

전압안정도 제약을 고려한 조상설비 최적투입계획

성웅, 김태균, 이병준, 송화창\*, 김태균\*\*, 신정훈\*\*  
고려대학교, 서울산업대\*, 한전전력연구원\*\*

Optimal Var sizing and Allocation Considering Voltage Stability Margin

Ung Sung, Taegyun Kim, Byungjun Lee, Hwachang Song\*, Taegyun Kim\*\*, Jeonghoon Shin\*\*  
Korean University, Seoul National University of Technology\*, KEPRI\*\*

**Abstract** - 사회가 발전함에 따라 전력 수요는 기하급수적으로 증가한다. 늘어나는 전력 수요는 전압안정도 마진을 감소시키고 이는 대정전의 원인이 될 수도 있기 때문에 전력계통에서 전압유지 및 전압안정도 여유확보는 중요한 이슈가 된다. 무효전력은 전압과 큰 관련이 있기 때문에 전압유지 및 전압안정도 여유확보 방안으로써 가장 최우선적으로 고려되는 사항이 조상설비를 추가하는 것이다. 하지만 조상설비를 추가하기 위한 용지확보, 비용, 환경문제 등의 영향으로 인한 전원의 원격화, 편제화 그리고 부하의 수요집중화에 의한 송전설비의 장거리화와 대용량화가 진행되고 있으며 이와 같은 장거리 송전에 따라 계통손실의 증가와 수요지의 저전압문제가 발생하고 있다. 그러므로 전압안정도 마진을 고려하면서 조상설비를 적절하게 투입하는 것은 중요한 고려사항이다. 본 논문은 2007년 8월 EMS Peak 데이터를 시뮬레이션 해 조상설비를 투입함에 있어 최적의 위치와 용량을 산정하는 위한 방안을 제시한다. 이러한 조상설비 추가를 최소로 하는 경제적인 측면 뿐 아니라 전압안정성 측면도 고려하기 위한 부하 scaling 기법을 적용해 전압안정도 여유를 확보하기 위한 방안을 추가한다. 또한 여러 가지 상정사고를 가정 한 후 heuristic method를 적용해 조상설비 최적화를 수행하고 한진 데이터를 근거로 추가할 조상설비의 가장 적절한 투입위치 및 용량을 산정해 제시한다.

1. 서 론

최근 전력계통은 지속적인 전력수요의 증가에 따라 설비용량의 규모가 급속히 증가하였고 발전, 송·변전, 배전 설비 등 각종 전력설비의 추가 건설을 지속적으로 계획하고 추진하고 있지만 현실은 추가할 수 있는 부지 및 설비가 제한적이다. 그래서 불필요하게 발전설비를 비롯한 전력설비는 수요지와 상당한 거리를 가지게 되고 이로 인해 큰 계통손실과 무효전력 공급부족에 따른 부하 측의 전압이 떨어지는 현상이 생긴다. 부하 측의 전압이 떨어지면 '전압붕괴'(Voltage Collapse) 현상이 생긴다. 이 '전압 붕괴' 현상은 세계 여러나라에서 대규모 정전의 원인이 되고 있다. 이러한 대정전 문제를 해결하기 위해 계통계획에서 무효전력 계획은 매우 중요하다. 왜냐하면 부족한 무효전력을 보충하기 위한 설비가 필요하지만 공간부족으로 인한 설치 부지의 제약 및 안정성의 확보를 전제로 한 경제적인 제약을 받고 있기 때문이다. 그러므로 조상설비의 적절한 위치 및 용량을 산정하는 것은 전압안정도 측면 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 보다 효율적일 수 있다. 과거에는 계통항상을 위한 체계적이고 효과적인 계획수립과 운영이 이루어지지 않았다. 주로 계통 운영자의 경험이나 판단 또는 시행착오적인 방법만으로 조상설비 계획을 하였고 이로 인해 비효율적인 계획이 이루어졌었다. 그러므로 보다 체계적이고 효율적인 조상설비 계획이 필요하다.

