

2차 전압 제어를 위한 전압 제어 지역의 결정

이석창\* 송화창 이병준  
고려대학교 전기전자전파 공학부

A Determination of The Voltage Control Area  
For The Secondary Voltage Control

Suckchang Lee\* Hwachang Song Byongjun Lee  
School of Electric Engineering, Korea University

**Abstract** - This paper presents the comparison of three methods which determines the voltage control area for the secondary voltage control in power system. Each secondary control area is sufficiently uncoupled from its neighbours for the controls within a area to be slightly influenced by the actions carried out in the other areas. Results obtained using a modified 48bus test system are presented illustrating the applicability of the approach.

1. 서 론

최근 전력 계통은 첨두 부하 수요의 증가와 계통의 복잡화에 따라 전압 안정도에 대한 관심이 높아져 가고 있다. 또한 전력 산업 구조 개편에 의한 발전 경쟁의 전력 시장 도입에 따른 계통의 불확정성의 증가로 전압 안정도 확보는 중요한 문제로 부각되고 있다. 본 논문에서는 계통의 전압 안정도 향상을 위해 고려되고 있는 2차 전압 제어(Sencondary Voltage Control)를 위한 전압 제어 지역(Voltage Control Area) 분할의 문제를 다룬다.

2차 전압 제어는 전체 계통을 부분 계통으로 분할하고, 각 지역을 대표하는 pilot 모선을 선택한 후, pilot 모선의 전압을 각 지역에 있는 발전기들이 담당하게 하는 방식이다[1]. 계통 내에서 pilot 모선을 잡을 때, pilot 모선은 그 전압 제어 지역 내의 전압 안정도를 대표해야 하고, 전압 안정도를 유지하기 위하여 전압 조절을 할 수 있어야 한다. 2차 전압 제어 방식은 제어 영역이 지역 전체를 담당하게 되며, 사고로 인한 무효 전력의 발전량이 각 발전기의 무효 전력 여유를 고려하여 담당하게 되어 각 발전기가 균일한 무효 전력 여유를 확보할 수 있다. 2차 전압 제어를 수행함으로써 수송 최대 전력을 증대시킬 수 있다. 즉, 2차 전압 제어로 인하여 발전기 모선보다 전기적으로 부하 모선에 가까운 pilot 모선의 전압을 일정하게 유지하게 되므로 PV 곡선의 꼭지점, 즉 최대 전력 수송점이 증가하게 된다. 또한 적절한 2차 전압 제어의 수행으로써 long-term 전압 안정도를 향상시킬 수 있고, 사고 또는 중부하 시 일어나는 무효 전력 공급의 불균형 문제를 발전기의 용량에 따라 무효 전력 발전량을 분배하게 되므로 이 문제를 해결할 수 있다.

2차 전압 제어에서 전체 계통에서 나뉘어지는 부분 계통을 전압 제어 지역이라고 정의하고, 그 지역 내의 모선들이 같은 전압 안정도 특성을 가지고 있는 지역으로 정의된다[2]. 따라서 전압 제어 지역 내에서는 무효 부하와 무효 전력 발전의 변화에 대해 전압이 매우 유사하게 반응하는 부하 모선군과 발전기 모선군으로 구성된다.

본 논문에서 2차 전압 제어를 위한 전압 제어 지역 설정을 하는 기존의 두 가지 방법 [1],[2]과 참고 문헌 [3]에서 제안하는 방법을 간단히 설명하고 사례 연구를

통해 결과를 비교하였다. 사례 연구에서는 수정된 48모선 계통을 이용하였다.

2. 전압 제어 지역 설정

2.1 전기적 거리(1)에 의한 지역 분할

전력 조류 계산에서의 일의의 조류해에서의 수정방식은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서 전압과 무효 전력간의 밀접한 연관성을 가지고 있다는 가정 하에서 전압과 무효 전력의 식을 분해하면 다음과 같이 표현된다.

$$[\Delta Q] = \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] [\Delta V] \quad (2.1)$$

$$[\Delta V] = \left[ \frac{\partial V}{\partial Q} \right] [\Delta Q] \quad (2.2)$$

여기에서  $[\partial V/\partial Q]$ 는  $[\partial Q/\partial V]$ 의 역행렬에 해당한다.

