

# 基于灵敏度计算的发电机无功资源价值分析

江岳文, 温步瀛

(福州大学电气工程及自动化学院, 福建 福州 350002)

摘要: 无功对电力系统的经济、安全和可靠运行具有重要的作用, 因此必须对无功的成本和价值进行分析, 才能科学解决无功定价问题。鉴于有大量的文献对无功生产成本做了分析, 该文从系统侧阐述了不同节点发电机发出或吸收的无功对系统电压和网损的影响, 从而提出了基于网损灵敏度和无功灵敏度的分析方法, 合理地说明了发电机无功对系统价值, 并以算例进行说明。

关键词: 电力市场; 发电机无功; 灵敏度; 系统价值

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)01-0055-03

## 0 引言

无功和电压关系密切, 系统无功的盈亏直接影响电压的质量和系统的线损, 即对电网的安全可靠及经济运行起到很大的作用。随着电力市场机制的引入, 无功的价值及如何定价受到了调度人员和研究人员的广泛关注, 一些文献也做了比较深入的探讨<sup>[1,4]</sup>。这些文献对无功的生产成本都做了比较全面的讲述, 但在无功资源价值方面分析比较少, 而且都没有一些具体的方法提出来, 因此本文提出了无功对网损和电压关系的灵敏度分析方法, 主要从无功资源价值方面分析了不同节点发电机发出或吸收无功对系统的贡献大小, 从而为无功的采购和定价提出可行的依据。有利于发电厂积极响应电网调度需求, 保证系统安全稳定运行和电力市场的进一步发展。

## 1 无功对系统网损价值分析

对于一个有多台发电机的系统, 每台发电机发出或吸收无功对系统总的网损是不一样的, 那么在考虑发电机无功定价或无功调度时, 可以先选择一些无功点, 这些点应该是随着无功的投入而系统有功网损变化较大的。因此, 我们需要进行灵敏度的分析, 确定哪些发电机无功变化对系统网损有更大的正面影响。

系统总的有功损耗可以看成系统所有节点的注入功率代数之和。

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = f(\theta, V) = F(P, Q) \quad (1)$$

其中:  $P_{\Sigma}$ 为系统总的网损;  $P_i$ 为节点注入功率;  $V_i$ 、 $V_j$ 为节点电压。

$$\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_j} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \quad (2)$$

$$V_j \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial V_j} = \sum_{i=1}^{i=n} V_j \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \quad (3)$$

式中, 每个元素都是 H 阵或 N 阵中相应诸元素之和, 因而不难求得。

因为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial Q} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U} \\ U \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U/U \end{bmatrix} \quad (4)$$

由潮流计算时的修正方程式:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H, N \\ J, L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U/U \end{bmatrix} \quad (5)$$

代入, 可得出

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial Q} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U} \\ V \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

再将上式转置, 又可以得

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U} \\ V \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial Q} \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U} \\ V \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (8)$$

此处的系数矩阵为雅可比矩阵。

于是

$$k_i = \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial Q_i} \quad \text{MW/Mvar} \quad (9)$$

通过式(9), 即可以算出节点无功变化影响网络灵敏度的大小,  $k_i$  越大证明该节点对全网有功损耗影响越大, 如果  $k_i < 0$ , 则说明随着该节点无功的增加, 系统的网损会减小, 则该节点所增加的无功对系统价值较大,  $k_i$  越小无功价值越大, 吸收无功的网损价值为负; 如果  $k_i > 0$ , 则说明该点无功增发时, 系统网损增加, 该节点所增加的无功对系统网损价值为负, 吸收无功则网损价值为正。

