

부하역률 감도기법 적용에 의한 효율적인 부하역률 개선에 관한 연구

論 文

54A-1-3

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

李 丙 河[†] · 金 正 勳^{*}
(Byung Ha Lee · Jung-Hoon Kim)

Abstract - Various problems such as the increase of the power loss and the voltage instability may often occur in the case of low load power factor. The demand of reactive power increases continuously with the growth of active power and the restructuring of electric power companies makes the comprehensive management of reactive power a troublesome problem, so that the systematic control of load power factor is required. In this paper, the load power factor sensitivity of the generation cost is derived and it is used for determining the locations of reactive power compensation devices effectively and for enhancing the load power factor appropriately. In addition, the voltage variation penalty cost is introduced and the integrated costs including the voltage variation penalty cost are used for determining the value of the load power factor from the point of view of the economic investment and voltage regulation. It is shown through the application to a large-scale power system that the load power factor can be enhanced effectively and appropriately using the load power factor sensitivity and integrated costs.

Key Words : Load Power Factor, Power Factor Sensitivity, Generation Cost, Voltage Variation Penalty cost, Reactive Power

1. 서 론

수직 독점체제로 운영하던 우리 나라의 전력산업이 경쟁체제로 변환되어 전력시스템 계획과 운용을 분리하게 되었고, 상호간의 경제적 작용이 구조적으로 존재함에 따라 계통 운용 관점에서 통합적인 무효전력 관리가 힘들어지고 있다. 전력 수요의 지속적인 증가와 함께 무효전력 수요도 급증하고 있어서 전력손실이 증대되고 있다. 또한 무효전력 공급 부족은 전압안정도 문제를 일으킬 수 있으므로 부하 역률 관리의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 이러한 상황에서 부하 역률을 전력계통의 경제적인 측면에서 어느 수준으로 유지하여야 효율적인가 하는 문제는 새로운 전력 환경에서 검토할 필요가 있다. 각국마다 부하 역률을 일정 수준으로 유지하기 위한 규제나 요금제도 등이 마련되어 있고, 규정 전압 유지 측면에서의 부하 역률 개선을 위한 무효전력 설비 투자 계획 등에 대한 연구들은 상당히 연구되어 왔으나, 부하 역률 모델과 부하 역률의 경제성에 미치는 영향에 대한 본격적인 연구는 없었다. M.M. Saied 는 전력손실과 무효전력 보상설비 비용과 역률을 개선함으로써 경감할 수 있는 선로나 변압기의 설치 비용을 근사적으로 계산하고 이들의 비용의 합을 최소로 하

는 역률을 결정하는 연구를 수행하였다[1]. 그러나 전체 역률만을 고려하여 어느 모선의 역률을 조정해야 하는지가 고려되지 않았고, 설비들의 비용도 개략적으로만 추론하였다. P.Nedwick 은 버지니아 전력회사가 개발하여 사용한 무효전력 관리 프로그램을 설명하고, 이 프로그램에서는 무효전력의 장거리 소용보다 무효전력이 필요한 모선 근처에서 무효전력을 공급하여 손실을 최소화하고 가능한 역률을 1에 가깝게 무효전력 여유를 유지시키며 운전하는 것을 목표로 하고 있음을 밝히고 있다[2]. Costa는 제약조건을 고려하는 라그랑지 함수에 뉴턴법을 적용하여 최적무효전력을 배분하는 연구를 수행하였고, 부등식 제약조건은 페널티를 적용하여 라그랑지 목적함수에 포함시켜 계산하였다[3]. 이 연구에서 부하역률은 고려치 않았고, 부등식 제약조건에 적용되는 페널티는 단지 타당성이 있는 영역으로 해가 쉽게 수렴되도록 하기 위한 것이다. 배전계통의 콘텐서의 최적 위치 및 용량을 산정하기 위하여 전력손실을 포함하는 라그랑지 함수의 모선무효전력에 대한 미분 값을 해석하여 투입지점을 선정하고, 손실최소 결과를 관찰하여 적정 콘텐서 용량을 결정하였다[4]. 여기서는 발전비용을 고려하지 않았다.

