

基于 OPF的实时无功电价及其分析

刘悦¹, 韦化²

(1. 山东省冶金科学研究院, 山东 济南 250014; 2 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 提出一种新的计算无功价格模型。在模型中引入静止无功补偿器 (SVC)的生产成本,以丰富模型涵盖的经济信息。采用互补条件形成新的无功电价模型的 Lagrange函数,详细分解实时电价模型,全面分析 Lagrange乘子 p 、 q 的经济意义,揭示出无功生产费用和经典经济调度的关联性。在 IEEE-14 节点系统上,针对不同负荷进行数字仿真,结果表明: SVC对系统无功定价产生积极影响,这说明所提模型的有效性。在更为广泛的系统 IEEE-4—IEEE-118上的数字仿真表明:运用原始-对偶内点法 (PDIM)求解无功价格具有良好的鲁棒性。

关键词: 无功定价; PDIM; SVC; 实时电价分解; 最优潮流

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)19-0055-06

0 引言

在过去 20 年间,由于私有制和解除管制的推行,全球电力系统在持续发展经历着重大的变革。北美电力可靠性委员会 (NERC)指出无功补偿服务是影响电力传输的必要服务。英国联邦能源管理委员会 (FERC)在论述辅助服务时也详细阐述无功补偿服务及其定价的必要性^[1]。在传统电力体制下,无功的生产和分配完全由系统调度员统一安排,不存在对无功服务进行成本核算和单独计费问题。当前,电力系统的一个全球性目标是,在保证电力服务的完整性、优质性和安全性达到合适水平的基础上,寻求一种最低花费。在完全竞争的电力市场中,要达到此目标,无功的电压控制及其生产必须具有高效性^[2-5]。因此无功由无偿提供转向有偿服务已成为必然趋势。

FERC提出,仅依据固定费率制定无功酬劳,远远不能提供一个合适的无功价格。基于功率因数罚值法的无功定价方法,也不能满足顾客需求的在电压约束下的精确价格信号。而基于微观经济学边际价格理论的无功实时定价策略,提供了无功传输和无功源价格与价值的信息,目前日益受到关注^[6]。

本文引入 SVC 成本^[7],运用文献 [8]中 Lagrange函数形式,建立新的无功竞价模型的 Lagrange函数,对实时电价进行详细分解,全面探讨 Lagrange乘子 p 、 q 的经济意义。运用 PDIM 求解模型,仿真试验表明所提模型的有效性以及算法

的鲁棒性。

1 基于最优潮流的无功定价数学模型

1.1 目标函数

选取有功无功生产总成本最小为目标函数。

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{n_g} [C_{gp_i}(P_{Gi}) + C_{gq_i}(Q_{Gi})] + \sum_{i=1}^{n_{sh}} C_{shi}(Q_{shi})$$

式中: $C_{gp_i}(P_{Gi})$, $C_{gq_i}(Q_{Gi})$, $C_{shi}(Q_{shi})$ 分别表示发电机有功、无功生产成本,以及 SVC 的资本成本。

1.2 等式约束

节点功率平衡方程

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \cos \theta_{ij} = 0 \\ Q_{Ri} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \sin \theta_{ij} = 0 \end{cases} \quad i \in S_N$$

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j - \theta_{ij}$

式中: P_{Di} , Q_{Di} , Q_{Ri} 分别为有功无功负荷以及无功源的无功出力, S_N 为系统所有节点的集合。

1.3 不等式约束

$$\begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \overline{Q}_{Gi} & i \in S_G \\ R \leq \sum_{i=1}^{n_g} R_i \leq \overline{R} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{shi} \leq Q_{shj} \leq \overline{Q}_{shj} & i \in S_{SH} \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \overline{V}_i & i \in S_N \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \overline{P}_{ij} & i \in S_{IJ} \end{cases}$$

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50467001); 广西基金项目桂科自 (024009)

式中: V_i 是节点电压幅值; n_g 是发电机总数; P_i 是联络线有功功率; S_G 是所有发电机集合; S_{SH} 是所有 SVC 集合; S_{ll} 是线路集合。

