

Pilot bus를 이용한 지역별 전압 제어

이호철, 송성환, 김선교, 윤용태, 문승일
서울대학교

Regional voltage control using pilot bus

Ho-Chul Lee, Sung-Hwan Song, Sun-Kyo Kim, Yong-Tae Yoon, Seung-Il Moon
Seoul National University

Abstract - 본 논문은 무효전력 특성에 따라 나누어진 각 지역의 대표 pilot bus 전압을 기준으로 계통 전압을 제어함으로써 계통내에 모든 버스 전압을 통한 제어보다 효율적인 방법을 제시한다. Pilot bus 전압을 기준으로 하는 경우는 계통내 모든 버스의 전압을 기준으로 하는 경우에 비해 필요로 하는 정보의 양이 작을 것이므로 더 효율적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 IEEE 14 버스 시스템에서 특정 상정사고가 일어났을 경우를 가정으로 steady state voltage monitoring and control(SSVMC)를 통한 전압제어 시뮬레이션을 하였다. 모든 버스 전압을 기준으로 한 경우와 pilot bus 전압을 기준으로 SSMC해준 경우를 비교 제시하였다.

1. 서 론

최근 대형 정전들의 발생으로 인해 전압 안정도의 중요성이 커지고 있다. 이 논문에서 전압을 제어하는데 있어 효율적인 방법을 제시하고자 한다. 전력 시스템의 전압 문제에 대해 가장 현명한 방법은 사고가 발생하기 전에 여러 가지 가상의 사고를 예측하고 시뮬레이션 해봄으로써 그런 사고가 발생하지 않게 하고 발생한다고 해도 예측된 내용을 토대로 해결하는 것이다.[1] 그러나 이 논문에서는 사고 발생 후 효율적으로 전압을 제어하는지 초점을 두고 있다. 시스템에서 효율적인 전압 제어를 위해서 어떤 정보들이 필요하며 그 정보의 양이 중요하다. 적은 양의 정보들은 더 효과적으로 전압을 모니터링하고 제어할 수 있게 한다.[2]

본 논문에서는 IEEE 14 버스 시스템에서 무효전력과 전압의 sensitivity에 따라 지역을 나누고 각 지역별 pilot 버스를 선정한다.[3],[5] 그리고 SSMC를 통해 전압을 제어함에 있어서 기존의 방식은 모든 부하 버스의 전압을 기준으로 하는 것에 비해 pilot 버스 전압만을 기준으로 하는 방법이 어떻게 효과적인지 나타났다.

2. 본 론

2.1 SSMC

SSVMC는 전압 모니터링을 통해 사고등이 발생했을 때 최적의 전압 상태를 유지하게 하는 알고리즘이다. 여기서의 전압 조절은 시스템에서 무효전력의 뒷받침이 가능하다는 가정하에 정상상태와의 전압 차를 최소화하는 것이다.[4]

조류계산식에서 무효전력 부분을 보면 다음과 같다.

$$-V_i \sum_{j=0, j \neq i}^{l+g} V_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} + G_{ij} \sin \theta_{ij}) + V_i^2 \left(\sum_{j=0, j \neq i}^{l+g} B_{ij} \right) - b_i - Q_i = 0 \quad (1)$$

- 0 - 슬랙 버스; 1, 2, ..., l - 부하 버스; (l+1), ..., (l+g) - 발전 버스
- $Y_{ij} = G_{ij} - jB_{ij}$: 버스 i와 j 사이의 admittance
- jb_i : 버스의 shunt admittance

위 기본식에서 우리는 모든 부하 전압의 오차를 최소화하기 위해 least square minimizaion을 이용한다. (1)식은 정상상태 전압에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$BV^{nom} - Q^{nom} / V^{nom} = 0 \quad (2)$$

시스템에서 어떤 사고가 발생하여 상태가 변했을 때 다음과 같다.

$$BV - Q / V = 0 \quad (3)$$

이 식에 정상상태 전압 (V^{nom})을 대입해 무효전력 mismatch(D)를 구할 수 있다.

$$D = BV^{nom} - Q / V^{nom} \quad (4)$$

(3)식과 (4)식의 차로부터 (5)식을 얻을 수 있다.

$$D = -B\Delta V + \text{diag} \left\{ \frac{-Q_i \Delta V_i}{(V_i^{nom} (V_i^{nom} + \Delta V_i))} \right\} 1 \quad (5)$$

- 1은 모든 성분이 1인 행렬을 의미한다. ($\Delta V = V - V^{nom}$)

식(5)를 Taylor series 전개 후 높은 차수 부분을 무시하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$D = -[B + \text{diag} \left\{ \frac{Q_i}{(V_i^{nom})^2} \right\}] \Delta V \quad (6)$$