본 논문에서는 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 수식으로 유도하여 도출하고, 이 민감도를 무효전력을 보상하는 위치와 보상순서를 체계적으로 결정하는 데 활용하여 부하역률을 효과적으로 개선시킬 수 있음을 보여준다. 역률개선의 주요한 목적 중의 하나가 전압을 적절한 범위내로 유지시키는 것이므로 기존의 전압에 대한 제약조건 방식 대신에 지수 함수 꼴의 페널티 함수를 도입하여 전압변동을 또 다른 비용

[†] 교신저자, 正會員: 仁川大學校 電氣工學科 副教授 · 工博

E-mail: bhlee@incheon.ac.kr

^{*} 正會員: 弘益大學校 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字: 2004년 8월 24일

最終完了: 2004년 12월 9일

으로 환산하여 산정하는 기법을 제안하였다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도와 발전비용, 보상설비 투자비용, 전압 변동 페널티비용을 합한 종합비용을 고려하여 적절한 역률 값을 결정하는 절차를 제시하고, 이를 한전의 실계통에 적용하여 분석한다. 부하 역률 유지 방안 수립과 무효전력을 보상하는 조상 설비의 투자계획이나 운용 등에 대한 정책을 수립하는데 활용할 수 있는 기초연구로서, 발전비용의 부하역률에 관한 민감도와 종합비용을 활용하여 부하역률의 변화가 전력 시스템의 무효전력 보상설비 투자에 미치는 영향을 분석한다.

2. 발전비용의 부하역률에 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 안정도와 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.

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

여기서, F 는 총 발전 비용, F_i 는 i 모선 발전기의 발전비용, F_{Gi} 는 i 모선 발전기의 연료비 단가, P_{Gi} 는 i 모선 발전기의 유효 전력 발전량이고, NTG 는 발전 모선의 집합을 나타내고, A, B, C 는 발전비용 계수이다. 모선 i 의 전력방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$P_{Gi} - P_{Li} + \sum_{j \in N_{Li}} V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) - \sum_{j \in N_{Li}} V_i^2 y_{ij} \cos(\theta_{ij}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} + \sum_{j \in N_{Li}} V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) + \sum_{j \in N_{Li}} V_i^2 y_{ij} \sin(\theta_{ij}) + \sum_{j \in N_{Li}} \omega C_{1ij} V_i^2 / 2 = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

위의 식에서, N_{Li} 는 모선 i 와 선로로 연결된 모선들의 집합, P_{Li} , Q_{Li} 는 i 모선의 유효전력 부하와 무효전력 부하, Q_{Gi} 는 i 모선 발전기의 무효 전력 발전량, V_i , δ_i 는 i

모선의 전압의 크기와 위상각, y_{ij} , θ_{ij} 는 i 모선과 j 모선간의 선로 어드미턴스 크기와 위상각, C_{1ij} 는 모선 i, j 간의 선로의 분로 커패시턴스, ω 는 각속도, n 은 전체 모선의 수를 나타낸다. 무효전력을 보상하는 제어설비를 발전 모선이 아닌 부하모선인 m 모선에 설치하는 경우, 이를 수식에 반영시키면 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$Q_m = Q_{Cm} - Q_{Lm} = - \sum_{j \in N_{Lm}} V_m V_j y_{mj} \sin(\delta_m - \delta_j - \theta_{mj}) - \sum_{j \in N_{Lm}} V_m^2 y_{mj} \sin(\theta_{mj}) - \sum_{j \in N_{Lm}} \omega C_{1mj} V_m^2 / 2 \quad (4)$$

여기서 Q_{Cm} 은 m 모선 무효전력의 제어량을 나타낸다. 역률 개선은 무효전력을 투입하여 역률을 개선하는 문제이므로, 유효전력의 부하는 일정한 것으로 가정한다. m 모선의 유효전력 P_m 은 상수이고, m 모선의 무효전력 Q_m 은 m 모선의 부하역률인 pf_m 에 의해

$$Q_m = P_m \sqrt{\frac{1}{(pf_m)^2} - 1} \quad (5)$$

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

m 모선의 발전비용의 부하역률에 관한 민감도($S_{(pf)m}$)는 Chain rule을 적용하여 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$S_{(pf)m} = - \frac{\partial F}{k_m \cdot \partial(pf_m)} = - \frac{\partial F}{\partial Q_m} \frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)} = - \sum_{i \in NTG} \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_j} \frac{\partial \delta_j}{\partial Q_m} \frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)} - \sum_{i \in NTG} \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_m} \frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)} \quad (6)$$

위의 식(6)에서 나타나는 편미분의 값들은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} = (B_i + 2 \cdot C_i \cdot P_{Gi}) \cdot F_{Gi} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_j} = - V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_i} = \sum_{j \in N_{Li}} V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_j} = -V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_{Gi}}{\partial V_i} = - \sum_{j \in N_L} V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) + \sum_{j \in N_L} 2 V_j y_{ij} \cos(\theta_{ij}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \delta_j}{\partial Q_m} = [J^{-1}]_{(j, n+m)} \quad (12)$$

$$\frac{\partial V_j}{\partial Q_m} = [J^{-1}]_{(n+j, n+m)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial (pf_m)} = - \frac{P_m}{(pf_m)^2 \sqrt{1 - (pf_m)^2}} \quad (14)$$

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

이 민감도 식을 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 계획 및 운용에 효과적으로 활용될 수 있다.

