

전력시장 체제에서 발전기 무효전력 출력의 가치 평가에 관한 연구

나 춘 수·박 종 근·한 태 경·김 문 겸·김 도 한·이 상 호·이 상 성  
 서울대학교 전기 컴퓨터 공학부\*, 전기 연구원\*\*, 기초 전력 연구원\*\*\*

Evaluation of Generator's Reactive Power in Deregulated Electricity Market

Chun-su Na\*, Jong-Keun Park\*, Tae Kyung Han\*, Mun-Kyeom Kim\*, Do-Han Kim\*, Sang-ho Lee\*\*, Sang-sung Lee\*\*\*  
 Seoul National University\*, KERI\*\*, KESRI\*\*\*

**Abstract** - As deregulated electricity markets are being implemented in different countries, the remuneration of reactive power which contribute to ancillary services is one of the key issues, so it is necessary to evaluate the generator's reactive.

In this paper, we focus on the evaluation of reactive power which contributes to reactive power balance. The idea is that the main usages of the reactive power of generator can be divided into two components. First one is physically required amounts for transmitting the real power and the second one is the amounts contributed to support the system, that is, to maintain the voltage profiles. In this paper, the second component is used to evaluate the effective amounts of the reactive power contributed to ancillary service.

1. 서 론

전력산업 구조개편이 세계적인 추세로 자리함으로써 시장의 원리에 입각하여 전력을 거래하는 형태로 바뀌어 가고 있다. 전력을 거래함에 있어 유효전력은 전력을 공급하는 발전회사와 전력을 소비하는 소비자들 간의 입찰을 통해서 이루어진다. 유효전력의 출력은 광역적이기 때문에 상품화가 가능하고, 유효 전력을 생산하기 위해 들어가는 연료비용으로 그 가치를 명확히 평가 할 수 있다.

무효전력은 유효전력과 달리 걸음으로 생산비용이 드러나지 않는 특성으로 인해 직접적인 가치가 고려되지 않았지만, 과거와 달리 시장 환경에서는 각 발전기의 무효전력 출력을 계통운영자가 마음대로 지정할 수 없기 때문에 필요한 무효전력을 확보하기 위해서는 그에 상응하는 비용을 지불해야만 한다. 그런데 무효전력은 관점에 따라 가치를 달리 생각할 수 있기 때문에 그 가치를 평가하는 확실한 기준이 아직까지 없는 상태이다.

이 논문에서 제안 하는 무효 전력가치 평가 방법은 무효 전력의 가치를 직접적인 방법을 통해 평가하는 것이다. 발전기로부터 생산되는 무효전력의 가치를 판단하기 위해 발전기들의 무효전력 생산량이 계통에 얼마나 기여하는 지에 따라 그 가치를 결정하는 과정을 택하였다. 즉, 발전기가 출력하는 무효전력을 유효전력을 보내기 위해 필요한 무효전력과 계통에 기여하는 무효전력으로 나누었다. 계통에 기여하는 무효 전력을 보상의 대상으로 간주 하였다. 경부하시 계통의 잉여무효전력으로 인한 전압 상승을 유발한다. 이를 흡수하는 발전기에 대해서도 계통에 기여한다고 판단하였다. IEEE 10기 39모선 을 통하여 제안하는 방법의 유용함을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 무효전력의 계통 기여도 정의

발전기가 생산해내는 무효전력을 평가하기 위해서는 실제로 발전기에서 발생하는 무효전력이 계통에 얼마나 전달되는지를 알아야 할 필요가 있다. 즉, 기존의 계통에 새로이 발전기가 투입된다고 가정한다면 발전기가 계통으로 유효전력을 전송하기 위해서는 전류가 흐르게 되고 그 전류로 인해 송전선에서 무효전력 손실이 발생하게 되며 그 손실분을 제한 나머지가 계통으로 유입된다. 그리고 경부하시에는 계통의 전압유지를 위해서 여분의 무효전력을 흡수해야 한다. 이와 같은 상황은 그림 2.1과 같다.

