

한정된 위치의 PMU 정보를 이용한 수도권 전압안정도 감시 알고리즘

논문

58-12-5

A Voltage Stability Monitoring Algorithm using a Few PMUs in Metropolitan Area

한 상 욱* · 이 병 준†

(Sangwook Han · Byongjun Lee)

Abstract - Through the development of phasor measurement units (PMU), various aspects of power system dynamic behavior could be monitored and diagnosed. Monitoring dynamic voltage stability becomes one of achievements we can obtain from PMUs. It is very important to select the method appropriate to the KEPCO system since there are many voltage stability indices.

In the paper, we propose an advanced WAVI (Wide Area Voltage Stability) for monitoring dynamic voltage stability. It reflects the PMU installation plan of KEPCO, thus it is suitable for KEPCO system specially. The salient features of the proposed index are; i) it uses only PMU measurements without coupling with EMS data. ii) it is computationally unburden so that it can be applied to real-time situation. The proposed index is applied to the KEPCO test system and the result shows that it successfully predicts voltage instability through the comparative studies.

Key Words : Voltage Stability, Real-time, PMU, Wide Area Voltage stability Index(WAVI)

1. 서 론

최근 정부에서는 세계 일류의 녹색 선진국 건설을 목표로 저탄소 친환경 녹색에너지 산업을 활성화하고 국가단위의 지능형 전력망 (Smart Grid) 구축을 위한 로드맵을 기획하고 있다. 녹색성장과 전력IT를 결합한 Smart Grid의 송전분야는 전력송전망의 공급신뢰도 향상과 정전 예방 및 송배전 효율향상을 통한 비용절감, 신규 투자비 감소와 아울러 10% 이상의 탄소배출 감소효과를 거둘 수 있는 효과가 있는 것으로 파악되고 있다.

이러한 지능형 전력망을 구축하기 위해서는 기본적으로 전력계통의 다양한 상황에 대하여 실시간으로 감시할 수 있고, 불시의 사고가 발생할 경우 국가 전체의 전력계통으로 파급되는 것을 차단하여 전략적으로 전력인프라를 방어 (Defense)할 수 있는 시스템 및 네트워크가 우선적으로 필요하다. 이는 자체 복구능력을 가진 계획과 적응성이 강한 계통 구조(Scheme)로 구성된, 진보된 궁극적인 전력계통 감시 제어시스템이라 할 수 있으며 통상 Wide Area Measurement, Protection and Control (WAMPAC) 시스템이라 한다.

이중에서도 가장 기본이 되는 실시간 전압안정도 해석은 PMU(Phasor Measurement Unit)가 개발된 이후로 연구가 활발하게 진행되고 있다. PMU는 계통의 변전소 등에 연결

되어 실시간으로 전압과 전류를 Phasor 형태로 측정하는 장치이다. 기존의 측정 장비와는 다르게 GPS를 통하여 매우 정밀하게 시각(時刻) 동기화 되며, Sampling 주기가 매우 짧아, 더 빠르게 더 많은 정보를 취득할 수 있다. 이러한 특성으로 전력계통 전체의 Dynamic Snapshot을 실시간으로 취득하는 것이 가능하다. 이는 기존의 SCADA/EMS 시스템의 단점을 크게 극복한 것으로써 그 활용도는 매우 높다고 할 수 있다.

PMU를 활용하여 실시간으로 전압안정도를 평가하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

-지역(Local area) 전압안정도 평가

-광역(Wide area) 전압안정도 평가

지역 전압안정도 평가 방법 중 가장 널리 알려져 있는 방법은 ABB사의 VIP(Voltage Stability Index)이다[1]. VIP는 계통의 한 모선에서만 전압 및 전류 페이저 정보를 취득하고, 이를 사용하여 지역 전압안정도를 평가한다.

광역 전압안정도 평가 방법에는 ABB사에서 개발한 VIP++와 국내연구진이 개발하고 있는 WAVI(Wide Area Voltage stability Index)가 있다[2-3]. 두 방법의 기본알고리즘은 거의 동일하지만 일부 파라미터 산정방식에 차이점을 두고 있다. 이들은 최소 두 개 이상의 PMU로부터 전압 및 전류 페이저 정보를 취득하고, 이를 사용하여 광역 전압안정도를 평가한다.

2009년 7월 한전계통에는 4대의 PMU가 설치되었다. KWAMS과제의 일환으로 LS전사에서 제작한 I-PIU가 아산 345kV 변전소, 청양 345kV 변전소, 신제천 345kV 변전소, 동서울 345kV 변전소에 설치되었다. 본 논문에서는 광역 전압안정도 평가 방법 중 하나인 WAVI를 PMU가 설치된 위치에 적용하였을 때, WAVI가 전압안정도를 잘 판별해 낼

* 정 회 원 : 고려대학 전기·전자·전파·공학과 박사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 고려대학 전기·전자·전파·공학과 교수

E-mail : leeb@korea.ac.kr

접수일자 : 2009년 8월 21일

최종완료 : 2009년 9월 7일

수 있는지에 대한 내용을 다룬다. WAVI를 한정된 위치에 PMU가 설치된다고 가정하여, PMU 설치 개수에 따라 알고리즘의 변화를 확인하고 가장 적절한 PMU 설치 위치 및 개수를 제안하도록 한다. 알고리즘의 결과를 비교하여 실제로 설치된 PMU로부터 얻어진 결과가 이상적인 감시결과와 비교하여 충분한지에 대해 알아보도록 한다. 본 평가를 위하여, 2007년도 하계 피크시의 한전 실계통(약 1400모선)을 사용하도록 한다.