3. 부하역률 감도와 종합비용을 이용한 역률 개선 방안 결정 절차

3.1 투자 비용

전력 공급용 설비를 건설하는데 발생하는 설비비와 건설한 후 매년 운전여부와 무관하게 발생하는 유지비, 인건비 등의 고정비를 합한 비용을 투자비로 정의할 수 있다. 설비비의 특성을 살펴보면 설비의 규모가 증가함에 따라 설비비는 단조 증가하는 경향을 갖고 있고, 검토대상 기간내에 전력수요를 만족시키기 위하여 수명이 경과된 설비는 계속 재투자하여야 한다. 이 때 수명이 남은 설비는 잔존가치로 회수된다. 여기서는 간략히 하기 위해 잔존가치를 감안하여 설비의 수명을 고려하고, 잔존가치는 없는 것으로 가정한다. 여러 가지 비용들이 다른 시간대에서 발생하거나 검토 대상 기간 전체에 걸쳐서 발생하는 경우에는 돈의 시간적 가치를 고려하여 동일한 시점에서의 비용으로 환산하여 계산하여야 한다. 유지비와 인건비를 포함한 설비 설치비용의 현가를 C_P , 수명을 L 년, 할인율을 i , 매년 발생하는 균등화 비용을 C_F 라 하면, 매년 발생하는 균등화 비용 C_F 는 아래와 같이 표현된다[8].

$$C_F = C_P \cdot \frac{i(1+i)^L}{(1+i)^L - 1} \quad (15)$$

이 값이 투자비용을 매년 발생하는 균등화 비용으로 표시한 것이다.

본 논문에서는 무효전력을 투입하여 역률을 개선하는 문제이므로, 유효전력의 부하는 일정한 것으로 가정하며 무효전력을 보상하는 설비들의 투자비용만을 고려한다.

3.2 전압 변동을 고려하는 비용 모형

역률개선 의 주요한 목적 중의 하나가 전압을 적절한 범위로 유지시키는 것이므로 역률의 값을 결정하는데 경제성만 고려할 수 없다. 따라서 최적 역률 값을 구하고자하는 수식화 과정에서 전압 변동을 또 다른 비용으로 환산하여 산정한다. 전압의 허용 범위를 정하고 이 전압의 범위에 들면 적합한 해가 되고 이 범위를 벗어나면 재조정하여 적합한 해를 구하는 방법이 많이 사용되고 있지만, 허용범위의 경계치 부근의 값을 취급할 때에 아주 작은 값의 차이임에도 적합 또는 부적합의 극단적인 해로 취급하는 이 방법은 불합리한 점이 있다. 또한, 기준값으로부터 $\pm 10\%$ 의 전압변동 허용범위를 준다고 가정할 경우에 1.0[p.u]에 해당하는 전압과 0.9[p.u]에 해당하는 전압은 둘 다 허용범위 내에 있는 해이지만 전압의 질에 있어서 차이가 있기 때문에 동일하게 취급하는 것은 불합리한 점이 된다. 이러한 점들을 고려하여 전압의 허용 범위를 주는 제약조건을 페널티 함수를 도입하여 전압이 원하는 값에서 벗어날수록 큰 값을 갖도록 하여 전압 변동을 비용으로 환산한다. 아래의 전압변동페널티비용(C_V)이 전압변동을 비용으로 환산한 것이다.

$$C_V = k_a \sum_{i \in N_{load}} \frac{\exp[k_b |V_i - V_n|] - 1}{N_i} \cdot F \quad (16)$$

여기에서, N_{load} : 부하모선들의 집합, N_i : 부하모선의 수, k_a, k_b : 상수, V_i : i 모선의 p.u.단위의 전압크기, V_n : i 모선의 p.u.단위의 원하는 전압의 크기, F 는 총 발전 비용, \exp 는 지수함수를 나타낸다. 이 함수는 부하모선전압이 원하는 전압의 값이면 영이나, 원하는 전압을 벗어나면 지수적으로 증가하는 특성을 나타내고 있으며, 모든 부하모선에 대하여 값을 합하고 부하모선의 수 N_i 로 나눔으로써 모든 부하모선에 대한 평균값을 취한 것이다. 전압변동페널티비용의 상수들인 k_a, k_b 의 값은 계통계획 및 운용의 결정권자가 전압변동과 경제성 측면 등의 중요성을 감안하여 적절한 값을 선정하면 된다.

