

조상설비 최적화를 위한 다단계 방안

허진\* 이병준 송길영  
고려대학교 전기전자전파 공학부

Multi-Layered Optimal VAR Planning

Jin Hur\*, Byoungjun Lee, Kil-Yeong Song  
Dept. of Electrical Engineering, University of Korea

**Abstract** - This paper presents a method of determining the minimum amount of reactive power capacity installation and minimizing transmission line losses. It deals with maintaining voltage profile within an acceptable range with respect to the increase in load demand. Our approach provides three-different stages to power system planner. First stage considers existing capacitors. Second stage considers expanding the size of the installed capacitors. Third stage considers existing capacitors and newly installed capacitors whose locations are irrelevant to the locations of existing ones. Validity and effectiveness of the proposed algorithm are confirmed by results on modified New England 30 bus test system.

존의 운용중인 설비 위치에 증설을 하여 최적의 투입량을 결정하도록 계획한다. 그러나 기존의 설정된 위치로 효과를 얻지 못하면 무효전력 변화에 전압의 감도가 민감한 부하모선을 선정하여 3 단계로 넘어가 조상설비 최적화 과정을 수행하게 된다. 세부적인 각 단계별 운전 동작 원리 및 방법은 다음과 같다.

1. 서론

조상설비 최적화의 목적은 안정한 범위 내에서 계통전압을 유지하기 위해 계통에 충분한 무효전력을 공급하는 것이다. 전력계통에서 조상설비 최적화에 대한 연구는 비교적 역사가 길다. 1968년에는 Maliszewski, Garver 등이 선형계획법을 이용한 조상설비 최적화모형을 제시하였다.[1] 그 후, Mamandur와 Chenoweth는 선형계획법(LP)에 알맞는 수학적인 정식화와 체계적인 알고리즘을 제시하였다.[2] 최근에는 Chih-Wen과 Ying-Tung은 손실비용과 조상설비 투입비용을 동시에 고려한 최적화 알고리즘을 제시하였다. 그러나 이러한 알고리즘은 조상설비의 투입단계 관점에서 체계적인 운용 및 계획을 제시하지 못하였다.[3]

본 논문에서는 조상설비 최적화에 있어서 체계적인 다단계 무효전력 투입계획을 제시하고자 한다. 다단계 무효전력 투입계획은 다음의 세 단계로 구성된다. 첫 번째 단계는 기존의 캐패시터 뱅크(기설용량)만을 고려하는 것이고 두 번째 단계는 기존의 캐패시터 뱅크(기설용량)에 증설 캐패시터 뱅크(증설용량)를 추가하는 단계를 말한다. 그리고 세 번째 단계는 기존의 캐패시터 뱅크의 위치와 관계없는 새로운 위치에 신설 캐패시터 뱅크(신설용량) 선정하여 조상설비 최적화를 위한 다단계 방안을 제시하고자 한다.

2. 조상설비 다단계 최적화 방안

조상설비 다단계 최적화 방안에 있어서 다음과 같이 연속적인 단계로 무효전력 투입계획을 한다. 우선 1 단계에서 기존의 설비운용을 중심으로 최적의 투입량을 결정하고 계통상태를 만족하지 못하면 2 단계로 넘어가 기

제 1 단계 (기설용량 운용단계)

1 단계(기설용량 운용단계)는 이미 정해진 기존 설비의 캐패시터 뱅크를 고려한다. 1 단계(기설용량 운용단계)에서는 기존용량의 최대용량( $Q_{C1}^{max}$ )과 최소용량( $Q_{C1}^{min}$ ) 사이에서 계통손실비용 최소화를 수행하며 최적의 투입량을 결정한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 운용점( $Q_{C1}$ )이 최적의 운용점이 될 수 있도록 최적화과정을 수행한다.