그러면 계통에서 어떤 i모선과 j모선 전압의 연관성에 대하여 고려하여 본다. 다음 식에서와 같이 j모선 전압의 미소 변화에 따른 i모선 전압의 미소 변화를  $\alpha_{ij}$ 라는 승수로 표현할 수 있다고 하자.

$$\Delta V_i = \alpha_{ij} \Delta V_j \quad (3)$$

$\alpha_{ij}$ 는 식 (2.2)를 이용하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{ij} = \frac{(\partial V_i/\partial Q)}{(\partial V_j/\partial Q)} \quad (4)$$

일반적으로  $\alpha_{ij}$ 는  $\alpha_{ji}$ 와 같지 않다. 그러나 대칭적인 특성을 유지하기 위하여 다음과 같은 식으로 전기적 거리를 정의한다.

$$D_{ij} = D_{ji} = -\log(\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji}) \quad (5)$$

위에서 pilot 모선의 각 모선에 대한 전기적 거리를 구하고 전기적 거리에 대한 기준치를 정해서 기준치 이하의 값을 가지는 모선들을 전압 제어 지역이라고 설정한다. 전기적 거리는 어떤 계통 사고에 의하여 발생되는 두 i, j모선의 전압의 결함의 불확실성의 정도를 나타내고 있다. 전기적 거리를 이용하여 각 지역의 전압의 연관성이 적은 지역을 분할할 수 있다.

2.2 VSSA(2)에 의한 지역 분할

참고 논문[2]에서 제안하는 전압 제어 지역의 정의에 의해 전압 제어 지역을 설정하는 방법이다. 참고 논문 [2]에 의하면 일정한 전압 제어 지역은 독특한 전압 안정도의 특성을 가지므로, 전압 제어 지역 내의 모선들은 독특한 Q-V 곡선을 가지고 있고, 각 모선의 Q-V 곡선의 꼭지점에서 무효 전력 공급 한계를 가지는 발전기를 동일하게 가지고 있다고 정의하였다. 정의에 의하여 각 모선의 Q-V 곡선을 작성하고, 무효 전력 공급 한계를

가지는 발전기를 조사하여, 공동된 발전기를 가지는 모선들을 전압 제어 지역이라고 설정한다.

### 2.3 참여 인수(3)를 이용한 지역 분할

참고 문헌[3]에서는 전압 안정도 해석을 위해 전력 계통 자코비안의 고유치 분해 방법의 사용이 제안되었다. 이 방법은 계통이 정적인 전압 불안정점 부근에서 특이성을 가지는 자코비안 행렬을 다루는데 매우 효율적인 방법이기 때문이다.

Pilot 모선에서 Q-V곡선을 작성하고, 무효 전력 여유의 한계를 가지는 Q-V곡선의 꼭지점에서 임계 고유치(zero eigenvalue)의 계산이 이루어진다. 이때 무효 전력 공급 한계를 가지는 발전기 모선의 정보도 추가로 제공되어, 고유치의 계산에 이용된다.

다음 식은 잘 알려진 선형 전력 조류 방정식이다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서 J를 고유치 분해에 의해 나누면,

$$J = L S R^T = \sum_{i=1}^n L_i S_i R_i^T \quad (7)$$

로 나타낸다. 식(7)에서 L과 R은 단위 직교 행렬을 나타내고, 고유벡터  $L_i$ 와  $R_i$ 는 L과 R의 열 행렬이다. S는 대각행렬이고,  $S_i$ 는 행렬 J의 고유값이다. 식(6)의 역행렬을 취하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} &= J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \\ &= R S^{-1} L^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \\ &= \sum_i \frac{R_i L_i^T}{S_i} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

참여 인수  $P_{ki}$ 는

$$P_{ki} = R_{ki} L_{ik}^T \quad (9)$$

으로 정의된다. 참여 인수  $P_{ki}$ 는 i모선의 전압 변화에 대한 k모선의 참여를 나타낸다. 참여 인수  $P_{ki}$ 가 크면 클수록, k모선이 i모선의 전압 변화에 더욱 큰 영향을 끼친다. 참고 문헌[3]에서는 작은 고유치, 즉 전압 불안정한 모선에 대해, 그 모선으로의 참여 인수는 전압 불안정에 가까운 지역을 설정한다고 설명하고 있다. 따라서, pilot 모선에 대해 각 모선의 참여 인수를 구한 후, 기준치 이상의 값을 갖는 모선들을 전압 제어 지역이라 설정한다.