위에서 고려한 발전비용, 보상설비 투자비용, 전압변동 페널티비용을 합한 비용을 종합비용이라고 정의하고, 이 종합비용을 최소화하는 값을 구하면 전압변동을 고려하는 전력계통 계획 관점에서의 최적 역률 값을 구할 수 있다.

3.3 부하역률 감도와 종합비용을 이용한 역률 개선 방안 결정 절차도

발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 사용하여, 무효전력의 투입위치와 무효전력의 보상량을 결정하고 역률을 개선하

는 방안을 선정할 수 있다. 경제성과 전압의 유지범위를 모두 고려하여 적절한 부하역률을 결정하기 위해 앞 절에서 기술한 비용들을 고려한다. OPF 프로그램을 수행하여 발전비용이 최소가 되게 발전력을 배분하고 이 상태에서 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 구하여 무효전력을 보상하는 위치와 보상순서를 결정한다. 보상을 수행한 후 매년 발생하는 균등화비용으로 표현한 투자비용과 전압변동페널티비용과 발전비용을 포함한 종합비용을 계산하고, 이 종합비용이 무효전력 보상을 실시하면 어느 정도까지는 감소하다가 최적점을 지나면 역으로 증가하게 되므로 최소가 되는 점을 구할 수 있다. OPF 프로그램을 수행하여 발전비용이 최소가 되게 발전력을 배분하고, 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 구하여 무효전력을 보상하는 위치와 보상순서를 결정하여 무효전력 보상을 수행하고, 이 때의 종합비용을 계산하여 종합비용이 더 이상 감소하지 않을 때까지 동일 과정을 반복하여 최적 역률 개선 방안을 결정할 수 있다. 여기서 발전비용의 부하역률에 관한 민감도 값은 반복 계산 시에 거의 변화하지 않는 결과를 보여주고 있어 매번 계산할 필요는 없고, 계산의 정도를 높이기 위해 수 회 반복하여 보상해 준 후에 한번씩 계산해 주는 것으로 충분하다. 반면에, OPF 프로그램으로는 그 조건에서의 보상 값만 결정하여 줄 뿐 앞으로의 추가 보상에 대한 정보를 주지 못한다. 이러한 점들을 고려하여 최적 부하 역률 값을 결정하기 위한 절차도는 그림 1과 같다.

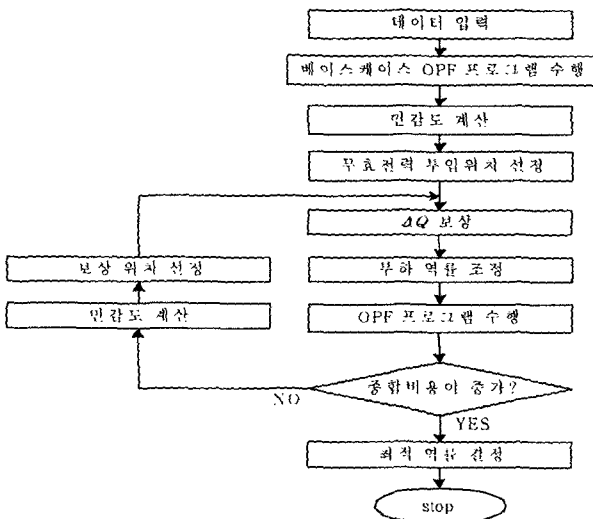


그림 1 민감도와 종합비용을 이용한 부하역률조정 플로우차트
Fig. 1 Flow chart of load power factor adjustment using the sensitivity and integrated costs

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서는 2004년 하계의 한전의 전력 시스템을 사용하여 분석한다. 이 전력 시스템은 154kV 이상의 설비에 대하여 모선수 1550개, 송전선로 2592선로, 변압기 165백크이고 발전기 249기와 부하 52,812MW를 가지고 있다. 이 시스템의

345kV 이상의 주요 계통도를 Power World 프로그램의 화면으로 표시한 것이 그림 2에 보여져 있다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도는 PSS/E 패키지와 IPLAN 프로그램을 활용하여 계산하였고, OPF프로그램 수행은 Power World 상용 프로그램을 사용하였다. Power World 프로그램은 PSS/E 패키지의 데이터를 호환할 수 있는 기능을 가지고 있다. 따라서 PSS/E의 패키지에서 사용하는 데이터(*.raw 형의 데이터)를 그대로 불러 들여서 동일한 시스템에 대하여 Power World의 OPF프로그램 계산을 수행한다.

