이 빠른 뉴턴-랩손법(Newton-Raphson Method)을 사용하며, 식(6)과 같은 전력방정식의 편차에 대해 자코비안 역행렬(Jacobian Matrix Inversion) 연산을 반복하여 수행하게 된다.

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad \text{식(4)}$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad \text{식(5)}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}_k = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}_k \quad \text{식(6)}$$

뉴턴-랩손법을 이용한 Base case 해석의 순서는 다음과 같다.

- ① 모선 어드미턴스 행렬 구성 : 계통의 연결 상태에 따라 구성한다.
- ② 슬랙모선 지정 : 용량이 가장 큰 발전모선을 슬랙모선으로 한다.
- ③ 전력방정식 계산 : 식(4), 식(5)와 같은 전력방정식을 계산한다.

- ④ 편차방정식 계산 : 모선전력 편차방정식을 수행한다.식(7)참조

$$\Delta S = \dot{S}_k - \dot{V}_k \cdot \dot{I}_k^* = \dot{S}_k - \dot{V}_k \cdot \sum_{m=1}^n Y_{km}^* \cdot \dot{V}_m^* \quad \text{식(7)}$$

- ⑤ 자코비안 행렬 계산

- ⑥ 변수 편차 계산 : 식(8)을 이용하여 변수 편차를 계산(전압/위상)

$$\theta = \theta + \Delta \theta, \nu = \nu + \Delta \nu \quad \text{식(8)}$$

- ⑦ 변수 값 갱신 : 전력편차방정식 계산과 수렴여부 판단 후 반복함

다음은 최적화 기법에 의한 최대전력 공급능력 계산으로써 Base case 해석 결과를 초기조건으로 하여 계산하는데, 주어진 문제는 다음의 식(9)와 같이 정식화 할 수 있다.

$$\text{Min } f(x), h(x) = 0 \quad \text{식(9)}$$

$$L(x, \lambda) \equiv f(x) + \lambda^T \cdot h(x) \quad \text{식(10)}$$

이를 다시 라그랑지안 쌍대함수(Lagrangian Dual Function)로 식(10)과 같이 정리한다. 그리고 이 식에 대한 최적조건식은 식(11)과 같이 비선형 연립방정식이 되므로, 뉴턴-랩손법을 적용하여 최적 해를 구한다.

$$L_x = \frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} + \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^T \cdot \lambda = 0, \quad L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda} = h(x) = 0 \quad \text{식(11)}$$

마지막으로 상정사고 해석은 발전기 OFF, 부하탈락, 선로사고 그리고 변압기 설비 단 사고가 주 해석 요소이며, 이들은 각각의 조합에 의해 상정사고 시나리오로 지정할 수 있다. 그리고 상정사고해석에서 주로 감시하는 내용은 모선전압 위반과 선로 과부하이며, N-2 상정사고 지정이 가능하게 한다.

### 2.2.2 온라인 전압안정도 감시 기능

기존의 전압안정도 해석을 위한 틀은 주로 오프라인을 기반으로 하였으며, 수렴까지의 연산시간이 수 분 이상이 걸려서 실시간 감시에 부적합 하였다. 하지만 본 시스템에서 개발한 프로그램은 동기위상 데이터 집중서버에 접속하여 조류계산을 하기위해 필요한 동적 데이터를 가져와 기존에 저장해 놓은 고정 데이터를 적용해 연산을 하며, 최적화 기법을 이용해 반복계산이 없이 실시간 해석이 가능하다.

HMI는 계통의 종합적인 상황을 파악할 수 있게 디자인하며, 메인 화면에는 실시간 계통해석에 필요한 정보와 시간에 따른 현황을 표시한다. 그리고 모든 연산이 완료된 후 결과는 다시 서버로 전송을 해 클라이언트가 실시간 전압안정도에 대한 정보를 알 수 있게 피드백 한다.

## 3. 결 론

국내 전력계통 광역감시(WAMS:Wide Area Monitoring System) 기술은 초보 단계에 있으며, 정부에서도 장기적인 계획을 가지고 다양한 프로젝트를 진행하고 있다. 본 논문도 그 프로젝트의 일환으로 동기위상 측정용을 기본으로 한 실시간 온라인 계통감시와 전압안정도 감시를 통해 계통의 안정성을 파악할 수 있고, 나아가 광역정전을 사전에 예방할 수 있는 지점을 내려 궁극적으로는 계통 위기에 대한 자동 제어를 그 목적으로 한다.

본 시스템 개발 완료 후 PMU장치를 현장에 설치하고 장시간에 걸쳐 충분한 경험 데이터를 축적 한 다음 전문적인 분석을 통하여 계통보호에 적극적으로 활용할 수 있는 새로운 방안을 제시해 광역계통보호의 기술 선진국으로 발돋움해야 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] IEEE Standard 1344-1995, "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems", 1995
- [2] A.G.Phadke, "Synchronized Sampling and Phasor Measurement for Relaying and Control", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.1, January 1994
- [3] IEEE Standard PC37.118, "IEEE Standard PC37.118/D60 Draft Standard for Synchrophasors for Power Systems", Dec, 2004
- [4] Damir Novosel, "Definition and Implementation of a System-Wide Phase Angle Reference for Realtime Visualization Applications", EIPP, PRTT, June 2005
- [5] John F. Hauer, "Database Organization for Analysis of Major System Events Recorded on the WECC WAMS", March 2005
- [6] John F. Hauer, "Data Concentrator Technologies for Integrated Phasor Measurement", CERTS internal communication, February 2003