

발전비용의 부하역률 감도를 이용한 효율적인 역률 개선 연구

이병하, 오민혁<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>인천대학교 전기공학과

김정훈, 심건보<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*\*</sup>홍익대학교 전자전기공학부

A Study on the Effective Enhancement of the Load Power Factor Using the Load Power Factor Sensitivity of Generation Cost

B.H.Lee, M.H.Oh<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>University of Incheon

J.H.Kim, K.B.Shim<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*\*</sup>Hongik University

**Abstract** - The low load power factor causes various problems such as the increase of the power loss and the voltage instability. The demand of reactive power increases continuously with the growth of active power and the restructuring of electric power companies makes the integrated management of reactive power troublesome, from which the systematic control of load power factor is required. In this paper, the load power factor sensitivity of the generation cost is derived and its effects in supplying the reactive power and enhancing the load power factor are analyzed in a small-scale power system. The load power factor sensitivity of the generation cost is applied for determining the locations and capacities of reactive power compensation devices. It is shown that the generation cost can be reduced and the system power factor can be enhanced effectively using the load power factor sensitivity.

1. 서 론

전력산업의 구조개편에 의하여 각각의 전력회사로 분할되면서 경쟁체제 환경하의 전력 시장이 조성됨으로써 계통 운용 관점에서 통합적인 무효전력 관리가 힘들어지고 있고, 전력수요의 지속적인 증가와 함께 무효전력 수요도 급증하고 있어서 전력손실이 증대되고 전압안정도가 문제가 될 수 있으므로 부하 역률 관리의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 유효전력과 무효전력의 관계를 나타내는 부하 역률은 전력계통의 상태를 나타내는 매우 중요한 파라미터로서 부하역률을 전력계통의 안정성이나 경제적인 관점에서 어느 수준으로 유지하여야 효율적인 가 하는 문제 등을 검토할 필요가 있다. 각국마다 부하역률을 일정 수준으로 유지하기 위한 규제나 요금제도 등이 마련되어 있고, 안정도 측면이나 규정 전압 유지 측면에서의 부하 역률 개선을 위한 무효전력 설비 투자 계획 등에 대한 연구들은 상당히 연구되어 왔으나, 부하역률모델과 부하역률의 경제성에 미치는 영향에 대한 본격적인 연구는 없었다. 국내에서도 부하역률은 주로 손실감소를 위한 수단으로 관리되어 지상역률 90% 이하시는 1% 감소시마다 기본요금의 1%를 요금에 증액하고, 90%와 95% 사이의 역률에 대해서는 1% 증가시마다 기본요금의 1%를 감액해 주고 있다. 그러나, 부하역률 유지 방안과 무효전력을 보상하는 조상 설비의 투자계획이나 운용 방안 수립시에 효과적으로 활용될 수 있는 부하역률의 기준이나 정책이 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를

수식으로 유도하여 도출하고, 이 민감도를 이용하여 부하역률의 변화에 의해 발전비용이 어떻게 변화하는지를 간단한 소규모의 전력시스템을 사용하여 분석한다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도에 의해 부하 역률을 개선하는 방안과 이 때의 발전비용 감소 효과 등을 분석한다. 부하 역률 유지 방안 수립과 무효전력을 보상하는 조상 설비의 투자계획이나 운용 등에 대한 정책을 수립하는데 활용할 수 있는 기초연구로서, 부하역률의 변화가 발전 비용에 미치는 영향과 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 이용한 효율적인 역률 개선 방안 및 무효전력 보상설비 투자 방안에 대하여 비교 분석한다.

2. 발전비용의 부하 역률에 관한 민감도

부하 역률은 유효전력과 무효전력의 관계식으로 표현되므로 무효전력이 주요한 영향을 미치게 된다. 부하역률이 나빠지면 전력손실이 많이 발생하게 되고 전압안정도에 심각한 영향을 미치는 등 계통운용을 어렵게 만든다. 따라서, 부하역률을 전력계통의 안정성이나 경제적인 관점에서 어느 수준으로 유지하여야 효율적인가 하는 문제 등은 깊이 있게 연구되어야 하고, 여러 가지 면들을 동시에 고려하여 검토해야 할 필요가 있다. 전력계통의 안전도와 경제성을 고려한 전력계통의 최적운용을 추구하는 최적조류계산의 목적함수로 가장 널리 채택되고 있는 것은 유효전력 생산비용이다. 이 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 구하면, 무효전력 투입위치나 보상량 결정 또는 부하역률 개선 방안 수립 시에 효과적으로 활용할 수 있다. 발전비용은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$F = \sum_{i \in NTG} F_i(P_{Gi}) = \sum_{i \in NTG} \{A_i + B_i \cdot P_{Gi} + C_i \cdot P_{Gi}^2\} \quad (1)$$

