

온실가스 배출량을 고려한 적정 부하역률 개선 연구

황승호\*, 이병하\*\*  
 인천대\*, 인천대\*\*

A Study on Determination of Appropriate Load Power Factor  
 Considering Greenhouse Gas Emission

Sung-Ho Hwang\*, Byung Ha Lee\*\*  
 University of Incheon\*, University of Incheon\*\*

**Abstract** - 최근 대두되고 있는 중요한 문제 중 하나인 기후변화협약에 의하여 온실가스 배출량에 대한 감축 및 규제가 실시되고 있으므로, 우리나라에서도 이에 대한 대비를 하지 않으면 안 되며, 유가가 급등하고 있어 에너지 소비를 감소시키는 정책을 적극적으로 수행해 나가야 한다. 전력시스템이 대형화되고 더욱 복잡하게 구성되면서, 전력손실 감소 및 전압관리 차원에서 부하 역률 관리의 중요성이 새롭게 부각되고 있다. 따라서 온실가스 배출량 감축 효과를 반영하여 우리나라의 전력시스템의 적정한 부하역률 기준치가 새롭게 조정될 필요가 있다. 본 논문에서는 온실가스 배출량 감축 효과를 반영하기 위한 기초연구로서 적정 부하역률을 산정하기 위한 기법을 제시하고, 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 반영하지 않을 때와 반영할 때의 적정 부하역률이 어떻게 변화하는지를 주어진 하나의 전력 시스템을 사용하여 분석한다.

1. 서 론

최근 대두되고 있는 중요한 문제 중 하나로 '기후변화협약'을 들 수 있다. 석유석탄 등 주로 화석연료가 연소될 때 나오는 이산화탄소와 메탄 등의 기체는 대기로 방출되는 복사에너지를 흡수해 다시 지표면으로 방출시키는 온실효과를 갖고 있다. 이에 따라 20세기 후반 들어 지구전체의 기온이 점차 올라가 수면상승과 엘니뇨 등 이상기온 현상이 빈발하고 있다. 에너지정책 수립과정에 있어서도 환경과 조화되는 에너지정책의 수립이 중요해지고 있으며 이 중 기후변화협약은 지구온난화를 유발하는 온실가스의 배출을 억제하여 기후의 안정성을 확보하는 것을 목표로 하고 있으며, 이는 단순한 환경문제로서 그치는 것이 아니라 온실가스가 주로 에너지 사용에서 발생되기 때문에 각국의 경제산업구조에 대한 수정을 요구하는 심각한 문제이다.

기후변화협약을 통해 선진국에서 온실가스 배출량에 대한 감축 및 규제가 실시되고 있으며, 우리나라도 예외 없이 교토의정서에 비준함으로써 온실가스 배출량 감축이행을 의무화 하였다. 따라서 우리나라에서도 이에 대한 대비를 하지 않을 경우, 특히 전력생산비용을 비롯한 각종 사회비용이 급격히 증가하게 되어 국가 전체적으로 산업생산에 막대한 손실을 가져올 것이 자명하다. 또한, 최근 1년 사이에 유가가 급등 하였고 이러한 추세가 지속될 것으로 예측하고 있다.

한편 수직 독점체제로 운영하던 우리나라의 전력산업이 경쟁체제로 변환되어 전력시스템 계획과 운용을 분리하게 되었고, 상호간의 경제적 작용이 구조적으로 존재함에 따라 계통 운용 관점에서 통합적인 무효전력 관리가 힘들어지고 있다. 전력산업 부분에서 경쟁체제의 도입과 함께 각 발전회사에서 전력을 공급하는 관점에서 부하의 역률 악화는 과도한 무효전력 소비를 발생시켜서 전력손실을 증대시키고 선로의 전압강하를 크게 하여 규정전압 유지를 어렵게 하는 등의 문제점을 유발시킨다. 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 전력시스템의 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[1]-[4], 기후변화협약에 의한 온실가스 배출량을 고려한 부하 역률의 경제성에 미치는 영향에 대한 본격적인 연구는 없었다. 기후변화협약에 의하여 선진국에서 온실가스 배출량에 대

한 감축 및 규제가 실시되고 있고, 앞으로 우리나라도 예외 없이 적용이 되는 상황임을 고려할 때 부하역률이 온실가스 배출량에 미치는 영향에 대한 정확한 분석이 요구되고 있으며, 이를 통한 온실가스 배출량 감축 효과를 반영하여 우리나라의 전력시스템의 적절한 부하역률 기준치가 새롭게 조정될 필요가 있다.

