

발전기 무효전력비용을 고려한 조상설비계획

이철휴 이상호 박종근  
서울대학교

Reactive Power Planning Considering  
Reactive Power Support Cost of Generator

C.H.Lee S.H.Lee J.K.Park  
Seoul National Univ.

**Abstract** - As one of ancillary services, voltage support and reactive power service should be compensated properly for its contribution. In this paper, a cost-based reactive power planning is presented, which minimizes the total cost of reactive power support of generators and VAR compensation facility installation. Reactive power support of generator is evaluated by the opportunity costs of reduced energy sale considering the varying SMP(system marginal price) in power market. Gradient projection method is applied to solve this reactive power planning using IEEE14 bus system.

1. 서 론

세계적으로 진행되는 전력산업 구조개편에 따라 기존의 수직통합형 전력회사에서 발전경쟁형 또는 도소매경쟁형 등 다수의 공급과 수요참여자에 의한 전력시장체제로의 이행이 가속화 되고 있다. 이에 따라 예비력확보, 전압/무효전력제공 등 시장에 참여하는 개별사업자들의 보조서비스가치는 기존의 수직통합형 체계에서 간과하였던데 비하여 전력계통의 안정적 운용 및 전기품질향상에 필수적인것으로 부각되어 그 비용적 가치를 보상하기 위한 다양한 시장체계가 영국, 호주 등 각국에서 수립되고 있는 실정이다.[1][2][3]

이와 관련하여 최근들어 무효전력 비용해석 또는 2차 곡선의 무효전력비용을 가정한 무효전력 배분 등의 다양한 연구가 진행되고 있으나 근본적으로 비용산출의 합리적인 근거를 제시하고 있지는 못하는 실정이다.[5][6]

본 논문에서는 발전사업자들의 무효전력비용을 기회비용측면에서 산출하고 이를 이용하여 조상설비계획을 수립하는 방안을 제시하였다. 이는 기존의 조상설비계획에서 계통손실 또는 발전비용 최소화를 하거나 무효전력여유도를 높여 안정도를 증진시키는 것과 달리 무효전력측면에서 접근한다는 명백한 차이를 보여준다.

2. 본 론

2.1 발전기의 무효전력제공 서비스

무효전력비용은 발전기에서 무효전력을 공급하거나 소비할 경우, 유효전력출력을 연료비와 직접적으로 비교할 수 있는 것과 같은 비용구성의 요소를 발견하기 어렵다. 아울러 유효전력가격에 비하여 무효전력가격 또한 무시할 수 있을 정도 낮다는 점에서 그간 무효전력비용은 간과되어 온 것이 사실이다. 그러나 전세계적인 전력산업 구조개편에 따라 전압 및 무효전력의 적절한 운용이 어느 때보다 필요하게 되었으며 이는 발전사업자 및 계통사업자간의 적극적인 협조 및 이 따른 적절한 보상이 요구된다고 볼수있다.

대부분 무효전력량의 획득에 장기계약방식을 도입하고

용량(capability), 가용성(availability), 사용용량 또는 기회비용(Utilization, Opportunity)등 지불방식이 연구되고 있으나 무효전력운용의 지역적 특성이 대단히 강하고 합리적 무효전력가격 설정의 어려움등으로 다양한 시장구조 및 가격체계가 나타나고 있다.

무효전력 및 전압관리의 일차적 책임은 계통사업자에게 주어지므로 생산자와 소비자가 다양하게 존재하는 유효전력 시장과 달리 수혜자는 다수일지라도 구매자가 계통사업자로만 국한되는 점은 곧 적절한 무효전력량을 확보하기 위하여 계통사업자가 자체 조상설비를 보유하거나 발전사업로부터 무효전력용량을 확보하여야 하지만 발전사업자에게 지불하여야 비용과 비교하여 최소의 비용으로 조상설비를 확보할 필요가 생긴다.