제 2 단계 (증설용량 계획단계)

2 단계(증설용량 계획 단계)에서는 기존 설비의 운용이 한계에 걸려 운용중인 부하모선의 전압을 향상시키기 위하여 기존의 설비용량을 확장하여 용량의 크기를 늘린다. 이 경우에는 운전 동작점이 기설 용량의 최대용량에 이르렀을 경우(상한제약에 걸림) 1 단계에서 2 단계로 연속적으로 단계를 이동하여 운용계획을 한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 기설용량 운용점이  $Q_{C1}^{min} \sim Q_{C1}^{max}$ 의 상한·하한의 제약을 유지하며 운전하다가  $Q_{C1}$ 의 값이  $Q_{C1}^{max}$ 의 상한에 걸린 경우에 새로 확장된 상한·하한의 제약  $Q_{C1}^{min} \sim Q_{C1}^{max}$ 에서 동작을 하며 최적화 과정을 수행한다.

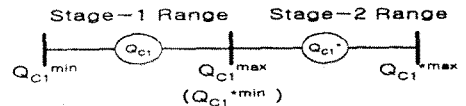


그림 1 제 1 단계와 제 2 단계 운전 동작점

제 3 단계 (신설용량 계획단계)

1 단계와 2 단계의 운용이 계통전압을 유지하기 위한 무효전력의 투입이 만족하지 못하면 3 단계(신설용량 계획 단계)의 계획단계를 수행한다. 이 단계에서는 취약한 부하모선을 선정하여 신설용량을 투입한다. 이 단계에서 취약한 모선을 선정하는 방법은 무효전력의 변화에 전압이 가장 민감하게 변화하는 모선을 선정하여 투입할 모선을 선정한다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 신설용량의 동작은  $Q_{C2}^{min} \sim Q_{C2}^{max}$ 의 상한·하한 범위 내에서 동

작점  $Q_{c2}$  는 동작을 하며 최적의 투입량을 결정한다. 이상의 운용 및 계획단계를 고려하여 조상설비의 최적화 방법을 이용하여 계통전압을 향상시키는 무효전력의 양을 결정할 수 있다.

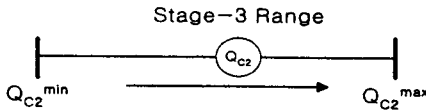


그림 2 제 3 단계 운전 동작점

### 3. 문제의 정식화

#### 3.1 목적함수

조상설비 최적화 문제를 풀기 위해서 계통손실 비용과 조상설비 투입비용의 합을 목적함수로 한다. 손실비용의 계수와 조상설비 투입 비용계수의 조정으로 목적함수는 다목적 함수로 최적화과정을 수행한다.

$$F = C(s_{ck}, q_{ck}) + k_{loss} D_u P_{loss}$$

$$P_{Loss} = [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] G_{ij}$$

$$C(s_c, q_c) = \sum s_c \cdot q_c$$

단,  $k_{loss}$  : 손실비용계수 (원/MWh)

$D_u$  : 계통운용시간

$s_c$  : 조상설비 비용계수 (원/MVAR)

$q_c$  : 투입된 무효전력량

#### 3.2 제약조건

조상설비 최적화는 전력계통의 무효전력을 조정하여 계통 전압의 적정유지와 전력손실 경감을 목적으로 설치되는 것이다. 그러므로 부하모선의 무효전력을 제어하기 위해 각 제어장치 즉, 변압기의 탭비(T), 발전기 단자전압( $V_G$ ), 캐패시터 뱅크( $Q_c$ )에 관한 감도가 필요하다. 각각의 변수를 이용하여 제약식을 구성한다.

#### ■ 제어변수

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

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

$$Q_{c1}^{\min} \leq Q_{c1} \leq Q_{c1}^{\max} \quad (\text{기존설비의 뱅크})$$

$$Q_{c1}^{\max} < Q_{c1}^* \leq Q_{c1}^{\max} \quad (\text{증설설비의 뱅크})$$

$$Q_{c2}^{\min} < Q_{c2} \leq Q_{c2}^{\max} \quad (\text{신설설비의 뱅크})$$

#### ■ 피제어변수

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

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

### 4. 조상설비 최적화 과정

다단계 투입이론에 따라 각 단계별 최적화 과정은 다음의 단계를 거쳐 최적의 무효전력량을 결정하고자 한다.

**단계 1** : 발전기 모선의 설정

제어변수  $V_G$ 의 관한 감도행렬을 산정하기 위해 발전기 모선을 선정한다.