본 논문에서는 온실가스 배출량 감축 효과를 반영하기 위한 기초연구로서 적정 부하역률을 산정하기 위한 기법을 제시하고 온실가스 배출량 감축효과를 분석한다. 온실가스 중 대표적인 가스가 이산화탄소이므로 이산화탄소의 배출량 감축을 고려하며, 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 반영하지 않을 때와 반영할 때의 적정 부하역률이 어떻게 변화하는지에 대하여 주어진 하나의 전력 시스템을 사용하여 분석한다.

2. 이산화탄소 배출량 감축효과와 경제성 등을 고려한 부하역률 개선

2.1 발전비용의 부하역률에 관한 민감도 적용

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

$$S_{(pf)_m} = - \frac{\partial F}{k_m \cdot \partial(pf_m)} = - \frac{\partial F}{\partial Q_m} \frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)} \quad (1)$$

$$= - \sum_{i \in NT} \sum_{G_j=1}^n \frac{\partial F}{\partial P_{G_i}} \frac{\partial P_{G_i}}{\partial \delta_j} \frac{\partial \delta_j}{\partial Q_m} \frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)}$$

$$- \sum_{i \in NT} \sum_{G_j=1}^n \frac{\partial F}{\partial P_{G_i}} \frac{\partial P_{G_i}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_m} \frac{\partial Q_m}{k_m \cdot \partial(pf_m)}$$

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

2.2 투자비용 및 전압변동 페널티비용의 산정

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.

$$C_F = C_P \cdot \frac{i(1+i)^L}{(1+i)^L - 1} \quad (2)$$

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

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 전압변동을 비용으로 환산한다. 전압변동을 비용으로 환산한 전압변동페널티비용( $C_V$ )은 아래식과 같이 표현될 수 있다.

$$C_V = k_a \sum_{i \in N_{load}} \frac{\exp[k_b |V_i - V_{ri}| - 1]}{N_i} \cdot F \quad (3)$$

여기에서,  $N_{load}$ : 부하모선들의 집합,  $N_i$ : 부하모선의 수,  $k_a, k_b$ : 상수,  $V_i$ :  $i$ 모선의 p.u.단위의 전압크기,  $V_{ri}$ :  $i$ 모선의 p.u.단위의 원하는 전압의 크기,  $\exp$ 는 지수함수를 나타낸다.

### 2.3 이산화탄소 배출량 감축효과 산정

CO2 배출 감축량 계산 과정은 연료별 소비 감축량 파악, 연료별 발열량 선정, 탄소 배출계수의 선정과 산화율 선정을 포함하며, 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{배출 감축량} &= \sum [\text{연료별 소비 감축량} \times \text{발열량} \times \text{환산계수} (\frac{4.186 \text{ Tj} \times 10^{-6}}{1 \text{ kcal}})] \\ &\times \text{탄소배출계수} (\text{tC/TJ}) \times \text{산화율} \times \text{CO}_2 \text{ 변환계수} (44/12) \quad (4) \end{aligned}$$

부하의 역률은 동일한 값으로 유지되는 경우 그 효과는 지속적으로 유지되므로, 역률이 개선된다면 각 시간당 발전원별 곡선의 윗부분을 잘라낸다고 볼 수 있다. 각 시간당 발전원별 곡선의 윗부분에 해당하는 발전원을 파악하여 이에 해당하는 CO2 배출 감축량을 계산한다.

CO2 배출권의 가격은 주위 여건에 따라 수시로 변경될 수 있는데, 부하역률 개선에 따른 CO2 배출 감축량을 계산한 후에 현재의 CO2 배출권의 시세인 톤당 가격을 곱하여주면, 현 상태에서의 CO2 배출 감축 효과를 일치하는 비용으로 환산하여 표현할 수 있다.

위에서 고려한 보상설비 투자비용, 전압변동 페널티비용, CO2 배출 감축 효과에 발전비용을 합한 비용을 종합비용이라고 정의한다. 이 종합 비용을 최소화하는 역률 값을 구하면 CO2 배출량을 고려하는 전력계통 계획 관점에서 최적 역률 값을 구할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

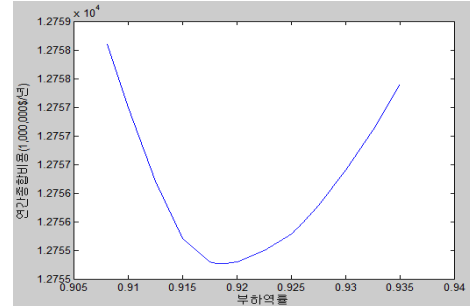
본 논문에서는 온실가스 배출량 감축 효과를 반영하기 위한 기초연구이므로, 주어진 하나의 전력 시스템에 대해서만 분석하며, 2004년 하계의 한전의 전력시스템을 사용하여 분석한다.

