

우리나라 계통의 전압 제어 지역 설정

백승도 이병준\*  
한국전력공사 고려대학교\*

A Determination of The Voltage Control Area  
To KEPCO system

Seungdo Baik Byongjun Lee\*  
KEPCO Korea University\*

**Abstract** - The secondary voltage control is the method the pilot bus controls the voltage of the voltage control area sufficiently uncoupled form its neighbours within a area to be slightly influenced by the actions carried out in the other areas. This paper presents the comparison of three methods which determines the voltage control area for the secondary voltage control in power system. Additionally, this paper selects the fitted thing of three methods determining the voltage control area, VSSA, and using it applies the procedure determining the voltage control area to KEPCO system.

본 논문에서는 2차 전압 제어를 위한 전압 제어 지역을 설정하는 기존의 두 가지 방법 [1],[2]과 참고 문헌[3]에서 제안하는 방법을 간단히 설명하고 사례 연구를 통해 결과를 비교하였다.

2. 전압 제어 지역 설정

2.1 전기적 거리[1]에 의한 지역 분할

전력 조류 계산에서의 임의의 조류해에서의 수정방정식은 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 식은 전압과 무효 전력의 식으로 표현하면 다음과 같다.

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

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

여기서 임의의 i모선과 j모선의 전압 연관성에 대하여 고려해 보면, 다음 식에서와 같이 j모선 전압의 미소 변화에 따른 i모선 전압의 미소 변화를  $a_{ij}$ 라는 승수로 표현할 수 있다.

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

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

$$a_{ij} = \frac{(\partial V_i / \partial Q_j)}{(\partial V_j / \partial Q_j)} \quad (4)$$

일반적으로  $a_{ij}$ 는  $a_{ji}$ 와 같지 않으나 i모선과 j모선의 대칭적인 특성을 유지하기 위하여 다음과 같은 식으로 전기적 거리를 정의한다.

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

위에서 대표모선의 각 모선에 대한 전기적 거리를 구하고 전기적 거리에 대한 기준치를 정해서 기준치 이하의 값을 가지는 모선들을 전압 제어 지역이라고 설정한다.

2.2 VSSA[2]에 의한 지역 분할

(Voltage Stability Security Assessment)

참고 논문[2]에 의하면 일정한 전압 제어 지역은 독특한 전압 안정도의 특징을 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. 이 정의에 의하여 각 부하 모선의 Q-V 곡선 꼭지점에서, 동일한 무효전력 공급한계를 가지는 발전기를 조사하여, 공통된 발전기를 가지는 모선들을 전압 제어 지역이라고 설정한다.

1. 서 론

최근 전력 계통은 부하증가와 계통의 복잡화, 장거리 화에 따른 무효전력 손실의 증가로 전압 안정도 문제가 대두되고 있다. 또한 전력 산업 구조 개편에 의한 발전 경쟁의 전력 시장 도입에 따른 계통 무효전력 공급의 불확정성의 증가로 전압 안정도 확보는 중요한 문제로 부각되고 있다. 전압 안정도 문제는 광역정전의 원인이 될 수 있으며, 실제 세계적으로 많은 국가에서 송전선로 고장에 이은 부하단의 비정상적인 전압강하로 인한 심각한 국부적 또는 광역정전을 경험했다. 본 논문에서는 계통의 전압 안정도 향상을 위해 고려되고 있는 2차 전압 제어(Secondary Voltage Control)를 위한 전압 제어 지역(Voltage Control Area) 분할의 문제를 다룬다.

