

비선형 내점법을 이용한 조상설비 최적화 방안 연구

김태균, 김재원, 이병준, 정응수*, 조종만*
고려대학교, 한국전력거래소*

Optimal Reactive Power Planning with a Nonlinear Interior Point Method

Taegyun Kim, Jaewon Kim, Byongjoon Lee, Eungsoo Jung*, Jongman Cho*
Korea University, KPX*

Abstract - 무효전력 계획은 크게 계통운용계획과 투자비용계획으로 구분할 수 있다. 본 논문은 조상설비 투입계획 관점에서 주·쌍대 비선형 내점법을 이용한 조상설비 최적화 모의를 수행한다. 실 계통 규모의 대규모 계통을 모의하기 위하여 모선번호 ordering 기법 및 고성능 LU 분해 기법을 적용하였으며 조상설비 계획문제에 포함되는 이산변수의 처리는 투입위치 및 용량의 정수화를 통하여 최적화 문제에 이산변수를 포함하지 않도록 한다. 본 알고리즘은 2006년도 한전계통의 조상설비 현황을 바탕으로 하여 2008년도 계통상태에 대한 조상설비 투입계획 모의에 적용한다.

1. 서 론

최적 조상설비 투입계획은 최적조류계산의 적용 분야중 하나로서 투입 용량 및 투입위치의 정보를 제공해야 하는 이산변수를 포함한 문제(MIP)이다. 이산변수의 처리를 위하여 분해법이 주로 이용되어 왔으나 비선형성이 강한 전력계통의 특성상 대규모 계통의 적용시 수렴성의 문제를 가지고 있으며 아직까지 이산변수를 완벽하게 다룰 수 있는 방법은 제시되지 못하고 있다. 현재 조상설비 계획 문제는 조류계산을 통하여 시행착오적인 방법으로 계통 운영자의 경험 및 지식에 의존하여 수행되고 있다. 이러한 방법은 많은 시간을 필요로 하게 되며 계통의 경제적 측면에서 최적화된 결과를 제시하기 어렵다. 그러므로 무효전력 계획은 보다 체계적이고 효율적인 계획방안이 필요하다.

본 논문에서는 조상설비 최적화를 수행하기 위한 최적화 기본 알고리즘을 제시하며 대규모 계통의 적용시 발생할 수 있는 문제점 및 해결방안을 제시하였다. 투입위치에 대한 정보를 실제로 투입 가능한 지역으로 사전에 선정하여 위치정보에 대한 이산변수를 제거하였으며 최적해 결과에 대하여 실제 투입 가능한 bank 단위로 정수화하는 방법으로 이산변수를 최적화 문제에서 직접적으로 다루지 않는 방법을 수행하였다. 해의 탐색은 주·쌍대 비선형 내점법 알고리즘을 적용하였으며 해의 고속성 및 수렴성을 향상시키기 위하여 모선번호 ordering 기법 및 고성능 LU분해 기법을 적용하였다.

2. 본 론

2.1 최적화 문제의 구성 및 정식화

조상설비 투입문제를 풀기위하여 조상설비 투입 최소화를 목적함수로 선정한다. 또한 계통이 정상상태 및 상정사고를 고려한 상황에서 적절한 운전범위를 만족해야 하므로 계통 운전조건을 만족하기 위한 모선 전압 및 무효전력 출력제약 등 계통 운전제약을 포함한다. 다음은 목적함수 및 제약의 정식화를 보인다.

$$\min f(x) = \sum_k B s_k \quad (k \in S) \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

여기서, P,Q는 각각 발전기의 유효전력 및 무효전력 출력을 나타내며 V는 각 모선의 전압, B는 기설 가변 캐패시터를 나타내고, tap은 가변 변압기의 탭을 나타낸다. S는 추가로 투입될 캐패시터의 투입 후보지이며 B_s 는 증설/신설되는 캐패시터 용량을 나타낸다. 등호방정식은 전력

계통의 유효/무효전력 수급 방정식을 나타낸다.

최적화 알고리즘에서 이산변수를 직접적으로 다루지 않으므로 증/신설되는 캐패시터의 용량은 선형 변수로 적용하며 변압기의 tap 정보 역시 선형 변수로 처리하였다.

2.2 주·쌍대 비선형 내점법 적용

(1),(2)와 같이 구성된 최적화 문제는 주·쌍대 비선형 내점법 알고리즘에 따라 해를 탐색한다. 먼저, 슬랙변수를 도입하여 부등식제약을 등식제약으로 변형하고 목적함수와 함께 라그랑지 함수를 구성한다. 구성된 라그랑지 함수는 KKT조건을 만족하는 방정식을 구성하고 [2]와 같이 축약된 수정방정식을 구성하고 Newton 법을 적용하여 해를 탐색한다. 비선형 내점법의 알고리즘은 다음과 같다.

Step1 : 초기치 설정 : 주·쌍대변수와 라그랑지 승수가 실행가능영역에서 시작되도록 초기치를 결정한다. 또한, 중심 파라미터 $\sigma \in (0, 1)$ 를 결정한다.