여기서,  $P_{Gi}$ 는 모선  $i$ 의 발전기의 유효 전력 발전량이고,  $NTG$ 는 발전 모선의 집합을 나타내고,  $A, B, C$ 는 발전비용 계수이다. 역률 개선은 무효전력을 투입하여 역률을 개선하는 문제이므로, 유효전력의 부하는 일정한 것으로 가정한다.  $m$  모선의 유효전력  $P_m$ 은 상수이고, 무효전력  $Q_m$ 은  $m$  모선의 부하역률인  $pf_m$ 에 의해

$$Q_m = P_m \sqrt{\frac{1}{(pf_m)^2} - 1} \quad (2)$$

으로 표시된다. 문제를 부하역률의 관점에서 표현하더라도, 결국은 역률변화에 해당하는 보상량에 의해 투자비용이나 제어량이 결정되기 때문에 발전비용의  $m$  모선의 부하역률에 관한 민감도는  $\frac{\partial F}{k \cdot \partial (pf_m)}$ 으로 정규화하는 것이 필요하다. 여기서  $k = \frac{P_m}{(pf_m)^2 \sqrt{1 - (pf_m)^2}}$ 으로 표현되는 정규화 계수이다.  $m$  모선의 발전비용의 부하

역률에 관한 민감도는 Chain rule을 적용하여 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$S_{(M)} = - \frac{\partial F}{k \cdot \partial (pf_k)} = - \frac{\partial F}{\partial Q_k} \frac{\partial Q_k}{k \cdot \partial (pf_k)}$$

$$= - \sum_{i \in N_{TRG}} \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_j} \frac{\partial \delta_j}{\partial Q_k} \frac{\partial Q_k}{k \cdot \partial (pf_k)}$$

$$- \sum_{i \in N_{TRG}} \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_k} \frac{\partial Q_k}{k \cdot \partial (pf_k)} \quad (3)$$

여기서, 수식의 부호는 지상역률시 음의 부호, 진상역률시 양의 부호로 되며, 편미분의 값들은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} = B_i + 2 * C_i * P_{Gi} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_j} = V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i - \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_i} = - \sum_{j \in N_L} V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i - \theta_{ij}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_j} = - V_j y_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i - \theta_{ij}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_i} = - \sum_{j \in N_L} V_j y_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i - \theta_{ij})$$

$$+ \sum_{j \in N_L} 2 V_i y_{ij} \cos(\theta_{ij}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \delta_j}{\partial Q_k} = [J^{-1}]_{(j, n+k)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial V_j}{\partial Q_k} = [J^{-1}]_{(n+j, n+k)} \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial (pf_k)} = - \frac{P_k}{(pf_k)^2 \sqrt{1 - (pf_k)^2}} \quad (11)$$

여기에서,  $J$ 는 조류계산의 Jacobian 행렬을 나타내고,  $[J^{-1}]_{(j, n+k)}$ 는  $J$ 의 역행렬의  $\delta_j$ 와  $Q_k$ 에 일치하는 요소를 나타내고,  $[J^{-1}]_{(n+j, n+k)}$ 는  $J$ 의 역행렬의  $V_j$ 와  $Q_k$ 에 일치하는 요소를 나타낸다.

### 3. 부하역률 감도를 이용한 역률 개선 방안 결정 절차

앞 장에서 제시한 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 사용하여, 무효전력의 투입위치와 무효전력의 보상량을 결정하고 역률을 개선하는 방안을 선정할 수 있다. 이 감도를 이용하여 무효전력의 투입위치를 선정하고 무효전력 보상으로 부하 역률을 조정하기 위한 절차도는 그림 1과 같다. 제시된 민감도식을 사용하면 1회 계산으로 모든 부하모선에 대한 민감도가 계산되고 민감도의 크기가 서로 비교될 수 있으므로 우선적으로 무효전력 설비를 설치하거나 우선적으로 역률을 개선해야 할 모선을 선정할 수 있어서, 계통 운용에 효과적으로 활용할 수 있다.