전압제어방식에는 크게 primary(1차), secondary(2차), tertiary(3차) 방식으로 나눌 수 있다. 1차 전압제어의 목적은 AVR을 이용한 발전기 출력단의 전압변동 제어등과 같이 국부적인 전압변동을 신속히 제어하는데 목적을 두고 있다. 그러나 제어영역이 발전기 단자전압에 국한되어 있어서 계통사고 또는 과부하로 인한 무효전력 불평형 시 다른 발전기의 무효전력 여유를 고려하지 않아 전압안정도 대처능력이 미흡하다. 2차 전압 제어는 전체 계통을 무효전력 특성이 유사한 부분 계통으로 분할하고, 각 제어지역을 대표하는 대표모선(pilot bus)을 선택한 후, 대표모선의 전압을 각 지역에 있는 발전기들이 담당하게 하는 방식이다. 계통 내에서 대표모선을 선택할 때, 대표모선은 그 전압 제어 지역 내의 전압 안정도를 대표해야 하고, 제어지역의 전압 안정도를 유지하기 위하여 전압 조절을 할 수 있어야 한다. 2차 전압 제어 방식은 대표모선을 통해 제어지역 전체의 전압을 조절하게 되며, 사고로 인한 무효 전력의 발전량이 각 발전기의 무효 전력 여유를 고려하여 담당하게 되어 각 발전기가 균일한 무효 전력 여유를 확보할 수 있다. 즉, 계통고장 또는 중부하시 일어나는 무효 전력 공급의 불균형 문제를 발전기의 용량에 따라 무효 전력 발전량을 분배하게 되므로 이 문제를 해결할 수 있다.[1] 마지막으로 3차 전압제어는 2차 전압제어 시, 대표모선 기준전압에 경제성 최적화 개념을 적용시킨 전압제어 방식이다.

### 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. 대표모선에서 Q-V곡선을 작성하고, 무효전력 여유한계를 가지는 Q-V곡선의 꼭지점에서 임계 고유치(zero eigenvalue)의 계산을 수행해서 대표모선에 대한 각 모선의 참여도를 나타낸다.

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,

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

로 나타내진다. 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.

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

여기서, 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 참여도를 나타낸다. 참여 인수  $P_{ki}$ 가 크면 클수록, k모선이 i모선의 전압 변화에 더욱 큰 영향을 끼친다. 따라서, 대표모선에 대해 각 모선의 참여 인수를 구한 후, 기준치 이상의 값을 갖는 모선들을 전압 제어 지역이라 설정한다.

### 3. 사례 연구

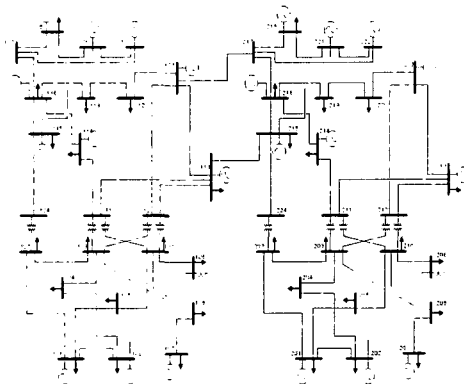


그림 1. 48모선 시험계통

사례 연구에서는 2차 전압 제어를 위한 전압 제어 지역을 설정하는 앞에서 설명한 세 가지 방법의 결과를 비교한다. 세 가지 방법 중에서 가장 정확히 지역분할을 하는 방법을 찾아서 한전 실계통 모델에 적용시켜 보기로 한다. 본 논문에서는 발전 지역에서 부하 지역으로 전력이 주입되는 부하 모선들 중에서 하나(103모선)를 임의의 대표모선으로 잡았다.

#### 3.1 전기적 거리를 이용한 지역 분할

표1은 전기적 거리를 이용하여 지역 구분을 나타낸다. 48모선 계통에서 대표모선인 103모선의 부하를 증가시킨

후, 103모선에서 각 모선까지의 전기적 거리를 구해 보면, 상대적으로 1지역(101모선~124모선)보다 2지역(201모선~224모선)이 전기적 거리가 먼 것을 볼 수 있다.

따라서 전기적 거리를 기준으로 1지역과 2지역이 구분되는 것을 볼 수 있다.

