

지역별 전압특성 분석을 통한 대표 모선 선정 방안

최윤희*, 서상수*, 김태균*, 이병준*, 권세혁*, 송인준**
고려대학교*, 한전전력연구원**

The selection of pilot buses using analysis voltage profile of each area

*Yun-Hyuk Choi, *Sangsoo Seo, *Tae-Kyun Kim, *Byongjun Lee, *Sae-Hyuk Kwon, **Injoon Song
*Korea University, **KEPRI

Abstract - 계통의 전압 안정성을 향상시키기 위해서는 무효전력의 원활한 공급이 필요하다. 무효전력은 지역적 특성이 다르고 국지적인 영향을 받기 때문에 전체 계통의 전압을 동일한 기준으로 관리 및 제어하기는 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 프랑스 EdF와 이탈리아 CESI에서는 전체 계통을 계통 특성이 반영된 소규모 지역들로 구분하고 지역 내 주요 모선의 감시를 통한 지역별 전압 제어 방안을 연구하여 실 계통에 적용하고 있다.

본 논문에서는 지역별 전압 감시 및 제어를 위해 지역의 전압 특성을 가장 잘 나타내는 대표 모선 선정 방안을 소개하고 시험 계통에 적용하여 적절성을 검증한다.

1. 서 론

우리나라 계통은 지속적인 부하의 증가에 따른 중 부하 상태로 인해 계통이 안정도 한계 근처에서 운용되고 있고 장거리 송전으로 인한 무효전력 손실이 증가하고 있으므로 이에 대한 대비가 필요하다. 그러나 현재의 전압 유지 기준은 지역적 특성을 고려하지 않고 전체 계통에 동일하게 적용되고 있어 안정한 전압을 유지하기 위한 투자 및 운용비용이 증가하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 프랑스 EdF와 이탈리아 CESI에서는 전기적 거리(electrical distance)의 개념을 이용하여 전체 계통을 소규모 지역으로 구분하고 지역별 전압제어를 실시하고 있다[1][2]. 실제 이 방안을 실 계통에 적용하기 위해서는 현재와 같이 안정도 해석을 통한 취약 모선의 전압을 유지하는 방법만으로는 부족하고 지역 내의 대표 모선들로 모든 부하모선들을 감시하고 제어할 수 있는 체계가 필요하다. 그러므로 지역별 전압제어에 앞서 대표 모선의 선정이 선행되어야 한다.

대표 모선은 지역 내의 부하 모선들의 전압특성을 잘 나타내야 하고 계통의 변화에 민감해야 하기 때문에 지역별 전압 특성을 분석해서 선정되어야 한다[3].

따라서 본 논문에서는 전기적 거리의 개념과 무효전력 예비력 감시를 통한 대표 모선 선정 방안을 소개하고자 한다. 사례연구에서는 제주계통의 대표 모선을 선정해 보고 외란 이후 전압을 회복하는 과정에서 모선들 간의 전압 변화 비교를 통해 적절성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 전기적 거리의 개념

전기적 거리란 'Information 이론의 관점에서 두 모선 사이가 얼마나 전기적으로 떨어져있어서 상호 전압 결합성이 있는나'를 나타낸다. 일반적으로 우리가 알고 있는 임피던스와 그 개념이 유사하며 전력조류 방정식에서 전압과 무효전력의 관계를 고려한다[4].

2.1.1 전기적 거리 계산

임의의 해에서 전력조류 방정식을 다음과 같이 표현한다.

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

식(1)에서 보면 전압안정도의 관점에서 전압과 무효전력의 관계에 관심이 많으므로 전압과 무효전력의 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 $[\partial Q/\partial V]$ 는 식(1)에서 보면 전력조류 계산의 자코비안 행렬이다. 식(2.2)의 $[\partial V/\partial Q]$ 는 $[\partial Q/\partial V]$ 의 역행렬로 감도행렬(sensitivity matrix)이라고 한다.

계통에서 어떤 i모선과 j모선 사이의 전압의 연관성에 대하여 고려하여 본다. j모선 전압의 미소변화에 따른 i모선 전압의 미소변화를 a_{ij} 라는 지수로 표현하면 다음과 같다.