2. 본 론

2.1 지역전압안정도 감시 지수 LAVI(Local Area Voltage stability Index)

LAVI는 모선에서 측정되는 전압과 전류로부터 계통의 전압안정도 여유를 계산하여 필요시 부하차단을 시행할 수 있는 알고리즘이다. LAVI는 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 지능화된 알고리즘이다. K-WAMS에서 개발된 LAVI의 기본적인 알고리즘은 그림 1과 같다.

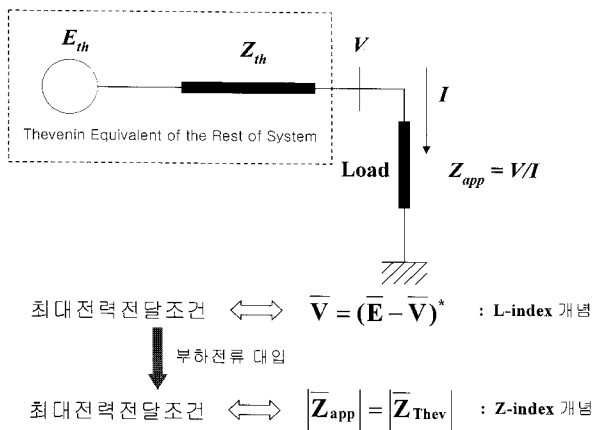


그림 1 LAVI 알고리즘 기본 원리
Fig. 1 Basic principal of LAVI algorithm

LAVI의 Z지수는 기존의 저전압 계전기와 연계되어, 급격한 사고 발생 시 계통 보호 차원에서 부하를 계통으로부터 분리시키도록 저전압 계전기에 신호를 주는 온라인 감시 지수로 주로 사용된다. 온라인 감시를 위한 Z지수의 원리를 살펴보면, 계통의 변화에 따라 부하의 임피던스가 테브난 임피던스에 가까워진다는 사실에 착안하여, 시간에 따른 부하의 임피던스 궤적을 통해 전압안정도 측면에서 사고의 심각성을 판별하게 된다.

계통의 전압안정성을 감시하려면 우선 실시간으로 변화하는 테브난 임피던스를 먼저 알아야 한다. 그림 1의 테브난 등가회로에서 회로방정식을 세우면 식 (1)과 같다.

$$\bar{E}_{Th} = \bar{V} + \bar{Z}_{Th} \bar{I} \quad (1)$$

이 식의 변수들을 $\bar{E}_{Th} = E_r + jE_i$, $\bar{Z}_{Th} = R_{Th} + jX_{Th}$, $\bar{V} = c + jd$, $\bar{I} = a + jb$ 로 놓으면 식 (1)은 식 (2)로 변형된다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -a & b \\ 0 & 1 & -b & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{Th} \\ X_{Th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 살펴보면 a, b, c, d 값을 알고 있다 하더라도 식의 수가 모자라서 단독으로는 4개의 변수에 대해 풀 수 없다. 그러나 회로이론 법칙이 임의의 운전점 또는 시간에서 성립되어야 한다는 사실을 이용하면 시간에 따라 변화하는 계통에 대하여 두 개 이상의 식을 중첩하여 해를 구할 수 있게 된다. 데이터 창 크기를 조정하여 두 개 이상의 식을 중첩하여 선형 최소제곱법을 이용하면 식(2)의 해를 구할 수 있다. 이러한 과정을 통해 계통의 테브난 임피던스를 구할 수 있다.

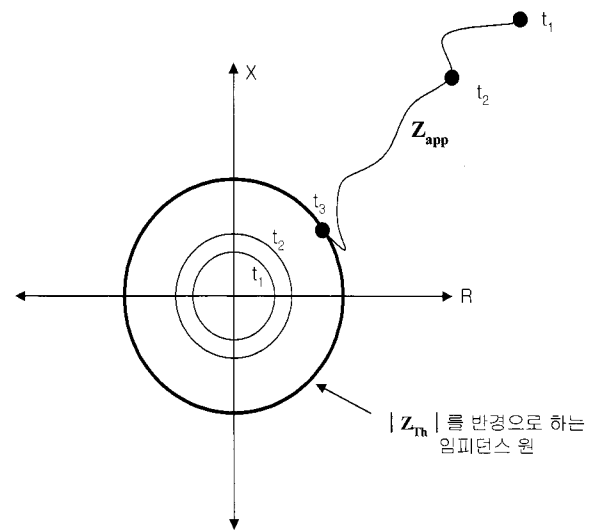


그림 2 임피던스 평면에서 테브난 임피던스 원과 계통의 상태변화에 따른 부하 임피던스의 궤적
Fig. 2 Trace of load impedance