절차도 내의 반복과정에서 매 반복시 마다 민감도를 계산하여 민감도 크기에 따라 무효전력 투입 모선을 선정하고, 커패시터나 리액터의 지정된 무효전력이 단계적으로 보상되며, 보상효과가 작거나 최대무효전력 보상량에 도달할 때까지 반복하여 부하역률을 조정하게 된다.

### 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서는 Ward & Hale의 6모선 전력 시스템을 사용하여 분석한다. 이 시스템의 계통도를 Power World 프로그램의 화면으로 표시한 것이 그림 2에 보여져 있다. 이 논문에서 가정된 모선 1, 2 발전기들의 발전 비용 계수들은 표 1에 보여져 있다. 베이스케이스에 대하여 OPF 프로그램을 수행시키고 각 부하모선에

서의 부하역률의 발전비용에 대한 초기감도를 계산한 것이 표 2에 제시되어 있다.

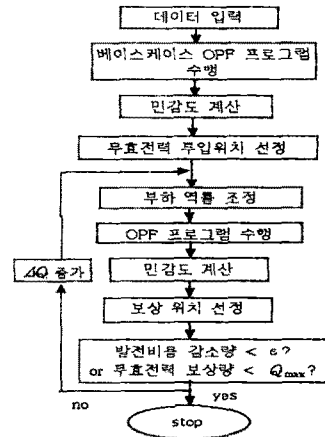


그림 1 민감도를 이용한 부하역률을 조정 플로우 차트

베이스케이스에 대하여 OPF 프로그램을 수행시키고 각 부하모선에서의 부하역률의 발전비용에 대한 초기감도를 계산한 것이 표 2에 제시되어 있다. 이 표에서 모선 6에서의 값이 가장 큰 것으로 나타났으므로 이 부하모선이 반복과정의 첫단계에서 우선적으로 무효전력 보상 설비를 투입할 위치가 된다.

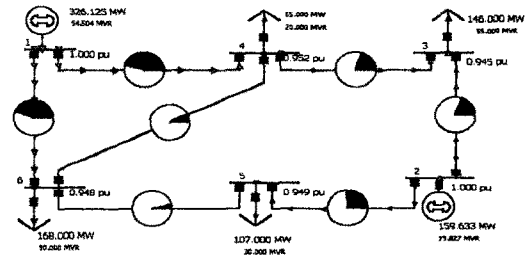


그림 2 6모선 전력시스템

표 1. 발전비용 계수

발전기 번호	발전비용계수 ( $F = C_f \cdot (A + BP + CP^2)$ ) (\$/Hr)			연료단가 ( $C_f$ )
	A	B	C	
1	215.6	8.1	0.0011	1.80
2	222.7	9.7	0.0014	2.25

표 2. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도

모선번호	3	4	5	6
초기 감도(\$/(Hr·MVar))	0.357	0.324	0.331	0.432
초기 부하 역률	0.936	0.940	0.963	0.881

병렬 커패시터를 사용하여 민감도에 따라 보상한 경우와 모선 3에서 90[MVar]까지 증가시키면서 발전 비용이 어떻게 변화하는지 그래프로 나타낸 것이 그림 3에 보여져 있다. 부하 역률의 민감도에 따라 무효전력을 보

상하는 것이 민감도가 낮은 모선 3에서의 보상보다 훨씬 더 효과적임을 알 수 있다. 같은 조건하에서 유효전력 손실이 어떻게 변화하는지가 각기 그림 4에 보여져 있는데, 유사한 결과를 보여준다. 국부적인 역률이 아니라 시스템의 역률을 전 발전기들의 유효전력 합과 전 발전기들의 무효전력의 합의 관계식으로 정의할 수 있다. 이렇게 정의할 때, 민감도에 따른 무효전력 보상과 모선 3에서의 보상이 시스템의 역률에 미치는 영향이 어떤지를 그림 5에서 보여 주고 있다. 이 그림에서 보면 동일한 양의 무효전력을 보상하더라도 투입 위치에 따라 시스템의 역률 개선효과가 달라짐을 알 수 있고, 민감도에 따른 보상이 시스템의 역률을 더 개선 시킴을 알 수 있다. 민감도에 따른 무효전력 보상시의 발전비용과 최저 모선전압의 변화가 그림 6, 7에 각기 보여져 있다. 모선 6에서 무효전력을 110[MVar]까지 증가 시키면서 모선 6의 역률 변화에 대한 발전 비용의 변화를 그래프로 표시한 것이 그림 8이다. 모선 6은 민감도가 높은 모선인데, 부하 역률이 개선되면서 발전비용이 줄어들고 있는 모습을 잘 보여 주며, 모선 6의 역률이 진상이 되더라도 전체 시스템 역률은 여전히 지상 0.95 정도의 수준밖에 안되므로 발전비용 개선효과가 있음을 보여준다. 위의 시뮬레이션 결과들을 통하여 부하역률의 발전비용에 대한 감도가 무효전력의 투입위치 선정과 부하 역률을 조정하기 위한 방안 결정에 효과적으로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 수식으로 유도하여 도출하고, 이 민감도를 이용하여 부하역률의 변화에 의해 발전비용이 어떻게 변화하는지를 간단한 소규모의 전력시스템을 사용하여 분석하였다. 발전비용의 부하역률에 관한 감도를 이용하여 무효전력의 투입위치를 선정하고 무효전력 보상으로 부하 역률을 조정하기 위한 방안을 결정하는 절차를 제시하였으며, 이 방법으로 발전비용을 효과적으로 줄일 수 있음을 보여 주었다. 부하역률에 따른 전력 손실의 변화와 선로 조류의 변화 등도 분석하였다. 이러한 연구결과들이 향후의 더 심도 깊은 관련 연구를 거쳐서 부하역률 유지 방안 수립과 부하역률을 개선하기 위한 조상 설비의 투자계획이나 운용 등에 대한 정책을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