## 2 发电机无功对系统电压价值分析

对于一个节点为  $N$  的系统,其中发电机台数为  $N_g + 1$ ,负荷母线为  $N_l$ ,平衡节点号为  $N_0$ 。根据快速解偶潮流法,可以得到下式

$$[Q] = -[L] \left[ \frac{V}{V} \right] \quad (10)$$

$$\text{又 } L_{ij} = V_j \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \quad (i, j=1, 2, 3, \dots, N, i \neq N_0) \quad (11)$$

$$[Q] = \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] [V] \quad (12)$$

将负荷与发电机的无功与电压分开,则为下式

$$\begin{bmatrix} Q_g \\ Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_g}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_l}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ V_l \end{bmatrix} \quad (13)$$

假设负荷节点作为 PV 节点,电压幅值应保持不变,与基准潮流解相同,故上式可以进一步简化为:

$$\begin{bmatrix} Q_g \\ Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_g}{\partial V_g} \\ \frac{\partial Q_l}{\partial V_g} \end{bmatrix} [V_g] \quad (14)$$

或写作

$$[Q_g] = \left[ \frac{\partial Q_g}{\partial V_g} \right] [V_g] = S_1 [V_g] \quad (15)$$

$$[Q_l] = \left[ \frac{\partial Q_l}{\partial V_g} \right] [V_g] = S_2 [V_g] \quad (16)$$

式中:  $V_l$  为由于发电机无功的改变而导致负荷母线上系统电压的幅值变化量;  $Q_g, Q_l$  为发电机、负荷母线无功变化幅值;  $S_1$  为发电机无功出力对发电机电压灵敏度矩阵,维数为  $N_g \times N_g$ ;  $S_2$  为负荷无功变化对发电机电压灵敏度矩阵,维数为  $N_l \times N_g$ 。

由于  $S_1$  对角元素比相应的非对角元素大的多,故  $S_1$  不可能是奇异矩阵,故

$$\begin{aligned} [V_g] &= S_1^{-1} [Q_g], \text{ 于是} \\ [Q] &= \left[ \frac{\partial Q}{\partial V_g} \right] [V_g] = S_2 S_1^{-1} [Q_g] = S [Q_g] \end{aligned} \quad (17)$$

$S$  为负荷无功变化对发电机无功变化的灵敏度矩阵,维数为  $N_l \times N_g$ ;

因为

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{j=1, j \neq i}^{j=N} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (18)$$

所以

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2V_i B_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^{j=N} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = L_{ii} / V_i \quad (19)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = L_{ij} / V_j \quad (20)$$

$L_{ij}$  为雅可比矩阵元素。此处的雅可比矩阵元素可以从式 (8) 获得。

采用两种方法的目的是为了分析的方便,并不影响结果的准确性。

通过以上的计算可以很方便地求出  $S$ , 现假设  $S$  矩阵如表 1。

表 1 负荷无功变化对发电机无功变化的灵敏度矩阵

Tab 1 Sensitivity matrix of generator's reactive power change to load's reactive power change

	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	...	$G_g$
$L_1$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	...	$S_{1g}$
$L_2$	$S_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$	$S_{24}$	...	$S_{2g}$
...	...	...	...	...	...	...
$L_l$	$S_{l1}$	$S_{l2}$	$S_{l3}$	$S_{l4}$	...	$S_{lg}$

由表 1 可以知道,对于  $G_1$ , 其对所有负荷母线无功的灵敏度为:  $S_1 = S_{11} + S_{21} + \dots + S_{l1}$ , 同理可以得出除平衡节点外的任何一台发电机无功对所有负荷的无功灵敏度之和,  $S_2, S_3, \dots, S_g$ , 然后把这些值从大到小排列, 则越大的表示该发电机的无功对系统电压贡献越大, 其资源价值也越高。

## 3 算例分析

通过以上分析,以 IEEE - 14 标准测试系统为例,得到 2、3、6、8 各节点上发电机无功出力变化对系统网损的灵敏度及对系统电压稳定价值系数见表 2、表 3。