**단계 2** : 교류 조류계산

계통의 초기상태가 결정되면 조류계산을 수행한다. 이 결과 초기 운전점과 Jacobian 행렬을 얻을 수 있다.

**단계 3** : 감도행렬의 구성

선형계획법문제(LP)를 구성하기 위해서 발전기 모선 전압, 변압비, 무효전력원의 제어변수를 이용하여  $P$ ,  $Q_L$ ,  $Q_C$ 에 관한 감도행렬을 구성한다.

**단계 4** : LP문제의 구성

LP문제를 구성한다. LP문제는 두 부분으로 구분할 수 있다. 선형화 된 목적함수와 선형제약조건으로 이루어진다.

**단계 5** : 입력 초기치의 수정

LP계산을 수행한 후에 조류계산을 위한 입력값을 수정한다. LP 해를 통한 입력 초기값은 다음 조류계산을 위해 수정된다.

**단계 6** : 수렴판정

계통비용이 허용범위 이내로 들어오면 이 과정은 정지되고 최적화과정을 거친 총 계통비용을 얻을 수 있다. 그렇지 않으면 단계 2로 돌아간다.

## 5. 사례연구

조상설비 최적화를 위한 다단계 방안을 New England 30 모선 계통에 적용하였다. 다단계 운용 및 계획을 적용하기 위해 시험계통을 수정하였다. 계통의 부하수준은 증부하 상태로 수정하였고 계통의 초기전압은 무효전력에 민감한 저전압 상태로 계통을 구성하였다.

### 제 1 단계(기설용량 운용단계)

1 단계는 기존의 설비용량만을 고려하여 계통운용을 한다. 기존 설비용량( $Q_{c1}$ )은 하한  $Q_{c1}^{\min}$  (0. MVAR) 과 상한  $Q_{c1}^{\max}$  (20 MVAR) 범위에서 계통비용을 최소화 하면서 최적의 투입량을 결정한다. 발전기 모선의 제약은  $\pm 1\%$ (p.u.)으로 하였다. 표 1에서 볼 수 있듯이 초기조류계산 후 계통손실은 각각 284.45(MW)이다. 최적화 과정을 거치면서 설정된 부하모선 21, 22에 기설용량( $Q_{c1}$ )은 모두 20(MVAR)의 최대값에서 운용하고 있다. 운용 후 계통손실은 각각 274.47(MW)으로 계산되었다. 결국 계통손실은 9.98(MW)으로 감소효과를 볼 수 있었다. 설정된 부하모선의 조상설비량이 최대값에서 운용하고 있으므로 다단계 방안에 따라 기설용량중 인 부하모선에 증설설비용량을 계획한다.

표1. 기설 운용시 계통손실과 비용의 변화

		운용 전	운용 후
계통손실 (MW)		284.45	274.47
투입 $Q_{c1}$ (MVAR)	Bus 21	0	20
	Bus 22	0	20

**제 2 단계(증설용량 계획단계)**

2 단계에서는 기설용량이 계통을 만족시키지 못하여 부하모선 21, 22에 최대용량  $Q_{cl}^{*max}$  (20 MVAR) 갖는 증설설비용량을 계획한다. 발전기 모선의 전압제약은  $\pm 1.5\%$ (p.u)으로 하였고 초기조류계산 후 계통손실은 표 2에서 볼 수 있듯이 274.47(MW)이다. 최적화 과정을 수행하면서 증설용량 ( $Q_{cl}^*$ )은 부하모선 21, 22에 각각 11.05(MVAR), 20(MVAR)로 운용되었다. 이때 모선 22에서는 최대치에서 운용하고 있다. 최종조류계산 후 계통손실은 271.95(MW) 계산되어 2.52(MW) 감소효과를 얻을 수 있다.

