

부하지속곡선과 부하역률 감도기법 적용에 의한 효과적인 부하역률개선 연구

이병하 김정훈
 인천대학교 홍익대학교

A Study on Enhancing Load Power Factor Effectively Using Load Duration Curves and the Power Factor Sensitivity of Generation Cost

Byungha Lee Junghoon Kim
 University of Incheon Hongik University

Abstract - In this paper, utilization of load duration curves is presented for analyzing the effect of load power factor and determining the value of load power factor effectively. In addition, the power factor sensitivity of generation cost and integrated costs including voltage variation penalty cost are used for determining the value of the load power factor from the point of view of voltage regulation and economic investment. It is shown through the application to the KEPCO power system that the load power factor can be enhanced effectively and appropriately using the load duration curve.

노력이 필요하며 분석하기가 아주 힘들어진다. 이러한 점들을 고려하여 본 논문에서는 부하 역률의 효과 분석을 보다 더 효율적으로 쉽게 수행하기 위하여 부하지속곡선을 활용하는 방법을 제안하고, 이를 이용하여 부하역률의 변화가 발전비용과 전압 조정에 미치는 영향과 부하역률을 효율적으로 개선하는 방안 및 무효전력 보상설비 투자 방안에 대하여 비교 분석한다. 효과적으로 역률을 개선하기 위하여 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 사용하고, 전압을 적절한 범위내로 유지시키도록 하기 위해 기존의 전압에 대한 제약조건 방식 대신에 지수함수 꼴의 전압 변동 페널티 비용을 적용한다. 발전비용, 무효전력 보상설비 투자비용, 전압변동 페널티비용을 합한 종합비용을 최소화하는 값을 구하여 전압변동을 고려하는 전력계통 계획 관점에서의 최적 역률 값을 선정한다.

1. 서 론

부하 역률을 일정 수준으로 유지하기 위한 규제나 요금 제도 등은 각국마다 마련되어 있고, 안정도 측면이나 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. 이와 관련된 외국의 논문을 살펴보면, M.M. Saied 는 전력손실과 무효전력 보상설비 비용과 역률을 개선함으로써 경감할 수 있는 선로나 변압기의 설치비용을 근사적으로 계산하고 이들의 비용의 합을 최소로 하는 역률을 결정하는 연구를 수행하였다[1]. 그러나 대규모 시스템이 아닌 아주 단순한 2모선 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. Costa는 제약조건을 고려하는 라그랑지함수에 뉴턴법을 적용하여 최적무효전력을 배분하는 연구를 수행하였고, 부등식 제약조건은 페널티를 적용하여 라그랑지 목적함수에 포함시켜 계산하였다[2]. 이 연구에서 부하역률은 고려하지 않았고, 부등식 제약조건에 적용되는 페널티는 단지 타당성이 있는 영역으로 해가 쉽게 수렴되도록 하기 위한 것이다. 이 외에 미국의 ISO(Independent System Operator)와 전력회사들인 NERC, ERCOT, PJM ISO, CA ISO [3]-[6] 등의 전압 및 역률 관리의 특징을 요약하면 전압 기준을 중요한 모선별로 설정하여 전압단계별 조치사항까지 명시하여 운용하고 있고, 일부 지역에서는 실시간 부하역률 감시시스템을 구축하여 부하역률을 제어하고 있으나, 부하역률의 모델이나 부하역률의 경제성 평가 등을 종합적으로 고려하고 있는 것은 아니다.

2. 부하역률 감도기법에 의한 전압 조정 및 경제성을 고려한 부하역률 개선

m 모선의 발전비용의 부하역률에 관한 민감도($S_{(pf_m)}$)는 Chain rule을 적용하여 아래와 같이 표현될 수 있다 [8].

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

우선적으로 무효전력 설비를 설치하거나 역률을 개선해야할 모선을 선정하는데 이 부하역률 감도를 활용한다.

