2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

PMU정보를 이용한 실시간 전압안정도 감시

남수철 , 김우호 , 이병준 , 문영환
고려대학교 전력시스템기술연구센터 한국전기연구원

Real-Time voltage stability monitoring which uses the PMU information

Su Chul Nam, Woo Ho Kim, Byongjun Lee, Young Hwan Moon
APSRC, Korea University KERI

Abstract - GPS(Global Positioning System)를 기반으로 하는 PMU(Phasor Measurement Unit)에서 측정된 페이저 정보는 사용자에게 계통의 여러 가지 동특성 정보를 제공한다. 이러한 PMU 정보는 지역과 중앙에서 취득하여 계통의 안정도를 감시, 판단하는 방법으로 활용할 수 있다. 최근에는 여기에 발전된 컴퓨터 연산기능과 통신기술을 접목하여 다양한 분야의 실시간 계통감시 기술이 연구되고 있다.

본 논문에서는 광역감시를 위하여 2곳 이상의 PMU 정보를 활용하는 VIP++ 알고리듬을 소개하고 시험계통을 이용한 모의를 통해 VIP++알고리듬의 유용성을 검증해 보인다.

1. 서 론

현대의 전력계통은 지속적인 수요증가와 전력산업의 구조개편으로 인한 송전 계통의 개방으로 인해 계통의 운용 여유가 점차 감소하고 있다. 이러한 변화는 결국 최근 발생한 광역정전과 같은 심각한 전압 붕괴 현상을 초래 하였으며 그로 인하여 전압안정도 해석과 향상 방안에 대하여 새로운 관심을 불러일으키게 되었다.

지난 수 십 년간 전압안정도의 해석은 계통의 동적인 특성 보다 사고 전과 사고 후의 정적인 상태에서의 해석을 바탕으로 P-V 곡선과 P 마진, Q-V곡선과 Q마진 등의 전압 유지와 관련된 특별한 계통 특성의 감시를 통해서 이루어져 왔다.[1] 그러나 근래에 경험한 대규모 정전사고의 경우를 살펴보면 전압불안정 현상은 정상상태에서 운전 중인 계통에서 다중 계통고장이 발생하거나, 초기 사고가 발생하고 이에 따라 파급되는 연속된 설비 탈락 등 예상하지 못한 다중사고의 파급에 의해 발생하였으며 이러한 불안정 현상은 계통의 동특성을 고려하지 않은 기존의 정적인 해석 방법으로 대비하기에는 한계가 있다.

최근 이러한 문제의 해결을 위하여 다음과 같은 방향의 연구들이 진행되고 있다. 온라인 계통 데이터를 기반으로 제한된 계통의 동특성만을 고려한 준 동적 시간 모의 방법(QSS : Quasi steady state)으로 빠른 시간모의를 실시하여 미래의 계통 상태를 예측하고 전압불안정을 대비하는 방법[2]와 SCADA/EMS를 통하여 획득 가능한 온라인 계통 데이터를 전압안정도의 지역적 특성에 적용하여 제어지역의 Q-마진 감시를 이용한 전압안정도 판정 방법[3], 계통의 안정도 마진과 발전기 무효전력 출력간의 상관관계를 도출하여 발전기의 무효전력 여유를 감시 하는 방법[4], 그리고 PMU와 같은 실시간 측정기기의 정보를 이용하여 계통의 테브닌 임피던스를 감시하는 VIP(Voltage Instability Predictor)[5]~[7]등이 대표적인 방법들이다.

특히 VIP의 경우 감시 모선에 설치된 하나의 PMU에서 획득한 전압과 전류의 간단한 정보만 사용하고 연산과정도 비교적 간단하여 전체 계통의 정보 없이 해당 지역의 계통 정보만을 이용하여 별도의 데이터 가공이나 통신선로의 사용 없이 빠르고 왜곡 없는 전압안정도 감시가 가능하다는 장점이 있다.

그러나 VIP 알고리듬은 테브닌 임피던스 계산과정에서 정확성 향상을 위한 무빙윈도우 구성과 최소자승법 연산에 시간지연이 발생하며 일련의 연산 과정이 진행 되는 동안 축약되는 계통은 선로나 발전기의 탈락과 같은 변화가 없다는 가정이 필요하다.