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

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

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

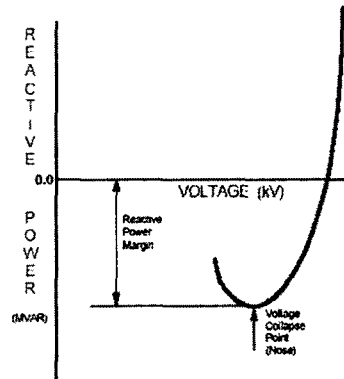
일반적으로 a_{ij} 와 a_{ji} 는 다르지만 대칭적(symmetric)인 특성을 고려하여 다음과 같은 식으로 전기적 거리를 정의한다.

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

2.2 무효전력 예비력 해석

본 논문에서는 상용 프로그램인 VSAT을 이용해서 계통의 각 부하모선에서 Q-V곡선을 작성하고 무효전력 여유를 산정하였다. 일반적으로 Q-V곡선의 작성 절차는 다음과 같다.

- (1) 먼저 Q-V곡선을 작성 할 계통 내의 주요모선을 선정한다.
- (2) 계통 내의 모선에 가상의 동기조상기(Synchronous compensator)를 붙인 다음, 동기조상기의 계획 출력전압을 조금씩 단계적으로 변화시켜서 조류계산을 수행한다.
- (3) 조류해가 구해지면 이때의 모선전압(V)과 조상기의 무효전력 출력(Q)을 기록하고 충분한 데이터가 작성될 때까지 조상기의 출력전압을 변화시켜 해를 구한다.
- (4) 이러한 과정을 반복하여 V-Q곡선을 그리고 무효전력 여유를 산정한다.



<그림 1> Q-V 곡선

2.3 대표 모선 선정 방안

대표 모선은 지역 내의 부하모선들의 전압특성을 잘 나타내야 하고 계통 변화에 민감해야 한다. 이는 계통 사고 시 발전기의 출력 및 조상설비들의 동작에 따른 모선 전압의 변화가 중요하기 때문이다. 이러한 사실을 바탕으로 다음과 같이 두 가지 조건을 고려하여 대표모선을 선정한다.

- ◆ 다른 모선들까지의 전기적 거리의 합이 가장 작은 모선
- ◆ 무효전력 여유가 가장 적고 전압 변동이 큰 부하모선

다른 모선들까지의 전기적 거리의 합이 가장 작은 모선은 발전기군의 전기적 중심과 가깝기 때문에 지역 내의 발전기들의 제어에 가장 민감하다. 또한 무효전력 여유가 가장 적고 전압 변동이 큰 부하모선은 전체 지역에서 볼 때 이 부하 모선이 가장 전압 불안정점에 가깝기 때문에 무효전력 변화에 민감하다[5][6].

이러한 사항들을 고려하여 2.4절의 사례 연구를 통해 시험 계통인 제주 계통에 적용해본다.

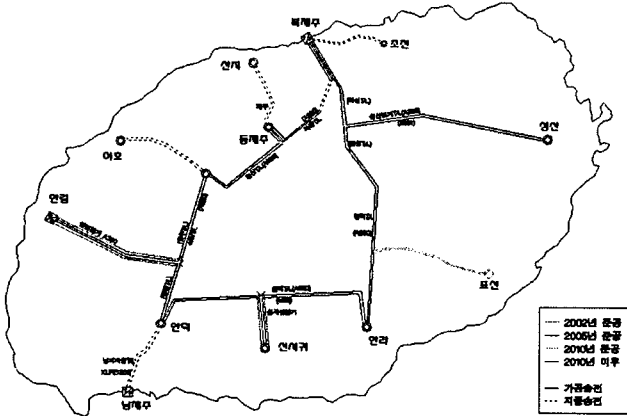
2.4 사례 연구

제주 계통은 제주-해남 간 HVDC 송전선로를 통하여 전체 제주 부하의 50%가 넘지 않도록 운전되고 있다. 이는 제주 부하에 있어 필요한 발전량의 절반 가까이를 육지로부터 공급받음을 의미한다. 그리고 제주지역 내의 발전기들은 용량이 크지 않고 우회 선로가 많이 있지 않아 심각한 선로 사

고 시 조류계산을 수행했을 경우 발전하는 경우가 발생하기도 한다. 이 점을 고려하여 적절하게 대표 모선 선정 방안을 제주 계통에 적용한다. 다음 표1은 본 논문에서 모의한 2005년 제주 계통의 개요이고 그림 2는 제주 계통의 계통도이다.