2.2 발전기의 무효전력비용

발전기의 가능출력곡선은 그림1과 같다. 가능출력곡선은 전기자권선의 온도상승에 의한 한계로 반경  $V_n I_n$ 인 반원의 형태를 나타낸다. 그러나 이상무효전력출력은 계자권선의 온도상승 한계로 전기자권선 전류한계 이내로 가능출력이 줄어들고 진상운전한계 또한 고정자 권선단의 온도상승 및 정태안정 한계 등으로 출력가능 범위에 더욱 제약이 가해진다. 특히 가능출력이 상대적으로 작은 진상운전에 따른 위험이 크게 부각되므로 실제 발전기운전시 진상운전을 기피하는 실정이기도 하다.[4]

그림1.에서처럼 무효전력가능 출력은 유효전력 출력이 높아짐에 따라 점차 감소하게 되며 계통운전상 필요한 무효전력출력을 위하여 유효전력발전에 제약이 가해질 수 있음을 의미한다. 이는 발전기의 무효전력출력에 따라 상실된 기회비용은 유효전력 출력감소에 따라 발생된 이익손실분 만큼의 비용으로 간주할 수 있을 것이다.

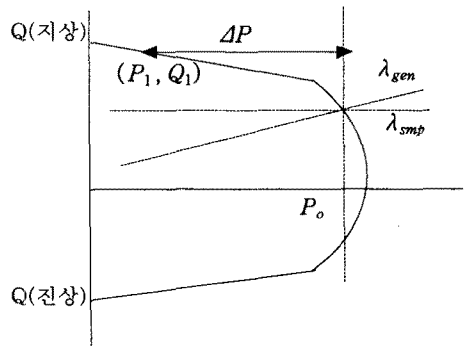


그림 1. 발전기 가능출력곡선

즉, 무효전력출력을 고려하지 않을 경우 유효전력출력은 시장에서 결정되는 SMP(System Marginal Price) 가격 이하에서 발전기의 1차 증분비용곡선과의 최대점  $P_0$ 로 결정되어진다. 발전기 무효전력출력  $Q_1$ 이 필요할 경우 가능출력곡선상에서 유효전력출력은  $P_1$ 으로 감소

한다. 식(1)은 발전기의 무효전력 출력감소분을 나타낸다.

$$\Delta P = P_{\lambda_{smp}} - P_{gen} \quad (1)$$

이 경우 상실된 기회비용은 시장에서 결정되는 SMP와 발전기 1차증분비용과의 차이만큼 나타나며 식(2)와 같이 정의된다.

$$Opp. Cost = \Delta P \times (\lambda_{smp} - \lambda_{gen}) \quad (2)$$

일반적으로 발전기의 1차증분비용곡선은 수직통합형 전력회사에서는 쉽게 알수있지만 경쟁입찰을 하여야 하는 자유경쟁시장하에서는 발전사업자가 공개하기 어려운 기업비밀로서 관리될것이다. 그러나 기회비용을 보상받기 위하여 필요한 증분비용 및 평균비용 단가등은 발전사업자가 제공하여야 하는 것이 합리적일것이다. 그렇지 못할 경우 SMP로 보상할수도 있으나 이는 공공의 전체 이익을 최대화하여야 하는 계통사업자로서는 발전사업자에게 지나친 보상의 성격을 띠게 되므로 가격상한제를 도입하거나 통계적 자료로서 보상하는 대안이 있을수 있겠지만 더 많은 연구가 진제되어야 한다.

전술한 바와 같이 발전기의 기회비용은 시시각각으로 변하는 유효전력시장의 SMP와 발전기별 증분비용곡선에 의해서 결정되므로 일반적인 유효전력 시장상황을 다음 식(3)과 같이 표현되는 Gaussian 확률밀도함수로 가정하도록 한다. 그림(2)는 SMP의 확률밀도분포를 보여준다.

$$Prob_{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda - m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

시장가격을 반영한 무효전력출력 기회비용은 다음식(4)와 같이 정의된다. 단 발전기 증분비용이 시장가격을 상회할경우 기회비용을 인정할수 없으므로 음수 기회비용은 0으로 하였다.

$$C(Q_{gen}) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} Prob(\lambda) E(\lambda) d\lambda_{smp} \quad (4)$$

$$E(\lambda) = \max\{(\lambda_{smp} - \lambda_{gen}) \times \Delta P, 0\}$$

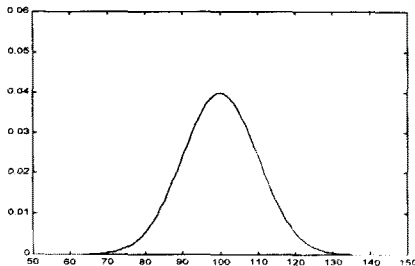
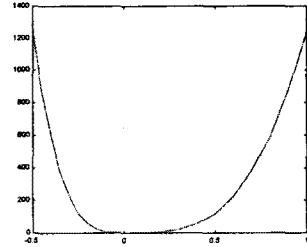