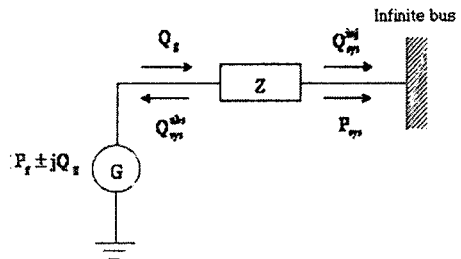


그림 2.1. 발전기와 계통의 관계

여기에서, 송전선을 리액턴스 성분만으로( $Z=jX$ ) 가정하고 송전선에 흐르는 전류를  $I$ , 발전단의 전압을  $E$ , 송전선에서 요구되는 무효전력량을  $Q_{req}$ 라고 하면, 송전선에서 소비되는 유효전력이 없으므로  $P_g = P_{sys}$ 가 되고, 전류  $I$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$|I|^2 = \frac{P_g^2 + Q_g^2}{|E|^2} \quad \text{또는,} \quad |I|^2 = \frac{P_{sys}^2 + Q_{sys}^2}{|V|^2} = \frac{P_g^2 + Q_{sys}^2}{|V|^2} \quad (2.1)$$

송전선에서 요구되는 무효전력은

$$Q_{req} = |I|^2 X = \frac{P_g^2 + Q_g^2}{|E|^2} X \quad \text{또는,} \quad (2.2)$$

$$Q_{req} = |I|^2 X = \frac{P_g^2 + Q_{sys}^2}{|V|^2} X \quad (2.3)$$

로 표시될 수 있으므로, 발전단에서 발생하는 무효전력은

$$Q_g = Q_{req} + Q_{sys}^{inj} = \frac{P_g^2 + Q_{sys}^{inj2}}{|V|^2} X + Q_{sys}^{inj} \quad (2.4)$$

로 표현될 수 있다. 식(2.4)에서  $Q_{sys}^{inj}$ 가 발전기가 실제로 계통에 기여하는 무효전력량이라고 할 수 있겠다.

식(2.4)에서  $X$ 값을 알면 나머지 값으로부터  $Q_{sys}^{inj}$ 를 결정할 수 있다. 식(2.4)를 다시 정리하면

$$Q_g = Q_{req} + Q_{sys}^{inj} = \left( \frac{P_g^2}{|V|^2} X \right) + \left( \frac{Q_{sys}^{inj2}}{|V|^2} X + Q_{sys}^{inj} \right) \quad (2.5)$$

로 표시할 수 있고, 첫 번째 항을  $Q_{g1}$ 이라 하고, 두 번째, 세 번째 항을  $Q_{g2}$ 라고 하면,  $Q_{g1}$ 값을 알면 그로부터  $Q_{g2}$ 를 구할 수 있고 이로부터  $Q_{sys}^{inj}$ 를 구해볼 수 있다.

$$Q_{g1} = \frac{P_g^2}{|V|^2} X \quad (2.6)$$

$$Q_{g2} = \frac{Q_{sys}^{inj2}}{|V|^2} X + Q_{sys}^{inj} \quad (2.7)$$

$Q_{g2}$ 가 구해지면 식 (2.7)은  $Q_{sys}^{inj}$ 의 2차 방정식이므로 근의 공식을 이용하여  $Q_{sys}^{inj}$ 를 구할 수 있다.

$$Q_{sys}^{inj} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{X}{|V|^2} Q_{g2}}}{2 \frac{X}{|V|^2}} \quad (2.8)$$

발전기가 무효전력을 흡수하는 경우, 발전기가 시스템에 기여하는 무효전력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q_{sys}^{abs} = |Q_g| \quad (2.9)$$

결론적으로 발전기가 기여하는 무효전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{sys} = Q_{sys}^{inj} + Q_{sys}^{abs} \quad (2.10)$$

여기에서, 발전기로부터 나머지 계통으로 연결되는 등가 임피던스( $X$ )는 테브난(Thevenin)등가회로로부터 구해볼 수 있다. 전력계통은 부하가 정전력 형태로 표시되므로 선형회로가 아니지만 부하를 정임피던스 형태로 변환하여 선형 회로라고 가정한 후 테브난 등가 회로를 구해볼 수 있다. 즉, 대상발전기를 제외한 나머지 발전기들은 모두 접지시킨 후 부하를 정임피던스 형태로 변환하여 테브난 등가 임피던스를 구한다. 이렇게 구한  $X$ 를 식 (2.6)에 대입하여  $Q_{g1}$ 을 구하고 이를 이용해 식 (2.7), (2.8)에서  $Q_{sys}^{inj}$ 를 구할 수 있다. 여기에서  $V$ 는 테브난 등가회로의 개방회로(open circuit) 전압으로 볼 수 있는데, 전력계통의 특성상 모선 전압의 대부분이 1.0p.u. 근방에서 결정되므로  $V \approx 1$ 로 사용해도 무방하다.

