2003년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집(2003.11.13~15)

발전비용의 부하역률 감도와 종합비용을 활용한 효과적인 역률개선 방안 연구

이병하*, 오민혁*°　　김정훈**, 심건보**
*인천대학교 전기공학과　　**홍익대학교 전자전기공학부

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

B.H.Lee*, M.H.Oh*°　　J.H.Kim**, K.B.Shim**
*University of Incheon　　**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 ractive 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 and integrated costs are used for determining the locations and capacities of reactive power compensation devices effectively and for enhancing the load power factor appropriately. It is shown through the application to a small-scale power system that the system power factor can be enhanced effectively and appropriately using the load power factor sensitivity and integrated costs.

1. 서　론

한국의 전력 산업에 구조개편이 도입되어 전력산업이 수직 독점 체제에서 경쟁체제로 바뀜에 따라 전력시스템 계획과 운용을 분리하게 되었고, 상호간의 견제적 작용이 구조적으로 존재함에 따라 계통 운용 관점에서 통합적인 무효전력 관리가 힘들어지고 있다. 또한, 전력 수요의 지속적인 증가와 함께 무효전력 수요도 급증하고 있어서 전력손실이 증대되고 있고 전압안정도가 문제가 될 수 있으므로 부하 역률 관리의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 이러한 상황에서 부하 역률을 전력계통의 안정성이나 경제적인 관점에서 어느 수준으로 유지하여야 효율적인가 하는 문제는 새로운 전력 환경에서 검토할 필요가 있다. 각국마다 부하 역률을 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, 부하 역율 모델과 부하 역률의 경제성에 미치는 영향에 대한 본격적인 연구는 없었다. 국내에서도 역률의 일부 범위에 대하여 기본요금에 대한 증액과 감액을 통하여 역률이 적절히 유지되도록 유도하고 있다. 그러나, 부하역률 유지 방안과 무효전력을 보상하는 조상 설비의 투자계획이나 운용 방안 수립시에 효과적으로 활용될 수 있는 부하역률의 기준이나 정책은 제대로 제시되어 있지 못한 실정이다.

본 논문에서는 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 이용하여 부하역률을 효과적으로 개선하고, 투자비용과 발전비용 등을 고려하여 적절한 역률 값을 결정하는 절차를 제시한다. 전압을 적절한 범위내로 유지시키는 것이 역률개선의 주요한 목적 중의 하나이므로 전압의 변동을 비용으로 환산하여 이를 역률의 값을 결정하는데 적용한다. 또한, 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 무효전력을 보상하는 위치와 보상량을 체계적으로 결정하는 데에도 활용한다. 이를 위하여 간단한 소규모의 전력시스템을 사용하여 분석한다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도와 종합비용을 활용하여 부하역률의 변화가 발전 비용에 미치는 영향을 분석하고 적절한 부하 역률 개선치를 결정한다.

2. 발전비용의 부하 역률에 관한 민감도

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 발전비용이며, 이것은 아래와 같이 표현될 수 있다.

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

여기서, F_i 는 i 발전기의 연료비용 함수이고, P_{Gi}는 모선 i의 발전기의 유효 전력 발전량, NTG는 발전모선의 집합을 나타내고, A. B, C는 발전비용 계수이다. 역률 개선은 무효전력을 투입하여 역률을 개선하는 문제이므로, 유효전력의 부하는 일정한 것으로 가정한다.

발전비용의 m 모선 부하역률에 관한 민감도는 Chain rule을 적용하여 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{(pf)} &= -\frac{\partial F}{k_m \cdot \partial(pf_m)} = -\frac{\partial F}{\partial Q_m}\frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)} \\ &= -\sum_{i \in NTG}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}}\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_j}\frac{\partial \delta_j}{\partial Q_m}\frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)} \\ &\quad -\sum_{i \in NTG}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}}\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_j}\frac{\partial V_j}{\partial Q_m}\frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서, pf_m: 모선 m의 역률, P_m, Q_m: 모선 m의 유효 전력 부하와 무효 전력 부하, V_j, δ_j: j 모선의 전압의 크기와 위상각, $k_m = \frac{P_m}{(pf_m)^2\sqrt{1-(pf_m)^2}}$.

이 민감도식을 사용하면 1회 계산으로 모든 부하모선에 대한 민감도가 계산되고 민감도의 크기가 서로 비교될 수 있으므로 우선적으로 무효전력 설비를 설치하거나 우선적으로 역률을 개선해야할 모선을 선정할 수 있어서, 계통 운용에 효과적으로 활용할 수 있다.