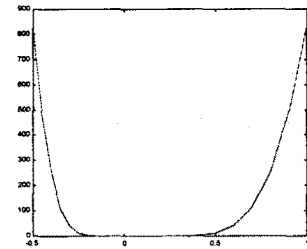
그림2. 계통한제비용(SMP)의 확률적 분포

그림3은 유효전력 시장가격의 정규확률분포를 가정하 기회비용으로 산출한 발전기별 무효전력비용곡선을 나타낸 것이다. 발전기별 1차 증분비용곡선이 서로 다른 경우와 시장가격의 의 분포에 따라 다른 무효전력비용곡선이 나타남을 알수 있다. 특히 진상운전 비용이 지상유전비용보다 비싸게 결정된다는 것을 알수있으며 이는 발전기 가능출력곡선상에서 보았을때 진상운전에 더 많은 제약이 가해져 출력범위가 작아진 것으로 부터 쉽게 추

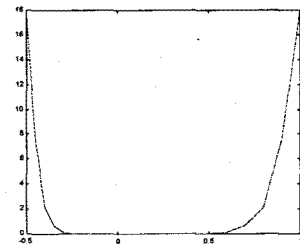
정할수 있는것과 일치한다.



(a) 평균(SMP) = 100,  $\lambda_{gen} = 40P_g + 80$



(b) 평균(SMP) = 70,  $\lambda_{gen} = 40P_g + 80$



(c) 평균(SMP) = 100,  $\lambda_{gen} = 60P_g + 80$

그림 3. 발전기의 무효전력비용곡선

### 2.3 무효전력계획의 정식화

무효전력계획문제의 목적함수는 경제성 측면에서 손실 비용 또는 발전비용 최소화를 선택하거나 안정도 측면에서 취약모션 무효전력여유의 최대화 등으로 설정되는 것이 일반적이다. 그러나 기존의 연구는 무효전력서비스를 통하여 그 경제적효과를 계량화 할수있는 부분이 지극히 제한적인 상황에서 설정된 것으로 판단된다. 또한 유효전력시장에서의 입찰결과에 따라 발전기별 출력량이 결정된 상황에서 손실최소화를 위한 재급전은 현실적으로 불가능하므로 유효전력과 전압에 가장 큰 영향을 미치는 무효전력을 별도로 분리하여 조상설비계획을 수립하는것이 적절할것이다.

본 논문에서는 새로이 정의된 발전기 무효전력비용과 조상설비 설치비용의 전체합을 최소화하는 것으로 목적함수를 설정하였다. 무효전력계획을 위한 최소화 목적함수는 식(5)와 같이 정의한다. 제약조건은 문제성격상 모션전압제약만을 적용하였다.

$$\min \sum f_{gen}(Q_{gen}) + \sum f_{var}(Q_{VAR}) \quad (5)$$

$$s. t. \quad V_{\min} \leq V_{bus} \leq V_{\max}$$

조상설비 설치에 따른 발전기의 무효전력 발전량 변화는 다음 식(6)과 같이 행렬  $S_g$ 로 주어지게 된다.  $S_g$ 는 조류계산으로부터 구해진 자코비안 행렬로부터 간단하게 구할수 있다. 단 발전기 단자전압과 변압기탭은 고정된것으로 가정하였다.

$$\Delta Q_{gen} = S_g \Delta Q_{VAR} \quad (6)$$

위에서 정의한 조상설비계획은 개별 비용함수 모두가 convex형태이므로 비선형해법으로 구한 최적점이 곧 전체의 최적해로 판단할수 있다. 본 논문에서는 제약조건이 걸린 경우의 비선형해법으로 일반적인 경사투영법(Gradient Projection Method)을 적용하였으며  $S_g$ 를 구하기 위하여 조류계산과 반복적으로 수행토록 하였다. 계산간격을 구하기 위한 line search방법으로 quadratic polynomial 탐색법을 적용하였으며 전체적인 알고리즘은 그림4와 같다.