发电机的旋转备用

$$R_i = \begin{cases} \overline{P_{Gi}} - P_{Gi} & \text{if } P_{Gi} > (1 - f_i) \overline{P_{Gi}} \\ f_i \overline{P_{Gi}} & \text{if } P_{Gi} < (1 - f_i) \overline{P_{Gi}} \end{cases}$$

式中: f_i 代表发电机 i 能够提供的旋转备用容量百分比。

2 原始 - 对偶内点算法 (PD IPM)

min $f(x)$

$$\text{s t } \begin{cases} h(x) = 0 & h(x): R^N \quad R^m \\ \underline{g} \leq g(x) \leq \overline{g} & g(x): R^N \quad R^r \end{cases}$$

引入松弛变量 $(l, u) \in R^r$, 此方程转化为:

min $f(x)$

$$\text{s t } \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) - l - \underline{g} = 0; \quad g(x) + u - \overline{g} = 0 \\ (l, u) \geq 0 \end{cases}$$

其 Lagrange 函数定义为:

$$L(x, l, u, y, z, w, \tilde{z}, \tilde{w}) = f(x) - y^T h(x) - z^T \cdot (g(x) - l - \underline{g}) - w^T (g(x) + u - \overline{g}) - \tilde{z}^T l - \tilde{w}^T \cdot u$$

由 $\frac{\partial L(\cdot)}{\partial l} = z - \tilde{z} = 0, \frac{\partial L(\cdot)}{\partial u} = -w - \tilde{w} = 0$ 可得
到: $\tilde{z} = z, \tilde{w} = -w$

根据扰动 KKT 条件可得:

$$\begin{cases} L_x & \nabla f(x) - \nabla h(x) y - \nabla g(x) (z+w) = 0 \\ L_y & h(x) = 0 \\ L_z & g(x) - l - \underline{g} = 0 \\ L_w & g(x) + u - \overline{g} = 0 \\ L_l^\mu & L_z e - \mu e = 0 \\ L_u^\mu & L_w e - \mu e = 0 \\ (l, u) & \geq 0, z \geq 0, w \geq 0, y \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $(L, U, Z, W) \in R^{r \times r}$ 分别是对角元素为 l_i, u_i, z_i, w_i 的对角阵, $y \in R^m$ 和 $(z, w, \tilde{z}, \tilde{w}) \in R^r$ 为 Lagrange 乘子, $\mu > 0$ 为扰动因子, e 为单位列向量。

应用 Newton 法求解方程 (1), 其修正方程为:

$$\begin{cases} (\nabla^2 h(x) y + \nabla^2 g(x) (z+w) - \nabla^2 f(x)) x + \nabla h(x) y + \nabla g(x) (z+w) = L_{x0} \\ \nabla h(x)^T x = -L_{y0} \\ \nabla g(x)^T x - l = -L_{z0} \\ \nabla g(x)^T x + u = -L_{w0} \\ Z^{-1} l + L z = -L_{l0}^\mu \\ W^{-1} u + U w = -L_{u0}^\mu \end{cases} \quad (2)$$

式中: $(L_{x0}, L_{y0}, L_{z0}, L_{w0}, L_{l0}^\mu, L_{u0}^\mu)$ 是扰动 KKT 条件的不平衡量, $\nabla^2 h(x)$ 和 $\nabla^2 g(x)$ 分别为 $h(x)$ 和 $g(x)$ 的 Hessian 矩阵。

由此采用如下 PD IPM 流程计算无功实时电价:

Step 0: 初始化。最大迭代次数 $Iter = IterMax$, 中心参数 $\beta = 0.1$, 系统功率平衡方程的 Lagrange 乘子初值 $[l, u]^T > 0, [z > 0, w < 0, y = 0]^T$, 精度 $tolerance = 10E-6$ 。

While ($Iter < IterMax$) Do:

Step 1: 计算对偶间隙 $C_{Gap} = l^T z - u^T w$ 。

If ($C_{Gap} < tolerance$), 输出最优解, 停机。

Step 2: 计算扰动因子 $\mu = \frac{C_{Gap}}{2r}$ 。

Step 3: 计算无功定价目标函数 $f(x)$ 和约束函数 $h(x), g(x)$ 的 Jacobin 矩阵和 Hessian 矩阵。

Step 4: 形成并稀疏求解简约修正方程 (2), 得到变量修正值 $[x, y, l, u, z, w]$ 。

Step 5: 通过可行性检验决定在原始 - 对偶空间内的最大允许步长:

$$step_p = 0.9995 \min \left(\min_i \left(\frac{-l_i}{l_i} \mid l_i < 0; \frac{-u_i}{u_i} \mid u_i < 0 \right), 1 \right);$$

$$step_d = 0.9995 \min \left(\min_i \left(\frac{-z_i}{z_i} \mid z_i < 0; \frac{-w_i}{w_i} \mid w_i > 0 \right), 1 \right)。$$

