

## 실시간 전압안정도 위험지수(VSRI) 계산방법과 시스템에 대한 고찰

김동준, 문영환, 송충기\*  
한국전기연구원, 한국전력공사\*

### A Review of the Method and System of Real-Time Voltage Stability Risk Index

D.J.Kim, Y.H.Moon, C.K.Song\*  
KERI, KEPCO\*

**Abstract** - 본 논문은 전력계통의 전압안정도 향상을 위해서 실시간 전압안정도 위험지수(Voltage Stability Risk Index, VSRI)를 계산하는 방법과 시스템을 기술한다. 기존의 모션 전압안정도 감시방법은 조류계산이라는 수학적 모델을 적용한 방법으로 입력데이터의 수가 많고 오차가 항상 존재하기 때문에 계산결과가 부정확하고 계산주기가 십 여분 이상 소요되는 단점을 갖는 반면, 제안된 방법은 측정된 전압 값을 사용하기 때문에 정확하고 실시간으로 모션의 과도 전압안정도를 감시할 수 있다. 특히 제안된 방법은 과도 전압안정도에 취약한 모션을 실시간으로 감시할 수 있다.

#### 1. 서 론

현재 전력회사에서 실 계통을 운용할 때 모션 전압제어 방법은 보통 두 가지 방법을 사용한다. 첫 번째 방법은 각 중요 모션으로부터 측정되어 전송된 전압 값을 계통 현황판에 표시하고, 표시된 전압값이 정격전압의 105%에서 95%사이에 유지하도록 제어하는 고전적인 수동제어 방법이다. 이러한 제어방법은 정상상태에서 전압제어에 있어서 가장 간단하고 효과적인 방법이 될 수 있으나, 외란에 의한 계통사고 시 긴급하게 전압제어를 해야 하는 상황에서는 크게 도움이 되지 않는다. 또한 이 방법은 모션 전압의 감도 정보를 알 수 없다.

두 번째 방법은 전력조류계산법 [4,5]을 이용한 정상상태에서의 모션전압 감도해석과 전압붕괴점 계산방법이다. 조류계산법을 이용하기 위해서는 전력계통에 관련된 모든 데이터가 입력으로 주어져야 한다. 송전선로의 임피던스 데이터는 미리 준비할 수 있고 송전선로의 토폴로지에 따라 변경할 수 있다. 그러나 발전량에 대한 데이터와 부하량에 대한 데이터는 실시간으로 변화하는 계통조건을 반영하기 위해서 직접 측정되어 전송되어야 한다. 여기서 문제점은 수 백 또는 수 천 모션으로 이루어진 계통에서 모든 모션의 발전량과 부하량을 측정하는 것이 불가능하다는 것이다. 따라서 중요 모션의 발전량과 부하량, 그리고 전압 등을 측정해서, 측정되지 않은 모션의 상태를 추정하게 된다. 이렇게 모든 데이터가 구성이 되면 조류계산 프로그램에 입력되어 사용되며, 계산주기는 십 여분이상 걸린다.

본 논문은 전력계통의 전압안정도 향상을 위해서 실시간 전압안정도 위험지수(Voltage Stability Risk Index, VSRI)를 계산하는 방법과 시스템을 고찰한다. 이 방법의 구성은 다음과 같다. 1) 중요모션에 설치된 실시간 페이저 측정장치 (Phasor Measurement Unit, 이하 PMU)를 이용하여 순시치 전압을 샘플링하고 유효치 전압 값을 계산하여 계산된 데이터를 저장한다. 2) 모션에 설치된 PMU에서 계산된 VSRI를 계산하고 인터넷 또는 통신장비를 통해서 수 초 주기로 상위감시 시스템에 전송한다. 3) 상위감시 시스템에서는 중요 모션에서 전송된 VSRI를 취합하여 서열화한다. 4) 서열화를 통해 VSRI가 가장 큰 절대치를 갖는 모션은 과도 전압안정도 위험이 가장 취약한 모션이 된다. 이와 같은 방법으로 VSRI법은 과도 전압안정도에 취약한 모션을 실시간으로 감시할 수 있다.