3. 부하역률 감도와 종합비용을 이용한 역률 개선 방안 결정 절차

3.1 투자 비용

투자비는 전력 공급용 설비를 건설하는데 발생하는 설비비와 건설한 후 매년 운전여부와 무관하게 발생하는 유지비, 인건비 등의 고정비를 합한 비용으로 나타낸다. 설비비의 특성을 살펴보면 설비의 규모가 증가함에 따라 설비비는 단조 증가하는 경향을 갖고 있고, 검토대상 기간내에 전력수요를 만족시키기 위하여 수명이 경과된 설비는 계속 재투자 하여야만 검토 대상기간 이후에는 설비를 위한 투자가 더 이상 발생하지 않는다. 이 때 수명이 남은 설비는 잔존가치로 회수된다. 여기서는 간략히 하기 위해 잔존가치를 감안하여 설비의 수명을 고려하고, 잔존가치는 없는 것으로 가정한다. 이때, 유지비와 인건비를 포함한 설비 설치비용의 현가를 C_P, 수명을 L년, 할인율을 i, 매년 발생하는 균등화 비용을 C_F라 하면, 매년 발생하는 균등화 비용 C_F는 아래와 같이 표현된다.

$$C_F = C_P \cdot \frac{i(1+i)^L}{(1+i)^L - 1} \qquad (3)$$

이 비용이 투자비용을 매년 발생하는 균등화 비용으로 표시한 것이다.

3.2 전압 변동을 고려하는 비용 모형

전압을 적절한 범위내로 유지시키는 것이 역률개선의 주요한 목적 중의 하나이므로 역률의 값을 결정하는데 경제성만 고려할 수 없다. 따라서 최적 역률 값을 구하고자하는 수식화 과정에서 전압 변동을 또다른 비용으로 환산하는 수식을 제안한다. 아래의 전압변동페널티비용 (C_V)이 전압변동을 비용으로 환산한 것이다.

$$C_V = k_a \sum_{i \in N_{load}} \frac{\exp[\,k_b |V_i - 1.0|] - 1}{N_l} \cdot F \qquad (4)$$

여기에서, N_{load}: 부하모선들의 집합, N_l: 부하모선의 수, k_a, k_b: 상수, V_i: i모선의 p.u.단위의 전압크기, exp는 지수함수를 나타낸다.
이 함수는 부하모선전압이 규정전압을 벗어나면 지수적으로 증가하는 특성을 나타내고 있다.

3.3 부하역률 감도와 종합비용을 이용한 역률 개선 방안 결정 절차도

발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 사용하여, 무효전력의 투입위치와 무효전력의 보상량을 결정하고 역률을 개선하는 방안을 선정할 수 있다. 경제성과 전압의 유지범위를 고려하여 적절한 부하역률을 결정하기 위해 앞 절에서 기술한 비용들을 고려한다. 매년 발생하는 균등화비용으로 표현한 투자비용과 전압변동페널티비용과 발전비용을 포함한 종합비용을 계산하고, 이 종합비용이 최소가 되는 점을 최적의 역률 유지값으로 결정할 수 있다. 이와 같은 방법으로 최적 부하 역률값을 결정하기 위한 절차도는 그림 1과 같다.

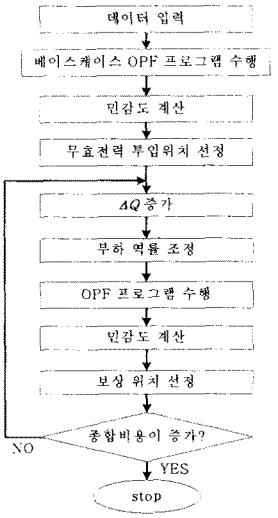

그림 1 민감도와 종합비용을 이용한 부하역률조정 플로우차트

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 가정한 모선 1, 2 발전기들의 발전 비용 계수들은 표 1에 제시되어 있다.

무효전력 보상설비의 설치비용의 현가를 60.0 [$/kVA], 수명은 30년, 할인율은 8%로 가정하였다. 또, $k_a = 1.25 * 10^{-3}$, $k_b = 25.0$으로 가정하였다.

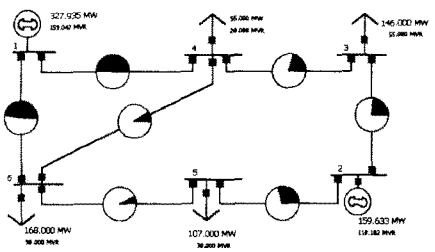

그림 2 6모선 전력시스템

표 1. 발전비용 계수

발전기 번호	발전비용계수 ($F = C_f \cdot (A + BP + CP^2)$[$]/(MW · 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

무효전력 보상설비를 사용하여 민감도에 따라 110[MVar]까지 무효전력보상량을 순차적으로 증가시키면서 보상한 경우에 대하여 검토한다. 국부적인 역률이 아니라 시스템의 역률을 전 발전기들의 유효전력 합과 전 발전기들의 무효전력의 합의 관계식으로 정의할 수 있다. 이렇게 정의할 때, 민감도에 따른 무효전력 보상시 시스템의 역률에 미치는 영향이 어떤지를 그림 3에서 보여 주고 있다. 민감도에 따른 무효전력 보상시의 최저 모선전압의 변화가 그림4에 보여져 있다.

