

文章编号: 1005-0523(2006)04-0067-04

# 基于最优潮流的无功电价研究

罗杰<sup>1</sup>, 陈赤培<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西电力设计院, 江西 南昌 330006)

**摘要:**无功功率服务价格是电力工业重组中的一个重要的研究课题. 传统的最优潮流数学模型将有功发电成本最小作为优化目标, 不考虑无功功率的生产成本, 因此无法得到合理的无功功率价格. 本文在分析电力定价方法的基础上, 对无功电价作了详细研究. 在引入了无功功率的生产成本和无功功率补偿的成本之后, 运用最优潮流方法, 分析了不同的优化目标及不同的约束条件下对以经济学为基础的无功电价的影响, 分析影响无功电价的因素.

**关键词:** 电力市场; 无功电价; 最优潮流

**中图分类号:** TM76

**文献标识码:** A

## 0 引言

电价在电力市场实现过程中占据着核心地位, 因为电力从生产到消费的一切行为都是用价格(费用)来表示的. 利用电价在市场环境中的经济信号作用, 指导、调节、控制电力生产与消费, 从而达到优化资源配置, 合理组织生产, 提高社会效益的目的. 本文无功电价定价采用最优潮流(OPF)方法将有功和无功总发电成本最小作为优化目标.

## 1 基于潮流跟踪的无功功率成本定价<sup>[1]</sup>

无功功率实时电价具有丰富的系统边际成本信息<sup>[2]</sup>, 是计算电力市场下的无功功率价格的一种较好的方法, 但是实时电价的缺点是对系统参数和结构变化比较敏感, 导致短时期内因系统轻微的变化而出现较大波动, 不易实时计算, 且不能准确回收系统的投资和运行成本, 所以在实际大规模电力系统中应用有一定的难度.

这里讲的无功功率定价方法是将系统中各无

功源的生产成本以及无功输电成本按照负荷的实际使用情况进行分摊, 使用户的无功功率电价最终包括两部分, 即分摊到该用户的系统无功功率生产成本和无功功率传输成本, 即以供需平衡为依据的定价.

### 1.1 系统无功功率生产成本

系统无功源主要有5种: 同步发电机、同步调相机、电容器、线路充电电容以及具有超前功率因数的负荷. 这里不考虑线路充电电容和具有超前功率因数的负荷的无功生产成本, 而只考虑发电机、调相机和电容器的无功生产成本.

### 1.2 无功功率输电成本

由于建造输电线路的主要目的是传输有功功率, 因此认为无功功率输电成本不包括输电线路的固定投资和运行人工等成本, 而只包含输电线路的有功和无功网损成本.

大部分对网损分配的讨论限于根据有功功率的传输来确定, 而在考虑了无功功率的潮流之后, 由于线路传输功率变为复数, 因此在网损分配上应同时考虑线路上无功和有功功率的传输情况.

### 1.3 无功功率成本定价流程

收稿日期: 2006-04-08

作者简介: 罗杰(1978-): 男, 湖南常德人, 讲师, 硕士, 从事电力自动化系统的研究和教学.

无功功率成本定价主要由两部分组成:用户消耗的无功功率成本和由于传输用户无功功率需求而导致的输电成本,两者相加就是最终的用户消耗的无功功率费用.计算无功电价的总体步骤如下:

- a. 状态估计或潮流计算;
- b. 根据系统潮流分别进行有功和无功潮流组成分析;
- c. 计算系统中各个无功电源的生产成本;
- d. 根据潮流组成分析结果计算各个负荷需要支付的无功功率生产成本;
- e. 计算系统各输电线路上的有功和无功损耗费用;
- f. 根据潮流组成分析的结果计算各负荷需要支付的无功功率费用;

## 2 基于最优潮流的无功电价数学模型

采用潮流方程为约束的最优方法进行无功时实电价计算,最优化问题的目标函数是使全网有功和无功功率发电总成本最小化,由于假定负荷已知,不随价格变化,这一优化目标函数实质上也是社会经济效益最优的反映.无功定价所用的有功和无功总成本最优化的目标函数为:

$$C = \sum_{i \in N_G} C_{gpi}(P_{Gi}) + C_{gqi}(Q_{Gi}) + \sum_{j \in N_C} C_{cj}(Q_{Cj}) \quad (1)$$

- 其中:  $N_G$  是系统发电机节点集合;
- $N_C$  表示系统中具有无功补偿器的节点集合;
- $C_{gpi}(P_{Gi})$  为节点  $i$  上的有功发电成本函数;
- $C_{gqi}(P_{Gi})$  为节点  $i$  上无功发电成本函数;
- $C_{cj}(Q_{Cj})$  为节点上的无功补偿器运行成本函数.