#### 2. 본 론

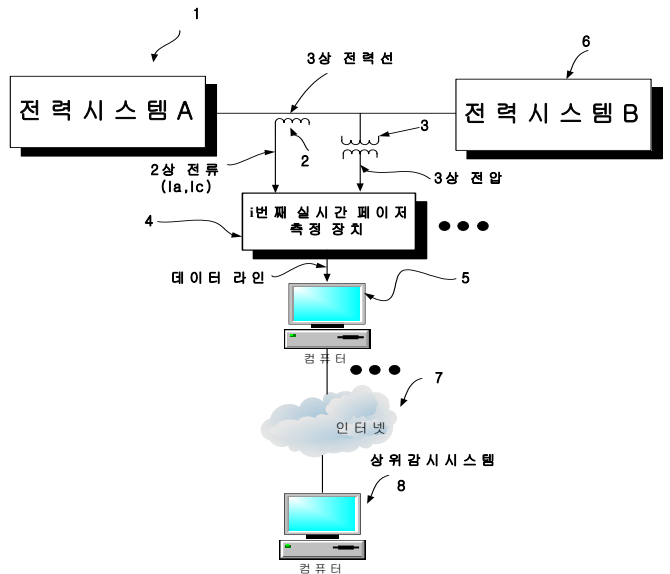
##### 2.1 조류계산을 이용한 온라인 전압감시

조류계산을 기본으로 하는 전압안정도 해석 기법 중 하나는 모션 전압 감도해석인데, 이것은 관심 모션에서 미소 무효전력(Q) 변동에 대한 미소 전압(V)변동을 나타내는 감도치를 계산한다 [6,7]. V-Q 감도치가 양의 값이면 전압안정도는 안정함을 나타내며, 그 감도치가 작을수록, 모션전압은 더 강건하다. 전압안정도가 감소하면, V-Q 감도치는 상승하며 전압 붕괴점에서는 무한의

값을 갖는다. 만약, 이 값이 음의 값을 갖는다면, 이것은 전압안정도 측면에서 불안정함을 나타낸다. 다른 하나의 전압안정도 해석은 전압 붕괴점을 계산하는 기법이다[8,9]. 전압 붕괴점은 전력계통 송전선로가 전송할 수 있는 최대 전력전송점이면서, 전압이 붕괴되는 점이다. 계산된 전압 붕괴점과 현재 계통 운전점과의 거리는 전압안정도 margin으로 사용하기도 한다. 전압 붕괴점 계산은 미리 부하량과 발전량을 알 수 없기 때문에 시나리오를 상정해서 계산된다. 조류계산법은 실시간 적용에는 문제가 있으나 계통상황을 예측할 수 있기 때문에 VSRI법과 상호보완적으로 사용 가능하다.

##### 2.2 실시간 VSRI를 이용한 전압감시

실시간으로 전압안정도를 감시하는 방법은 그림 1과 같이 설치된 각각의 PMU로부터 계산된 위험지수를 상위감시시스템에서 취합하고, 각 모션의 전압안정도의 위험지수를 서열화하여 취약 모션을 감시하는 것이다. 이러한 과정을 수행할 때 고성능 PMU를 이용하여 수 초 내에 분석가능하다. 따라서 중요모션의 전압안정도를 실시간으로 감시할 수 있다.



<그림 1> 실시간 VSRI 계산 시스템 구성도

실시간 모션 전압안정도 위험지수 계산하는 알고리즘은 그림 2와 같고 각 단계에 대한 자세한 설명은 아래와 같다.

**단계 1. 모션전압 측정:** PMU에서 계산되는 실효치 전압값은 측정된 순시치 전압을 이용하여 보통 8 msec~40 msec 속도로 계산되어진다. 실시간으로 측정된 유효치 전압값들은 다음 단계를 위해서 저장된다.

**단계 2. N이동평균값 계산:** N 이동 평균 (Moving average)은 다음과 같이 구할 수 있다. M개의 입력 데이터  $y_i, i=1,2,3,\dots,M$  는 벡터  $y=[y_1, y_2, \dots, y_M]^T$  로 나타낼 수 있다. N 이동 평균 값은 아래와 같이 두 가지 경우를 생각해서 구한다.