### 3. 사례 연구

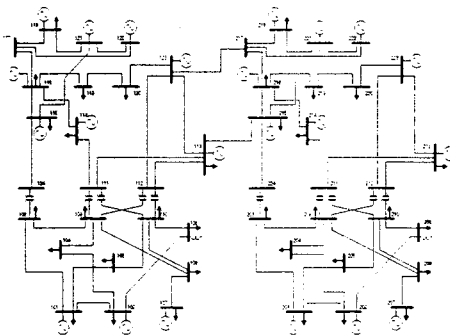


그림 1. 48모선 시험계통

사례 연구에서는 본 논문에서 나타내고자 하는 2차 전압 제어를 위한 전압 제어 지역을 설정하는 앞에서 설명한 세 가지 방법의 결과를 비교한다. 세 방법을 수정된 48모선 계통을 통해 적용하고 결과를 각각 비교해

보았다. 본 논문에서는 발전 지역에서 부하 지역으로 전력이 주입되는 부하 모선들 중에서 하나(103모선, 203모선)를 pilot 모선으로 잡았다. 그림 1은 모의에 이용된 수정된 48 시험계통을 보이고 있다.

### 3.1 전기적 거리를 이용한 지역 분할

표1은 전기적 거리를 이용하여 지역 구분을 해보았다. 수정된 48모선 계통에서 pilot 모선인 103모선의 부하를 증가시킨 후, 103모선에서 각 모선까지의 전기적 거리를 구해 보았다. 상대적으로 1지역(101모선~124모선)보다 2지역(201모선~224모선)이 전기적 거리가 먼 것을 볼 수 있다. 따라서 1지역과 2지역의 명확한 지역 구분이 이루어짐을 알 수 있다.

표1. 전기적 거리에 의한 지역분할

bus	electrical distance	bus	electrical distance
101	0.6984094	201	1.669690
102	0.7213008	202	1.658979
103	0.0000000	203	1.790616
104	0.6081840	204	1.402940
105	0.8204451	205	1.630712
106	1.0029060	206	1.740024
107	0.2174247	207	0.9469762
108	0.6046169	208	1.293572
109	0.6013545	209	1.636427
110	0.6457995	210	1.365054
111	0.6689278	211	1.439788
112	0.7508084	212	1.691395
113	0.7712351	213	1.745421
114	0.7794089	214	1.347321
115	0.7221327	215	1.061388
116	0.6748168	216	1.106317
117	0.8936321	217	1.086587
118	0.9363210	218	1.128475
119	0.7107288	219	1.248488
120	0.6795148	220	1.333354
121	0.9068158	221	1.127246
122	0.6617202	222	1.549434
123	0.9628947	223	1.547922
124	0.5608949	224	1.456680

### 3.2 VSSA를 이용한 지역 분할

표2는 VSSA를 이용한 전압 제어 지역의 정의에 의해 수정된 48모선에 대해 결과를 나타냈다. 일정한 전압 제어 지역은 독특한 전압 안정도의 특징을 가지므로, 각 모선의 Q-V 곡선을 작성하여 그 꼭지점에서 무효 전력 공급 한계를 가지는 발전기를 조사하였다. 그 결과, 1지역(101~124모선)에서는 101, 113, 115, 116, 215, 216 발전모선이, 2지역(201~224모선)에서는 115, 116, 201, 213, 215, 216 발전모선이 공통적으로 무효 전력 공급 한계를 가지는 것을 보이고 있다. 이러한 공통적인 발전 모선에 의해 전체 계통을 1지역과 2지역으로 구분할 수 있다.