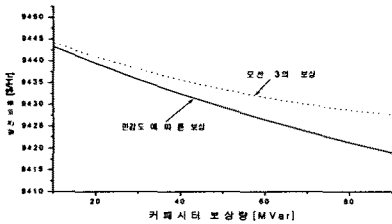


그림 3 커패시터 보상량에 따른 발전비용 비교

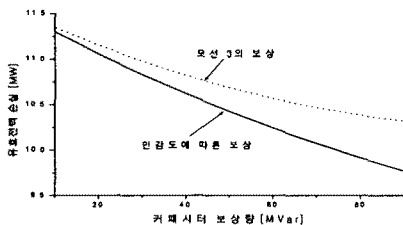


그림 4 커패시터 보상량에 따른 유효전력 손실 비교

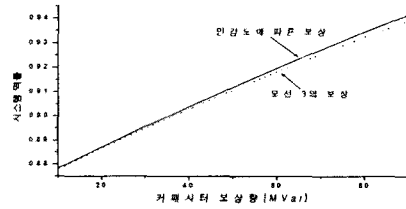


그림 5 커패시터 보상량에 따른 시스템 역률 변화 비교

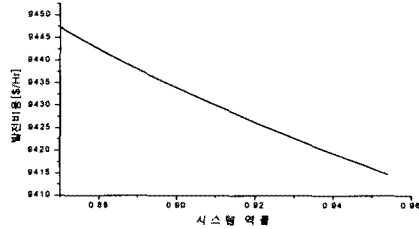


그림 6 시스템 역률변화에 따른 발전비용 변화

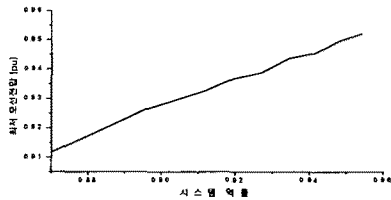


그림 7 시스템 역률변화에 따른 최저 모선 전압 변화

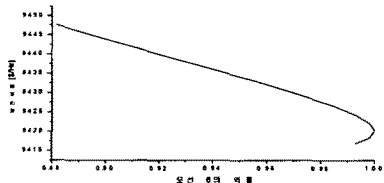


그림 8 모선 6의 역률변화에 따른 발전비용 변화

### (참 고 문 헌)

- [1] P. Nedwick, A.F. Mistr, E.B. Croasdale, "Reactive management: A key to survival in the 1990s", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp.1036-1043, May, 1995.
- [2] David I. Sun, Bruce Ashley, Brian Brewer, Art Hughes and William F. Tinney, "Optimal Power by Newton Approach", IEEE Trans. Power App. and Syst., Vol. PAS-103, No. 10, Oct. 1984.
- [3] F.G.M. Lima, S.Souares, A. Santos, K.C. Almeida, F.D. Galiana, "Numerical experiments with an optimal power flow algorithm based on parametric techniques", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 3, pp.374-379, Aug., 2001.
- [4] 한국전력연구원, "전력계통 안정도 정밀 해석을 위한 적정 부하 모델에 대한 연구", 2001.3.
- [5] 한국전력거래소, "전력계통 전압운용 및 부하 역률 결정 방안에 관한 연구", 2002.12.