

한정된 위치의 PMU 정보를 이용한 수도권 전압안정도 감시 알고리즘

한상욱*, 이병준*, 김상태**, 문영환***
 고려대학교*, 한전KDN**, 전기연구원***

A voltage stability monitoring algorithm using a few PMUs in metropolitan area

Sangwook Han*, Byongjun Lee*, Sangtae Kim**, Younghwan Moon***
 Korea University*, KDN**, KERI***

Abstract - PMU 정보를 이용하여 실시간으로 전압안정도를 감시하는 기술은 계속적으로 연구가 진행되고 있다. 전압안정도를 해석하는 수많은 방법 중에서 국내계통에 가장 잘 맞는 알고리즘을 찾는 것이 무엇보다도 중요하다. 또한 PMU의 설치에 현재에는 한정적일 수 밖에 없으므로 최소의 PMU를 가장 적절한 위치에 설치하여 계통의 전압 안정도를 감시하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 소수의 PMU를 이용하여 실시간으로 전압안정도를 감시하는 기술을 제안하고자 한다. 계통데이터 중 선로임피던스를 이용하여 최소한의 PMU로부터 전압안정도를 감시하도록 한다. 본 방법을 검증하기 위하여 한전 실계통을 사용하도록 한다.

발전지역(Area1)과 부하지역(Area2)로 구분을 한다면, 두 지역은 송전선로로 연결되게 된다. 광역을 감시하기 위하여 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. V_1 과 V_2 는 Area1과 Area2에서 취득되는 모든 모선전압의 평균이며, I_1 과 I_2 는 각 지역으로 흘러가는 전류의 총 합이 된다.

1. 서 론

PMU(Phasor Measurement Unit)가 개발된 이후로 실시간 전압안정도 해석에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. PMU는 계통의 변전소 등에 연결되어 실시간으로 전압과 전류를 Phasor 형태로 측정하는 장치이다. 기존의 측정 장비와는 다르게 GPS를 통하여 매우 정밀하게 시간(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 선정 방식에 차이점을 두고 있다. 이들은 최소 두 개 이상의 PMU로부터 전압 및 전류 페이저 정보를 취득하고, 이를 사용하여 광역 전압안정도를 평가한다.

본 논문에서는 광역 전압안정도 평가 방법 중 하나인 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 가장 합리적인 PMU 설치 개수 및 위치를 제안하도록 한다. 현재 한전에서 올해 PMU를 4대 설치하기로 계획 중이다. 4대 이하의 PMU를 이용하여 수도권의 전압안정도를 충분히 감시할 수 있는 방법을 제안하도록 한다.

본 평가를 위하여, 2007년도 하계 피크시의 한전 실계통(약 1400모선)을 사용하도록 한다.

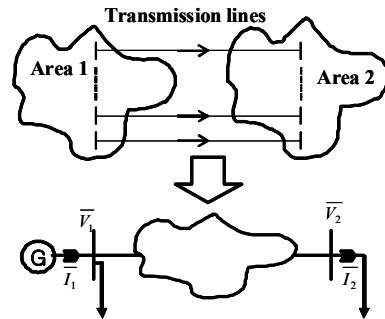
2. 본 론

2.1 광역전압안정도지수 (WAVI)

광역전압안정도 지수는 PMU로부터 취득된 전압과 전류의 실시간 Phasor 정보를 바탕으로 계통의 전압안정성을 감시한다. 광역(Wide Area)을 감시하기 위하여 계통을 발전지역과 부하지역으로 나누고 각 지역에서 취득되는 Phasor정보를 이용하여 계통을 축약한다. 축약된 계통으로부터 테브닌임피던스를 구하고 최대전달전력 법칙을 이용하여 전압안정도를 판별하게 된다.