역률개선의 주요한 목적 중의 하나가 전압을 적절한 범위내로 유지시키는 것이므로 역률의 값을 결정하는데 경제성만 고려할 수 없다. 따라서 최적 역률 값을 구하고자하는 수식화 과정에서 전압의 허용 범위를 주는 제약조건을 페널티 함수를 도입하여 전압이 원하는 값에서 벗어날수록 큰 값을 갖도록 하여 전압 변동을 비용으로 환산한다. 전압변동을 비용으로 환산한 전압변동 페널티비용(C_V)은 아래식과 같이 표현될 수 있다.

$$C_V = k_n \sum_{i \in N_{load}} \frac{\exp[k_{\beta} |V_i - V_n|] - 1}{N_i} \cdot F \quad (2)$$

여기에서, N_{load} : 부하모선들의 집합, N_i : 부하모선의 수,

간략한 시험 모델이 아닌 전력시스템의 실제통의 부하역률 효과를 분석하기 위해서는 각 케이스 마다 엄청난 양의 데이터들을 수정하여 입력하여야 하기 때문에 막대한 시간과

k_a, k_b : 상수, V_i : i 모선의 pu단위의 전압크기, V_n : i 모선의 pu단위의 원하는 전압의 크기, \exp 는 지수함수를 나타낸다. 이 함수는 부하모선전압이 원하는 값이면 영이나, 원하는 전압을 벗어나면 지수적으로 증가하는 특성을 나타내고 있다.

전력 공급용 설비를 건설하는데 발생하는 설비비와 건설한 후 매년 운전여부와 무관하게 발생하는 유지비, 인건비 등의 고정비를 합한 비용을 투자비로 정의할 수 있다. 무효전력 보상설비의 투자비용을 매년 발생하는 균등화 비용으로 표시하면, 아래식과 같이 표현된다.

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

여기서, C_P 는 유지비와 인건비를 포함한 보상 설비 설치비용의 현가, L 은 수명, i 는 할인율, C_F 는 매년 발생하는 균등화 비용이다.

위에서 고려한 전압변동 페널티비용과 보상설비 투자비용에 발전비용을 합한 비용을 종합비용이라고 정의하고, 이 종합 비용을 최소화하는 값을 구하면 전압변동을 고려하는 전력계통 계획 관점에서의 최적 역률 값을 구할 수 있다.

무효전력의 투입위치와 무효전력의 보상량을 결정하고 효율적으로 역률을 개선하는 방안을 선정하기 위하여 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 사용한다. OPF 프로그램을 수행하여 발전비용이 최소가 되게 발전력을 배분하고, 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 구하여 무효전력을 보상하는 위치와 보상순서를 결정하여 무효전력 보상을 수행하고, 이때의 종합비용을 계산하여 종합비용이 더 이상 감소하지 않을 때까지 동일 과정을 반복하여 최적 역률 개선 방안을 결정할 수 있다.

3. 부하지속곡선을 활용한 부하역률 효과 분석

전력 시스템 모델은 각 전력회사마다 다르며 또 같은 전력 시스템이라 하더라도 시간에 따라서 변화하고 있다. 따라서, 부하 역률의 효과 분석을 위한 전력 시스템 모델 또한 수많은 케이스가 존재하게 된다. 이러한 특성의 전력 시스템에 대하여 부하역률의 효과를 분석하기 위해서는 간략화 하기 위한 과정이 필요하다. 계절별, 요일별, 유사 특성을 갖는 시간대 별로 각 부하대의 특성을 대표하는 전력 시스템의 모델을 구분하고 이 모델들의 효과를 합하여 부하역률 효과를 분석할 수 있다. 이 경우 각 시점에서의 부하의 크기를 나타내는 시간대별 부하곡선을 이용하게 되는데, 간략한 시험 모델이 아닌 한전의 실계통에 대해서는 각 케이스마다 엄청난 양의 데이터들을 수정하여 입력하여야 하기 때문에 막대한 시간과 노력이 필요하다.

본 논문에서는 이의 분석을 보다 더 효율적으로 쉽게 수행하기 위하여 부하지속곡선을 활용하는 방법을 제안한다. 부하지속 곡선(그림 1)을 단계별로 여러 부분으로 나누고 각 부하의 단계마다 대표적인 역률의 전력시스템 모델을 선정하고 이 각각의 대표 모델에 대하여 시물레이션을 수행하여 종합함으로써 부하역률의 개선 효과를 분석할 수 있다. 여기서는 부하역률과 관련된 시물레이션을 단순화하기 위해 부하지속 곡선을 그림 1과 같이 크게 3부분으로 나누어 중부하, 중간 부하, 경부하로 구분하고, 각 부하대를 대표하는 전력시스템의 부하 모델을 선정한다. 선정된 각각의 전력시

스템 부하 모델에 대하여 각 모선별로 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 계산하고, 선정된 모든 전력시스템 모델에 대하여 민감도의 값들을 종합하여 순위를 정한 후, 이 종합 순위에 따라 부하역률 개선을 위한 무효전력 보상을 시행한다. 부하역률 개선을 위한 무효전력 보상의 투자효과도 각각의 전력시스템 부하 모델에 대하여 계산하고, 모든 전력시스템 모델에 대하여 이 값들을 종합함으로써 분석할 수 있다.