표2. 증설 운용시 계통손실과 비용의 변화

		운용 전	운용 후
계통손실 [MW]		274.47	271.95
투입 $Q_{cl}^*$ [MVAR]	Bus 21	0	11.05
	Bus 22	0	20

**제 3 단계(신설용량 계획단계)**

3 단계에서는 신설용량 계획단계이다. 2 단계에서 계통이 만족되지 못하여 20개의 부하모선 중에서 무효전력 변화에 전압의 감도가 민감한 부하모선 26, 28을 선정하였다. 선정된 부하모선 26, 28에 신설용량 설비를 투입하여 계통운용을 한다. 발전기 모선의 전압제약은  $\pm 1.5\%$ (p.u)으로 하였고 초기조류계산 후 계통손실은 표 3에서 볼 수 있듯이 271.95(MW)이다. 최적화과정을 수행하면서 증설용량 ( $Q_{c2}$ )은 설정된 부하모선 26, 28에 각각 2.52(MVAR), 2.34(MVAR)로 운용되었다. 최종조류계산 후 계통손실은 267.04(MW)으로 계산 되어 4.91(MW) 감소효과를 얻을 수 있다.

표3. 신설 운용시 계통손실과 비용의 변화

		운용 전	운용 후
계통손실 [MW]		271.95	267.04
투입 $Q_{c2}$ [MVAR]	Bus 26	0	2.52
	Bus 28	0	2.34

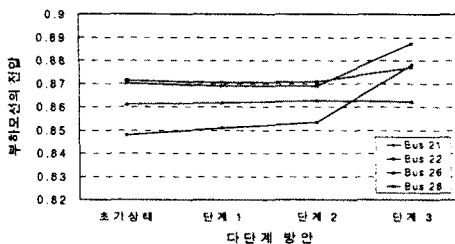


그림 3 다단계 방안에 따른 전압 향상

다단계 방안이 적용된 부하모선의 전압향상을 그림 3에 나타내었다. 예를들어, 부하모선 21, 28의 경우 초기상태의 전압은 0.84801, 0.87018(p.u)이고 기설, 증설, 신설의 다단계 방안을 통한 전압은 0.87814, 0.88742(p.u)로 각각 향상되었다.

**6. 결론**

본 논문에서는 조상설비 최적화를 위한 다단계 방안을 제시하였다. 계통운용 및 계획에 있어 제시한 다단계 방안은 연속적인 과정으로 진행된다. 계통손실 비용계수와 조상설비 투입비용계수는 수렴성을 고려하여 설정하였다. 발전기 모선의 조정은 시험계통의 모든 발전기를  $\pm 1\% \sim \pm 1.5\%$ 의 범위에서 조정하여 발전기의 무효전력을 조정하였다. 기설, 증설, 신설을 통한 계통손실은 17.41(MW)감소하여 6.12% 계통손실 감소효과를 얻을 수 있었다. 또한 선정된 부하모선의 전압향상도 얻을 수 있었다. 제시된 조상설비 최적화를 위한 다단계 방안은 계통에 무효전력원을 공급함에 있어 보다 체계적인 운용과 계획을 할 수 있다고 사료된다.

**(참고 문헌)**

- [1] J. Qiu, S. M. Shahidehpour, "A New Approach for minimizing and Power losses and Improving voltage profile", IEEE Transaction on Power System, Vol. PWR-2, No. 2, May 1987.
- [2] K.R.C. Mamandur and R.D. Chenoweth, "Optimal Control of reactive Power Flow for Improvements in voltage profiles and for real Power Loss Minimization." IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, pp. 3185~3194, July, 1981.
- [3] L. Chih-Wen, J. Wu-shun, L. Chun-chang "A Fast Global Optimization to VAR Planning for the Large Scale Electric Power System". IEEE Transaction on Power System, Vol. 12, No. 1, February 1987.
- [4] K. Iba, H. Suzuki, "Practical Reactive Power Allocation/Operation Planning using Successive Linear Programming", IEEE Transaction on Power System, Vol. 3, No. 2, May 1988.
- [5] H. H. Happ, K. A. Wirgau, "Static and Dynamic VAR Compensation in System Planning", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-97, No. 5, Sept/Oct 1978.
- [6] V. Ajarapu, P. L. Lau, S. Battula, "An Optimal Reactive Power Planning Strategy against voltage collapses", IEEE Transaction on Power System, Vol. 9, No. 2, May 1994.
- [7] K. Aoki, M. Fan, A. Nishikori, "Optimal VAR Planning by Approximation Method for Recursive Mixed-Integer Linear Programming", IEEE Transaction on Power System, Vol. 3, No. 4, November 1988.