2.1.1 계통축약

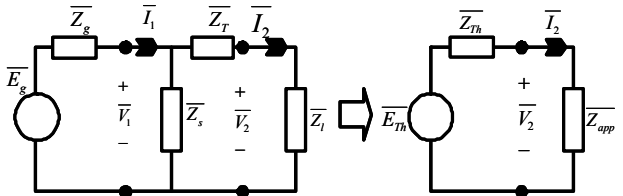
WAVI에 이용하는 계통 축약방법을 그림1에 나타내었다. 계통전체를



〈그림 1〉 WAVI의 계통축약 개념

2.1.2 테브닌임피던스 계산

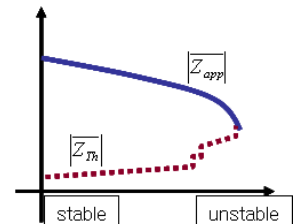
축약된 계통은 그림2의 형태로 표현할 수 있으며 테브닌임피던스와 부하임피던스로 표현할 수 있다. 키르히호프의 법칙을 이용하여 간단하게 계산할 수 있다.



〈그림 2〉 축약계통의 테브닌 등가회로

2.1.3 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 Z_{Th} 와 Z_{app} 의 비를 감시함으로써 계통의 전압안정도를 판별할 수 있다. Z_{Th}/Z_{app} 를 계산하여 그 값이 0에 가까우면 안정하고 1에 가까워지면 불안정하다고 볼 수 있다.

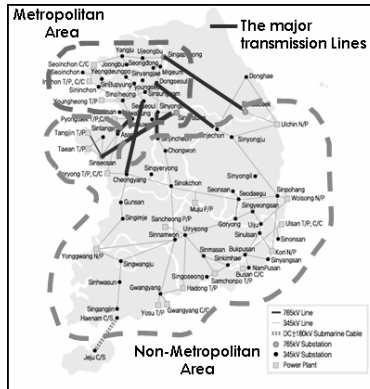


〈그림 3〉 전압안정도 판별 개념도

2.2 수전단(송전단) 정보만을 이용하는 WAVI

선로의 임피던스를 알고 있다면 선로 양단에 모두 PMU를 설치 하지 않아도 각각의 전압 및 전류를 계산할 수 있다. 통상적으로 널리 알려진 수식을 사용하여 한 지역에서의 전압, 전류를 측정하면 선로임피던스를

이용하여 반대쪽의 전압, 전류를 계산 할 수 있다. 이를 WAVI 알고리즘에 적용하면, 송전단 또는 수전단의 정보만을 가지고 전압안정도를 감시할 수 있다.



〈그림 4〉 한전계통과 주요 용통선로

2.3 PMU 설치 개수 별 결과 비교

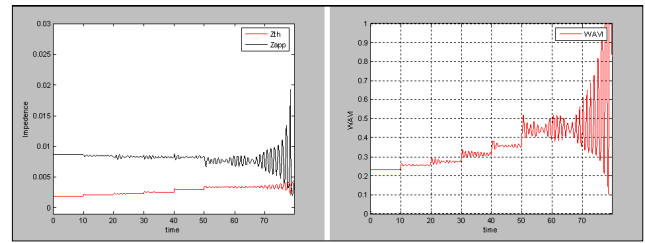
한전계통은 6개의 용통선로를 통하여 대부분의 전력이 수도권 쪽으로 전송된다. 따라서 대부분의 전압안정도 문제는 위 6개의 용통선로에서 발생된다. 수도권 전압안정도를 감시하기 위해서는 6개의 용통선로를 감시하는 것이 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다. 용통선로의 임피던스를 알고 있다고 가정할 경우 총 6개의 PMU가 용통선로의 수전단 혹은 송전단에 설치되면 상당히 정확한 수도권의 전압안정도를 감시할 수 있다. 하지만 6대의 PMU 설치도 현 상황에선 쉽지 않다. 현재 PMU는 총 4대가 설치될 것으로 계획되고 있다. 전압안정도 감시는 이 중 일부만이 사용 가능 할 것이다. 따라서 보다 적은 수로 전압안정도 감시가 가능한지를 확인하고 적당 수를 찾아야 한다. 본 논문에서는 시나리오를 3개를 선정하여 안정도 감시 결과를 비교해 보도록 한다.