위와 같이 등가 전원이 부하에 전달할 수 있는 최대 전력은 테브난 임피던스와 부하 임피던스가 같아질 때이다. 이 법칙을 전력계통에 적용해 보면 계통이 부하모선에 공급할 수 있는 전력의 한계값은 $|\bar{Z}_{app}| = |\bar{Z}_{Th}|$ 라는 조건이 성립할 때의 부하전력이다. 이 이론은 부하특성에 관계없이 성립하므로 임피던스 평면상에서 정적인 전압불안정 현상을 설명할 수 있다. 부하증가나 계통고장과 같은 계통상태의 변화에 대한 안정도 추이를 임피던스 평면 위에서 살펴보면 그림 2와 같다. 임피던스 평면상에서 테브난 임피던스는 원으로 표현되고 계통상태가 변화하면 원의 크기와 부하 임피던스 \bar{Z}_{app} 의 궤적이 변화한다. 부하가 증가하거나 외란이 발생하여 계통상태가 불안정한 방향으로 이동하면 \bar{Z}_{app} 의 궤적은 테브난 임피던스 원에 가까워지고 동시에 테브난 임피던스의 원의 크기는 증가한다. 계통이 불안정해지면 \bar{Z}_{app} 의 궤적은 원의 표면에 도달하여 원의 내부로 진입하는 순간 정적인 전압불안정 현상이 발생한다. 그림 2에서 t1일 때에는 테브난 임피던스 원과 부하임피던스 사이에

상당한 거리를 유지하고 있다가 시간이 지나 t2일 때 부하 증가나 계통고장과 같은 외란이 발생하여 테브난 임피던스의 원의 반지름이 증가하고 부하 임피던스의 궤적이 원의 방향으로 이동한다. 만일 계통에 더 심각한 외란이 발생하여 전압안정도 한계점에 도달한다면 t3인 순간에 테브난 임피던스의 크기는 급격하게 증가하고 부하임피던스의 크기는 작아져서 그림과 같이 부하임피던스의 궤적이 테브난 임피던스 원의 내부로 진입하게 된다. 따라서 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 비인 Z-index로써 판별되고, 안정조건을 수학적으로 표현하면 아래와 같은 조건이 된다[4].

$$\text{전압안정도 측면에서 안정할 조건 : } \frac{|\bar{Z}_{Th}|}{|\bar{Z}_{app}|} < 1$$

2.2 광역전압안정도 감시 지수 WAVI (Wide Area Voltage stability Index)

LAVI 알고리즘은 최소자승법을 이용하여 계통의 테브난 임피던스를 계산해서 전압안정도를 판단한다. 이때 한정된 지역의 계통 정보만을 이용하기 때문에 정확성 향상을 위해서 2 스텝 이상의 측정 데이터를 이용하여 데이터 창을 구성하고 사용되는 각 스텝의 측정 데이터는 부하의 변화에 대하여 충분히 다른 값을 가져야 하며, 구성된 등가 계통은 최소 자승법 연산 과정 중에 변화하지 않고 일정하여야 한다. 따라서 LAVI 알고리즘은 변화하는 계통 환경에 의해 오차가 발생하게 되며 정확성 향상을 위한 데이터 창 구성 시간으로 인해 일반적으로 SCADA와 같은 수분대의 시간지연이 발생하게 된다.

위와 같은 단점을 극복하는 방안으로 제시한 것이 바로 WAVI 알고리즘이다. WAVI 알고리즘의 기본개념은 LAVI 알고리즘과 같이 테브난 임피던스와 부하 임피던스가 같을 때, 등가 전원이 부하에 최대 전력을 전달 할 수 있다는 최대전력전달법칙을 사용한다. 다만 WAVI의 경우 최소자승법의 연산 없이 서로 다른 2곳 이상에서 측정된 계통 정보를 통해 등가 계통을 구성하여 테브난 임피던스를 구하는 것이 LAVI 알고리즘과 다른 점이다.

WAVI 알고리즘의 진행은 다음과 같다. 먼저 감시하고자 하는 선로를 선정하고, 다음으로 iPIU 등을 이용하여 선정된 선로 양단의 모선에서 계통의 정보를 측정하여 그림 3과 같이 T-등가회로를 구성한다. 등가회로의 각 파라미터들은 측정된 계통정보와 전류방정식을 이용하여 쉽게 계산이 가능하며, 모든 파라미터의 계산이 끝나면 옴의 법칙을 이용하여 테브난 등가회로를 구성할 수 있다. 이렇게 구성된 등가회로의 테브난 저항을 이용하여 LAVI 알고리즘에서 제시한 방법과 같이 $|\bar{Z}_{app}|$ 와 $|\bar{Z}_{Th}|$ 두 값의 거리를 실시간으로 추적하여 계통의 전압안정성 감시 지수로 활용할 수 있는 Z-index를 제공한다.