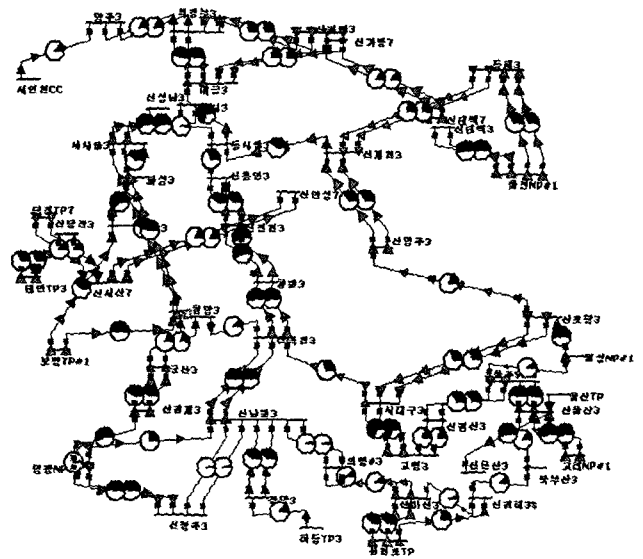


그림 2 한전 전력시스템 (2004년)
Fig. 2 The power system of KEPCO (2004)

무효전력 보상설비의 수명은 30년, 할인율은 8%로 가정하였다. 또, 점차 전력의 높은 품질이 요구되는 상황으로 변화되어 가고 있으므로 전압변동페널티비용을 고려하며, 전압변동페널티비용의 계수들을 $k_a = 2.5 * 10^{-4}$, $k_b = 30.0$ 으로 가정하였다. 주 검토시에 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가를 30.0[\$/kVA]로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 추가로 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 변하는 경우를 고려하여 20.0[\$/kVA]와 40.0[\$/kVA]인 경우들에 대하여 간단히 비교하였다. 한전의 2004년 하계의 전력 시스템을 시뮬레이션을 위한 기본 케이스로 두고, 이 경우의 무효전력 보상설비의 투자 비용을 영으로 간주하였다. 기본 케이스에서의 부하역률은 0.908이다. 모든 부하에 대한 부하역률의 분석은 수많은 케이스의 부하모델들에 대하여 분석하여 종합하여야 하지만, 여기서는 분석의 단순화를 위해 이 기본 케이스의 전력시스템 모델이 대표적인 부하모델이고, 계속하여 이 부하대를 유지하면서 전력 시스템이 운용된다고 가정하고 기술한다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도에 따라 무효전력을 보상하는 위치를 결정하고, 무효전력 보상설비에 의한 순차적인 무효전력 보상을 통하여 부하역률을 개선시켜나가면서 각 변수들의 변화되는 궤적들을 통하여 분석한다.

민감도에 따라 부하역률을 순차적으로 증가시킬 때 연간 발전비용의 변화와 연간 무효전력보상설비 투자비용의 변화가 각기 그림3과 그림4에 보여져 있다. 이 때의 전압변동페널티비용이 그림 5에 보여져 있다. 그리고 그림3, 4, 5를 종합한 비용이 그림 6에 제시되어 있다. 그림 6에서 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 30.0 [\$/kVA]인 경우의 부하역률 최적점은 부하 역률이 0.918 일 때이다. 부하의 역률이 아니라 전 발전기들의 유효전력 합과 전 발전기들의 무효전력의 합의 관계식으로 시스템의 역률이 정의된다. 시스템역률의 변화에 따라 연간종합비용이 변화하는 그림으로 표시한 것이 그림7에 보여져 있다. 시스템 역률로 보면, 이 경우 시스템 역률이 0.97일 때 최적이다. 시스템 역률이 높은 것은 시뮬레이션을 위한 기본 케이스의 전력 시스템이 주요 모선 별로 커패시터 등의 무효전력 보상 설비들을 운전하고 있는 상태이기 때문이다. 무효전력 보상량에 따른 연간종합비용의 궤적이 그림8에 보여져 있다. 이 경우에는 1600[MVar] 정도의 무효전력을 보상하였을 때 최적임을 보여준다.