시나리오 1은 6개의 용통선로를 모두 감시하는 것이다. 가장 좋은 결과를 보여줄 것으로 예상된다. 시나리오 2는 3개의 용통선로를 감시하고, 시나리오 3은 1개의 용통선로를 감시한다. 통상, 6개의 용통선로 중 화성-아산을 잇는 345kV 송전선로에서 전압불안정 현상이 자주 발생하므로 시나리오 3에서는 화성-아산 1개의 용통선로를 감시하도록 한다. 용통선로 6개 중에는 765kV 송전선로가 두 개 포함되어 있는데, 6개중 가장 큰 전력을 송전한다. 시나리오 2에서는 시나리오3의 화성-아산 선로에 765kV 용통선로 두 개를 추가하여 3개의 용통선로를 감시하도록 한다.

표1은 각 시나리오에 적용한 사고 시나리오 이다. 이는 현실적이지는 못한 시나리오이지만, 알고리즘의 결과 변화를 가장 쉽게 관찰 할 수 있다. 그림5는 각 시나리오 별 WAVI와 Zth, Zapp 에 대한 그래프를 나타낸다. 그림5의 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, Zapp는 감소한다. 6개의 PMU를 설치한 시나리오1의 경우 각 사고에 따라서 이를 잘 표현해주고 있음을 알 수 있다. 하지만 시나리오2의 경우 일부 구간에서 Zapp가 오히려 증가하기도 한다. 시나리오3에서도 같은 현상이 발생하며 Zth의 경우 시점에서만 변화하는 등 부정확한 모습을 보여준다. 결과를 보았을 때, 단연 6개의 용통선로를 모두 관찰하는 것이 가장 좋은 결과를 보여준다. 1개의 용통선로만을 관찰하는 경우, 일부 사고에 대해서만 반응하는 등 전압안정도 지수로 사용하기에는 너무 부족함이 있다. 3개의 용통선로를 감시하는 경우, 6개의 용통선로를 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 용통선로를 관찰 하는 것은 경제적 측면과 정확도 측면의 타협점으로 볼 수 있다.

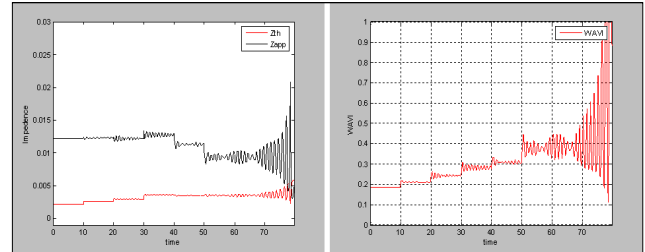
〈표 1〉 사고 시나리오

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



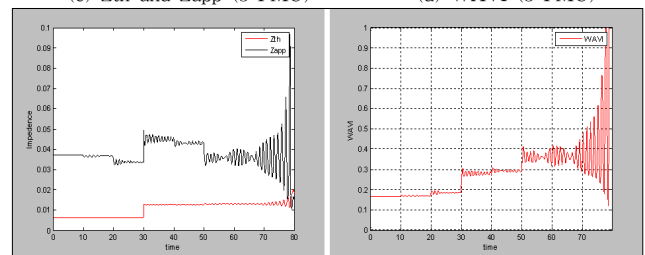
(a) Zth and Zapp (6 PMU)

(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 6〉PMU 수 변화에 따르는 WAVI 및 Zth, Zapp

3. 결 론

본 논문에서는 PMU가 한정적인 위치에만 설치되는 것을 가정하여 가장 적절한 PMU 설치 위치를 제안 하였다. 계획상 최대 4대의 PMU만을 설치할 수 밖에 없으므로, 가장 최상의 결과를 보여주는 위치를 선택하였다. 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 되었다.

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.

【감 사 의 글】

This work was the outcome of a Manpower Development Program for Energy for & 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] 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.
 [3] S.W. Han, B.Lee, S.T.Kim and Y.H. Moon, "Real time Wide Area Voltage stability Index in Korean Metropolitan area," 2007 APAP, April 2007.
 [4] 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
 [5] 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