표1. 전기적 거리에 의한 지역분할

모선	electrical distance	모선	electrical distance
101	0.6284094	201	1.699690
102	0.7213008	202	1.658879
103	-	203	1.790616
104	0.6081840	204	1.402940
105	0.8304451	205	1.630712
106	1.0028050	206	1.740024
107	0.2174247	207	0.9469762
108	0.6046169	208	1.293572
109	0.6013545	209	1.636427
110	0.6457965	210	1.365054
111	0.6689278	211	1.439788
112	0.7308084	212	1.691385
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	0.836321	217	1.086387
118	0.9363210	218	1.128475
119	0.7107288	219	1.248488
120	0.6795148	220	1.333354
121	0.9068158	221	1.127346
122	0.6617302	222	1.549434
123	0.9628947	223	1.547922
124	0.5638949	224	1.456680

#### 3.2 VSSA를 이용한 지역 분할

표2는 VSSA를 이용한 전압 제어 지역의 정의에 의해 48모선에 대해 결과를 나타냈다. 각 부하모선의 Q-V곡선의 꼭지점에서 무효전력 공급한계를 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 무효전력 공급한계를 가지는 것을 보이고 있다. 이러한 공통적인 발전 모선에 의해 전체 계통을 1지역과 2지역으로 구분할 수 있다.

표2.VSSA를 이용한 지역 분할

모선	무효전력 여유한계를 가지는 발전기	모선	무효전력 여유한계를 가지는 발전기
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
106	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

표3은 참여 인수를 이용하여 전압제어 지역분할의 결과를 나타낸다. 표3은 대표모선인 103모선의 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.

표3. 참여인수를 이용한 지역분할

모선	participation factor	모선	participation factor
101	0.02353	201	-
102	0.02759	202	-
103	0.27302	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	0.02786	209	0.00001
110	0.01032	210	0.00001
111	0.03924	211	0.00001
112	0.00823	212	0.00000
113	0.00363	213	-
114	0.01680	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

3.4 KEPCO 실계통 적용

2차 전압제어를 위해 전압제어 지역분할을 하는 세 가지 방법에 대한 수정된 48모선 계통의 적용 결과를 비교해 보았다.

전기적 거리를 이용한 방법은 간단한 행렬식으로 이루어지므로 빠르게 지역분할을 할 수가 있다. 그러나 제어 지역을 분할할 때 전기적 거리의 기준값을 정해야 한다는 문제점으로 불분명한 지역 분할이 이루어지게 된다. 두 번째, VSSA에 의한 방법은 Q-V 곡선을 구하고, 직접적 무효 전력 공급 부족을 구할 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 있고, 지역을 나누는데 필요한 임의의 기준값을 정할 필요가 없다. 마지막으로 참여 인수를 이용한 전압 제어 지역 분할은 자코비안의 고유치 분해를 통해 참여 인수가 얻어지므로, 여기서 얻어진 고유치를 이용해 계통의 전압 안정도를 판명할 수 있는 부수적 효과가 주어진다.

전기적 거리나 참여인수를 이용한 지역분할은 제어 지역 설정의 속도가 빠르고, 부수적인 정보를 얻을 수 있는 이점을 가지고 있으나, 기준 모선과 제어지역 설정의 기준값 설정이라는 불분명한 요소를 가지고 있는 것으로 판명됐다. 따라서 전압제어지역설정 정확성을 고려해 볼 때, VSSA를 이용하는 방법이 가장 적합한 방법으로 고려되어 진다.