표2. VSSA를 이용한 지역 분할

bus	exhausted reactive margin source	bus	exhausted reactive margin source
103	101,102,113,115,116,215,216	203	113,115,116,201,202,213,215,216
104	101,102,113,115,116,215,216	204	115,116,201,202,213,215,216
105	101,102,113,115,116,118,215,216	205	113,115,116,201,202,213,215,216
106	101,102,113,115,116,118,215,216	206	115,116,201,202,213,215,216
108	101,107,113,115,116,215,216	208	115,116,201,202,207,213,215,216
109	101,102,107,113,115,116,118,215,216	209	113,115,116,201,202,207,213,215,216
110	101,102,107,113,115,116,118,121,215,216	210	113,115,116,201,202,207,213,215,216,218,221
111	101,102,113,115,116,118,121,215,216	211	113,115,116,201,202,213,215,216,218
112	101,102,113,115,116,118,215,216	212	115,116,201,207,213,215,216
114	101,102,113,115,116,118,121,215,216	214	113,115,116,201,202,213,215,216,218
117	101,113,115,116,118,121,122,215,216	217	113,115,116,201,202,213,215,216,218,221,222
119	101,102,113,115,116,118,121,215,216	219	113,115,116,201,202,207,213,215,216,218,221
120	101,102,107,113,115,116,118,121,215,216	220	113,115,116,201,202,207,213,215,216,218,221
124	101,102,113,115,116,118,121,215,216	224	113,115,116,201,202,213,215,216,218,221

### 3.3 참여 인수를 이용한 지역 분할

표3과 표4는 참여 인수를 이용하여 전압 제어 지역 분할의 결과치를 구해 보았다. 표3은 pilot 모선인 103 모선의 부하를 증가시켰을 때, 103모선에 대한 Q-V곡선을 작성하고, 무효 전력 공급 여유의 한계를 가지는 곡선의 꼭지점에서 임계 고유치와 고유치에 대한 좌, 우 고유 벡터를 구해서, 각 모선의 참여 인수를 각각 계산하였다. 이 참여 인수를 기준값과 비교하여 기준값 이상의 참여 인수를 가지는 모선들(101모선~124모선)을 전압 제어 지역이라고 설정하였다. 표4는 pilot 모선을 203모선으로 잡고, 203모선의 부하 증가시 각 모선과 203모선과의 참여 인수를 나타내었다. 각 모선과의 참여 인수를 비교해 기준치 이상의 값을 가지는 모선들(201모선~224모선)을 전압 제어 지역으로 설정하였다.

표3. 참여인수를 이용한 지역분할 (103모선 부하 증가)

bus	participation factor	bus	participation factor
101	0.02963	201	-
102	0.02739	202	-
103	0.27202	203	0.00003
104	0.03146	204	0.00000
105	0.02038	205	0.00000
106	0.01540	206	0.00001
107	-	207	-
108	0.00315	208	0.00000
109	0.02766	209	0.00001
110	0.01032	210	0.00001
111	0.00924	211	0.00001
112	0.00823	212	0.00000
113	0.00363	213	-
114	0.00580	214	0.00002
115	0.00271	215	0.00010
116	0.00283	216	0.00004
117	0.00029	217	0.00000
118	-	218	-
119	0.00583	219	0.00003
120	0.00872	220	0.00002
121	-	221	-
122	-	222	-
123	-	223	-
124	0.03512	224	0.00007

표4. 참여인수를 이용한 지역분할 (203모선 부하 증가)

bus	participation factor	bus	participation factor
101	-	201	0.04307
102	-	202	0.04000
103	0.00002	203	0.45136
104	0.00002	204	0.04460
105	0.00001	205	0.02827
106	0.00002	206	0.02099
107	-	207	-
108	0.00001	208	0.00422
109	0.00006	209	0.03967
110	0.00004	210	0.01353
111	0.00011	211	0.01257
112	0.00013	212	0.01085
113	0.00030	213	0.00644
114	0.00005	214	0.00756
115	0.00000	215	0.00314
116	0.00001	216	0.00356
117	0.00000	217	0.00030
118	-	218	-
119	0.00002	219	0.00759
120	0.00003	220	0.01143
121	-	221	-
122	-	222	-
123	-	223	-
124	0.00001	224	0.05172

### 3.4 각 방법 비교

2차 전압 제어를 위해 전압 제어 지역 분할을 하는 세 가지 방법에 대한 수정된 48모선 계통의 적용 결과를 비교해 보았다.