①  $j=<N$ 인 경우,  $v_j$ 값의 초기화

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^j y_i}{j}, j=1,2,\dots,N \quad (1)$$

② j)N 인 경우, N 이동 평균값 계산

$$v_j = \frac{\sum_{i=j-N+1}^j y_i}{N}$$

$$= v_{j-1} + \frac{y_j - y_{j-N}}{N}, j = N+1, \dots, M \quad (2)$$

**단계 3. % 이격율 계산:** 측정된 i번째 데이터  $y_i$  값이 이동 평균값  $v_j$ 에 얼마나 멀리 떨어져 있는가를 나타내는 것이 % 이격율 계산이다. % 이격율은 순간 전압강도를 나타낸다.

$$d_i = \frac{y_i - v_i}{v_i} \times 100, i=1,2,\dots,M \quad (3)$$

**단계 4. 전압안정도 위험지수(VSRI) 계산:** %이격율이 나타내는 면적은 모션 전압의 건전성을 나타낼 수 있다. VSRI는 N개의 구간으로 이루어진 % 이격율이 만들어 내는 면적을 N으로 나눈 값이다. 면적이 적을수록 모션전압은 강건하며, 면적이 클수록 모션전압의 안정도는 감소한다. 사다리꼴 적분방식에 의해서 아래 수식과 같이 위험지수를 계산하고, 계산된 VSRI는 상위감시 시스템에 인터넷 등을 이용하여 전송한다. 그리고  $\Delta T$ 의 주기로 다시 PMU에서 측정된 데이터를 취득하고 VSRI를 계산하고 전송한다.

가.  $j < N$ 인 경우,  $Z_j$ 값의 초기화:

$$z_j = \frac{1}{j} \left[ \frac{\sum_{i=1}^j (d_i + d_{i-1}) \Delta t}{2} \right], d_0 = 0, \Delta t = 1, j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

여기서,  $\Delta t$ 는 샘플링 Cycle로 가정한다.

나.  $j > N$ 인 경우,  $Z_j$

$$z_j = \frac{1}{N} \left[ \frac{\sum_{i=j-N+1}^j (d_i + d_{i-1}) \Delta t}{2} \right]$$

$$= z_{j-1} + \frac{1}{N} \left[ \frac{(d_j + d_{j-1}) - (d_{j-N} + d_{j-1-N}) \Delta t}{2} \right], \quad (5)$$

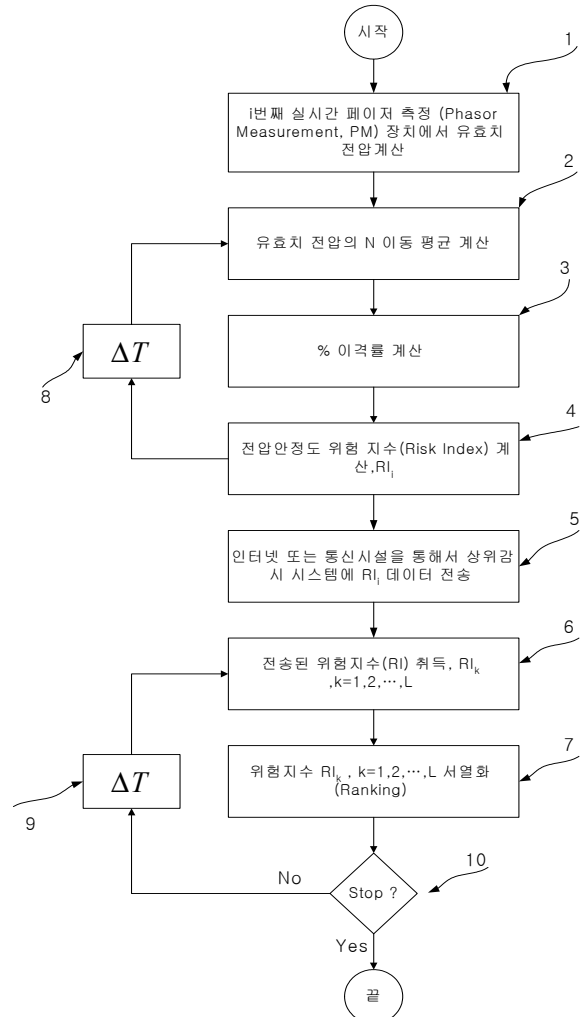
$$\Delta t = 1, j = N+1, \dots, M$$

**단계 5. 위험지수의 서열화:** i번째 PMU에서 전송된 전압안정도 위험지수  $z_i$ 는 다른 장치에서 전송된 위험지수와 더불어 상위감시 시스템에서 벡터  $z = [z_1, z_2, \dots, z_k]^T$ 로 구성된다. 위험지수 벡터는 크기에 따라 서열화가 된다. 가장 큰 양의 값을 갖는 위험지수 모션은 과전압의 위험이 내재해 있고, 가장 적은 음의 값을 갖는 위험지수 모션은 저전압의 위험이 내재해 있다. VSRI의 절대치가 큰 모션은 전압변동이 크기 때문에 중점적으로 감시해야 할 모션이다.