본 논문에서는 부하 scaling 기법을 적용한 전압안정도 여유 지수를 고려하는 방법을 적용해[1] 조상설비 추가할 최적의 위치와 최소의 용량을 시뮬레이션을 통해 산정한 후 계통의 전압안정성을 유지하면서 경제성을 극대화할 수 있는 방안을 제시한다. 즉, PDIPM 기법을 통해 조상설비 계획을 세우고 추가적으로 전압안정도 여유 지수를 추가한다. 그리고 2007년 EMS Peak 데이터를 기반으로 여러 가지 상정사고를 고려하고 heuristic method를 적용해 미래계통의 최적의 조상설비 투입위치와 용량을 제안한다.

2. 본 론

2.1 PDIPM 기법을 통한 조상설비 투입 계획의 정식화 및 해법

PDIPM(Primal Dual Interior Point Method) 기법은 부등식 제약의 취급에 다소 어려움이 있는 뉴턴법에 기반하지만 대수 Barrier 함수법을 도입하여 부등식 제약을 효과적으로 다룰 수 있게 한 비선형 내점법이다.[2][3] 즉, 슬랙변수를 도입해서 부등식 제약을 등식 제약으로 변환한 후 대수 Barrier 함수법을 사용하여 슬랙변수가 음의 값을 갖지 않도록

하면서 뉴턴 탐색 방향으로 비선형 해를 찾는 기법이다. 본 논문에서는 PDIPM 기법을 통하여 조상설비 최적화를 수행하고 상정사고를 고려한 조상설비 최적화를 고려하기 위해 heuristic method[4]를 적용한다. 조상설비 계획문제의 정식화는 아래와 같다.

$$\min f(x) = \sum_{k=1}^S Bs_k \quad (k \in S) \quad (1)$$

$$s.t. P_{Ti} + P_{Li} - P_{gi} = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Ti} + Q_{Li} - Q_{gi} - B_i V_i^2 = 0$$

$$P_{slack}^{\min} \leq P_{slack} \leq P_{slack}^{\max}$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}$$

$$B_i^{\min} \leq B_i \leq B_i^{\max}$$

$$Bs_i^{\min} \leq Bs_i \leq Bs_i^{\max}$$

위 식에서 P, Q는 각각 발전기의 유효/무효전력 출력을 나타내며 V는 각 모선의 전압, B는 기설 가변 조상설비를 나타낸다. S는 추가로 투입될 조상설비의 투입 후보지이며 Bs는 증설 및 신설되는 조상설비 용량을 나타낸다. 여기서 목적함수인 식 (1)은 증설 및 신설 조상설비 투입량을 최소로 하는 해를 탐색하는 목적함수이고 식 (2)는 전력계통의 유효/무효전력 수급 방정식을 나타낸다.

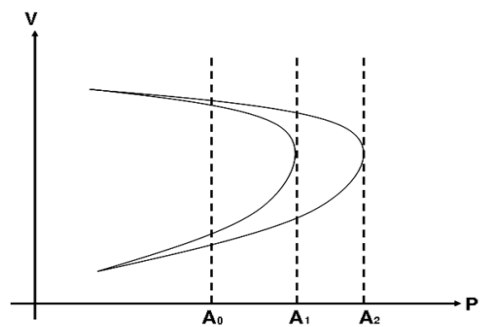
2.2 전압안정도 여유 지수

계통의 여유를 확보하기 위한 조상설비 투입 운용 전략 수립에 있어 전압여유량을 확보하기 위한 방법으로 부하 scaling 기법이 있다. 즉, 확보하고자 하는 전압안정도 여유 증가분을 가정하고 부하 증가량의 비율을 동일하게 비율로 가정하는 것이다. 여기서 발전기의 발전량도 동일한 비율로 발전한다고 가정한다.

본 논문에서는 전압안정도 여유를 확보하기 위해 조상설비 계획의 정식화에서 유효/무효전력 수급방정식에 부하 scaling 기법을 적용해 전압안정도 여유 지수(a)를 아래와 같이 포함하였다. 여기서 slack bus는 제외한다.