이러한 VIP의 단점을 극복하기 위해 제안 된 것이 감시 하고자 하는 송전 선로 양단의 모선 정보를 이용한 VIP++알고리듬이다.[8] VIP++ 알고리듬의 가장 큰 장점은 송전선로 양단의 정보를 이용하여 송전선로 T- 등가회로의 파라미터를 직접 계산하여 시간 지연 없이 임피던스를 계산 가능하다는 것이다.

본 논문에서는 이러한 VIP++ 알고리듬의 기본원리와 계산 방법을 소개하고자 한다. 사례연구에서는 소개하는 알고리듬을 시험계통에 적용하여 전압안정도 감시 방법으로서의 유용성을 보이고 외란 이후 전압이 붕괴되는 과정을 정확하게 감시하고 있는지 확인하기 위해서 시간 모의방법을 통해 검증해 보았다.

2. 본 론

2.1 T-등가회로와 테브닌 임피던스의 계산

테브닌 임피던스의 계산은 감시하고자 하는 송전선로의 양단에서 측정된 실시간 정보를 바탕으로 두 단계의 계산과정을 거쳐 연산된다. 첫 번째 계산과정은 측정된 실시간 정보를 이용하여 송전선로의 T-등가회로 파라미터를 계산하고 계통을 축약하는 과정이다. 실제 송전선로의 축약은 그림 1.과 같이 이루어진다.

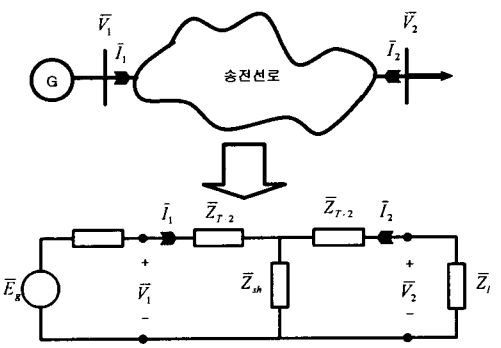

그림 1. 감시모선 양단에서 측정한 정보를 이용한 T 등가회로의 구성

옴(Ohm's Laws)의 법칙과 키르히호프의 전류 법칙(Kirchoff's laws) 그리고 계통에서 측정된 페이저 정보

인 $\overline{v_1}$, $\overline{i_1}$ 와 $\overline{v_2}$ $\overline{i_2}$ 를 사용하여 T-등가 회로에서 필요한 파라미터 $\overline{Z_T}$, $\overline{Z_{sh}}$ $\overline{Z_L}$을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\overline{Z_T}=2\frac{\overline{v_1}-\overline{v_2}}{\overline{i_1}-\overline{i_2}} \quad (1)$$

$$\overline{Z_{sh}}=\frac{\overline{v_1}\overline{i_2}-\overline{v_2}\overline{i_1}}{\overline{i_2}-\overline{i_1}} \quad (2)$$

$$\overline{Z_L}=\frac{\overline{v_2}}{-\overline{i_2}} \quad (3)$$

복소전압인 $\overline{E_g}$와 등가 전원의 임피던스 $\overline{Z_g}$는 동시에 같은 계산과정에서 구할 수 없으므로 초기 연산과정에서 둘 중 하나를 가정하여 대입한 다음 연산을 실시해야 한다. 만약 계통의 발전기들이 일정한 전압을 유지하는 제어 동작을 갖고 있다면 $\overline{E_g}$를 계산할 수 있다.

$$\overline{Z_g}=\frac{\overline{E_g}-\overline{v_1}}{\overline{i_1}} \quad (4)$$

또 다른 방법은 일반적으로 전류를 주입하는 송전선로 시작단의 변압기와 송전선로의 임피던스를 통해 $\overline{Z_g}$를 계산하는 방법이다.