以上这3项之和即为系统发电的总成本(这里不考虑电网运行控制及设备维护等成本).

上式中第1项发电机的有功功率成本函数用二次近似,并受最大和最小出力限制,即

$$\begin{cases} C_{gpi}(P_{Gi}) = a + bP_{Gi} + cP_{Gi}^2 \\ P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \end{cases} \quad (2)$$

由于发电机运行是要受到发电容量的限制,当发电机在发出无功功率时,其有功出力的极限比没有无功出力的情况下的极限值要小,从而造成发电厂隐性的经济损失,此时即使该有功功率无需发出,也会影响这部分有功功率可作为旋转备用的相应利润,这就是我们前面说过的机会成本(opportunity cost),我们把上式的第2项无功发电成本作为该发电机由于其无功出力而损失的有功发电能力所对应的利润,

$$C_{gqi}(Q_{Gi}) = k [ C_{gpi}(S_{Gimax}) - C_{gpi} \sqrt{S_{Gimax}^2 - Q_{Gi}^2} ] \quad (3)$$

- 其中:  $S_{Gimax}$  是发电机允许的最大出力;
- $Q_{Gi}$  是发电机运行时的无功出力;
- $k$  是常定系数,为发电机厂的利润率,一般为5%—10%.

无功补偿器一般由系统安装,为了收回其投资成本,必须在电价中也包含无功补偿器的成本.上式的第3项为无功补偿器的成本,近似用其投资总额的折旧率计算(按使用寿命15年,希望收回成本为11,600 \$ /Mvar 计)

$$C_{cj}(Q_{Cj}) = \frac{11,600 Q_{Cj} h}{15 \times 365 \times 24} = 13.24 Q_{Cj} \quad (4)$$

其中:  $h$  为平均使用率,近似取为2/3.

## 3 实例研究

为了分析不同的目标函数和不同的运行条件对电力市场的影响,对下列不同情况分别进行最优潮流计算:

- a. 目标函数忽略无功发电和无功补偿器成本;
- b. 目标函数只包含有功和无功发电成本,忽略无功补偿器的成本;
- c. 目标函数只包含有功发电成本和无功补偿成本,忽略无功发电成本;
- d. 目标函数同时包括了有功发电及无功成本和无功补偿器.

由目标函数:  $C = \sum_{i \in N_G} C_{gpi}(P_{Gi}) + C_{gqi}(Q_{Gi}) + \sum_{j \in N_C} C_{cj}(Q_{Cj}); (i=1,2; j=4)$  (5)

$$C_{gqi}(Q_{Gi}) = k [ C_{gpi}(S_{Gimax}) - C_{gpi} \sqrt{S_{Gimax}^2 - Q_{Gi}^2} ]; (取 k=0.1)$$
 (6)

$$C_{cj}(Q_{Cj}) = \frac{11,600 Q_{Cj} h}{15 \times 365 \times 24} = 13.24 Q_{Cj};$$
 (7)

$$C_{gqi}(Q_{Gi}) = 93.75 - 75 \sqrt{1.25^2 - Q_{Gi}^2} + 42 Q_{Gi}^2$$
 (8)

$$C_{cj}(Q_{Cj}) = 0.1324 Q_{Cj}$$
 (9)

由上面的式子可以得到目标函数:

$$C = \sum_{i \in V_G} (420 P_{Gi}^2 + 750 P_{Gi} + 168.75 - 75 \sqrt{1.25^2 - Q_{Gi}^2} + 42 Q_{Gi}^2) + 0.1324 Q_{C4}$$
 (10)

在 OPF 计算中无特别说明采用以下的约束条件<sup>[3]</sup>:

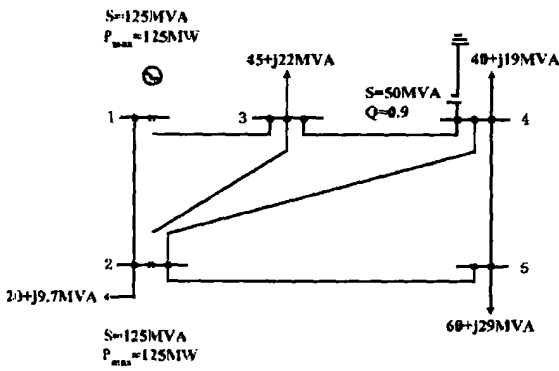


图1 5节点电力系统示意图

a. 潮流方程等式约束

$$\sum P_{Gi} - \sum P_{Li} - \Delta P = 0 \quad (11)$$

$$\sum Q_{Gi} - \sum Q_{Li} - \Delta Q = 0$$

b. 发电机有功和无功出力约束

$$0.2 \leq P_{Gi} \leq 1.25 \quad (12)$$

$$P_{Gi}^2 + Q_{Gi}^2 \leq 1.25^2; \text{其中: } i \in N_G$$

c. 无功补偿电容器出力约束

$$0 \leq Q_{c4} \leq 0.5 \quad (13)$$

d. 线路潮流约束

$$|P_{ij}| \leq 1.8; \text{其中: } P_{ij} \text{ 可由 } V_i, V_j \text{ 及线路参数计算.} \quad (14)$$

e. 母线电压约束

$$0.95 \leq V_i \leq 1.05; \text{其中: } i=2, 3, 4, 5 \quad (15)$$

在这里由于计算的缘故暂且只考虑约束条件的等式约束,即:潮流方程等式约束;(有功、无功保持平衡)

有功平衡(假设系统网络损耗为总发电机有功的10%)

$$\sum P_{Gi} - \sum P_{Li} - \Delta P = 0; \quad (16)$$

$$0.9 \sum P_{Gi} - 1.65 = 0;$$

无功平衡(假设不计网络损耗)

$$\sum Q_{Gi} - \sum Q_{Li} = 0; \quad (17)$$

$$\sum Q_{Gi} - (0.097 + 0.22 + 0.19 + 0.29) = 0;$$

由目标函数和约束条件构造一个无约束的拉格朗日函数:

$$L(P_{Gi}, Q_{Gi}, \lambda_1, \lambda_2) = C + \lambda_1(0.9(P_{G1} + P_{G2}) - 1.65) + \lambda_2(Q_{G1} + Q_{G2} - 0.797); \quad (18)$$

对每个变量和拉格朗日因子求导:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 420 * 2 P_{G1} + 750 + 0.9 \lambda_1 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 420 * 2 P_{G2} + 750 + 0.9 \lambda_1 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{G1}} = 42 * 2 Q_{G1} + \frac{75 Q_{G1}}{\sqrt{1.25^2 - Q_{G1}^2}} + \lambda_2 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{G2}} = 42 * 2 Q_{G2} + \frac{75 Q_{G2}}{\sqrt{1.25^2 - Q_{G2}^2}} + \lambda_2 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = 0.9(P_{G1} + P_{G2}) - 1.65 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = Q_{G1} + Q_{G2} - 0.797 = 0; \end{cases} \quad (19)$$

可以解得:  $\begin{cases} P_{G1} = P_{G2} = 0.917 \\ Q_{G1} = Q_{G2} = 0.3985 \end{cases} \quad (20)$

将  $P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$  的值代入上面的等式中可得:  $\begin{cases} \lambda_1 = -1689.2 \\ \lambda_2 = -58.7 \end{cases} \quad (21)$

将  $P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}, \lambda_1, \lambda_2$  的值代入目标函数中可得:

$$C_{\min C4} = 2254.9 + 0.1324 Q_{C4} \quad (22)$$

现在假定  $Q_{C4} = 20 \text{ MVA}$ , 则可得:  $C_{\min} = 2254.97 + 0.1324 * 20 = 2257.618 \text{ \$/h}$ ; 其中3项组成部分分别是:有功成本  $2231.85 \text{ \$/h}$ , 无功成本  $23.12 \text{ \$/h}$ , 无功补偿器成本  $2.648 \text{ \$/h}$ . 容易看出,有功成本和无功成本有很大的不同,有功成本是无功成本的大约100倍.