〈표 1〉 제주 계통의 계통 개요

| 유효전력[MW] | | 무효전력[MVar] | | 투입된 발전기 수 |
|----------|-------|------------|-------|-----------|
| 발전량 | 부하량 | 발전량 | 부하량 | |
| 495.5 | 490.9 | 101.8 | 214.5 | 12 |



〈그림 2〉 제주 계통도

2.4.1 대표 모선 선정 결과

프랑스 EdF와 이탈리아 CESI가 운영하고 있는 지역별 전압 제어 방안은 전체 계통을 계통 특성이 반영된 소규모 지역들로 구분하고 지역 내 대표 모선의 감시를 통해 계통의 제어가 이루어진다. 따라서 대표모선 선정에 앞서 전체 계통을 소규모 지역으로 나누는 지역분할이 먼저 이루어져야 한다. 그러나 본 논문에서 대표 모선을 선정하고자 하는 제주계통은 육지 계통에 비해 작고 밀접하게 연관되어 있으며 HVDC 송전선로를 통해 필요한 발전량의 절반 가까이를 육지로부터 공급받고 있어서 전기적 거리의 개념을 이용하여 지역분할을 실시할 경우 하나의 제어지역으로 나타난다. 그러므로 본 절에서는 별도의 지역 구분 없이 대표 모선을 선정하였다. 제주 계통의 대표 모선 선정 결과는 표 2에 나타내었다.

〈표 2〉 각 부하모선에서 다른 부하모선들까지의 전기적 거리의 합 및 무효전력 여유

| 부하모선 | 전기적 거리의 합 | 무효전력 여유[MVar] |
|-------|-----------|---------------|
| 제주 TP | 3.3244 | 263 |
| 동제주 | 9.5208 | 290 |
| 신제주 | 9.5636 | 320 |
| 한림CC | 9.9320 | 423 |
| 안덕 | 9.5547 | 361 |
| 신서귀 | 10.0461 | 309 |
| 한라 | 9.7432 | 314 |
| 성산 | 10.3990 | 265 |

표 2에서는 계통이 정상상태일 때 154kV 이상의 모선만을 고려한 것으로 제주 T/P 모선이 대표 모선으로 선정되었다. 다른 모선들까지의 전기적 거리의 합을 고려했을 경우 제주 T/P모선을 쉽게 대표 모선으로 판단할 수 있으나 무효전력 여유를 고려했을 경우 판단하기가 쉽지 않다. 이것은 제주 계통의 특성 상 HVDC 송전선로를 통해서 많은 발전량을 공급받고 제주 지역 내에는 대용량의 발전기들이 없고 그 투입 발전기 수도 작아서 각 모선들이 비슷한 무효전력 분배량을 가지기 때문에 풀이된다.

2.4.2 선정된 대표모선의 검증

제주 계통의 대표 모선으로 선정된 제주 T/P모선이 정상적인 대표 모선의 기능을 할 수 있을 지는 실제로 계통을 운영해보아야 알 수 있다. 그러나 현재의 모의환경에서는 이것이 어렵기 때문에 적절한 검증을 하기는 쉽지 않다.

본 논문에서는 실제 계통을 운영한다고 가정하고 상정사고 후의 제주T/P 모선과 다른 모선들 간의 전압 변화를 분석해서 제주T/P 모선이 대표 모선으로 적절한지를 검증한다. 즉 계통에 외란이 발생했을 때 제주 T/P 모선의 전압을 감시하고 신뢰도 기준 이상으로 올랐을 때 다른 모선의 전압의

변화를 관찰해서 전압 회복의 정도로 모선들 간의 민감도를 판단한다. 상정사고 시나리오는 제주T/P 모선과 동제주 모선 간 1, 2회선 선로를 단락시키는 것이고 조류계산을 통해서 154kV 이상 부하모선들의 전압을 관찰했다. 아래의 표 3은 사고 전, 후 및 제주T/P 모선에 55MVar의 switched shunt 투입 후 제주T/P 모선과 신서귀, 한라 모선의 전압을 나타낸 것이다.