H 행렬은 다음과 같이 정의한다.

$$H = -[B + \text{diag} \left\{ \frac{Q_i}{(V_i^{nom})^2} \right\}] \quad (7)$$

(6)식에서 mismatch를 발전기와 부하로 분리하여 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} D_d \\ D_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{dd} & H_{dg} \\ H_{gd} & H_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_g \end{bmatrix} \quad (8)$$

- D_d - 부하 버스의 mismatch
- H_{dd} - d×d 행렬
- H_{dg} - d×g 행렬
- ΔV_d - 1×L 행렬, 부하 버스의 전압 차이
- ΔV_g - 1×G 행렬, 발전 버스의 전압 차이

D행렬은 정상상태 전압과 시스템변화 후의 전압 사이의 무효전력 mismatch를 나타낸다.

식(8)에서 부하쪽의 mismatch만 고려해서 정리해보면 다음과 같다.

$$D_d = H\Delta V = [H_{dd} \ H_{dg}] [\Delta V_d \ \Delta V_g]^T \quad (9)$$

$$\Delta V_d = H_{dd}^{-1} D_d - H_{dd}^{-1} H_{dg} \Delta V_g$$

정상상태와 사고 후 부하전압의 변화량이 최소 즉, 사고 후 최대한 정상상태가 되기 하기 위해 발전 전압을 조정해야한다. 따라서 목적함수가 부하 전압의 변화량이 되는 Least Square Minimization을 이용할 것이다.

$$\min_{\Delta V_g} \| \Delta V_d \|^2 \quad (10)$$

이 논문에서는 위의 알고리즘을 이용해서 사고 전과 사고 후의 부하버스 전압차이를 최소화하는 발전전압을 얻을 것이다.

2.2 무효전력에 따른 지역 분할과 pilot 버스 선정

본 논문에서는 SSMC를 사용하여 모든 부하버스의 전압 변화량을 최소화한 경우와 pilot 버스 전압의 변화량을 최소화 했을 때를 비교하기 위해 IEEE 14버스 시스템을 사용하였다.

먼저 시스템의 지역을 나누고 각 지역을 대표하는 pilot 버스를 선정하는 과정을 살펴보자. 무효전력은 지역적인 특성이 있다. 따라서 특정 버스에서 무효전력의 영향력은 가까운 버스일수록 크다. 이런 특성을 수식적으로 나타내는 것이 electrical distance 이다. Electrical distance는 다음과 같은 순서로 구해진다.[5]

- Step1 모든 버스에서 $[\partial V_i / \partial Q_j]$ 값을 구해준다.

Jacobian matrix의 역수는 sensitivity matrix가 된다

$$J_y^{-1} \text{ sensitivity matrix } [\partial V_i / \partial Q_j]$$

j버스 무효전력의 변화에 따른 i버스에서 전압의 변화량은 위 식과 같이 sensitivity matrix 통해 나타난다. 이를 이용해서 특정버스에서 전압의 변화에 따른 다른 버스에서 전압의 변화를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta V_i = [J_y^{-1} / J_y^{-1}] \Delta V_j$$

- Step2 Step1의 값을 사용하여 α_{ij} 의 값을 구한다.

$$[J_y^{-1} / J_y^{-1}] \text{를 } \alpha_{ij} \text{라 둔다.}$$

- Step3 α_{ij} 는 j버스에서 무효전력이 변했을 때 j버스 전압에 미치는 영향력기준으로 i버스 전압에 미치는 영향력을 나타내는 수식이다. 영향력이 크다는 것은 결국 거리적으로 가깝다는 것이 되고 영향력이 작다는 것은 거리적으로 멀다고 생각할 수 있다. 따라서 α_{ij} 를 이용해서 electrical distance를 나타낼 수 있다.

$$ed_{ij} = ed_{ji} = -\log(\alpha_{ij} * \alpha_{ji}) \quad (11)$$

Electrical distance를 이용한 clustering의 기본적인 방법은 electrical distance가 가까운 지역을 묶는다는 것이다. Electrical distance의 값 중 작은 값들부터 묶어준다. 이 과정에서 묶이는 버스들은 하나의 버스로 생각하고 다른 버스와의 electrical distance를 다시 구해준다. 통합된 버스와 단일(또는 통합된)버스와 electrical distance는 가장 큰 값과 가장 작은 값의 평균을 사용한다.

$$ed_{ij} = (ed_{ij}^{\min} + ed_{ij}^{\max}) / 2 \quad (12)$$

위의 과정을 반복하다 결국 system operator가 정한 값에 왔을 때 clustering은 완성된 것이다. System operator가 정한 electrical distance값에 의해 clustering이 결정된다.