Step 6: 更新原始与对偶变量:

$$\begin{bmatrix} x \\ l \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ l \\ u \end{bmatrix} + step_p \begin{bmatrix} x \\ l \\ u \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ z \\ w \end{bmatrix} + step_d \begin{bmatrix} y \\ z \\ w \end{bmatrix}$$

$$Iter = Iter + 1$$

End Do

Step 7: 打印“不收敛”, 停机。

3 基于 OPF 的实时电价分解

3.1 实时电价分解

本文所提无功定价模型含有大量不等式约束, PD IPM 的 Lagrange 函数采用互补条件处理不等式约束中引入的松弛变量, 大大降低了系统对病态问题的敏感度。Lagrange 函数写为:

$$L = F(P_g, Q_g, Q_{sh}) - h^T(X) + (z+w)^T \cdot g(X) +$$

式中: $= z^T (-l - \underline{g}) + w^T (u - \overline{g}) - (\tilde{z}^T l + \tilde{w}^T u)$;

$$h = [h_{p1}, h_{q1}, \dots, h_{pi}, h_{qi}, \dots];$$

$$X = [l, V_1, \dots, i, V_i, \dots];$$

$$\begin{aligned}
 &= [p_1, q_1, \dots, p_i, q_i, \dots, l]; \\
 z &= [\tilde{z}_p, \tilde{z}_q, \tilde{z}_r, \tilde{z}_{sh}, \tilde{z}_v, \tilde{z}_{ij}]^T; \\
 w &= [w_p, w_q, w_r, w_{sh}, w_v, w_{ij}]^T; \\
 \tilde{z} &= [\tilde{z}_p, \tilde{z}_q, \tilde{z}_r, \tilde{z}_{sh}, \tilde{z}_v, \tilde{z}_{ij}]^T; \\
 \tilde{w} &= [\tilde{w}_p, \tilde{w}_q, \tilde{w}_r, \tilde{w}_{sh}, \tilde{w}_v, \tilde{w}_{ij}]^T.
 \end{aligned}$$

所有节点的实时电价表示为 (*代表最优解点):

$$p_i = \left. \frac{\partial L}{\partial P_i} \right|_* \quad (3)$$

$$q_i = \left. \frac{\partial L}{\partial Q_i} \right|_* \quad (4)$$

对发电机节点有:

$$p_i = \left. \frac{\partial F(P_{gi})}{\partial P_{gi}} \right|_* + l_{pi} + u_{pi} + l_r \frac{\partial \sum_{i=1}^{n_g} R_i}{\partial P_{gi}} \quad (5)$$

$$q_i = \left. \frac{\partial F(Q_{gi})}{\partial Q_{gi}} \right|_* + l_{qi} + u_{qi} \quad (6)$$

功率平衡方程若表示为:

$$P_L = P_S + \sum_i P_i$$

$$Q_L = Q_S + \sum_i Q_i$$

式中: P_S 、 Q_S 为平衡节点处的有功无功; P_L 、 Q_L 为系统有功无功网损。

对上两式分别求偏导有:

$$\frac{\partial P_S}{\partial X} = \sum_{i \in S} \left(-1 + \frac{\partial P_i}{\partial P} \right) \frac{\partial P_i}{\partial X} + \sum_{i \in S} \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} \frac{\partial Q_i}{\partial X} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_S}{\partial X} = \sum_{i \in S} \left(-1 + \frac{\partial Q_i}{\partial Q} \right) \frac{\partial Q_i}{\partial X} + \sum_{i \in S} \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X} \quad (8)$$