Step2 : 상보값 계산 : 다음 식(3)과 같이 모든 부등식제약으로부터 유도된 상보 값을 계산한다.

$$C_{gap} = \sum_{i=1}^r (l_i z_i - u_i w_i) \quad (3)$$

Step3 : 수렴판정 : 수렴판정은 조류방정식의 최대오차와 상보값이 수렴 한계치 내로 들어오면 종료하고 그렇지 않으면 다음 단계로 진행한다.

Step4 : 배리어 파라미터(μ)의 계산 : 부등식제약을 효과적으로 다루기 위해 도입되는 배리어 파라미터 μ 를 다음과 같은 방법으로 계산한다.

$$\mu = \sigma \frac{C_{gap}}{2r} \quad (4)$$

Step5 : 수정방정식의 해를 계산 : 수정방정식을 계산해서 주변수와 등식제약의 라그랑지 승수의 수정량을 구하고 이것을 통하여 쌍대변수와 부등식제약에 관한 라그랑지 승수의 수정량을 구한다.

Step6 : 최대스텝 길이의 계산 : 단계5에서 구한 각 변수의 수정량에 적용될 최대스텝 길이를 구하기 위한 다음과 같은 방법으로 ratio test를 수행한다.

$$step_P = 0.9995 \min \left[\min \left(\frac{-l}{\Delta l} : \Delta l < 0, \frac{-u}{\Delta u} : \Delta u < 0 \right), 1 \right] \quad (5)$$

$$step_D = 0.9995 \min \left[\min \left(\frac{-z}{\Delta z} : \Delta z < 0, \frac{-w}{\Delta w} : \Delta w > 0 \right), 1 \right] \quad (6)$$

Step7 : 변수의 수정 : 주·쌍대변수의 수정량을 다음과 같이 계산한다.

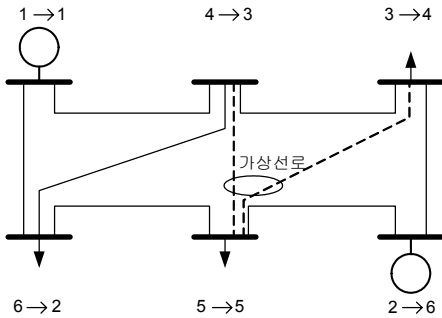
$$(x, l, u)_{k+1}^T = (x, l, u)_k^T + step_P (\Delta x, \Delta l, \Delta u)^T \quad (7)$$

$$(\lambda, z, w)_{k+1}^T = (\lambda, z, w)_k^T + step_D (\Delta \lambda, \Delta z, \Delta w)^T \quad (8)$$

수정 후 단계2로 돌아가서 수렴할 때까지 과정을 반복한다.

2.3 Sparsity Techniques

전력계통은 모선간 연계선로가 적어 Y-bus행렬 및 hessian행렬이 sparsity 한 특성을 가지고 있다. 하지만 기본 행렬을 그대로 사용하게 되면 LU분해 과정에서 fill-in 요소에 의하여 많은 메모리를 필요로 하게 되며 계속속도를 저하시키는 요인이 된다. fill-in 요소의 감소를 위하여 [2]에서는 hessian 행렬의 배열을 재조정하는 방법(Novel data structure)을 제안하고 있다. 본 논문에서는 보다 효율적으로 fill-in 요소를 감소시킬 수 있는 모선번호 ordering 기법[4]을 적용하였으며 ordering 과정 이후에도 존재하게 되는 fill-in 요소의 위치를 미리 알아내어 이를 위한 가상선로를 추가한다. 다음은 모선번호 ordering 및 가상선로 투입의 예를 보인다.



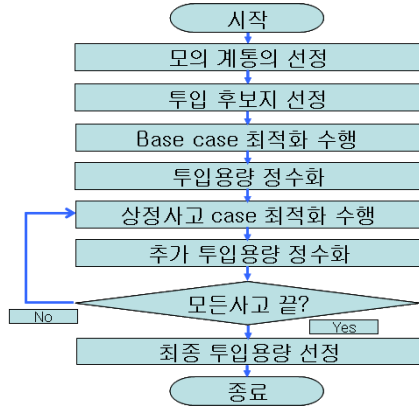
<그림 1> 모션번호 ordering 결과

위의 계통은 6모션 계통으로 ordering을 통하여 예상되는 fill-in 요소의 위치에 가상선로를 투입한 결과이다. 작은 계통이므로 ordering 전후 fill-in요소의 감소는 보이지 못하지만 대규모 계통에의 적용에서는 큰 효과를 보일 수 있으며 모션 ordering 및 가상선로를 추가하는 방안은 고성능 LU분해 알고리즘의 적용을 위하여 필요한 방법이다.

비선형 내점법은 슬랙변수를 도입하고 해를 feasible 영역 안에서 탐색한다. 이때 특정 변수가 boundary에 근접하면 슬랙변수의 값이 0에 가깝게 되고 hessian행렬의 특정 성분을 매우 큰 값으로 만들어 해의 탐색에 수치적 어려움을 가지게 되는데 이러한 문제점을 해결하기 위한 다양한 방법들[1][3]이 제안되고 있다. 본 논문에서는 행렬의 sparsity 특성을 이용한 고성능 LU분해법을 적용하여 수행속도를 향상시켰으며 LU분해 과정에서 수치적 문제를 발생시키는 성분을 적절한 값으로 조정하여 수렴성을 향상시키는 방안을 적용하였다.