Pilot Bus는 지역의 전압, 무효전력을 제어하는데 있어서 reference가 되므로 기본적으로 다음과 같은 조건을 충족해야 된다.

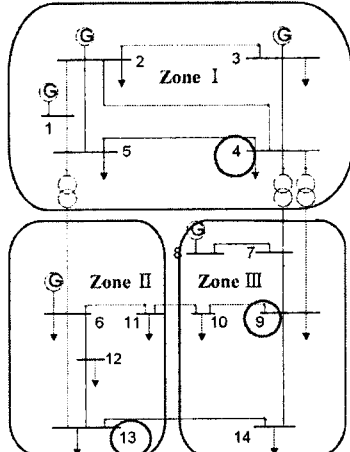
- 1) Pilot Bus는 제어지역 전체 전압을 반영해야 한다. (Observable)
- 2) 근처 reactive power resource 에 의해 제어 되어야 한다. (Controllable)

우선 위 clustering에 의해 나누어진 각 지역마다 1개의 Pilot Bus 가 있어야 한다.

$$\min \sum_{a \in S_e} ed_{a,i} \quad (13)$$

여기서 S_e 는 Pilot Bus를 정하고자 하는 지역의 모든 부하버스를 의미한다.

위 식을 만족하는 a버스가 pilot bus가 된다. 이는 지역의 전압 특성을 잘 나타내기 위해서 전체적으로 같은 지역의 다른 버스와 electrical distance가 가까운(값이 작은) 것을 의미한다. 여기서 선정된 pilot 버스의 전압은 각 지역전압을 가장 잘 나타낸다



〈그림 1〉 무효전력 sensitivity 따른 지역분할과 pilot bus

2.3 pilot 버스를 통한 전압 제어

2.1에서 나타난 SSSVM에서 weighting factor(W_i)를 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min W_i \| \Delta V_{dj} \|^2 \quad (14)$$

이 식에서 모든 부하 버스를 이용해 전압제어를 해주는 경우에 $W_i = 1$ 로 두면 기존의 SSSVM의 목적함수와 동일하게 된다. 그러나 pilot 버스의 전압만을 기준으로 전압제어를 해주는 경우에는 다음과 같이 두면 된다.

- $W_i = 1$ 각 지역의 pilot 버스의 경우
- $W_i = 0$ pilot 버스를 제외한 나머지 버스

2.2에서 나타난 것처럼 pilot 버스 전압은 각 지역의 전체전압을 반영하고 제어할 수 있는 대표 전압이다. 따라서 pilot 버스 전압만을 고려해서 전압을 제어해주는 것이 가능하다면 효율적이고 간편할 뿐만 아니라 시스템의 전압을 한 눈에 볼 수 있어 유용할 것이다.

3. 사례연구

앞에서 언급했듯이 각 지역에서 선정된 3개의 pilot 버스의 전압만을 토대로 시스템의 전압을 제어해준 경우와 모든 부하 버스의 전압을 토대로 시스템의 전압을 제어해준 경우를 비교해보겠다.

그림1에서 Electrical distance를 이용하여 IEEE 14버스 시스템의 지역을 나타낸다. 1번 버스는 슬랙 버스로 2, 3, 6, 8번 버스는 발전기 버스이다. 나머지 버스는 부하버스가 된다. 그리고 각 지역에서 4번, 13번, 9번 버스가 pilot 버스가 된다. 이 시스템에서 13-14버스 사이 선로 상정사고가 다른 선로 상정사고보다 시스템 전압에 큰 영향을 미치기 때문에 13-14버스 선로 상정사고를 가정하고 시뮬레이션을 했다.

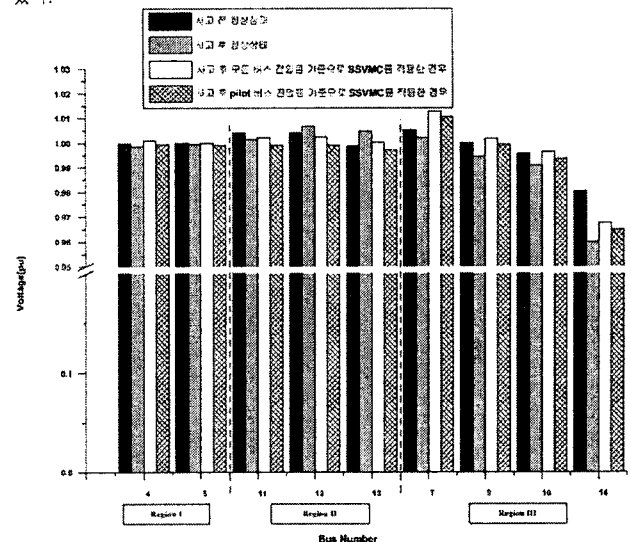
표1에서 SSSVM를 적용하여 전압을 제어한 후 발전 전압의 결과가 나타나고 그림2는 정상상태와 사고 후 각 부하버스의 전압을 나타낸다. 사고 후에 거의 모든 버스에서 전압이 감소현상이 나타났고 특히 14번 버스의 전