又因从 $\frac{\partial L}{\partial X} = \frac{\partial F}{\partial X} - \frac{\partial h^T}{\partial X} + \frac{\partial g^T}{\partial X} (l + u) = 0$ 可推出:

$$\begin{aligned}
 &= \left[\frac{\partial h}{\partial X} \right]^{-1} \left[\frac{\partial F}{\partial X} + \frac{\partial g^T}{\partial X} (l + u) \right] = \\
 &\left[\frac{\partial h}{\partial X} \right]^{-1} \left[\frac{\partial F}{\partial P_S} \frac{\partial P_S}{\partial X} + \frac{\partial F}{\partial Q_S} \frac{\partial Q_S}{\partial X} \right] + \left[\frac{\partial h}{\partial X} \right]^{-1} \cdot \\
 &\left[\frac{\partial g^T}{\partial X} (l + u) \right]
 \end{aligned}$$

将式 (7)、(8) 代入上式并将 $\frac{\partial F}{\partial X}$ 写为 $\frac{\partial F}{\partial P_S}$ 和 $\frac{\partial F}{\partial Q_S}$ 形式:

$$\begin{aligned}
 p_i &= \left(1 - \frac{\partial P_i}{\partial P} \right) \frac{\partial F}{\partial P_S} - \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} \frac{\partial F}{\partial Q_S} - \\
 &\sum_{j \in h_0} \frac{\partial g_j}{\partial P_i} (l_{ij} + u_{ij}) \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_i &= \left(1 - \frac{\partial Q_i}{\partial Q} \right) \frac{\partial F}{\partial P_S} - \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} \frac{\partial F}{\partial Q_S} - \\
 &\sum_{j \in h_0} \frac{\partial g_j}{\partial Q_i} (l_{ij} + u_{ij}) \quad (10)
 \end{aligned}$$

再将式 (9)、(10) 分别代入式 (3)、(4) 中, 并将最后一项按有功、无功分离得出各自实时电价:

$$\begin{aligned}
 p_i &= \left(1 - \frac{\partial P_i}{\partial P} \right) p_{ps} - \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} q_{qs} - \\
 &\sum_{j=1}^l (l_{ij} + u_{ij}) \frac{\partial P_{lj}}{\partial P_i} \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_i &= - \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} p_{ps} + q_{qs} \left(1 - \frac{\partial Q_i}{\partial Q} \right) - \sum_{j=1}^l (l_{ij} + \\
 &u_{ij}) \frac{\partial P_{lj}}{\partial Q_i} - \sum_{j=1}^n (l_{vj} + u_{vj}) \frac{\partial V_j}{\partial Q_i} \quad (12)
 \end{aligned}$$

3.2 p 、 q 经济意义的论述

Lagrange 乘子 p 、 q 分别对应由功率平衡方程的不平衡扰动所导致的目标函数值的变化。在优化问题中, 等式约束表示供需平衡, 即节点 i 的有功出力和无功出力的微小变化所引起的系统总成本的变化。提供了这种供求波动信息, 可被理解为对应于节点功率注入的影子价格。因此用 p 、 q 分别作为有功和无功实时电价, 具有充分的微观经济学依据^[9,10]。

式 (5)、(6) 所代表的发电机实际生产费用同对应实时电价的关联, 体现出发电容量约束的作用。因此如果发电机解除其出力容量限制, z_{pi} 、 z_{qi} 、 w_{pi} 、 w_{qi} 的值则代表系统收益。

式 (9)、(10) 可看作由三部分构成: 系统电价, 网损补偿费用和由系统运行工况决定的安全费用 (主要对应不等式约束), 因此 p 、 q 包含了电力系统运行的所有经济信息^[11]。

从 3.1 节看出 p 和 q 表达式相似, 二者关系可用彼此对对方网损的影响来表现, 即 $\frac{\partial P_L}{\partial Q_i}$ 、 $\frac{\partial Q_L}{\partial P_i}$ 。此影响在区域发电成本中可用来计算边际转运价格。

如果将式 (9)、(10) 变换成:

$$\begin{aligned}
 p_{ps} &= \frac{\partial F}{\partial P_S} = \frac{p_i + \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} \frac{\partial F}{\partial Q_S} + \sum_{j \in h_0} \frac{\partial g_j}{\partial P_i} (l_{ij} + u_{ij})}{1 - \frac{\partial P_i}{\partial P_i}} \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$q_s = \frac{\partial F}{\partial Q_s} = \frac{p_i + \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \frac{\partial F}{\partial P_s} + \sum_{j \in h_0} \frac{\partial g_j}{\partial Q_i} (l_j + u_j)}{1 - \frac{\partial Q_L}{\partial Q_i}} \quad (14)$$