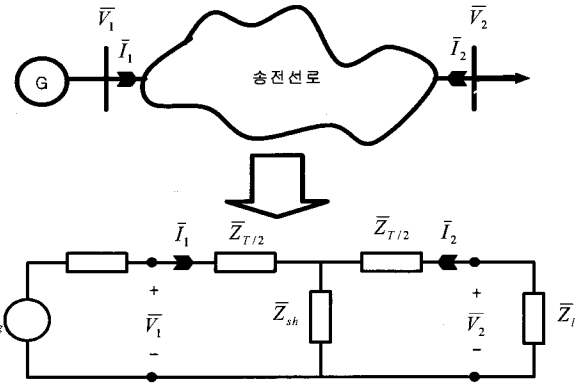


그림 3 감시모선 양단에서 측정된 정보를 이용한 T-등가회로의 구성

Fig. 3 Implementation of T-equivalent circuit

WAVI 알고리즘은 가상모선과 가상 선로의 개념을 이용하면 감시 범위를 확장하여 광역계통 감시에 적용이 가능하다. 그림 3의 위 그림 같이 독특한 전압 안정도 특성을 가진 전압 제어지역으로 미리 구분되어진 계통이 있다. 각 제어지역에서 전력 조류가 흘러 나가고 들어오는 각 모선과 선로를 통해 가상 모선과 가상 선로를 구성 할 수 있으며 이것을 통해 그림 3의 아래 그림과 같은 등가회로를 구성하여 WAVI 알고리즘을 적용하면 광역 계통의 전압안정성을 실시간으로 감시할 수 있다. 여기서 파라미터 \bar{Z}_L , \bar{Z}_T , \bar{Z}_s 는 옴(Ohm's Laws)의 법칙과 키르히호프의 전류 법칙(Kirchhoff's laws) 그리고 계통에서 측정된 페이지 정보인 v_1 , i_1 과 v_2 , i_2 를 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{Z}_L = \frac{\bar{v}_2}{\bar{i}_2} \tag{3}$$

$$\bar{Z}_T = \frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_2}{\bar{i}_2} \tag{4}$$

$$\bar{Z}_s = \frac{\bar{v}_1}{\bar{i}_1 - \bar{i}_2} \tag{5}$$

\bar{Z}_g 와 \bar{E}_g 의 값을 계산 하는 방법은 VIP++알고리즘과 가장 큰 차이라고 할 수 있다. VIP++에서는 지역 계통의 측정 정보만으로 \bar{Z}_g 와 \bar{E}_g 의 값을 판단할 수 없기 때문에 전체 계통의 정보를 알아야만 연산이 가능하다. 계통 정보를 이용하여 직접 임피던스를 계산할 경우 간단한 계통이나 발전단의 구성이 발전원에 가까운 경우에는 계산이 쉬우나, 계통이 복잡해지고 발전단의 구분이 발전원에서 멀어질 경우 계산이 어렵게 된다. 더구나 VIP++알고리즘을 통해 실시간 계통 감시가 이루어지고 있는 중에 축약된 발전단에서 외란이나 고장과 같은 계통의 구성 변경이 이루어지게 된다면 사전에 계산된 \bar{Z}_g 와 \bar{E}_g 의 값도 함께 변경되어 VIP++ 알고리즘을 통하여 계산되는 Z-index의 결과에 오차가 발생하게 된다 [5].

본 알고리즘에서는 위와 같은 단점을 극복하기 위하여 1 번 모선에서의 취득 정보로 LAVI 연산을 시행한다. LAVI

의 계산결과인 \overline{Z}_{Th} 와 \overline{E}_{Th} 는 본 알고리즘에서 각각 \overline{Z}_g 와 \overline{E}_g 로 사용되게 된다. 위 등가회로를 테브닌 등가회로로 구성하면 그림 4와 같다.

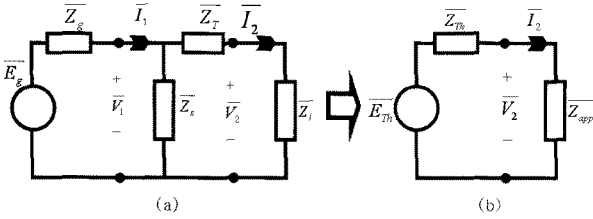


그림 4 등가회로(a)와 축약된 테브닌 등가회로(b)
Fig. 4 Equivalent circuits(a) and Thevenin equivalent circuit(b)

\overline{Z}_{Th} 와 \overline{E}_{Th} 는 다음 식 들을 이용하여 계산 할 수 있다.

$$\overline{Z}_{th} = \overline{Z}_T + \frac{1}{\frac{1}{\overline{Z}_g} + \frac{1}{\overline{Z}_s}} \quad (6)$$

$$\overline{Z}_{app} = \overline{Z}_L \quad (7)$$

$$\overline{E}_{th} = v_2 \frac{\overline{Z}_{th} + \overline{Z}_{app}}{\overline{Z}_{app}} \quad (8)$$