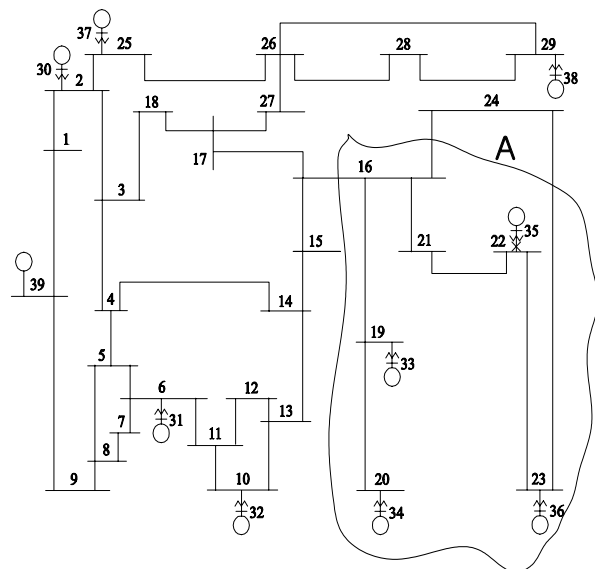
## 2.2 실시간 VSRI법의 계통 적용

실시간 VSRI법을 다모션 계통에 검증하기 위해서 그림 3과 같은 10기 39모션 시스템을 상정하여 시뮬레이션 하였다. 상정사고는 A 지역의 Bus 35의 발전기가 불시트립 되는 것으로 하였다. 이 시스템의 네트워크 데이터와 발전기 데이터는 참고 문헌과 같다. 이 시스템은 원래 미소신호안정도에 매우 취약한 계통인데 전압안정도만 관찰하기 위해서 여자시스템과 조속기/터어빈 시스템을 다소 변경하였다. 여자시스템은 정지형 여자기, PSS 제어장치, 그리고 계자전압 리미터 (OEL)로 구성되어 있고, 조속기/터어빈 시스템은 화력발전기 모델로 가정하였다. 시뮬레이션은 상

용 과도안정도 프로그램을 사용하였다. Bus 35의 발전기를 불시트립인 경우, A지역의 중요부하 모션전압 응답특성은 그림 4와 같다. 그림 4의 데이터는 1초에 60개의 실효치 전압데이터로 구성된다. 이 데이터를  $N=180$ 으로 해서 분석하고 매 1초마다 VSRI 지수를 상위 감시 시스템으로 전송한다고 가정했을 때, 위험지수 비교는 그림 5와 같다.



<그림 2> 도면 7의 VSRI 분석 (N=180, 시간간격: 1sec)



<그림 3> 도면 7의 VSRI 분석 (N=180, 시간간격: 1sec)

사고 전의 A 지역의 부하모션의 운전조건은 표 1과 같고, 가

장 낮은 전압을 보여주고 있는 것은 Bus 20 이다. 그림 4로부터 알 수 있는 정보는 매우 제한적이다. 반면 VSRI법은 계산된 지수를 분석하면 쉽게 과도 전압안정도에 취약한 모션을 분석할 수 있다. 그림 5로부터 Bus 35의 발전기가 불시 트립이 발생하고 나서 가장 과도 전압안정도에 취약한 모션은 발전기 인근모션인 Bus 23이고, 다음으로 Bus 21이다. 전압이 가장 낮은 Bus 20은 다른 모션에 비해 전압감도는 덜 민감하다. 이러한 결과는 그림 4의 모션 전압파형으로 알 수 없다. 그림 5에서 8초 이후의 VSRI가 제로 값으로 수렴하는 것은 모션 전압이 안정되어 가고 있음을 나타낸다. 이러한 결과로서 VSRI법은 과도 전압안정도와 실시간 전압안정도를 효과적으로 감시할 수 있다.

### 3. 결 론

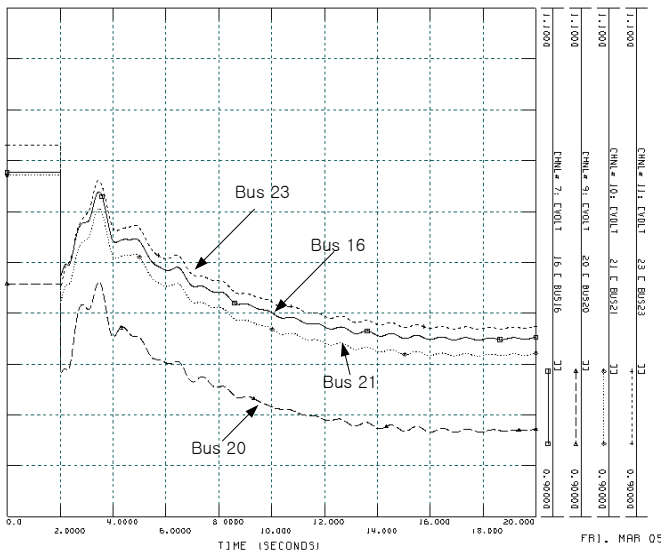
내용을 적어주세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요.