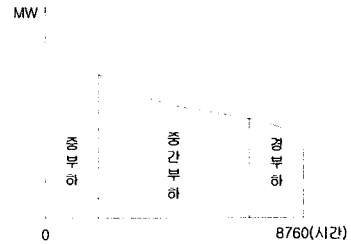


그림 1. 부하지속곡선의 단계별 분할

4. 한전 실계통 적용 분석

여기서는 한전에서 작성하여 2004년도의 중부하, 중간 부하, 경부하로 사용했던 데이터를 중부하, 중간 부하, 경부하의 대표적인 전력시스템의 부하 모델로 가정하고 분석한다. 이 전력시스템들의 부하데이터들을 보면, 각 부하대별로 차이는 있으나 모든 모선들의 부하가 유도성 무효전력 부하들로 되어 있으므로, 분석의 단순화를 위해 용량성 무효전력을 공급하는 전력용 커패시터에 의한 무효전력 보상 대책만을 고려한다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도는 PSS/E 패키지와 IPLAN 프로그램을 활용하여 계산하였고, OPF 프로그램 수행은 Power World 상용 프로그램을 사용하였다.

무효전력 보상설비의 수명은 30년, 할인율은 8%로 가정하였다. 또, 전압변동페널티비용의 계수들을 $k_a = 2.5 \cdot 10^{-3}$, $k_b = 30.0$ 으로 가정하였다. 전압변동페널티비용의 상수들의 값은 계통계획 및 운용의 결정권자가 전압변동과 경제성 측면 등의 중요성을 감안하여 적절한 값을 선정하면 된다.

한전의 2004년 중부하대, 중간부하대, 경부하대의 전력 시스템들을 각기 중부하대, 중간부하대, 경부하대의 시물레이션용을 위한 기본 케이스로 두고 각 경우의 무효전력 보상설비의 투자 비용을 영으로 간주하였다. 각각의 기본 케이스에서의 부하역률은 중부하대가 0.908, 중간부하대가 0.935, 경부하대가 0.977이다. 고려하는 모든 전력시스템 모델에 대하여 발전비용의 부하역률에 관한 민감도 값들을 모선별로 각각 계산하고 이 민감도를 각 모델이 대표하는 부하대의 발전비용에 비례하는 가중치를 가하여 합산함으로써 모선별 종합 민감도를 산정한다. 이 종합민감도를 사용하여 순위를 정한 후에 이 종합 민감도의 순위에 따라 부하역률 개선을 위한 무효전력 보상을 시행한다.

발전비용의 부하역률에 관한 종합 민감도에 따라 무효전력을 보상하는 위치를 결정하고, 무효전력 보상설비에 의한 순차적인 무효전력 보상을 통하여 부하역률을 개선시켜나감으로써 각 변수들의 변화되는 계측들을 통하여 분석한다. 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가는 10.0 [\$/kVA]에서부터 10.0[\$/kVA] 간격으로 증가시키면서 50.0[\$/kVA]까지 변할 때의 경우들에 대하여 분석하고 이들에 대하여 비교한다. 중부하대, 중간부하대, 경부하대의 부하역률에 따른

전체 종합비용의 변화는 각기 그림 2, 그림 3, 그림 4에 제시 되어 있다. 어느 정도의 부하역률 보상이 까지는 전체 종합비용이 감소하나 일정 범위를 넘어 서면 반대로 증가함을 보여주며, 이 꺾기의 최소점이 각 부하대에서 최적 부하역률 개선점이 된다. 중부하대인 경우 그림 2로부터 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 10.0[\$/kVA]인 경우 최적부하역률은 0.930, 20.0[\$/kVA]인 경우 0.928, 30.0[\$/kVA]인 경우 0.926, 40.0[\$/kVA]인 경우 0.924, 50.0[\$/kVA]인 경우 0.922 정도인 것을 알 수 있다. 중간부하대인 경우 그림 3으로부터 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 10.0[\$/kVA]인 경우 최적부하역률은 0.957, 20.0[\$/kVA]인 경우 0.955, 30.0[\$/kVA]인 경우 0.953, 40.0[\$/kVA]인 경우 0.950, 50.0[\$/kVA]인 경우 0.948 정도인 것을 알 수 있다.