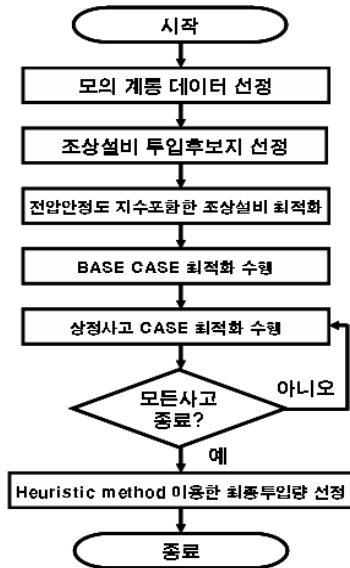
$$s.t. P_{Ti} + \alpha P_{Li} - \alpha P_{gi} = 0 \quad (3)$$

$$Q_{Ti} + \alpha Q_{Li} - Q_{gi} - B_i V_i^2 = 0$$



<그림 1> 전압안정도 여유 지수를 고려한 PV곡선

전압안정도 여유 지수( $\alpha$ )의 값에 따른 PV 곡선은 <그림1>과 같다. 현재 계통의 운전점을  $A_0$ 이라고 하면 유효전력에 따른 전압여유량은 곡선 X1을 따른다고 가정한다. 최대 전압여유량은  $A_1$ 이 된다. 그런데 계통에서 전압여유량이  $A_2$ 만큼을 필요로 하게 되면 조상설비 추가가 필요하게 된다. 그러므로 조상설비 투입 계획에서 전압안정도 여유 지수가 포함된 수식 (3)은 PDIPM 알고리즘에 의해 해를 탐색하며 탐색된 해는 ( $A_2 - A_1$ )만큼의 전압안정도 여유를 확보하기 위한 목적함수인 최소량의 조상설비 용량을 나타낸다. 아래 알고리즘은 심각한 상정사고를 고려한 전압안정도 여유 지수를 포함한 조상설비 최적화 과정을 나타낸 알고리즘이다.



<그림 2> 전압안정도 여유 지수를 포함한 조상설비 최적화 과정

### 2.3 모선번호 ordering

전력계통은 모선 간 연계선로가 적기 때문에 어드미턴스 행렬 및 hessian행렬의 대부분의 element가 0인 sparsity 특성을 가지고 있다. 그러나 기본 행렬을 그대로 사용하게 되면 LU분해 과정에서 fill-in 요소에 의하여 많은 메모리를 필요로 하게 되어 이것은 곧 계산속도를 저하시키게 되므로 fill-in 요소를 최대한 줄이는 것은 중요한 고려사항이다. 본 논문에서는 보다 효율적으로 fill-in 요소를 감소시킬 수 있는 모선번호 ordering 기법[5]을 적용하였으며 ordering 과정 이후에도 존재하게 되는 fill-in 요소의 위치를 미리 알아내어 이를 위한 가상선로를 추가한다. 특히 모선 ordering 및 가상선로를 추가하는 방안은 대규모 계통일 수록 더 큰 효과를 보일 수 있으며 고성능 LU분해 알고리즘의 적용을 위하여 적절한 방법이다.

비선형 내점법은 슬랙변수를 도입해 부등식 제약을 등호 제약으로 바꾸고 해를 feasible 영역 안에서 탐색한다. 이때 특정 변수가 boundary에 근접하면 슬랙변수의 값이 0에 가깝게 되고 이 값이 분모가 되어 hessian행렬의 특정 성분을 매우 큰 값(무한대)으로 만들어 해의 탐색에 수치적 어려움을 가지게 되기 때문에 본 논문에서는 행렬의 sparsity 특성을 이용한 고성능 LU분해법을 적용하여 수행속도를 향상시켰으며 LU분해 과정에서 수치적 문제를 발생시키는 성분을 적절한 값으로 조정하여 수렴성을 향상시키는 방안을 적용하였다.[6]

### 3. 사례 연구

2007년도 8월 EMS Peak 데이터를 기반으로 2009년도 계통상태에 대해 조상설비 추가 설비계획을 하였다. 투입 후보지는 현실성과 정확성을 고려하기 위해 12개 전압제어지역의 154kV 모선 중에서 중요성과 지역성을 고려해 73개의 후보지를 선정하였다. 각 후보지별 최대 투입 가능 용량은 300MVar로 산정하였고, 부하 scaling 기법을 정확하게 적용하기 위해 다년간의 실제 부하수준을 고려해 매년 6.3%의 최대전력량 증가량을 가정하였고 전압안정도 여유 지수는 5%로 선정하였다. base case 및 4개 상정사고를 고려해서 조상설비 투입용량이 큰 순서대로 투입순서를 정하는 heuristic method를 적용하였다. 여기서 4개 상정사고(선로 루트 사고)는 화성-아산, 곤지암-신체전, 서서울-신온양, 신용인-신진전으로 345kV 용통선로이다.

