

전압 및 무효전력 계획의 최적화에 관한 연구

김 준 현
한양대학교

김 태 군
한양대학교

A Study on Optimization of Voltage and Reactive Power Planning

Joon - Hyun Kim
HanYang Univ.

Tae - Gyun Kim
HanYang Univ.

1. Abstract

This paper discusses one overall reactive power installation pattern that will satisfy system performance constraints for base case. The cost of installation is minimized. Existing controllers are fully utilized prior to any addition of new installation. Installation pattern for the required new shunt compensation is comprised of discrete, standard size components.

2. 서론

전력계통에 있어서 제 문제는 일반적으로 운영과 계획의 두가지 측면으로 나눌 수 있다. 전자는 현재 주어진 설비에서의 최적 운전 조건을 구하는 것인데 반하여 후자는 설비의 신증설을 고려한 설비의 최적조건을 구하는 문제이다. 전력계통계획의 문제는 유효전력원과 무효전력원을 포함하는 전체 전력계통 설비의 최적화를 꾀하는 것이지만 무효전력원의 설비에 부차되는 비용이 유효전력원에 부차되는 그것에 비하여 상당히 작으므로 일반적으로 유효전력원의 최적화로 국한하는 경향이 있다.

그러나 우리나라의 경우와 같이 대응량 전력과 대전력 소비자가 멀리 떨어져 있는 경우, 또는 송전전압의 상승에 따라 심야 경부하시 계통전압 상승의 문제가 있는 계통에서는 계통계획시 무효전력원에 대한 고려를 배제할 수 없다.

이러한 무효전력원 계획문제에 대하여 국내적으로 연구가 활발히 진행되고 있다. [1,2,3,4]

본 연구에서는 실제 우리나라 전력계통에서 무효전력 보상장치로서 주로 사용하고 있는 분포 리액터와 커패시터를 고려하여, 그 설치 비용을 최소화하는 것으로서 무효전력 계획의 문제를 구성하였다.

이해를 구하기 위하여 Reduced Gradient 법과 정수 계획법을 사용하였고, 특히 실제계통에서 무효전력 보상장치가 Bank 단위로 설치되는 것을 감안할 때 정수 계획법을 사용하여 구한 이산치에 대해서는 실용적이라고 생각된다.

3. 문제의 정식화

본 연구에서 무효전력 보상장치 계획 문제를 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(u) \\ \text{s.t} \quad & h(x,u) = 0 \\ & \underline{x}^m \leq x \leq \bar{x}^m \\ & \underline{u}^m \leq u \leq \bar{u}^m \end{aligned}$$

위 문제에서 상태 변수들에 대한 부등식 제약 조건의 위반치를 페널티 함수로 나타내어 다음과 같이 증가화 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & F(x,u) = f(u) + P(x) \\ \text{s.t} \quad & h(x,u) = 0 \\ & \underline{u}^m \leq u \leq \bar{u}^m \end{aligned}$$

3.1 목적함수

$f(u)$ 는 새물계 추가되는 무효전력 보상장치에 대한 투자비용 함수로서, 그림 1과 같이 나타내었다.

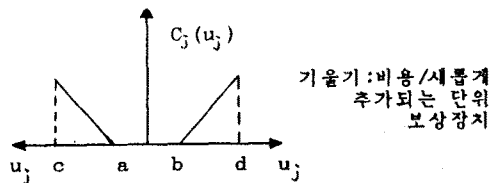


그림 1

무효전력원의 보상은 부하모선에서 행하여 지는 것으로 하였고, 보상장치로서는 분포리액터와 커패시터를 고려하였다.

여기서

- j : 부하모선
- a : 현존하는 무효전력 보상장치의 하한
- b : 현존하는 무효전력 보상장치의 상한
- c : 새물계 추가되는 무효전력 보상장치의 하한

- d : 새롭게 추가되는 무효전력 보상장치의 상한
- C_j : 모선 j 에 새롭게 추가되는 무효전력 보상장치의 단위비용 (원/MVAR)
- u_j : 모선 j 에 새롭게 추가되는 무효전력 보상장치의 양

그리고 P(x)는 페널티 함수로서 그림 2 와 같이 나타내었다.