〈표 3〉 계통 변화에 대한 제주 T/P모선과 신서귀, 한라의 전압변화

| 부하모선 | 사고 전 전압 | 사고 후 전압 | switched shunt 투입 후 전압 |
|-------|---------|---------|------------------------|
| 제주 TP | 1.04674 | 1.01285 | 1.04008 |
| 신서귀 | 1.02550 | 0.87685 | 0.92588 |
| 한라 | 1.03056 | 0.91132 | 0.95465 |

표3을 보면 제주T/P 모선은 사고 후에도 1.0pu 이상의 전압을 유지한다. 따라서 대표 모선의 전압유지를 목적으로 하는 것이 아니라 전압변화에 대한 유사성이 있는가를 목적으로 한다면 55MVar의 switched shunt를 제주 T/P 모선에 투입한 후의 신서귀, 한라 모선의 전압은 사고 전의 수준으로는 올라오지 못했지만 심각한 수준은 벗어난 것으로 판단된다. 따라서 제주 T/P 모선의 전압 감시를 통해 다른 부하모선의 전압이 계통 사고에 의해 비슷한 전압 변화를 보여주기 때문에 명확하지는 않지만 대략적으로 선정된 제주T/P 모선에 대한 적절성을 검증하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 전기적 거리의 개념과 무효전력 예비력 감시를 통한 대표 모선 선정 방안을 소개하고 제주 계통의 대표 모선을 선정해 보았다.

제주 계통의 경우는 단일 계통으로 운영되어 대표 모선의 기능이 큰 효용성을 가지기는 어려우나 다수의 지역으로 구분되는 계통의 경우 대표 모선 감시를 통해 지역적 특성을 가지는 무효전력의 함리적 제어로 전체 모선의 감시가 가능해진다.

특히 우리나라의 경우 수도권 전압안정성 향상을 위해 지역별 전압제어 방안을 도입하려고 준비하고 있고 그 타당성 조사를 하고 있다. 따라서 지역별 전압제어를 위해 필수적으로 필요한 적절한 대표 모선 선정은 무효전력 손실을 줄이고 안전한 전압 유지를 가능하게 한다는 측면에서 유용하다.

앞으로 해결해야 하는 문제점은 제주계통에 적용한 바와 같이 선정된 대표모선의 적절성을 판단할 수 있는 방안을 찾는 것이다. 실제로 지역별 전압제어를 계통에 운영하고 있는 프랑스 EdF와 이탈리아 CESI에서는 대표 모선의 선정 기준으로 계통 운영자의 판단을 중요한 항목에 포함하고 있다. 또한 하나의 제어지역에 두 개 이상의 대표 모선이 선정될 수도 있다. 이것은 정해진 기준으로 대표 모선을 선정하더라도 그 모선이 계통의 구성이나 발전기들의 분포, 부하 수준의 변화에 따라 대표 모선으로 제 기능을 못 할 수도 있기 때문이다.

그러므로 대표 모선 선정의 객관적인 기준들을 세우고 기준에 맞게 선정된 대표 모선의 적절성을 판단하는 명확한 방안이 있어야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 전력 기술개발 기반기금의 연구지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] J. P. Paul, J. Y. Leost, and J. M. Teseron, "Survey of the secondary voltage control in France: Present realization and investigation", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 2, no. 2, May 1987, pp. 505-511.
 [2] S. Corsi, "The Secondary Voltage Regulation in Italy", Panel Session on "Secondary Voltage Control" IEEE/PES 2000 Summer Meeting, Jul. 16-20, Seattle, Washington.
 [3] A. Conejo, M. Aguilar, "A Nonlinear Approach To The Selection Of Pilot Buses For Secondary Voltage Control", IEE Power System Control and Management, Conference Publication, no. 421, April 1996.
 [4] 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. on Power Systems, vol.4, no. 2, May 1989.
 [5] A. Conejo, J. I. de la Fuente, S. Goransson, "Comparison of Alternative Algorithms to Select Pilot Buses for Secondary Voltage Control in Electric Power Network", Proceeding of the IEEE MELECON'94 International Conference. vol. 3, pp. 940-943. Antalya, Turkey, April 1994.
 [6] R. A. Schlueter, "A voltage stability security assessment method", IEEE Trans. Power Systems, vol. 13, no. 4, Nov. 1998, pp. 1423-1438.