式中: $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}, \frac{\partial Q_L}{\partial P_i}, \frac{\partial P_L}{\partial Q_i}, \frac{\partial Q_L}{\partial Q_i}$ 为有功网损和无功网损的微增率, $\frac{\partial F}{\partial P_s}, \frac{\partial F}{\partial Q_s}$ 为平衡机有功无功耗量微增率, 分别用 p_0, q_0 表示。

在最优潮流的最优解处, 有功网损和无功网损的微增率很小, 对偶变量 l, u 的值也相对很小, 因此由式 (13)、(14) 可知, 各节点 p_i, q_i 在最优解处分别近似相等, 且近似等于平衡机的耗量微增率。如果忽略此影响, 可将式 (13)、(14) 写成:

$$p_s = \frac{\partial F}{\partial P_s} = \frac{p_i + \sum_{j \in h_0} \frac{\partial g_j}{\partial P_i} (l_j + u_j)}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \quad (15)$$

$$q_s = \frac{\partial F}{\partial Q_s} = \frac{p_i + \sum_{j \in h_0} \frac{\partial g_j}{\partial Q_i} (l_j + u_j)}{1 - \frac{\partial Q_L}{\partial Q_i}} \quad (16)$$

式 (15)、(16) 为考虑了安全约束的最优调度, 类似于经典经济调度方程。在满足不等式约束 (即忽略安全性) 的情况下, 退化经典经济调度的协调方程式。可见考虑有功和无功生产费用一体化的最优潮流与经典经济调度具有异曲同工之效。

4 算例分析

4.1 电价分析

SVC 具有连续自动控制电压的特性, 响应速度小于 0.02 s, 其运行成本适中, 运行维护简单, 功率损耗较小。并且能做到分相补偿以适应不平衡的负荷变化, 对于冲击负荷也有较强的适应性。因此以 IEEE-14 节点系统为例, 对本文所提模型计算出的涵盖 SVC 成本的无功电价进行分析。

图 1 表明: 不仅安装 SVC 的 3、8 节点的无功电价有较大提高, 其它节点处无功电价也有不同程度的提高。这种较高的无功电价促使消费者节约无功资源, 鼓励无功生产者增加投资, 缓解电力市场中无功缺额的紧张度。图 2 曲线显示, 安装 SVC 后, 有功无功生产总成本仅有小幅提高, 说明无功市场中的投资方只需额外付出较少成本, 就可获得足够无

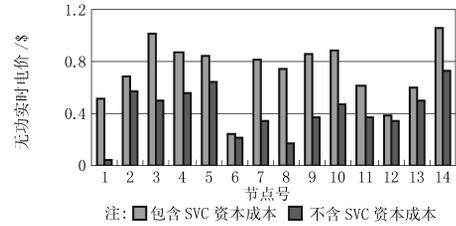


图 1 IEEE-14 系统各节点无功电价 $mCMgQ$ (\$/Mvarh) 与 SVC 的关系

Fig 1 Relationship of the $mCMgQ$ with SVC for IEEE-14 system

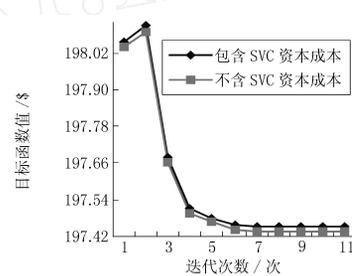


图 2 IEEE-14 系统目标函数

Fig 2 Objective functions of IEEE-14 system

功补偿, 保证合适的电压利润, 满足电压稳定需求。IEEE-14 节点系统的各节点电压幅值、无功边际价格和有功边际价格的测试曲线如图 3~图 5 所示。三种负荷情况为: 基本负荷因数 (base) 1.0; 最小负荷因数 (minimum) 0.75; 最大负荷因数 (maximum) 1.25。

表 1 基本负荷情况下 IEEE-14 系统有功无功价格

Tab 1 Active and reactive power prices of IEEE-14 system corresponding to base case operation condition