〈표 1〉 SSSVM 적용 전과 후의 발전 버스의 전압[pu]

버스 번호	사고 전	사고 후	사고 후 모든 부하 버스 전압을 기준으로 SSSVM C를 적용	사고 후 pilot 버스 전압을 기준으로 SSSVM를 적용
2	1.0200	1.0200	1.0154	1.0195
3	1.0200	1.0200	1.0296	1.0197
6	1.0200	1.0200	1.0158	1.0126
8	1.0200	1.0200	1.0430	1.0398
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

압이 크게 감소하였다. 모든 부하 버스의 정상상태와 전압차이를 최소화하는 SSSVM를 적용하면 버스의 전압을 높이기위해 특히 14번 버스의 전압을 높이기 위해 같은 지역에 존재하는 8번 발전 버스의 전압을 많이 높인다. 그리고 14번 버스에 영향을 미치는 3번 발전 버스의 전압을 높이게 된다. 반면 3번, 8번 발전 버스 전압의 상승에 의해 다른 버스들이 많은 전압이 상승하는 것을 막기 위해 2번, 6번 발전 전압은 낮아지게 된다.

사고 후 Pilot 버스의 전압만을 고려하여 정상상태 전압과 차이를 최소화하는 SSSVM를 적용하였을 경우 다른 부하 버스의 전압차는 무시하고 4번, 13번, 9번 버스의 전압을 복구하는데 중점을 두게 된다. 결과적으로 사고 후 전압의 변화가 가장 심한 14번 버스의 전압을 높이기 위해 8번 발전 버스의 전압을 많이 높인다. 그리고 다른 버스의 전압이 높아지는 것을 막기 위해 다른 발전 버스의 전압을 전체적으로 낮추었다. 이는 앞의 모든 버스 전압을 고려한 경우와 다소 차이는 있지만 비슷한 유형의 형태로 나타났다.



〈그림 2〉 각 버스별 전압

SSVM를 통해 낮아진 전압을 올리는데 효과를 보인다. 모든 버스를 기준으로 SSSVM를 적용한 경우와 pilot 버스를 기준으로 SSSVM를 적용한 경우를 비교해 보면 전반적으로 모든 버스를 기준으로 하는 경우가 조금 더 효과적인 것을 알 수 있다. 그러나 그 차이는 그리 크지 않고 미세한 정도이다. 그러나 모든 버스를 기준으로 했을 경우 SSSVM를 적용하기 위해 필요로 하는 정보는 pilot 버스를 기준으로 한 경우에 비해 많다. 구체적으로 SSSVM를 적용하는 과정에서 H 행렬을 구하는 과정이 있다. H 행렬을 구하기 위해서는 모든 버스간의 admittance가 필요하고 무효전력 값 등이 필요하다. 그리고 pilot 버스를 기준으로 하는 경우 H 행렬을 구하기 위해 필요한 것은 pilot 버스와 관련이 있는 admittance만 알면 된다. 따라서 정보의 양이 현저하게 줄어들 뿐만 아니라 줄어드는 정보로 인해 계산과정 또한 줄어든다.

4. 결 론

이 논문을 통해 나누어진 지역별 대표 pilot 버스만을 통해 전압제어를 해주었다. 더불어 기본적으로 필요로 하는 정보의 양을 줄임으로써 더 효율적으로 제어하는 방법을 제시하였다. 필요로 하는 정보가 줄어들어 제어의 간편해질 것이다.

〈참고 문헌〉

- [1] Chien-Ning Yu, Yong T. Yoon, Marija D. Ilic, Armand Catelli "On-line Voltage Regulation: The Case of New England", IEEE Transaction on Power System, Vol.14, No.4, November 1999
- [2] M. Ilic-Spong, J. Christensen, K. L. Eichorn "Secondary Voltage Control Using Pilot Point Information", IEEE Transaction on Power System, Vol.3, No.2, May 1988
- [3] Mohammad Shahidehpour, Yaoyu Wang, "Communication and Control in Electric Power Systems", John Wiley & Sons, 2003
- [4] Assef Zebian, Marija D. Ilic "A Steady State Voltage Monitoring and Control Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviations", IEEE Transaction on Power System, Vol.11, No.2, May 1996
- [5] Sung-Hwan Song, Ho-Chul Lee, Yong Tae Yoon, Seung-II Moon "Cluster Design compatible with Market for Effective Reactive Power Management"