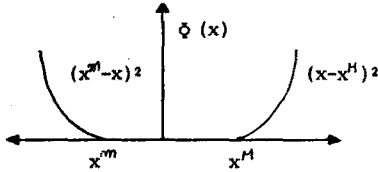


그림 2

여기서 x^m ; 상태변수의 하한치
x^M ; 상태변수의 상한치

$$\phi(x) = \begin{cases} (x - x^M)^2 & ; x > x^M \\ (x^m - x)^2 & ; x < x^m \\ 0 & ; \text{그외} \end{cases}$$

이므로 $\phi(x)$ 들의 합, 즉 $P(x) = \sum \phi(x)$ 로서 나타낼 수 있다.

3.2 제약조건

상태변수 (x) 는 무효전력 조류, 부하 모선의 전압 및 발전기 모선에서의 무효전력 발전량으로 하였다, 제어변수 (u) 는 부하모선에 추가되는 무효전력 보상장치, 발전기 모선의 전압 및 탭으로 하였다.

이에 대한 수식적 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{상태변수 (x)} : & Q_{if}^m \leq Q_{if} \leq Q_{if}^M \\ & V_j^m \leq V_j \leq V_j^M \\ & Q_x^m \leq Q_x \leq Q_x^M \\ \text{제어변수 (u)} : & -UL + Q_j^m \leq Q_j \leq Q_j^M + UC \\ & V_x^m \leq V_x \leq V_x^M \\ & N^m \leq N \leq N^M \\ & 0 \leq UC \leq UC^M \\ & 0 \leq UL \leq UL^M \end{aligned}$$

조류 방정식 : $h(x, u) = 0$

여기서

- Q_{if} ; 무효전력 조류
- V_j ; 부하모선 전압
- Q_x ; 발전기 모선의 무효전력
- Q_j ; 추가되는 무효전력
- V_x ; 발전기 모선 전압
- N ; 탭
- i ; 발전기 모선
- j ; 부하 모선
- UC ; 새롭게 추가되는 커패시터의 양
- UL ; 새롭게 추가되는 분리기역터의 양

4. Reduced Gradient 법을 이용한 최적 기법

상태변수 (x)는 제어변수 (u)에 대한 함수이므로 앞의 목적 함수를 다음처럼 표현할 수 있다.

$$F(x, u) = f(u) + P(x(u)) = F(u)$$

제어 변수 (u)에 대한 F(u)의 gradient vector 방향으로 최적화가 진행되므로 이를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{dF(u)}{du} = \frac{\partial f(u)}{\partial u} + \left[\frac{dx}{du} \right]^T \cdot \frac{\partial P(x)}{\partial x}$$

여기서 dF(u)/du 는 Reduced Gradient Vector 이고 dx/du 는 상태변수 (x)와 제어변수 (u)와의 관계를 나타내는 감도 행렬이다. $\partial f/\partial u$ 는 제어변수에 대한 부자비용 함수의 기울기에서 구할 수 있고 $\partial P/\partial x$ 는 다음처럼 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \partial P / \partial x &= 2(x - x^M) ; x > x^M \\ \partial P / \partial x &= 2(x - x^m) ; x < x^m \\ \partial P / \partial x &= 0 ; \text{그외} \end{aligned}$$

5. 감도 행렬의 표현

매 반복 계산시 수정되는 감도 행렬을 다음과 같은 선형화된 모델을 이용하여 간략하게 구하였다.

가정:

- 1) 정규 상태만을 고려하여 계통내의 상태변수 (x)들이 동작점 근처에서 크게 변화하지 않는 것으로 한다.
- 2) $|b_{sr}| \gg g_{sr}, c_{sr}$
- 3) $\cos(\theta_s - \theta_r) \gg \sin(\theta_s - \theta_r)$

이러한 가정들을 이용하여 Ward - Hale 계통을 선형화 하면 그림 3과 같이 된다.