2.4 조상설비 투입 최적화

최적 조상설비 투입 계획은 앞서 언급한 알고리즘을 바탕으로 정상상태 및 각 상정사고시의 최소 추가 투입용량을 선정하고 고려되는 모든 상정사고 모의가 종료될 때까지 반복 수행하여 총 요구되는 설비용량을 산출한다. 최적 조상설비 투입계획 문제는 다음과 같은 순서로 진행된다.



<그림 2> 최적 조상설비 투입계획 알고리즘

Base case 및 상정사고시 최적화 문제의 구성에서 조상설비의 투입 후보지를 사전에 선정한다. 실제 조상설비 투입계획 문제에서는 최초 설치비용 및 설비용량에 따른 추가 비용이 반영되어야 하나 본 알고리즘에서는 투입용량에 선형적으로 설비비용이 부담된다고 가정하였다. 또한 조상설비 투입용량은 bank 단위로 투입되지만 주어진 알고리즘은 정수 문제를 다루지 않으므로 최적화 결과 선형화된 투입용량을 산출한다. 따라서 선형적인 결과를 bank 단위로 정수화시켜 투입용량을 산정한다.

3. 사례 연구

본 알고리즘을 2006년도 peak한전계통의 조상설비 설치현황을 바탕으로 2008년도 계통상태에 대하여 조상설비 추가 설비계획에 적용하였다. 투입 후보지는 현실성을 반영하기 위하여 실제 2008년도 계획계통에서 캐패시터뱅크의 증/신설되는 위치 및 용량을 바탕으로 선정하였다. 이에 따라 총 119개 투입 후보지가 선정되었으며 증/신설되는 캐패시터의 투입용량 최소화를 수행하였다.

고려되는 상정사고는 전압안정도 측면에서 심각한 상정사고로 고려되는 345kV 8개 선로사고(루트사고)를 적용하였다. base case에서 수렴하지 않는 765kV 2회선 사고의 경우 주어진 후보지 내에서 운전범위를 만족하는 해를 찾지 못하였다. 기타 여러 상정사고를 고려할 수 있으나 주어진 상정사고만을 고려하여도 기타 상정사고를 대비할 수 있는 캐패

시터 투입용량을 결정할 수 있다.

다음은 2008년도 계획계통에 대한 조상설비 최적화 결과이다. 각 상정사고에 따른 증/신설되는 캐패시터 투입 용량은 다음과 같다.

<표 1> 조상설비 투입개소 및 용량

상정사고	설치개소(개소)	투입용량(MVar)
base case	21	740
영서-신시흥	3	5
영서-서서울	34	1135
신안성-신용인	5	5
화성-서서울	0	0
곤지암-신제천	0	0
청원-신옥천	14	490
신온양-정양	3	55
화성-아산	3	100
총 계	58	2530

총 58개소의 투입위치가 결정되었으며 총 투입 용량은 2530 MVar 이다. 시뮬레이션은 2008년도 peak 계통으로 수행한 결과로서, 각 부하 수준별 모의를 통하여 실제 2008년도 투입용량 및 위치를 선정할 수 있다. 본 시뮬레이션은 계통의 상정사고를 고려함에 있어 안정도 여유지수는 반영되지 않았다. 사고 이후의 계통에 대하여 운전제약 범위만을 고려하여 최적 조상설비 투입계획을 모의한 것으로서 안정도제약을 포함하면 보다 의미있는 모의가 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

최적 조상설비 투입 계획은 정수변수를 포함한 문제로서 풀기 어려운 문제이다. 이러한 문제를 다루기 위하여 사전에 위치정보를 제공하고 결과값을 실제 투입 가능한 뱅크단위로 정수화시키는 방안을 적용하였다. 이러한 방법은 어느정도의 오차를 감안한 방법이 되며 향후 정수변수 처리를 위한 보다 정확한 해법의 제시를 위한 연구가 수행되어야 한다. 또한 투입계획 문제를 바탕으로 조상설비 운용계획에 대한 최적화 기법의 적용이 또 하나의 연구 주제가 될 수 있으며 운용계획 문제는 상정사고를 고려해야하는 예방제어의 문제로서 접근이 가능하다. 향후 위에서 언급한 두 가지 주제에 대한 지속적인 연구를 수행해 나가겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] Xihui Yan, Victor H.Quintana, "Improving An Interior Point Based OPF by Dynamic Adjustments of Step Sizes and Tolerances", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No.2, 709-717, 1999
- [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] A.Brameller, R.N.Allan, Y.M.Hamam, "Its practical application to systems analysis", Pitman Ltd., London, 1976
- [5] Yu-Chi Wu, Atif S.Debs, Roy E.Marsten, "A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.9, No.2, 876-883, 1994