마지막으로, 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 20.0 [\$/kVA]와 40.0 [\$/kVA]인 경우의 보상설비 투자비용과 연간종합비용의 궤적들이 각기 그림 9, 10과 그림 11, 12에 보여져 있다. 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 20.0 [\$/kVA]인 경우의 부하역률 최적점은 부하 역률이 0.926이고 40.0[\$/kVA]인 경우의 부하역률 최적점은 부하 역률이 0.915로서 보상설비의 설치비용이 낮아지면 최적 역률값이 올라감을 보여준다. 하지만, 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 변화할 때, 최적역률값이 여기에 비례하여 변하지 않는 것은 전압페널티 비용이 합산되고 연간 발전 비용의 변화도 완전 선형은 아니기 때문이다. 보상설비의 설치비용의 현가 외에도 전압변동페널티비용의 상수들의 값, 전력시스템의 특성 등에 따라서 그림이 많이 달라지게 된다. 전압변동페널티비용의 상수들의 값은 계통계획 및 운용의 결정권자가 전압변동과 경제성 측면 등의 중요성을 감안하여 적절한 값을 선정하면 된다. 위의 시뮬레이션 결과들을 통하여 부하역률의 발전비용에 대한 감도와 투자비용, 발전비용 및 전압변동페널티비용을 포함하는 종합비용을 활용하여, 효과적으로 부하 역률을 개선하고 적절한 역률값을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

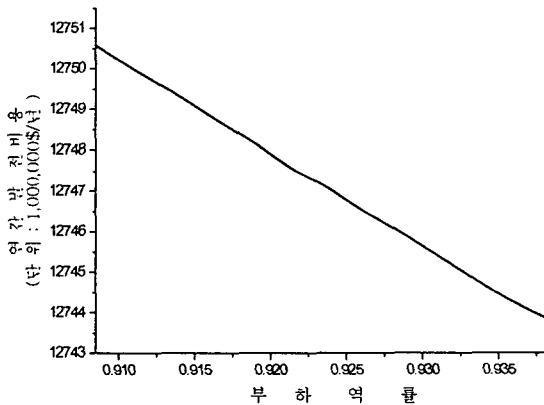


그림 3 부하역률에 따른 발전비용 변화
Fig. 3 The variation of the generation cost according to the load power factor

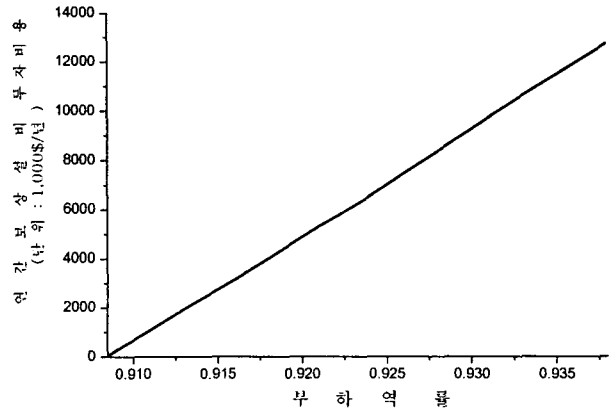


그림 4 부하역률에 따른 보상설비 투자비용 변화
Fig. 4 The variation of the investment cost of compensation devices according to the load power factor

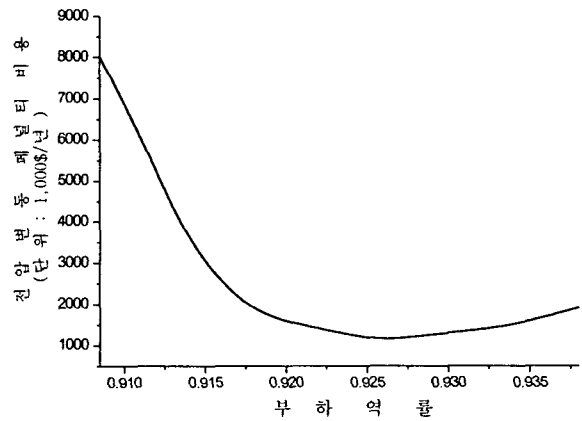


그림 5 부하역률에 따른 전압변동페널티비용 변화
Fig. 5 The variation of the voltage variation penalty cost according to the load power factor