$$\overline{E_g}=\overline{v_1}+\overline{Z_g}\overline{i_1} \quad (5)$$

위의 과정을 통해 T-등가회로와 계통의 테브닌 임피던스를 계산했다면 다음 단계로 임피던스 조합을 통해 $\overline{Z_T}$ $\overline{Z_{sh}}$ $\overline{Z_g}$가 결합한 테브닌 임피던스를 다음 식을 통하여 구할 수 있다.

$$\overline{Z_{th}}=\frac{\overline{Z_T}}{2}+\frac{1}{\frac{1}{\overline{Z_{sh}}}+\frac{1}{\frac{\overline{Z_T}}{2}+\overline{Z_g}}} \quad (6)$$

$$\overline{E_{th}}=\overline{v_2}\frac{\overline{Z_{th}}+\overline{Z_L}}{\overline{Z_L}} \quad (7)$$

그림 2.(b)의 테브닌 등가 회로를 이용하여 계통의 안정도 해석을 직접 계산할 수 있다.

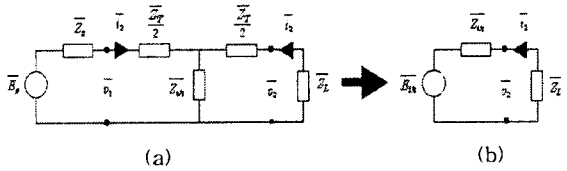

그림 2. T 등가회로(a)와 축약된 테브닌 등가회로(b)

2.2 테브닌 등가 회로를 이용한 전압안정도 감시

그림 2.(b)에서 보인 테브닌 등가 회로를 기본으로 하여 안정도 해석이 이루어진다. 계통의 부하 $\overline{Z_L}$로 전달되는 복소전력 $\overline{S_L}$은 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{S_L}=\overline{Z_L}\left|\frac{\overline{E_{th}}}{\overline{Z_{th}}+\overline{Z_L}}\right|^2 \quad (8)$$

$\overline{Z_L}$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(8)에 부하의 변화율을 적용하고 유효전력의 전달관계를 확인하면 식 (9)와 같다.

$$p_L=R[\overline{S_L}]=R\left[k\overline{Z_{L0}}\left|\frac{\overline{E_{th}}}{\overline{Z_{th}}+k\overline{Z_{L0}}}\right|^2\right] \quad (9)$$

우리는 이미 회로법칙을 통하여 최대 전력을 전달하는 임피던스의 조건이 식 (10)과 같음을 알고 있다.

$$k_{crit}=\left|\frac{\overline{Z_{th}}}{\overline{Z_{L0}}}\right| \quad (10)$$

$k=k_{crit}$라 하면 식 (9)는 다음과 같이 표현가능하다.

$$p_{Lmax}=R\left[k_{crit}\overline{Z_{L0}}\left|\frac{\overline{E_{th}}}{\overline{Z_{th}}+(k_{crit}\overline{Z_{L0}})}\right|^2\right] \quad (11)$$

따라서 $k=k_{crit}$ 일 때와 식(11)에서와 같은 최대전력전달이 가능해 진다. 따라서 우리는 축약된 계통으로부터 연산되는 $\overline{Z_{th}}$와 $\overline{Z_L}$을 통해 전압안정도를 감시할 수 있으며 이를 *Zindex* 라고 한다.

$$Zindex=\left|\frac{\overline{Z_{th}}}{\overline{Z_{L0}}}\right| \quad \begin{cases}\geq 1 : unstable \\ < 1 : stable\end{cases} \quad (12)$$

식 (12)에서 보인 것과 같이 *Zindex*의 값이 1보다 작으면 안정한 상태이며 1과 크거나 같으면 계통은 불안정한 상태가 된다.

2.3 사례 연구

시험계통 그림 3.을 보자. 위에서 설명한 일련의 과정을 계통에 적용하기 위해서는 먼저 발전단과 부하단의 구분이 필요하다.

그림 3.의 시험계통의 경우에서 발전 단은 4개의 발전기를 포함하고 있는 1번 절단선 좌측을 선택한다.