민감도에 따라 110[MVar]까지 무효전력보상량을 순차적으로 증가시킬 때 연간발전비용의 변화와 연간 무효전력보상설비 투자비용의 변화가 각기 그림5와 그림6에 보여져 있다. 이 때의 전압변동페널티비용이 그림 7에 보여져 있다. 그리고 그림5, 6, 7을 종합한 비용이 그림 8에 제시되어 있다. 이 경우의 최적점은 70[MVar]의

무효전력량을 부하 역률의 민감도에 따라 보상하는 것이다. 마지막으로 시스템역률의 변화에 따라 연간종합비용이 변화하는 그림이 그림9에 보여져 있다. 이 경우 그림9에서 연간종합비용이 가장 작은 최적역률치는 0.927이다. 단위무효전력 보상당 설비투자비용과 전압변동페널티비용의 상수들의 값, 전력시스템의 특성 등에 따라서 그림이 달라지게 된다. 계통계획 및 운용의 결정권자가 전압변동 등의 중요성을 감안하여 적절한 값을 선정하면 된다. 위의 시뮬레이션 결과들을 통하여 부하역률의 발전비용에 대한 감도와 투자비용과 발전비용과 전압변동 페널티비용을 포함하는 종합비용을 활용하여, 효과적으로 부하 역률을 개선하고 적절한 역률값을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

발전비용의 부하역률에 관한 감도와 종합비용을 이용하여 무효전력의 투입위치를 선정하고 적절한 부하 역률 조정치를 결정하는 절차를 제시하였다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도와 종합비용을 활용하여 부하역률의 변화에 의해 발전비용이 어떻게 변화하는지와 최적의 역률개선치를 구하는 방법을 간단한 소규모의 전력시스템을 사용하여 분석하였다. 그리고, 부하 역률에 따른 발전비용의 변화, 종합비용의 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.

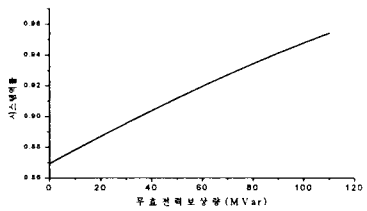

그림 3 무효전력 보상량에 따른 시스템 역률 변화

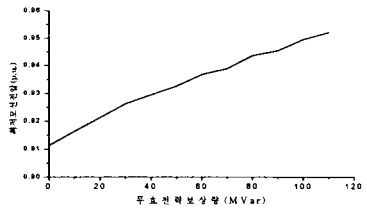

그림 4 무효전력 보상량에 따른 최저 모선전압 변화

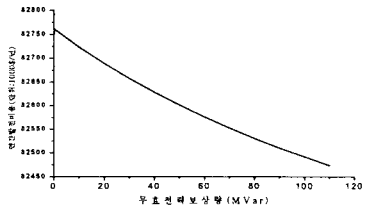

그림 5 무효전력 보상량에 따른 발전비용 변화

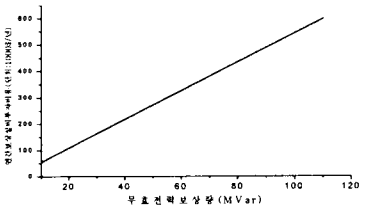

그림 6 무효전력 보상량에 따른 보상설비투자비용 변화

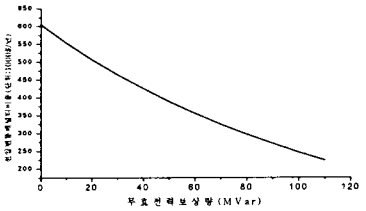

그림 7 무효전력 보상량에 따른 전압변동페널티비용 변화

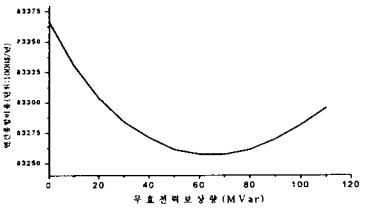

그림 8 무효전력 보상량에 따른 종합비용 변화

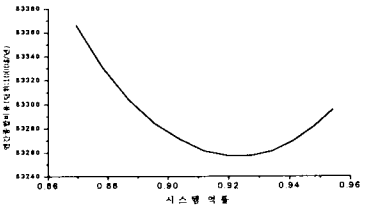

그림 9 시스템 역률변화에 따른 종합비용 변화

[참 고 문 헌]

[1]M.M. Saied, "Optimal Power Factor Correction", IEEE Trans. Power Systems, Vol.3, No. 3, pp.844-851, Aug., 1988.
[2]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.
[3]F.G.M. Lima, S.Soares, 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]한전전력연구원, "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.