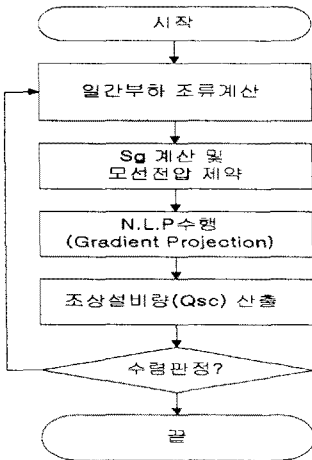
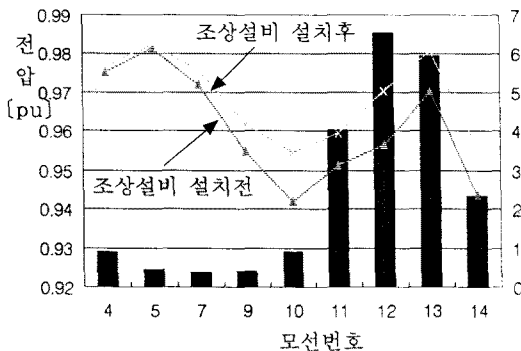


그림 4. 조상설비계획 흐름도

## 2.4 사례모의

조상설비계획을 IEEE 14모선을 대상으로 적용하였으며 모든 부하모선을 조상설비 설치가능 후보모선으로 가정하였다. 초기 조상설비 설치량은 없는 것으로 보고 조상설비값을 연속적인 것으로 가정하였다.



(— : 전압, ■ : 조상설비량)

그림 5. 조상설비 설치량 및 모션전압 분포  
조상설비계획을 통하여 얻어진 조상설비 총 설치량은

21.76(Mvar) 로구해졌으며 무효전력발전 총비용은 처음의 96.89(천원)에서 63.45(천원)으로 34.5 % 감소하였으며 모션전압도 개선되었음을 알수있었다. 조상설비 설치량 및 설치전후 모션별 전압분포를 그림5에 나타내었다. 아울러 각 모션에서의 단기한계비용으로 계산하여 본 무효전력가격 또한 설치전에 비하여 감소하였다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 전압/무효전력제공에 따른 보조서비스의 비용적 가치를 인정하고 기회비용개념을 이용하여 발전기 무효전력비용곡선을 산출하여 보았다. 발전기 무효전력비용을 포함하여 조상설비 설치비용을 최소화하는 조상설비계획에 대하여 연구하였으며 모의계통에 적용하여 그 타당성을 입증하였다.

전압/무효전력제공 사업자의 효용을 적절하게 보상하고 보조서비스시장의 활성화를 위하여 기회비용 뿐만 아니라 무효전력 가용용량(Availability)에 따른 적절한 보상이 이루어져야 할것으로 보인다.

또한 발전기 단자전압의 변화와 변압기 탭변경에 따라 무효전력상태가 다른 양상을 띠므로 운용측면에서의 무효전력배분을 위하여는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

## (참 고 문 헌)

- [1] N.H.Dandachi, M.J.Rawlins, O.Alsac, M.Prais, B.Stott, "OPF for Reactive Pricing Studies on The NGC System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 11, No.1 pp 226-232, Feb.1996
- [2] Transgrid, VPX, "National Electricity Market (NEM1, Phase2)", May 1997
- [3] ISO TARS&P, "Ancillary Services Protocol", Jun.1999
- [4] M.M.Aidibi, D.P.Milanicz, T.L.Volmann, "Optimizing Generator Reactive Power Resources", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 14 No 1, Feb.1999
- [5] D.Chattopadhyay, K.Bhattacharya, J.Parikh, "Optimal Reactive Power Planning and Its Spot-Pricing: An Intergrated Approach", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 10, No.4 pp.2014-2020, Nov.1995
- [6] S. Hao, A.Papalexopoulos, "Reactive Power Pricing and Management", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 12, No.1 pp.95-102, Feb.1997
- [7] S.Ahmed, L.Z.Yao, A.Dixon, A.Ekwue, "Allocation of Reactive support in a Competitive Environment", 13th PSCC, Jul.1999