## 2.2 발전기 무효전력의 단가

발전기를 동적 무효 전력원으로써 동가적인 동기 조상기로 보고 그 단가를 구한다. 동기 조상기의 설비 투자비를 그 수명으로 나누고 정격 용량으로 나누면 단위 시간당 단위 출력의 단가를 구해볼 수 있다. 여기에서 한 가지 유의할 점은 동기 조상기가 항상 투입되어있는 상태가 아니기 때문에 설비 이용률로 단위 시간, 단위 출력 당 단가를 나누어서 실제 투입된 경우만을 고려하여 단가를 구하도록 한다. 동기 조상기의 수명은 10년으로 하고, 설비 이용률은 30%로 가정하면 다음과 같이 동기

조상기의 단위 시간 출력 당 단가를 구할 수 있다.

동기 조상기의 출력 단가

$$k_c = \$5,500,000 / (10 \text{ Year} \times 8760 \text{ h} \times 100 \text{ MVar} \times 30\%) \approx \$2.09 / \text{MVar} \cdot \text{h} \quad (2.11)$$

그러므로,  $T$ 시간동안  $Q_{sys}$  [MVar]의 무효전력을 계통에 기여하고 있는 발전기는  $Q_{sys} \times k_c \times T$  [\\$]만큼의 무효전력 생산비를 받게 된다.

## 2.3 사례 연구

### 2.3.1 발전기 무효전력의 계통 기여도 평가

그림과 같은 IEEE New England 39 모선 계통에 대해 사례 연구를 시행하였다.

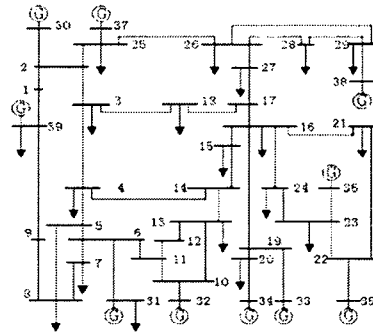


그림 2.2 뉴 잉글랜드 39모선 계통

이 모의 계통의 전체 부하는 6097.1MW, 1408.9MVar이며, 총 발전 출력은 6144.4MW, 1360.5MVar이다.

계통에 투입되어 있는 10기의 발전기들의 무효전력에 대해 계통 기여도를 평가하였다. 표 2.1은 각 발전기들이 출력하는 유효전력과 무효전력 그리고 각 발전기의 역할과의 관계를 나타내었다.

Gen.#	P_gen	Q_gen	PF
30	250	174	0.821
31	524	142	0.9653
32	650	149	0.9748
33	632	50	0.9968
34	508	140	0.9642
35	650	233	0.9412
36	560	199	0.9426
37	540	21	0.9993
38	830	49	0.9983
39	1000	217	0.9772

표 2.1 각 발전기들의 출력 패턴

표 2.1을 보면 발전기 #30, 31, 35, 36 등은 상대적으로 역할이 낮음을 알 수 있다, 즉, 상대적으로 무효전력 출력이 많다는 뜻이 된다. 앞 절에서와 같이  $Q_{sys}$ 을 구해보면 그림 2.3과 같다.

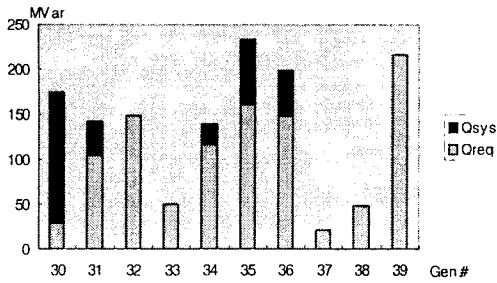


그림 2.3 발전기들의 무효전력 구성

위의 그래프는 각 발전기들이 출력하고 있는 무효전력을 시스템에 기여하는 무효전력  $Q_{sys}^{ini}$ 와 유효전력을 송전하기 위해 계통에 소비되고 있는 무효전력  $Q_{req}$ 을 나타내고 있다. 발전기 39에서 출력하고 있는 무효전력은 대부분 유효전력을 출력 하기위해 필요한 무효 전력량이 되고 시스템에 기여하는 무효 전력은 없다. 이 발전기의 유효전력의 출력이 다른 발전기에 비하여 상당히 크기 때문에  $Q_{req}$ 가 발전기가 출력하는 무효전력의 대부분을 차지함을 알 수 있다.