경부하대인 경우 그림 4로부터 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 10.0[\$/kVA]인 경우 최적부하역률은 0.994, 20.0[\$/kVA]인 경우 0.993, 30.0[\$/kVA]인 경우 0.991, 40.0[\$/kVA]인 경우 0.989, 50.0[\$/kVA]인 경우 0.987 정도인 것을 알 수 있다.

위의 시뮬레이션 결과들을 통하여 부하지속곡선을 이용하여 효과적으로 부하역률 개선 효과를 분석할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 적절한 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가를 결정하여 주면, 종합비용을 활용하여 효과적으로 부하역률을 개선하고 적절한 역률값을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

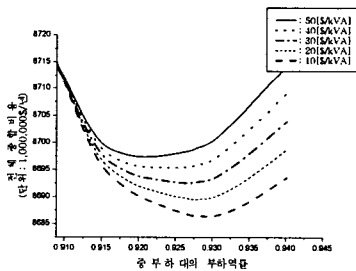


그림 2. 중부하대의 부하역률 대비 전체 종합비용의 변화 (보상설비 설치비용의 현가별 비교)

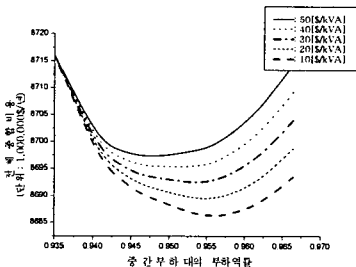


그림 3. 중간부하대의 부하역률 대비 전체 종합비용의 변화 (보상설비 설치비용의 현가별 비교)

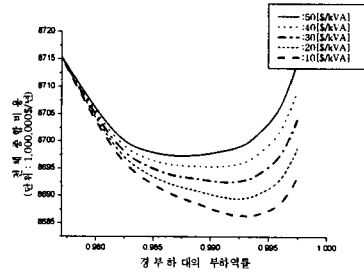


그림 4. 경부하대의 부하역률 대비 전체 종합비용의 변화 (보상설비 설치비용의 현가별 비교)

4. 결 론

실계통 부하 역률의 효과 분석을 위해서는 수많은 케이스의 모델과 엄청난 양의 데이터들을 수정하여 입력하여야 하기 때문에 막대한 시간과 노력이 필요하다. 본 논문에서는 이의 분석을 보다 더 효율적으로 쉽게 수행하기 위하여 부하지속곡선을 활용하는 방법을 제안한다. 부하지속 곡선을 단계별로 여러 부분으로 나누고 각 부하의 단계마다 대표적인 역률의 전력시스템 모델을 선정하고 이 각각의 대표 모델에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 종합함으로써 부하역률의 개선 효과를 효과적으로 분석할 수 있다. 여기서는 부하역률과 관련된 시뮬레이션을 단순화하기 위해 부하지속 곡선을 크게 3부분으로 나누어 중부하, 중간 부하, 경부하로 구분하고, 각 부하대를 대표하는 전력시스템의 부하 모델을 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 한편에서 작성하여 2004년도의 중부하, 중간 부하, 경부하로 사용했던 데이터를 중부하, 중간 부하, 경부하의 대표적인 전력시스템의 부하 모델로 가정하고 분석하였다. 보상설비 투자비용, 전압변동 페널티 비용에 발전비용을 합한 종합비용을 최소화하는 부하역률값을 구함으로써 전압조정과 경제성 측면에서의 최적 역률값을 구하였다. 경제성 평가의 비교분석을 위해 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가가 10.0[\$/kVA]에서부터 10.0[\$/kVA] 간격으로 50.0[\$/kVA]까지 변할 때의 경향을 검토하였다. 시뮬레이션 결과들을 통하여 부하지속곡선을 이용하여 효과적으로 부하역률 개선 효과를 분석할 수 있음을 보여주었다.

[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]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.
- [3]North American Electric Reliability Council, "Transmission Operations and Voltage and Reactive Control", 1996.10.
- [4]ERCOT, "Proposed ERCOT Reactive Standards", 2001.5.
- [5]PJMISO, "Transmission Operation Manual", 2001.1.
- [6]CAISO, "Voltage and Var Control", 2001.5.
- [7] 한국전력거래소, "전력계통 전압운용 및 부하 역률 결정 방안에 관한 연구", 2002.12.
- [8]이병하, 김정훈, "부하역률 감도기법 적용에 의한 효율적인 부하역률 개선에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제54A 권 제1호, pp.18-24, 2005.