目标函数忽略无功发电和无功补偿器成本:

$$C = \sum_{i \in N_G} C_{gpi}(P_{Gi}); \text{则 } C_{\min} = 2231.85 \text{ \$/h}$$

目标函数只包含有功和无功发电成本,忽略无功补偿器的成本:

$$C = \sum_{i \in N_G} [C_{gpi}(P_{Gi}) + C_{gqi}(Q_{Gi})]; \text{则 } C_{\min} = 2254.9 \text{ \$/h}$$

目标函数只包含有功发电成本和无功补偿成本,忽略无功发电成本:

$$C = \sum_{i \in N_G} C_{gpi}(P_{Gi}) + 0.1324 Q_{C4}; \text{则 } C_{\min} = 2231.85 + 0.1324 * 20 = 2234.5 \text{ \$/h}$$

## 4 影响无功功率定价的因素

### 4.1 用户功率因数影响无功功率定价的

在负荷功率因数接近1的时候,上例中系统的2台发电机都转入进相运行,吸收由于线路充电电容产生的无功功率,而这时负荷节点上的无功边际

成本变成上升趋势,这是由于发电机进相运行而造成的有功发电机隐性损失要由负荷承担.另外,当功率因数下降而母线4上的无功补偿器达到无功出力极限时,所有负荷节点上的无功边际价格也开始加快上升趋势.

在负荷功率因数接近0.7时,由于系统中的无功潮流很大,导致母线5的电压达到0.95的极限值,同时也使离母线5较远的母线1上的发电机减少无功出力,而与母线5之间有联系的母线2上的发电机增加无功出力以保持母线的电压维持在0.95.这一系列的变化使得负荷节点无功边际价格急剧上升,从而给用户一个正确的价格信号,促使用户减少无功需求.

#### 4.2 系统日需求变化影响无功功率定价

夜晚负荷低时,由于无功需求减少,2台发电机都改为进相运行,以吸收线路充电电容产生的过多的无功功率,其边际成本要比负荷高时小得多.

#### 4.3 电压控制影响无功功率电价

在我们给出的实例系统中,母线5的电压水平最低,我们选择母线5作为电压控制的对象.当母线5的电压变化时,系统其它的母线的电压也受其影响.因此如果对系统中的某一节点进行电压控制,其邻近母线的电压也会收到相应的影响.母线5的电压可能会导致其它母线的电压水平达到极限,从而使得无功边际价格产生强烈的价格波动.价格会随母线电压变化而改变,可以看出,电压控制对有功边际价格也有一定的影响.在母线电压达到极限时,系统各无功源的出力也会出现较大的波动,尤

其在母线1到达上先后,母线1上的发电机转为进相运行,改变了无功潮流的方向,以维持母线1的电压不超过1.05.

#### 4.4 无功机会成本利润率影响无功功率电价

母线2和母线5的无功边际成本受到的影响比母线3和母线4要大.在机会成本很小时,系统尽可能的利用发电机发出的无功功率.由于发电机2更接近用户母线而优先提供无功,母线1上的发电机略呈进相运行,以维持母线1的电压限制.随着发电机无功功率成本的升高,系统逐渐转向利用母线4上电容器发出的无功功率,而母线1和母线2上发电机的无功出力也趋于接近.

### 5 小结

本文从电力市场的电价分析入手,对成本电价作了讨论,建立数学模型,引入无功功率发电成本和无功补偿器成本,进行了分析.最优化问题的目标函数是使全网有功和无功功率发电总成本最小化,实质上也是社会经济效益最优的反映.

#### 参考文献:

- [1] 戴彦,倪以信,文福拴,韩祯祥.基于潮流组成分析及成本分摊的无功功率电价[J].电力系统自动化,2000,24(18):13~17.
- [2] 郑斌,王秀丽,王锡凡.电力边际成本定价类型及特点[J].华东电力,2000,(8):1-3
- [3] 夏道止.电力系统分析[M].北京:中国电力出版社,2004.

## The Research of Reactive Power Price Based on OPF

LUO Jie<sup>1</sup>, CHEN Chi-pei<sup>2</sup>

(1.School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013;2.Jiangxi Electric Power Design Institute, Nanchang 330006, China)

**Abstract:** Currently, developing an accurate and feasible reactive power pricing is an important undertaking for power system restructure. Such reactive power price can not be obtained by traditional optimal power flow models because the production cost of reactive power is ignored in these models. In this paper, both reactive power production cost of generators and investment cost of capacitors are included in total system operation cost. Different types of objective functions are used to observe reactive power prices under different OPF models, and different system operation conditions are adopt to observe the effects on power prices, the factors, which influence to the reactive power price, are analyzed as well.

**Key words:** electricity market; reactive power price; optical power flow