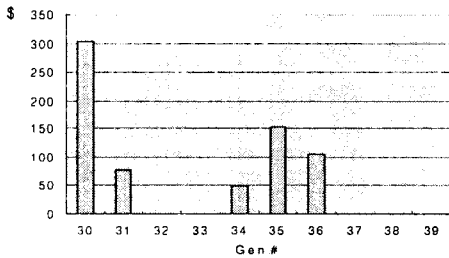


그림 2.4 각 발전기에 대한 무효전력 보상

그림 2.4는 1시간 동안 무효전력의 출력에 대한 각 발전기들에 대한 보상을 나타내고 있다. 시스템에 기여하고 있는 무효전력에 대한 보상은 2.2절에서 설명한 것과 같이 동기 조상기의 투자비로 등가화 하여 지급한다. 즉, 시스템에 기여하고 있는 무효 전력에 동기 조상기의 출력 단가를 곱하면 된다.

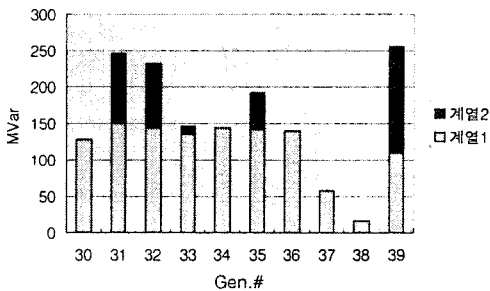


그림 2.5 발전기 위치에 따른 무효전력 구성

그림 2.5는 각 발전기들의 위치에 따른 발전기 무효전력 공급에 따른 계통 기여도를 평가하기 위해 모든 발전기의 유효전력의 출력을 614MW로 고정시키고 발전모선의 전압을 동일하게 1.2로 고정시켰을 경우 발전기의 위치와 부하 구성에 따른 각 발전기들이 출력하고 있는 무효전력의 구성을 나타내고 있다. 그림 2.3과 그림 2.5를 비

교해 보면 39번 발전기가 계통에 기여하는 정도가 큼을 알 수 있다. 그 원인으로 39번 발전기는 부하밀집 지역에 위치해 있어 테브난 임피던스가 상대적으로 작아 계통에 기여하는 무효전력이 많이 늘어났기 때문이다.

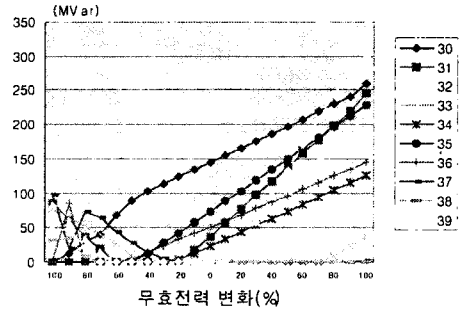


그림 2.6 부하 변화에 따른 시스템에 기여하는 무효전력

그림 2.6은 각 발전기들의 유효전력의 출력을 일정하게 한 다음 발전기들의 무효전력의 변화에 따른 계통에 기여하는 발전기들의 량을 나타내고 있다. 그림을 보면 부하 근접지역에 있는 #39번 발전기가 무효전력에 대한 수요가 많을 때 가장 많이 시스템에 기여하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 전력 시장 체제에서 무효전력의 가치를 직접적인 방법으로 평가하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안 하는 방법은 무효전력을 계통에 기여하는 무효 전력을 유효전력을 출력 하기위해 필요로 하는 무효전력으로 분리하여 무효전력원에 대한 평가를 하였다. 그리고 계통에 무효전력이 과잉일 경우 계통의 전압 유지를 위하여 무효전력을 흡수하는 무효전력도 계통에 기여하는 무효전력으로 정의하였다. 계통에 기여하는 발전기의 무효전력량을 동기조상기의 출력 단가로 등가화 해 보상하는 것이 타당함을 보였다. 그리고 본 논문에서 제안 하는 방법이 계통의 특성을 잘 반영함을 사례 연구를 통해서 입증하였다. 앞으로 전력 시장이 진화해 감으로써 이 논문에서 제안하는 보상방식이 외에 입찰을 통한 보조서비스 시장에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초 전력연구원 주관으로 수행된 과제이며, 관련 기관 관계자 여러분에게 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Shangyou Hao and Alex Papalexopoulos, "Reactive Power Pricing and Management", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.1, Feb. 1997, pp. 95-104
- [2] Garng M.Huang and H. Zhang, "Pricing of Generators' Reactive Power Delivery and Voltage Control in the Unbundled Environment", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 4, 2000, pp.2121-2126
- [3] Julian Barquin Gil, et al., "Reactive Power Pricing: A Conceptual Framework for Remuneration and Charging Procedures". IEEE Trans. On Power Systems, May 2000, pp. 483-489