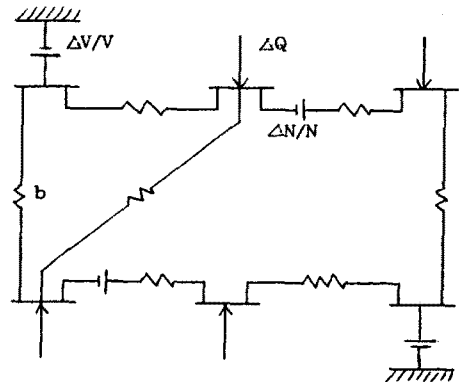


그림 3

이것을 6모델이라 칭하기로 한다.

감도행렬은 제어변수의 단위량 변화에 대한 상태변수의 변화량을 표시하는 것으로, 정의에 따라

$$\Delta \tilde{x} = \tilde{S} \Delta u$$

이므로 이를 선형화한 모델을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{I} & \tilde{0} & \tilde{0} \\ \tilde{0} & 1/\tilde{V}_j & \tilde{0} \\ \tilde{0} & \tilde{0} & \tilde{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{Q}_H \\ \Delta \tilde{V}_j \\ \Delta \tilde{Q}_\lambda \end{bmatrix} = \tilde{H}(\tilde{\epsilon}) \begin{bmatrix} \tilde{I} & \tilde{0} & \tilde{0} \\ \tilde{0} & 1/\tilde{V}_\lambda & \tilde{0} \\ \tilde{0} & \tilde{0} & 1/\tilde{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{Q}_j \\ \Delta \tilde{V}_\lambda \\ \Delta \tilde{N} \end{bmatrix}$$

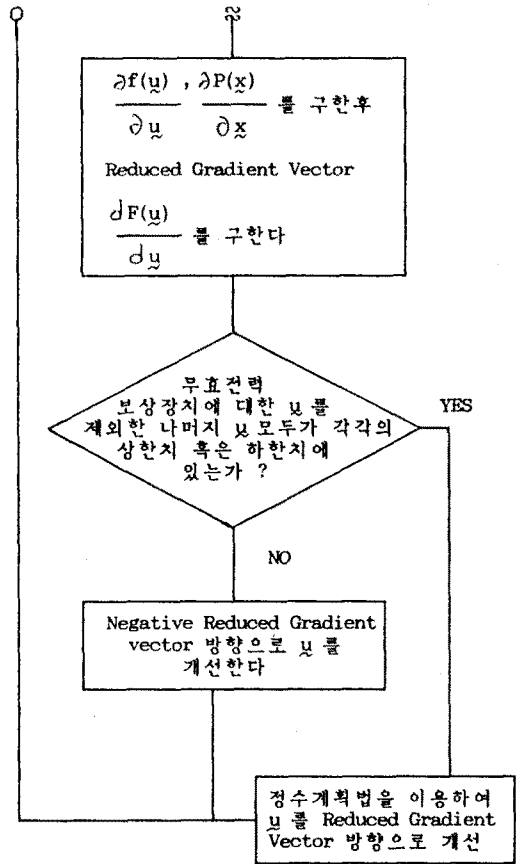
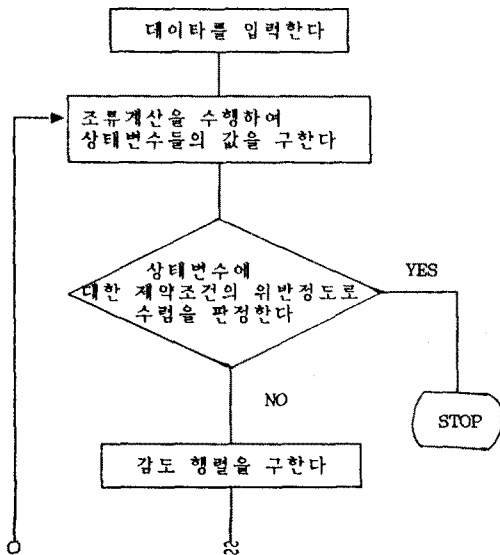
위 식을 다시 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{Q}_H \\ \Delta \tilde{V}_j \\ \Delta \tilde{Q}_\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{I} & \tilde{0} & \tilde{0} \\ \tilde{0} & \tilde{V}_j & \tilde{0} \\ \tilde{0} & \tilde{0} & \tilde{I} \end{bmatrix} \tilde{H}(\tilde{\epsilon}) \begin{bmatrix} \tilde{I} & \tilde{0} & \tilde{0} \\ \tilde{0} & 1/\tilde{V}_\lambda & \tilde{0} \\ \tilde{0} & \tilde{0} & 1/\tilde{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{Q}_j \\ \Delta \tilde{V}_\lambda \\ \Delta \tilde{N} \end{bmatrix}$$