表 2 发电机无功出力对系统有功网损的灵敏度系数。

Tab 2 Sensitivity factor of generator reactive power to system real loss

发电机节点	2	3	6	8
$k_i$	0.014 8	0.047 1	0.025 6	0.013 2

表 3 发电机无功出力对系统电压稳定价值系数

Tab 3 Stability value factor of generator reactive power to system voltage

发电机节点	2	3	6	8
$S_1$	1.215	1.337	1.124	1.189

## 4 综合分析

发电机的无功综合贡献主要体现在为了保持电压质量而吸收或者多发无功,从而使系统的网损发生变化,并减少了无功补偿设备的投资,减少了电容器的投切和变压器档位的调节次数,减少了调相机和电抗器的投入。以上得出的灵敏度只是反映了发电机对系统贡献的大小,尚需结合系统无功生产成本,然后考虑  $k_i$ ,  $S_i$  作为权系数。无论  $k_i$  是否大于零,发电机发出无功时,权系数取  $-k_i$ ,吸收无功时则取  $k_i$ 。通过生产成本与权系数的结合才能对无功定价作一个全面的参考。

## 5 结论

本文基于灵敏度的基础上,详细分析了无功发电对系统网损和电压价值的价值,通过算例验证了这种方法的有效性,对无功定价有很大的指导作用,有利于促进系统的稳定,提高系统的经济性。

### 参考文献:

- [1] Xu W, Zhang Y, Kundur P. Assessing the Value of Generator Reactive Power Support for Transmission Access [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 2001, 7 (4): 337-342
- [2] Choi J Y, Rin S H, Punk J H. Optimal Real Time Pricing of Real and Reactive Powers [J]. IEEE Trans on

Power Systems, 1998, 13 (4): 1226-1231.

- [3] 常玉波,孙洪波,周家启.新的实时有功无功电价模型及算法 [J].电网技术,1997,21 (10): 62-65.  
CHANG Yu-bo, SUN Hong-bo, ZHOU Jia-qi New Spot Price Module and Arithmetic of Active Power and Reactive Power [J]. Power System Technology, 1997, 21 (10): 62-65.
- [4] 温步瀛,周峰,程浩忠,等.电力市场条件下无功发电成本研究 [J].电力自动化设备,2002,21 (2): 26-29.  
WEN Bu-ying, ZHOU Feng, CHENG Hao-zhong, et al Research on Reactive Power Cost in Power Market [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 21 (2): 26-29.
- [5] Exposito A G, Ramos J IM, Macias J L R, et al Sensitivity-based Reactive Power Control for Voltage Profile Improvement [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8 (3): 937-943.
- [6] Baughman M L, Siddiqi S N, Zamikau J W. Advanced Pricing in Electrical Systems, Part I Theory [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1): 489-495.

收稿日期: 2005-05-23; 修回日期: 2005-06-14

### 作者简介:

江岳文 (1977 - ),女,硕士,讲师,研究方向为电力市场; E-mail: wenzi3344@163.net

温步瀛 (1967 - ),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与电力市场。

## Resource value analysis of generators reactive power based on sensitivity calculation

JIANG Yue-wen, WEN Bu-ying

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Reactive power is important to the economic, secure and reliable operating of power system. In order to solve the pricing problem of reactive power scientifically, its cost and value should be analyzed. Many papers analyzed the cost of reactive power from production side. This paper expounds the effects of producing or absorbing reactive power in different generator nodes to the voltage and net loss from system side. What's more, it puts forward the method of sensitivity analysis based on net loss and reactive power to illustrate system value of generators reactive power rationally. An example is introduced for validating the method.

**Key words:** power market; generators reactive power; sensitivity; system value

(上接第 21 页 continued from page 21)

**Abstract:** A setting management system of relay protection based on the mode of C/S and B/S is presented in this paper. It applies the technique of internet/intranet sufficiently. The systematic architecture is adopted, in which intranet uses the mode of C/S and demanding and releasing of external information use the mode of B/S. Finally, advantages of the two modes are brought into play, and each function of the system is achieved. The system is developed by C++ programming, it has been applied in practice and improves work efficiency of setting managers.

**Key words:** relay protection; setting management system; Client/Server; Browser/Web server; database