Gen	P_g / MW	Q_g / Mvar	V_g / V	$CMgP$ (\$ / MWh)	$CMgQ$ (\$ / Mvarh)
1	2 000 0	0 126 1	1 100 0	34 855 6	0 507 3
2	0 496 2	0 269 9	1 075 4	36 750 9	0 690 6
6	0 200 0	0 151 1	1 100 0	37 739 3	0 243 1

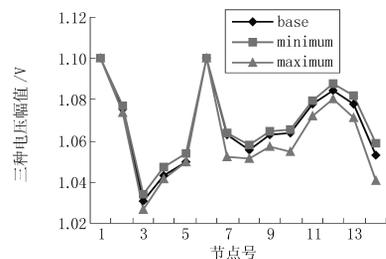


图 3 IEEE-14 系统各节点电压幅值与三种负荷情况的关系

Fig 3 Bus voltage magnitude profiles of IEEE-14 system for three load conditions

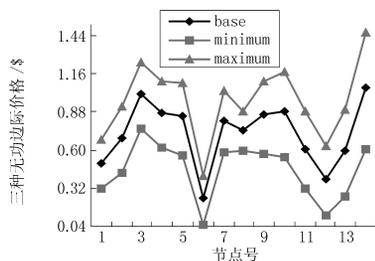


图 4 IEEE-14系统各节点无功电价
 $mCMgQ$ (\$/Mvarh)与三种负荷情况的关系

Fig 4 Reactive power marginal prices of IEEE-14 system for three load conditions

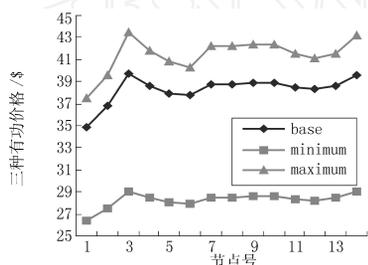


图 5 IEEE-14系统各节点有功电价
 $mCMgQ$ (\$/Mvarh)与三种负荷情况的关系

Fig 5 Active power marginal prices of IEEE-14 system for three load conditions

表 1 列出运行于基本负荷时, IEEE-14 系统各发电机节点有功无功功率值、电压幅值以及有功无功实时电价,用来协助三种情况进行比较和分析。图 3 看出在三种负荷情况下,各节点电压均满足本文所提模型电压约束,电压幅值上下波动较小,说明无功系统在较大负荷变化区域仍可保持良好的稳定性。图 4 为三种负荷情况下各节点无功实时电价曲线。其中 3 号节点在三种负荷下无功实时电价最高。可考虑若无功容量市场需求波动,需安装新无功源(如 SVC)时,可将无功实时电价作为安装的指示信号,由此节点电压曲线和电能质量都将得到增强。同时看出负荷越大,无功电价也越大,投资利润较大。投资商就可参照价格信号选择投资地址和设备容量。图 5 显示对于取决于电气距离的节点有功实时电价,如果某负荷节点远离发电机,则该节点有功电价将上升。联合图 4 和图 5 看出各节点有功电价差别较小,无功电价波动较大,因此可忽略无功功率的生产费用,对有功定价子问题进行独立地研究。观察两图各节点无功、有功价格曲线的起伏涨落,各节点基本符合同起同落,说明无功实时电价是与为实现电力市场中最大经济效率和平滑操作而制定的有功实时电价同步发展的。

4.2 算法收敛性分析

采用 IEEE-4, -14, -30, -57, -118 母线系统,验证原始-对偶内点法(PD IPM)对求解本文最优模型所展示的优良性能。编程语言用 Matlab 7.0,在 2.0GHz CPU 的计算机上进行仿真试验。