여기서 $\tilde{H}(\tilde{\epsilon})$ 행렬은 선형화한 모델에서 구한다. 이 $\tilde{H}(\tilde{\epsilon})$ 행렬을 구한 다음 이것을 열 단위로 기억한 후 각 대응되는 값만을 곱하여 주면 감도행렬을 구할 수 있으므로 계산 과정을 상당히 단축할 수 있다.

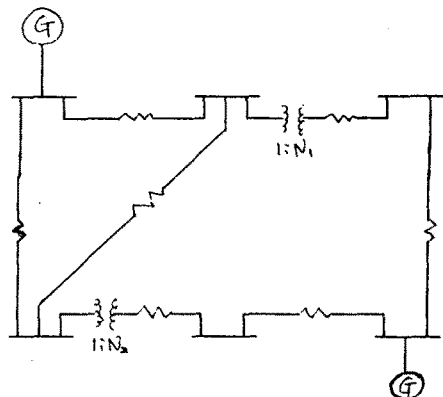
물론 이렇게 해서 구한 감도 행렬 요소의 값과 원 계통에서 구한 것과의 차이는 있지만 무시해도 좋은 정도이다.

6. 최적 무효 전력 계획을 위한 흐름도



7. 모델계통

6-Bus, 7-Lines Ward Hale 계통으로 시뮬레이션 하였다.



8. 결 론

본 연구에서는 무효전력 보상장치의 설비계획을 수립하는데 있어서 실제로 사용되고 있는 분포 리액터와 커패시터에 대하여 Bank 수와 설치 지점을 결정하는데 주안점을 두었다. 해를 구하기 위하여 Reduced Gradient 법과 정수계획법을 사용하였는데 특히 정수 계획법을 적용하여 실제 사용에 유용하도록 Bank 수를 결정하였고, 이것을 모델계통에 적용하여 적합성을 입증하였다.

그러나 계통 안정도 측면과 유효전력 손실의 최소화 등의 문제들을 고려한 종합적인 무효전력 계획의 분석이 이루어져야 할 것이다.

9. 참고문헌

- [1] R.M. Maliszewski, L.L. Garver, A.J. Wood, "Linear Programming as an Aid in Planning Kilovar Requirements," IEEE Vol. PAS-87, Nov./Dec. 1968, pp. 1963-67.
- [2] H.H. Happ and K.A. Wirgau, "Static and Dynamic Var Compensation in System Planning, IEEE Vol. PAS-99, Step/Oct. 1978, pp. 1564-1578.
- [3] A. Hughes et al., "Optimal Reactive Power Planning," IEEE Vol. PAS-100, May 1981, pp. 2189-2196.
- [4] A. Venkataramana, "Optimal Reative Power Allocation" IEEE Vol. PAS-2, No. 1, Feb. 1987, pp. 138-144
- [5] LASDON, L. S. (1970). "Optimization Theory for Large Scale System", MacMillan
- [6] MOKHTARS. BAZARRA, C.M.SHETTY, (1979), "Nonlinear Programming Theory and Algorithms ", John Wiley & Sons.
- [7] Kuester, J.L., and Mize, J.H., "Optimization Techniques with Fortran" McGraw Hill Book Company, 1973.