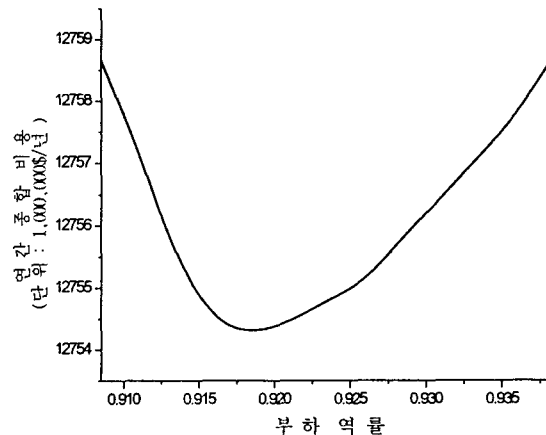


그림 6 부하역률에 따른 종합비용 변화
Fig. 6 The variation of the integrated costs according to the load power factor

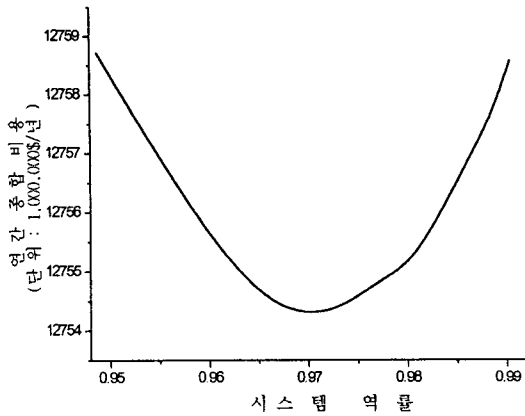


그림 7 시스템역률에 따른 종합비용 변화
 Fig. 7 The variation of the integrated costs according to the system power factor

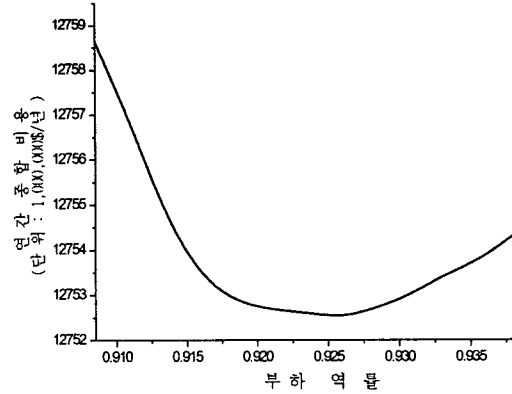


그림 10 부하역률에 따른 종합비용 변화(보상설비의 설치비용의 현가가 20.0 [\$kVA]인 경우)
 Fig. 10 The variation of the integrated costs according to the load power factor (the current price of installation : 20.0 [\$kVA])

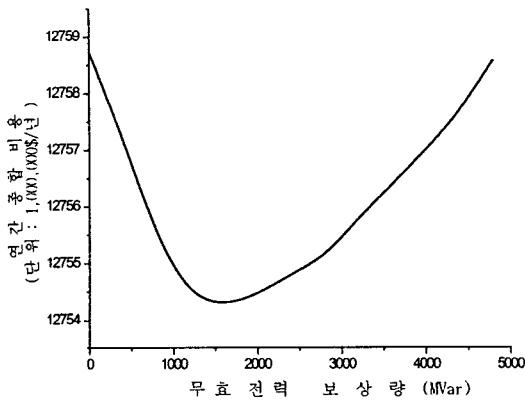


그림 8 무효전력보상량에 따른 종합비용 변화
 Fig. 8. The variation of the integrated costs according to the compensation amount of reactive power

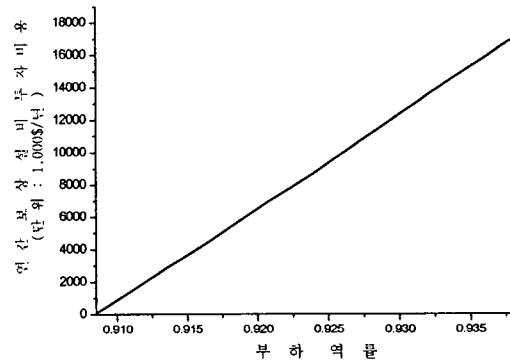


그림 11 부하역률에 따른 보상설비투자 비용 변화(보상설비의 설치비용의 현가가 40.0 [\$kVA]인 경우)
 Fig. 11 The variation of the investment cost of compensation devices according to the load power factor(the current price of installation: 40.0 [\$kVA])