표4.VSSA를 이용한 지역분할

전압제어 지역	해당 모선	무효전력 여유한계값 가지는 발전기
#1	영주, 녹양, 윤니, 덕계, 원남, 온평, 세종로, 녹번, 불평, 육인, 금촌, 정부, 삼계	일산, 부천, 분당, 용진, 청평, 의왕, 춘천, 화천, 소양
#2	영서, 신길, 광명, 신일, 구공, 오류, 대방, 목동, 천왕, 운수, 시흥, 동서, 잠동	한중, 부천, 평택, 분당, 안양, 청평, 춘천, 강릉, 보령
#3	서인천, 계양, 임학, 목인천, 영풍, 경서, 양곡, 신인천, 인천, 주안, 송원	신인, 서인, 한중, 부천, 평택, 분당, 안양, 청평
#4	신안성, 화성, 판안, 오산, 사강, 평택, 원정, 송탄, 포승, 분남, 아탑, 수지, 잠원	부천, 평택, 분당, 대정, 청평, 의왕, 춘천, 원하
#5	신진천, 청원, 용진, 신영주, 동해, 신계천, 충주, 태백, 원주, 횡성, 속초, 양양	용진, 청평, 춘천, 소양, 안동, 원하
#6	달천, 신서산, 보령, 태안, 대신, 안면, 천안, 부주, 공주, 신일, 대덕, 보은, 남대천	대정, 안동, 임학, 충주, 강릉, 보령
#7	신남원, 영평, 원도, 여천, 여수, 목포, 진도, 대평, 신광주, 단양, 광양, 고흥	의왕, 청평, 임학, 강릉, 무주, 용담, 서천, 영광
#8	횡성, 청하, 신경산, 진량, 안성, 신안, 구미, 삼주, 고아, 김천, 신포항, 경주	의왕, 안동, 임학, 강릉, 무주, 군산, 용담
#9	유산, 북부산, 개령, 모래, 동래, 신양산, 시면, 좌동, 수영, 안양, 연양, 효문	의왕, 강릉, 군산, 용담, 영평, 주암, 횡성, 고리, 유산
#10	충부, 진동, 거제, 시천, 의령, 함천, 산청, 가야, 홍동, 뽕양, 진서, 신김해	의왕, 청평, 강릉, 영평, 여수, 유산, 삼양천

4. 결론

2차 전압 제어를 위한 전압 제어 지역 설정을 본 논문에서 설명한 세 가지 방법에 의해 48모선 계통에 적용시켜서 제일 적절한 방법을 찾은 후, 한전 실계통에 적용시켜 보았다.

표4는 세 방법 중 가장 적합한 VSSA를 이용하여 각 부하모선의 Q-V 곡선 꼭지점에서 무효전력 한계를 가지는 발전기를 조사하여 10개 제어지역으로 구분하였고, 아래 그림2와 같이 나타내었다. 10개 지역은 수도권 4개 지역, 나머지 6개 지역으로 구분되어 진다.

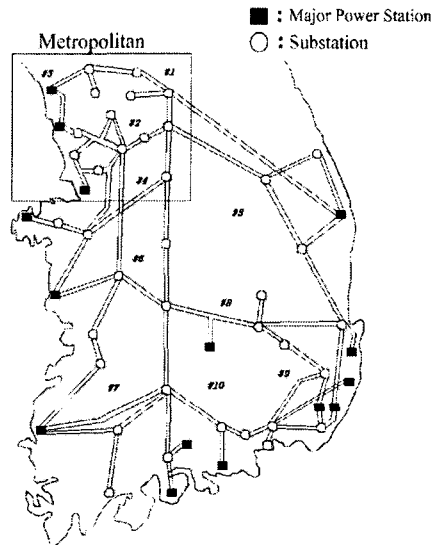


그림 2. 우리나라계통의 전압제어지역 설정

국내에 2차 전압제어 방식을 적용하기에는 한전 계통의 특수성, 무효전력 보상문제 등 많은 문제점을 내포하고 있다. 그러나, 본 논문에서 제시한 우리나라 계통의 전압 제어지역 설정을 통해 2차 전압제어 방식의 국내 적용가능성을 검토해 보고, 무효전력의 효율적인 확보방안을 통해 조상설비 설치계획 등을 검토해 보고자 한다.

[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 Vltage Instability", IEEE Trans. PWRs, vol. 9, no. 2, May 1994