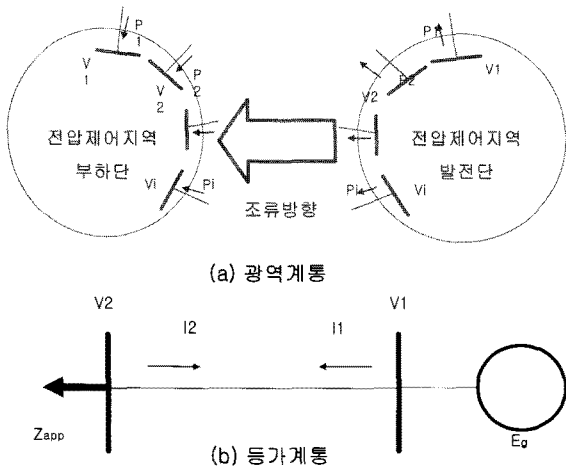


그림 5 WAVI의 광역계통 감시 적용 방안
Fig. 5 Application of wide area power system

그림 4(b)에서 보인 테브닌 등가 회로를 기본으로 하여 안정도 해석이 이루어진다. 계통의 부하 \overline{Z}_L (또는 \overline{Z}_{app})로 전달되는 복소전력 \overline{S}_L 은 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{S}_L = \overline{Z}_L \left| \frac{\overline{E}_{th}}{\overline{Z}_{th} + \overline{Z}_L} \right|^2 \quad (9)$$

\overline{Z}_L 이 일정한 역률을 갖는다고 가정하면 $\overline{Z}_L = k\overline{Z}_{L0}$ 로 표현이 가능하며 여기서 k는 부하의 초기 값 \overline{Z}_{L0} 에서 변화하는 부하의 변화율을 나타내며, \overline{Z}_{L0} 는 식 (3)을 통해 계산된다. 식(9)에 부하의 변화율을 적용하고 유효전력의 전달관계를 확인하면 식 (10)과 같다.

$$p_L = R[\overline{S}_L] = R \left[k\overline{Z}_{L0} \left| \frac{\overline{E}_{th}}{\overline{Z}_{th} + k\overline{Z}_{L0}} \right|^2 \right] \quad (10)$$

우리는 이미 회로법칙을 통하여 최대 전력을 전달하는 임피던스의 조건이 식 (11)과 같음을 알고 있다.

$$k_{crit} = \left| \frac{\overline{Z}_{th}}{\overline{Z}_{L0}} \right| \quad (11)$$

$k = k_{crit}$ 라 하면 식 (11)은 다음과 같이 표현가능하다.

$$p_{Lmax} = R \left[k_{crit} \overline{Z}_{L0} \left| \frac{\overline{E}_{th}}{\overline{Z}_{th} + (k_{crit} \overline{Z}_{L0})} \right|^2 \right] \quad (12)$$

따라서 $k = k_{crit}$ 일 때와 식(12)에서와 같은 최대전력 전달이 가능해진다. 따라서 우리는 축약된 계통으로부터 얻는 \overline{Z}_{th} 와 \overline{Z}_{app} 를 통해 전압안정도를 감시할 수 있으며 이를 WAVI라고 한다.

$$WAVI = \left| \frac{\overline{Z}_{th}}{\overline{Z}_{L0}} \right| \begin{cases} \geq 1 : unstable \\ < 1 : stable \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)에서 보인 것과 같이 WAVI의 값이 1보다 작으면 안정한 상태이며 1과 크거나 같으면 계통은 불안정한 상태가 된다.

2.2.1 계통축약

WAVI에 이용하는 계통 축약방법을 그림 6에 나타내었다. 계통전체를 발전지역(Area1)과 부하지역(Area2)로 구분할 한다면, 두 지역은 송전선로로 연결되게 된다. 광역을 감시하기위하여 여러 개의 PMU가 설치된다면, Area1과 Area2에 각각 여러 개의 PMU가 설치되게 된다. 각각의 지역으로부터 얻어지는 전압, 전류 정보를 이용하여 각 지역은 하나의 가상모선(Virtual bus)으로 축약되게 된다. V1과 V2는 Area1과 Area2에서 취득되는 모든 모선전압의 평균이며, I1과 I2는 각 지역으로 흘러가는 전류의 총 합이 된다.

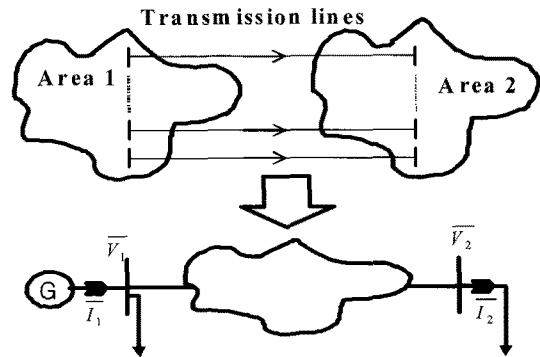


그림 6 WAVI의 계통축약 개념
Fig. 6 Concept of system reduction

2.2.2 테브닌임피던스 계산

축약된 계통은 그림 7의 형태로 표현할 수 있으며 테브닌 임피던스와 부하임피던스로 표현할 수 있다. 키르히호프의 법칙을 이용하여 간단하게 계산할 수 있다.