무효전력 보상설비의 수명은 30년, 할인율은 8%로 가정하였다. 전압변동페널티비용의 계수들은  $k_a = 2.5 \times 10^{-4}$ ,  $k_b = 30.0$ 로 가정하였다. 무효전력 보상설비의 설치비용의 현가  $30.0$ [\$/kVA]로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 각 시간당 발전원별 곡선의 윗부분에 해당하는 발전원을 파악하여 이에 해당하는 CO2 배출 감축량을 계산하는데, 분석을 간단히 하기 위하여 석탄 16.7%, 중유 70.8%, LNG 12.5%의 분포로 발전량을 감축한다고 가정하였다. CO2 배출권의 가격은 주위 여건에 따라 수시로 변경될 수 있는데, 현재의 탄소 배출권 가격은 국제시세로 톤당 17.21[유로]이다. 부하역률 개선에 따른 CO2 배출 감축량을 계산한 후에 현재의 탄소 배출권의 시세인 톤당 가격을 곱하여서 현 상태에서의 CO2 배출 감축 효과를 일치하는 비용으로 환산하였다. 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 산정하였다. 부하역률 0.9와 0.95 사이에서는 부하역률 변화당 탄소배출권 가격이 거의 선형의 특성의 관계를 보여주었고, 본 논문의 예제 시스템의 경우에는 부하역률 1%의 상승 시에 약 1.513[million USD]의 탄소배출권 이득이 발생하는 것으로 산정되었다. 발전비용의 부하역률에 관한 민감도에 따라 무효전력을 보상하는 위치를 결정하고, 무효전력 보상설비에 의한 순차적인 무효전력 보상을 통하여 부하역률을 개선시켜 나가면서 종합비용이 최소가 되는 최적 부하역률 값을 산정하였다.

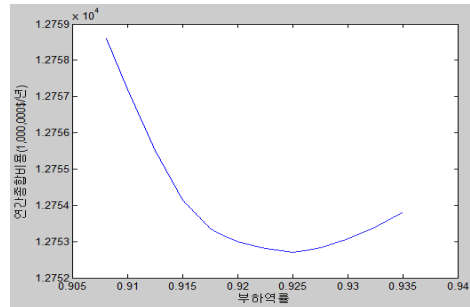
먼저 민감도에 따라 부하역률을 순차적으로 증가시킬 때 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 반영하지 않는 경우의 종합비용의 변화가 그림 1에 제시되어 있다. 그림 1에서 부하역률 최적점은 부하 역률이 0.918 일 때이다.

이어서 민감도에 따라 부하역률을 순차적으로 증가시킬 때 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 반영하는 경우의 종합비용의 변화가 그림 2에 제시되어 있다. 그림 2에서 부하역률 최적점은 부하 역률이 0.925 일 때이다.

위의 시뮬레이션 결과들을 통하여 부하역률의 발전비용에 대한 감도와 투자비용, 발전비용, 전압변동페널티비용 및 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 포함하는 종합비용을 활용하여, 효과적으로 부하 역률을 개선하고 적절한 역률값을 결정할 수 있음을 알 수 있고, 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 포함하는 경우 무효전력 보상설비의 투자비용이 증가하게 되더라도 부하역률을 이와 일치하여 적정하게 더 높게 유지하는 것이 경제적인을 알 수 있다.



〈그림 1〉 탄소배출 미고려시의 부하역률에 따른 종합비용 변화



〈그림 2〉 탄소배출 고려시의 부하역률에 따른 종합비용 변화

### 4. 결 론

기후변화협약에 의하여 온실가스 배출량에 대한 감축 및 규제가 실시되고 있어서, 이에 대한 대비를 하지 않으면 안 되며, 온실가스 배출량 감축 효과를 반영한 우리나라의 전력시스템에 맞는 적절한 부하역률 기준치가 새롭게 조정될 필요가 있다.

본 논문에서는 온실가스 배출량 감축 효과를 반영하기 위한 기초연구로서 적정 부하역률을 산정하기 위한 기법을 제시하고, 온실가스 중 대표적인 가스가 이산화탄소이므로 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 분석하였다. 적정 부하역률 기준치 산정을 위하여 발전비용의 부하역률에 관한 민감도를 활용하였다. 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 포함하는 전력시스템의 종합비용을 고려하여 적정 부하역률 값을 도출하였고, 이산화탄소의 배출량 감축 효과를 반영하지 않을 때와 반영할 때의 적정 부하역률이 어떻게 변화하는지에 대하여 주어진 하나의 한전의 전력 시스템을 사용하여 분석하였다.

### [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]M. Sekoguchi, H.Konishi, M. Goto, A. Yokoyama, Q. Lu, "Nonlinear optimal control applied to STATCOM for power system stabilization", IEEE/PES T& D Conference, Vol. 1, No. 2, pp342-347, 6-10 Oct. 2002.