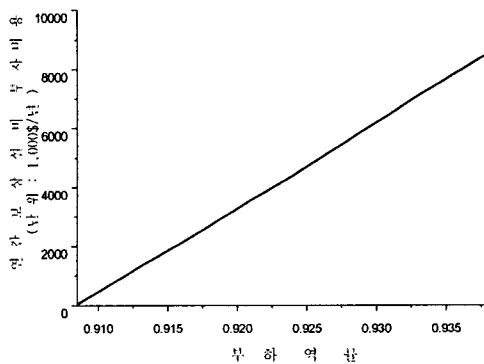


그림 9 부하역률에 따른 보상설비 투자비용 변화(보상설비의 설치비용의 현가가 20.0 [\$kVA]인 경우)
 Fig. 9 The variation of the investment cost of compensation devices according to the load power factor (the current price of installation: 20.0 [\$kVA])

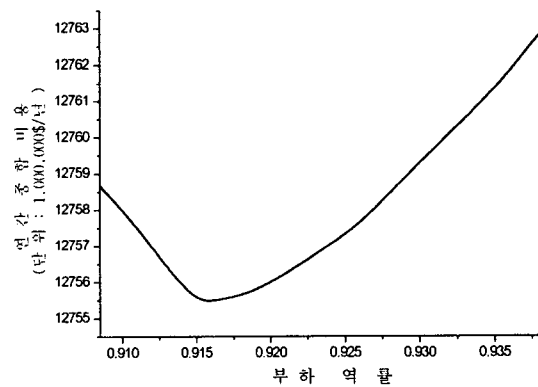


그림 12 부하역률에 따른 종합비용 변화(보상설비의 설치비용의 현가가 40.0 [\$kVA]인 경우)
 Fig. 12 The variation of the integrated costs according to the load power factor (the current price of installation : 40.0 [\$kVA])

5. 결 론

발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 수식으로 유도하여 도출하고, 이 민감도를 무효전력을 보상하는 위치와 보상순서를 체계적으로 결정하는 데 활용하여 부하역률을 효과적으로 개선시킬 수 있음을 보여주었다. 역률개선 주요 목적 중의 하나가 전압을 적절한 범위내로 유지시키는 것이므로 기존의 전압에 대한 제약조건 방식 대신에 지수함수 꼴의 페널티 함수를 도입하여 전압변동을 또 다른 비용으로 환산하여 산정하는 기법을 제안하였다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도와 전력시스템의 종합비용을 고려하여 적절한 역률 값을 결정하는 절차를 제시하고, 이를 한전의 실계통에 적용하여 무효전력 보상설비 투자 측면에서 부하 역률에 따른 발전비용의 변화, 종합비용의 변화 등을 분석하였다. 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 변하는 경우에 대하여도 비교 검토하였다. 이 연구는 부하역률 유지 방안 수립과 부하역률을 개선하기 위한 조상 설비의 투자계획이나 운용 등에 대한 정책을 수립하는데 활용될 수 있는 기초연구이며, 관련부처의 확정적인 정책안을 수립하기 위해서는 다양한 부하모델과 많은 케이스들에 대한 향후의 더 심도 깊은 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2002-B-029) 주관으로 수행된 과제임.

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] G.R.M. da Costa, "Optimal reactive dispatch through primal-dual method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp.669-674, May, 1997.
- [4] 장정태, 전영수, "배전계통의 역률보상 콘덴서의 최적 위치 및 용량 산정", 대한전기학회논문지, Vol. 48A, pp. 1190-1197, 1999. 10.
- [5] 한국전력거래소, "전력계통 전압운용 및 부하 역률 결정 방안에 관한 연구", 2002.12.
- [6] 이병하, 오민혁, 김정훈, 심건보, "발전비용의 부하역률 감도와 종합비용을 활용한 효과적인 역률 개선 방안 연구", 대한전기학회 추계학술대회논문집, pp. 284-286, 2003. 11.
- [7] 한전전력연구원, "전력계통 안정도 정밀 해석을 위한 적정 부하 모델에 대한 연구", 2001. 3.
- [8] 한국전력공사 전력경제처, "전력경제론 권4 전력설비 투자 이론", 1995. 12.

저 자 소 개



이 병 하(李 丙 河)

1954년 7월 12일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 부교수. Tel: 032-770-8437, FAX: 032-765-8118 E-mail: bhlee@incheon.ac.kr



김 정 훈(金 正 勳)

1955년 9월 13일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1981년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수. 현 대한전기학회 이사 및 용어위원회 위원장. Tel: 02-320-1621, FAX: 02-320-1110 E-mail: kimjh@hongik.ac.kr