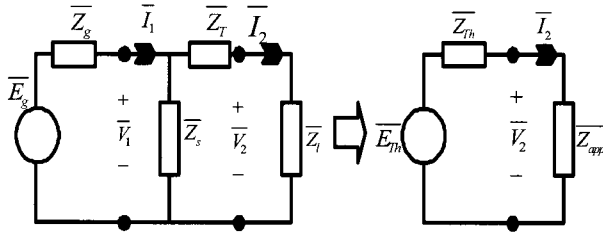


그림 7 축약계통의 테브닌 등가회로
Fig. 7 Thevenin equivalent circuit

2.2.3 전압안정도 판별

최대전력전달법칙에 의하면 계통의 테브닌임피던스와 부하임피던스가 같아지는 때에 최대 전송 전력이 일어나게 된다. 또한 계통이 정상적으로 운전될 때에는 부하임피던스가 테브닌임피던스보다 훨씬 크게 된다. 따라서 ZTh와 Zapp의 비를 감시함으로써 계통의 전압안정도를 판별할 수 있다. ZTh/Zapp를 계산하여 그 값이 0에 가까우면 안정하고 1에 가까워지면 불안정하다고 볼 수 있다.

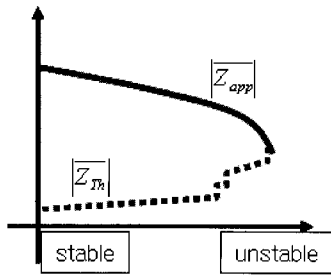


그림 8 전압안정도 판별 개념도
Fig. 8 Concept of voltage stability assessment

2.3 수전단(송전단) 정보만을 이용하는 WAVI

선로의 임피던스를 알고 있다면 선로 양단에 모두 PMU를 설치 하지 않아도 각각의 전압 및 전류를 계산 할 수 있다. 통상적으로 널리알려진 수식을 사용하여 한 지역에서의 전압, 전류를 측정하면 선로임피던스를 이용하여 반대쪽의 전압, 전류를 계산 할 수 있다. 이를 WAVI알고리즘에 적용하면, 송전단 또는 수전단의 정보만을 가지고 전압안정도를 감시 할 수 있다. 아래 식을 이용하여 반대쪽 전압과 전류를 쉽게 구해 낼 수 있다.

$$V_2 = V_1 - \left(\left(\frac{S}{V_1} \right)^* - j \frac{B}{2} V_1 \right) \times Z \tag{14}$$

$$I_2 = \left(\frac{V_2 - V_1}{Z} + j \frac{B}{2} V_2 \right) \tag{15}$$

- V1 : voltage of bus #1
- I1 : current of bus #1
- V2 : voltage of bus #2
- I2 : current of bus #2
- S : power transferred bus#1 to bus#2
- Z : R+jX, impedance of line
- B : charging susceptance of line

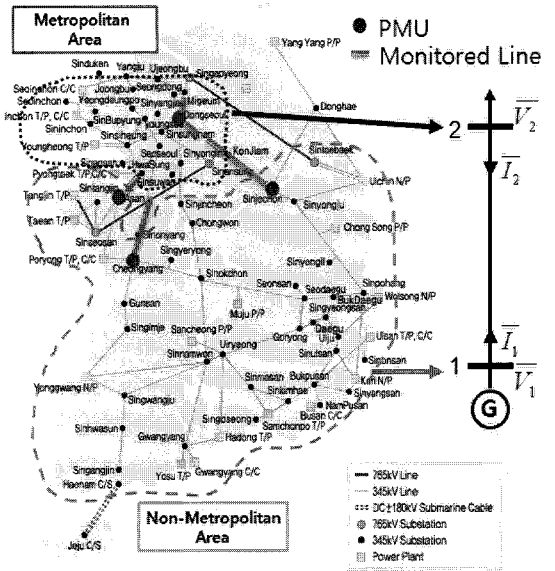


그림 9 한전계통과 주요 용동선로
Fig. 9 KEPCO system and major transmission lines

2.4 PMU 설치 개수 별 결과 비교

한전계통은 6개의 용동선로를 통하여 대부분의 전력이 수도권 쪽으로 전송된다. 따라서 대부분의 전압안정도 문제는 위 6개의 용동선로에서 발생된다. 수도권 전압안정도를 감시하기 위해서는 6개의 용동선로를 감시하는 것이 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다. 용동선로의 임피던스를 알고있다고 가정할 경우 총 6개의 PMU가 용동선로의 수전단 혹은 송전단에 설치되면 상당히 정확한 수도권의 전압안정도를 감시할 수 있다. 하지만 6대의 PMU 설치도 현 상황에선 쉽지 않다. 현재 PMU는 총 4대가 설치되었으며, 전압안정도 감시는 이 중 일부인 3대만이 사용 가능 하다. 따라서 보다 적은 수로 전압안정도 감시가 가능한지를 확인해야 한다. 본문에서는 시나리오를 3개를 선정하여 안정도 감시 결과를 비교해 보도록 한다.