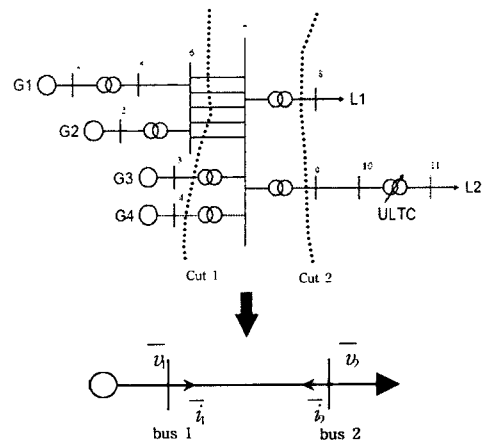

그림 3. 4기 11모선 시험계통

절단선 1번과 2번 사이를 우리가 관심 있는 송전선로로 가정 할 수 있다. 2번 절단선 우측은 부하 단으로 가정한다.

감시 지역을 선정하고 나면 감시하고자 하는 선로 양단에 있는, 즉 1번 2번 절단선과 인접하여 송전선로로부터 조류를 공급받거나 주입하는 모선들을 가상 모선으로 축약한다. 그림 3.의 시험계통에서는 발전 단의 가상모선 1은 모선 3, 4, 6으로 구성되며, 부하단의 가상모선 2는 모선 8, 9로 구성한다. 가상 모선을 구성 하였다면 가상 모선 사이의 구간은 우리가 감시 하고자 하는 가상 의

송전선로로 생각할 수 있다.

계통의 축약이 끝났다면 이제 안정도 해석을 위해 각 가상 모선의 전압과 전류를 측정 한다. 측정은 PMU와 같은 실시간 측정 장비를 통하여 이루어지며 각 PMU의 위치는 가상모선을 구성하고 있는 개별 모선에 설치하여 시각 동기화된 전압과 전류의 페이저 정보를 획득하여 위에서 제시한 안정도 감시 알고리듬에 적용한다.

$$\overline{i}_i=\left(\frac{p_{cal-i}+jq_{cal-i}}{v_i}\right)^* \quad i\in 1,2 \quad (13)$$

가상모선에 흘러 들어오는 전류의 크기는 식 (13)과 같은 방법으로 측정이 가능하다. 각 절단면에 들어오거나 흘러 나가는 전력의 합은 각 모선에서의 전력 조류의 합으로 구성되며 가상 모선 1과 2의 전압은 해당 모선을 구성하는 모선 전압의 평균값으로 계산이 가능하다.

이제 설명한 시험계통의 시간 모의를 통하여 본 논문에서 제시한 전압안정도 감시 알고리듬의 유용성을 보인다. 그림 4.는 모의 시작 후 20초에 6번과 7번 모선 사이의 1회선에 단락 사고가 발생하고 30초 후에 1회선에 추가로 단락 사고가 발생한 후 계통 변화를 감시한 결과이다.

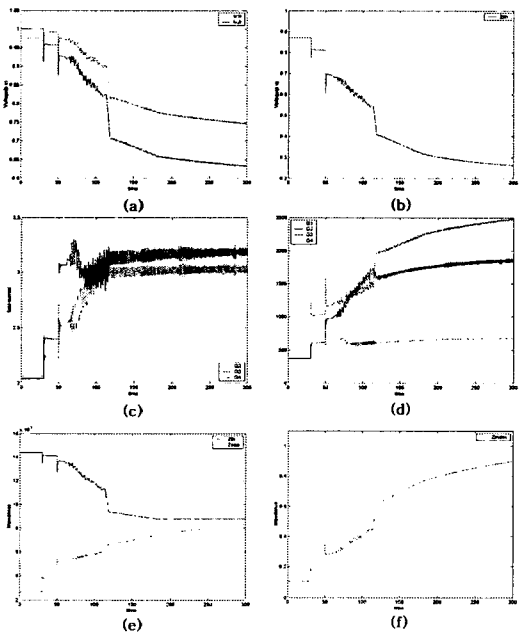

그림 4. 가상모선 1, 2의 전압(a), 전압안정도 감시 알고리듬을 통하여 계산된 $\overline{E}_{th}$(b), 각 발전기에서 측정한 Field Current(c), 각 발전기에서 측정한 무효전력 발전량(d), 전압안정도 감시 알고리듬을 통하여 계산된 $\overline{Z}_L$와 $\overline{Z}_{th}$(e), 전압안정도 감시 알고리듬을 통하여 계산된 $Zindex$(f)