<표 1> 연간 Peak시 최대전력 및 증가율[7]

연도	최대전력	전년대비 최대전력증가율(%)
2007	62285	5.58
2006	58994	7.99
2005	54631	6.57
2004	51264	8.19
2003	47385	3.52
2002	45773	6.14

다음은 2007년도 8월 EMS Peak 계통에 대한 조상설비 최적화 결과로써 Base Case와 전압안정도 여유 지수 5%를 고려한 화성-아산 루트사고에 대한 조상설비량은 아래와 같다.

<표 2> 상정사고에 따른 조상설비 투입 용량

	Base Case	화 성 - 아 산 contingency
조상설비량	1702.87	3526.74

총 18개소의 투입위치가 결정되었고 총 투입용량은 3526.74 MVar이다. 이 용량은 2009년 미래계통을 모의한 결과이다. 즉, 매년 6.3%의 Peak 부하증가율을 근거로 하고 전압안정도 여유 지수 5%를 고려한 결과이다. 여기서 heuristic method 기법을 적용해서 순차적으로 조상설비 추가량을 예상했으나 화성-아산사고가 가장 심각한 사고일 뿐 아니라 추가 조상설비 투입량이 나머지 다른 상정사고 경우를 커버해 더 이상 추가 조상설비를 계획하지 않아도 되는 결과가 나왔다. 즉, 다른 상정사고는 추가할 조상설비량이 0인 된다. 이 결과는 심각한 상정사고를 고려하고 계통의 운전제약 범위와 전압안정도 여유 지수를 같이 모의함으로써 미래계통의 조상설비 용량과 위치 선정에 있어 보다 정확하고 의미 있는 결과로 판단된다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 하계 Peak 데이터를 근거로 심각한 상정사고를 고려해 미래 계통에 대한 조상설비 최적화를 수행함에 있어 유효/무효 전력 수급방정식에 전압안정도 여유 지수를 포함시켜 전압안정도 마진을 고려한 점에 의의가 있다. 전압안정도 마진을 고려하는 것은 차후에 증가할 부하 수준에 따라 감소하게 될 전압안정도 여유량을 고려함으로써 보다 실질적인 조상설비 계획을 할 수 있다. 그 과정은 PDIPM 기법을 통해 조상설비 계획을 정식화시켰고 더 나아가 부하수준을 고려한 부하 scaling 기법을 적용한 결과와 전압안정도 지수( $\alpha$ )를 동시에 포함시켰다. 그리고 심각한 상정사고를 고려해 추가할 조상설비량을 heuristic method를 적용해 모의하였다. 차후에는 전압안정도 여유 지수 변화에 따른 계통 안정성에 대한 연구와 투입최소화와 비용 최소화를 목적함수로 한 결과를 조상설비 최적화 문제에 추가적으로 연구하면 보다 심도 있는 결과를 가져올 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] EL-Dib, Amagad A., Youssef, Hosam K.M., EL-Metwally, M.M., Osman, Z., "Optimum var sizing and allocation using particle swarm optimization", Electric Power Systems Research, v.77, n.8, p965-972, June, 2007
- [2] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, and R. Yokoyama, "An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.3, 870-877, August 1998
- [3] Victor Quintana, Geraldo Torres, "An Interior Point Method for Nonlinear Optimal Power Flow Using Voltage Rectangular Coordinates", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.4, 1211-1218, 1998
- [4] Thomas, W.R.; Dunnett, R.M.; Dixon, A.M.; Schaff, G.; Cheng, D.T.Y.; Thorp, J.D., "Optimal reactive planning with security constraints", IEEE Power Industry Computer Applications Conference, p79-84, 1995
- [5] A. Brameller, R.N. Allan, Y.M. Hamam, "Its practical application to systems analysis", Pitman Ltd., London, 1976
- [6] 김태균, "비선형 내점법을 이용한 조상설비 최적화 방안 연구", 전기학회 하계학술대회 논문, 2007
- [7] Korea Power Exchange homepage