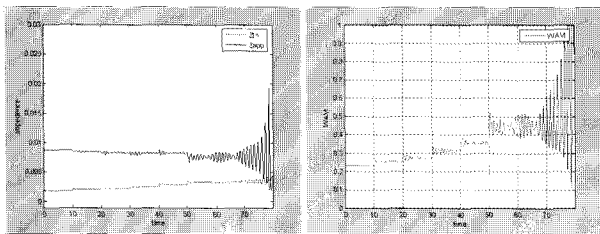
시나리오 1은 6개의 용동선로를 모두 감시하는 것이다. 가장 좋은 결과를 보여줄 것으로 예상된다. 시나리오 2는 3개의 용동선로를 감시하고, 시나리오 3은 1개의 용동선로를 감시한다. 통상, 6개의 용동선로 중 화성-아산을 잇는 345kV 송전선로에서 전압불안정 현상이 자주 발생하므로 시나리오 3에서는 화성-아산 1개의 용동선로를 감시하도록 한다. 시나리오 2에서는 시나리오3의 화성-아산 선로에 09년7월 설치된 실제 PMU위치인 청양-신은양 선로와 신제천-곤지암 선로 두 개를 추가하여 3개의 용동선로를 감시하도록 한다.

표 1은 각 시나리오에 적용한 사고 시나리오 이다. 이는 현실적이지는 못한 시나리오 이지만, 알고리즘의 결과 변화를 가장 쉽게 관찰 할 수 있다. 그림 10은 각 시나리오 별 WAVI와 Zth, Zapp 에 대한 그래프를 나타낸다. 그림 10의 b,d,f 를 보면 3가지 경우 모두 최종적으로 전압 불안정 현상을 잘 관찰한다고 할 수 있다. 하지만, 그 과정을 보면 그렇다고 할 수 없다. 일반적으로 불안정 현상으로 갈 수록 Zth는 증가하며, Zapp 는 감소한다. 6개의 PMU를 설치한 시나리오1의 경우 각 사고에 따라서 이를 잘 표현해주고 있

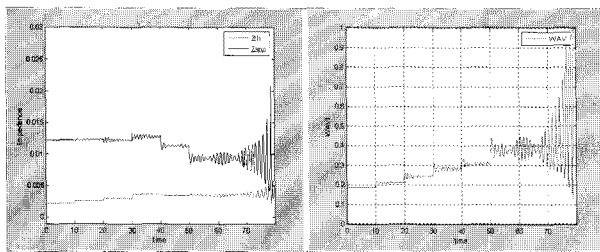
음을 알 수 있다. 하지만 시나리오2의 경우 일부 구간에서 Zapp가 오히려 증가하기도 한다. 시나리오3에서도 같은 현상이 발생하며 Zth의 경우 한 시점에서만 변화하는 등 부정확한 모습을 보여준다. 결과를 보았을 때, 단연 6개의 유통선로를 모두 관찰하는 것이 가장 좋은 결과를 보여준다. 1개의 유통선로만을 관찰하는 경우, 일부 사고에 대해서만 반응하는 등 전압안정도 지수로 사용하기에는 너무 부족함이 있다. 3개의 유통선로를 감시하는 경우, 6개의 유통선로를 관찰하는 것에 비해서는 그 결과의 정확성이 떨어지지만, 어느 정도 전압 불안정 현상을 잘 쫓아가고 있다고 할 수 있다. 현재 소수의 PMU만 사용할 수 있기 때문에 시나리오 2의 3개의 유통선로를 관찰 하는 것은 경제적 측면과 정확도 측면의 타협점으로 볼 수 있다.

표 1 사고 시나리오
Table 1 Contingency scenarios

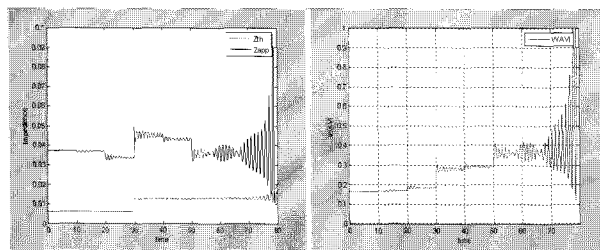
At time	From	To	CKT
10 sec	신가평	신태백	1
20 sec	신안성	신서산	1
30 sec	화성	아산	1
40 sec	곤지암	신제천	1&2
50 sec	청원	신옥천	1&2



(a) Zth and Zapp (6 PMU) (b) WAVI (6 PMU)