#### [참 고 문 헌]

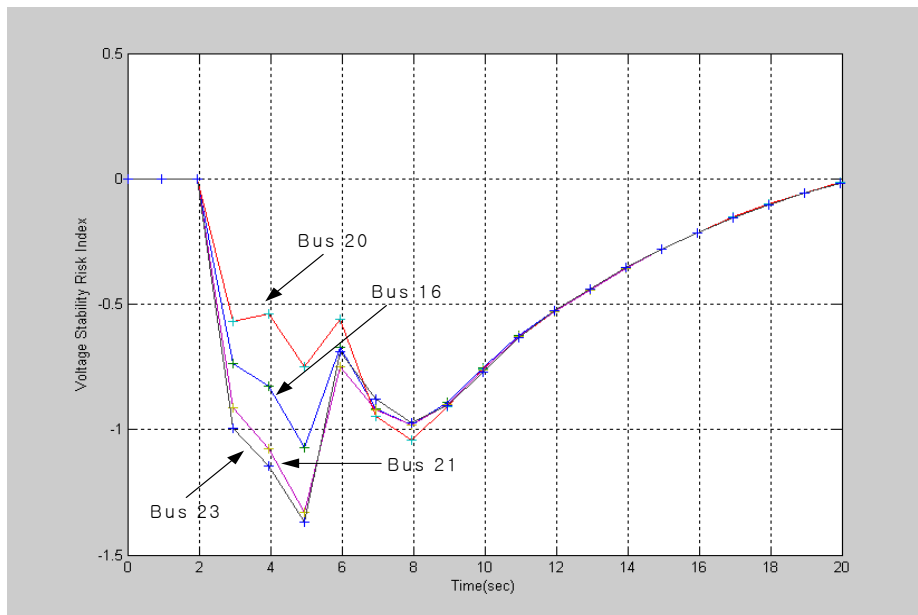
- [1] Bharat Bhargava, "Synchronized Phasor Measurement System Project at Southern California Edison Co.", IEEE PES SM 1999, pp.18-22, 1999
- [2] Magnus Akke, "Phasor Measurement Applications in Scandinavia," IEEE PES T&D Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, pp. 480-484, 2002
- [3] Report, "August 14, 2003 Outage Sequence of Events", U.S./Canada Power Outage Task Force, Sep. 12, 2003
- [4] W.F. Tinney and J.W.Walker, "Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization," Proceedings of IEEE, Vol. 55, pp. 1801-1809, November 1967
- [5] G.W.Stagg and A.H. El-Abiad, Computer Method in Power System Anlysis McGraw-Hill, 1968
- [6] N.Flatabo, R.Ognedal, and T.Carlsen, "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods," IEEE Trans.,
- [7] C.Lemaitre, J.P.Paul, J.M.Tesson, Y.Harmand, and Y.S.Zhao, "An indicator of the Risk of voltage Profile Instability for Real-Time Control Applications," IEEE Summer Meeting 1989, Paper 89Sm713-9 PWRs
- [8] V.Ajjarapu and C.Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis," IEEE PICA Conference Prodedings, pp. 304-311, May 1991
- [9] F.L.Alvarado and T.H. Jung, "Direct Detection of Voltage Collapse Conditions," Proceedings: Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security, EPRI EL-6183, pp. 5.23-5.38, January 1989

<표 1>정상상태인 경우 A 지역의 부하모션 운전조건

Bus No.	부하 (MW+jMVAR)	전압 (PU)
Bus 16	329.4+j32.3	1.035
Bus 20	680.0+j103.0	0.9915
Bus 21	274.0+j115.0	1.034
Bus 23	247.0+j84.0	1.046



<그림 4> Bus 35의 발전기 트립 사고인 경우 A지역 부하모션 전압응답



<그림 5> 그림 3의 VSRI 분석 (N=180, 시간간격: 1sec)