전기적 거리를 이용한 방법은 간단한 행렬식으로 이루어지므로 빠르게 지역 분할을 할 수가 있다. 그러나 관심 지역과 그 외의 지역을 분할할 때 전기적 거리의 기준값을 정해야한다는 문제점으로 불분명한 지역 분할이

이루어지게 된다. VSSA에 의한 방법은 Q-V 곡선을 구하고, 직접적으로 무효 전력 공급의 부족을 측정할 수 있으나, 모든 부하 모선의 Q-V 곡선을 구해야 되므로, 많은 계산량이 필요하고, 이에 따라 계산 속도도 저하된다. 그러나 무효 전력 공급 한계를 가지는 발전기 모선에 대한 정보로 정확한 지역 분할을 할 수 있는 장점이 있다. 마지막으로 참여 인수를 이용한 전압 제어 지역 분할은 자코비안의 고유치 분해를 통해 참여 인수가 얻어지므로, 여기서 얻어진 고유치를 이용해 계통의 전압 안정도를 판명 할 수 있는 부수적 효과가 주어진다. 또한 사례 연구에서 보인 것처럼, 정확한 전압 제어 지역을 설정할 수 있다. 또한 참여 인수는 계통이 전압 불안정을 나타낼 때, 가장 효율적인 무효 전력 보상을 수행하는데 있어 심각한 계통 지역을 정하는데 이용된다. 예를 들면, 전압 불안정의 해결을 위해 Static Var Compensator (SVC)를 장착하기 위한 가장 효율적인 위치를 선정하는데 이용될 수 있다[4].

## 4. 결론

2차 전압 제어를 위한 전압 제어 지역 설정을 본 논문에서 설명한 세 가지 방법에 의해 수정된 48모선 계통에 적용시켜 보았다.

전기적 거리를 이용한 지역 설정은 계산 시간이 세 가지 방법 중에서 제일 빠르나 기준치의 설정에 어려움을 가지므로 정확한 결과를 얻기가 어렵다. 이에 반해 VSSA는 무효 전력 한계를 이용하므로 정확성에서는 우수한 결과를 보일 수 있으나, 많은 계산량을 요구하므로 계산 속도 면에서 많은 시간이 요구된다. 참여 인수를 이용한 지역 설정은 앞선 두 방법과 비교해 볼 때, 계산 속도는 고유치 계산과 참여 인수의 계산이 필요하므로 전기적 거리를 이용한 방법보다는 느리나, VSSA를 이용한 지역 분할보다는 빠르다. 이와는 반대로, 정확도 면에서는 VSSA를 이용한 방법보다는 부정확하고, 전기적 거리를 이용한 방법보다는 정확하다.

본 논문에서는 수정된 48모선 계통이 세 가지 방법으로 1지역과 2지역으로 나눌 수 있음을 보인다.

## [참고 문헌]

- [1] P. Lagonotte, J. C. Sabonnadiere, J. Y. Leost, J. P. Paul, "Structural Analysis Of The Electrical System: Application To Secondary Voltage Control in France", IEEE Trans. PWRs, vol. 4, no. 2, May 1989.
- [2] R. A. Schlueter, "A Voltage Stability Security Assessment Method", IEEE Trans. PWRs, vol. 13, no. 4, Nov. 1998.
- [3] B. Gao, G. K. Morison, P. Kunder, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Trans. PWRs, vol. 7, no. 4, Nov. 1992
- [4] Y. Mansour, W. Xu, F. Alvarado, C. Rinzin, "SVC Placement Using Critical Modes of Voltage Instability", IEEE Trans. PWRs, vol. 9, no. 2, May 1994