(c) Zth and Zapp (3 PMU) (d) WAVI (3 PMU)



(e) Zth and Zapp (1 PMU) (f) WAVI (1 PMU)

그림 10 PMU 수 변화에 따르는 WAVI 및 Zth, Zapp
Fig. 10 Results of WAVI, Zth and Zapp

3. 결 론

본 논문에서는 PMU가 한정적인 위치에만 설치되는 것을 가정하여 가장 적절한 PMU 설치 위치를 제안 하였다. 계획 상 최대 4대의 PMU만을 설치할 수 밖에 없으므로, 가장 최상의 결과를 보여주는 위치를 선택하였다. 또한 위 결과를 실제 설치된 PMU 위치로부터 얻은 결과와 비교하여 그 효과를 검증 하였다. 실시간 전압안정도 평가 방법으로는 WAVI를 사용 하였으며, 계통의 임피던스를 알고 있는 것으로 가정하여, PMU의 설치 개수를 절반으로 줄였다. 정확성 측면으로 보았을 때, PMU가 많이 설치되면 설치될 수록 결과가 정확해 지지만, 경제적인 측면을 생각하여 그 타협점을 찾았을때 3개의 PMU를 설치하는 것이 가장 좋은 것으로 판명 되었으며 현재 설치된 PMU를 이용하여 계통의 전압안정도를 충분히 감시할 수 있음을 확인 하였다.

앞으로 PMU를 활용하여 전압안정도를 감시하는 방법은 계속적으로 연구될 것이고, PMU의 설치 요건이 변화함에 따라서 그 위치 및 감시 방법등도 계속 적으로 변화할 것이다. 이에 대해서는 앞으로도 계속 적으로 연구가 진행될 것이다.

감사의 글

This work was the outcome of a Manpower Development Program for Energy & Resources supported by the Ministry of Knowledge and Economy (MKE) and the Electric Power Infrastructure Center supported in part by the Korea Electric Power Corporation (KEPCO) under MKE

참 고 문 헌

- [1] D. E. Julian, R. P. Schulz, K. T. Vu, W. H. Quaintance, N. B. Bhatt and D. Novosel, "Quantifying Proximity To Voltage Collapse Using The Voltage Instability Predictor(VIP)," 2000 IEEE, Jul.2000.
- [2] D. Novosel, V. Madani, B. Bhargave, K. Vu, J. Cole, "Dawn of the grid synchronization", Power and Energy Magazine, IEEE, Vol. 6, pp.49-60, 2008.
- [3] D. Atanackovic, J. H. Clapauch, G. Dwernychuk, J. Gurney, H. Lee, "First steps to wide area control", Power and Energy Magazine, IEEE, Vol. 6, pp.61-68, 2008
- [4] D. E. Julian, R. P. Schulz, K. T. Vu, W. H. Quaintance, N. B. Bhatt and D. Novosel, "Quantifying Proximity To Voltage Collapse Using The Voltage Instability Predictor(VIP)," 2000 IEEE, Jul.2000.
- [5] Mats Larsson and Joachim Bertsch, "Monitoring and Operation of Transmission Corridors,"Power Tech

- Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 23-26 June 2003, on page:8pp. Vol.3.
- [6] CIGRE Working Group, "Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement", Cigre Technical Brocher Final Report, January 2007.
- [7] C. W. Taylor, D.C. Erickson, K.E. Martin, R.E. Wilson, V. Venkatasubramanian, "WACS-Wide-Area Stability and Voltage Control System: R&D and Online Demonstration", Proceedings of the IEEE, Vol. 93, pp.892-906, May 2005
- [8] H.S. Campeanu, E. L'Helguen, Y. Assef, N. Vidal, S.C. Savulescu, "Real-Time Stability Monitoring at Transelectrica", PSCE '06. IEEE PES, pp.1-5, Oct. 29-Nov. 1 2006
- [9] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
- [10] Mats Larsson and Joachim Bertsch, "Monitoring and Operation of Transmission Corridors,"Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 23-26 June 2003, on page:8pp. Vol.3.
- [11] Xu, B. and Abur A., "Observability Analysis and Measurement Placement for Systems with PMUs," IEEE paper 0-7803-8718-X/04, 2004, pp 1-4
- [12] Baldwin, T.L., Mili, L. Boisen, M.B. and Adapa,R., "Power system observability with minimal phasor measurement placement,"IEEE Transactions on Power Systems, 8, No.2, May 1993, pp707-715

저 자 소 개



한 상 옥 (韓相旭)

He received B.S. and M.S. degrees in Electrical Engineering from Korea University, Korea in 2004 and 2006 respectively. He is currently a Ph.D candidate in the School of Electrical Engineering at Korea University.



이 병 준 (李炳峻)

He received B.S. degree from Korea University, Seoul, Korea in 1987, M.S. and Ph.D degrees in Electrical Engineering from Iowa State University in 1991 and 1994 respectively. He is currently a professor in the School of Electrical Engineering at Korea University.