모의 결과를 분석하면 모선 6번과 7번 사이의 선로에 단락 사고가 발생함으로 인해 모의 시작 후 20초와 50초 경과 후 계통에 순간적인 전압 강하가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 (c), (d)를 보면 두 번째 선로 단락 사고 후 10여초 경에 3번과 4번 발전기의 무효전력 출력이 상한에 이르러 ULTC 동작이 시작되고 있으며 2번 발전기의 무효전력이 상한에 이르면서 모의 시작 후 120초경에 전압이 붕괴하는 모습을 관찰할 수 있다.

그림 4.의 (e)와 (f)는 각각 $\overline{Z}_L$와 $\overline{Z}_{th}$의 관계, 그리고 $Zindex$의 계통 변화에 따른 변화 추이를 보이고 있다. 사고가 진행되면서 $\overline{Z}_L$와 $\overline{Z}_{th}$는 서로 점차 접근하고 있으며, 결국 $Zindex$가 전압 붕괴 지점에서 1의 값에 근접하는 것을 볼 수 있다. 특히 $Zindex$의 그래프는 계통의 변화에 따라 일정한 변화 모습을 보여 계통의 상태를 예측 가능한 전압안정도 감시 방법으로서의 유용성을 보이고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 감시 선로 양단에서 획득하는 PMU 정보를 이용한 실시간 전압안정도 감시의 기본 원리를 소개하고 4기 11모선 시험 계통의 시간모의를 통해 알고리듬의 유용성을 확인해 보았다.

일반적인 전압 불안정 현상이 예상치 못한 사고들의 연속될 경우 발생하는 특성에 비추어 볼 때 본 논문에서 소개한 실시간 감시 알고리듬의 배치를 통해 기존 시스템이 갖고 있는 문제점을 개선 할 수 있을 것으로 기대된다.

특히 가상의 감시선로를 선정하여 전압안정도를 감시하는 특징을 고려하면 우리 계통이 안고 있는 북상조류 한계에 의한 수도권 지역의 전압안정도 감시에 적용 가능 할 것으로 기대된다.

앞으로 해결해야 하는 문제점은 계산 초기에 감시선로의 발전 단을 축약하여 얻는 $\overline{Z}_s$와 $\overline{E}_s$의 정보를 발전 단의 계통구성이 변경될 경우 계산과정에 반영하는 방법의 개발이 필요하며 실 계통 적용을 위해서 실 계통의 사고 기록이나 오프라인 시간 모의를 위한 정확한 계통 모델의 개발이 필요하다. 뿐만 아니라 다양한 오프라인 연구를 통하여 운영자에게 계통의 상태정보를 제공할 수 있는 threshold value의 결정도 필요한 부분이다.

본 연구는 산업자원부 중기거점사업의 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

[1] Hang Liu, Anjan Bose, and Vaithianathan Venkatasubramanian, "A Fast Voltage Security Assessment Method Using Adaptive Bounding", IEEE Transaction On Power System, VOL. 15, NO.3, Aug. 2000

[2] Vournas C. Van Cutsem, T. "Voltage Stability of Electric Power System", Kluwer Academic Publisher, Boston, 1998

[3] B. Avramovic and L. K. fink, "Real-time Reactive Security Monitoring", IEEE Transactions on Power Systems, VOL 7, 1, Feb, 1992

[4] Lixin Bao, Zhenyu Huang, Wilsun Xu, "On-line Voltage Stability Monitoring Using Var Reserves", IEEE Power Engineering Society General Meeting, VOL.3, 2003

[5] 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

[6] Vu, k, M M Begovic, D Novosel and M M Saha, "Use of local Measurements to Estimate Voltage Stability Margin", 20th International Conference on Power Industry Computer Application. IEEE.

[7] 김상암, 이병준, "계통 지역정보를 이용한 전압안정성 감시 및 보호계전기에의 적용"

[8] 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.