表 2 数据说明应用 PD IPM 方法计算本文所提最优模型,程序各参变量稳步迭代并最终达到满意取值。

表 2 应用 PD IPM 测试 IEEE-14 系统的各参数迭代值

Tab 2 Every varieties of IEEE-14 system during iterations by applying PD IPM

迭代次数	扰动因子 Perturbed	对偶间隙 Compl -Gap	最大不平衡量 Max{dP, dQ}	原始变量修正步长 Step-P	对偶变量修正步长 Step-D
0	1.000e-001	080	1.250e+000	0.000 0	0.000 0
1	8.980e-002	7.184e+001	8.646e-002	0.999 5	0.001 0
2	2.200e-002	1.760e+001	1.893e-003	0.999 5	0.834 1
3	6.125e-003	4.900e+000	4.607e-003	0.999 5	0.799 9
4	6.857e-004	5.486e-001	3.525e-003	0.808 9	0.999 5
5	1.300e-004	1.040e-001	4.637e-003	0.999 5	0.914 9
6	2.543e-005	2.034e-002	3.605e-003	0.776 7	0.984 6
7	4.088e-006	3.271e-003	2.959e-004	0.999 5	0.999 5
8	7.043e-007	5.634e-004	1.657e-004	0.526 6	0.999 5
9	7.820e-008	6.256e-005	1.776e-006	0.999 5	0.999 5
10	7.869e-009	6.295e-006	5.149e-007	0.999 5	0.999 5
11	7.926e-010	6.340e-007	1.697e-007	0.999 5	0.999 5

从表 3 数据发现:算法收敛到最优点所需的最大迭代次数为 22 次,最小次数为 9 次。随着系统规模的增大,收敛所需的迭代次数也相应增加,但增加的幅度并不大,说明该算法具有良好的鲁棒性。图 2 目标函数值曲线迅速收敛并最终趋于一个稳定值,说明目标函数在迭代过程中得到了良好的优化,验证了用原始-对偶内点法(PD IPM)求解基于最优潮流的无功定价问题是行之有效的。

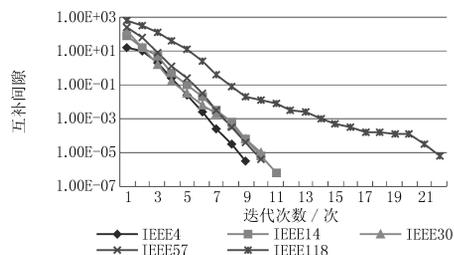


图 6 IEEE-4, -14, -30, -57, -118 系统
互补间隙与迭代次数的关系

Fig 6 Relationship of the iteration with complementarity's gap for IEEE-4, -14, -30, -57, -118 systems

表 3 无功定价模型的迭代次数与 CPU 时间

测试系统	IEEE-4	IEEE-14	IEEE-30	IEEE-57	IEEE-118
迭代次数/次	9	11	10	10	22
CPU-time/s	0.07	0.26	0.6	1.452	17.925

互补间隙是现代内点算法的一个重要性能指标,通常以互补间隙是否达到给定的精度要求作为算法收敛的标志。因此,图 6 给出了 5 个系统迭代过程中互补间隙变化的情况,可见随着系统规模的不断增大,对偶间隙下降的速度是令人满意的。

5 结论

本文提出了新的基于 OPF 的无功实时电价模型和算法。采用 IEEE4-118 节点测试系统进行仿真实验,结果表明:

1) 结合 SVC 特性得到的无功实时电价,为电力系统的用户和分配者提供了关于无功使用和无功源的花费与价值的更为经济的实时信息。

2) 采用原始-对偶内点法 (PDIPM) 求解无功定价,具有良好的鲁棒性以及合理的计算时间。

3) 对实时电价进行分解,使 Lagrange 乘子 μ 、 λ 的经济意义一目了然,全面体现出其中丰富的经济内涵,揭示出实时电价、经济调度以及最优潮流在理论上具有同根同源性。

参考文献:

- [1] Trehan N K. Ancillary Service-reactive and Voltage Control [A]. Proc IEEE PES 2001. 1341-1346
- [2] 曾鸣,赵庆波. 电力市场中的辅助服务理论及其应用 [M]. 北京:中国电力出版社,2003.
ZENG Ming, ZHAO Qing-bo. Theories and Applications of Ancillary Service in Power Market [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [3] 曾鸣,孙昕,张启平. 电力市场交易与电价理论及其应用 [M]. 北京:中国电力出版社,2003.
ZENG Ming, SUN Xin, ZHANG Qiping, Power Market

Trade and Power Pricing with Its Applications [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

- [4] Baughman M L, Siddiqi S N. Real Time Pricing of Reactive Power: Theory and Case Study Results [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (2): 23-29.
- [5] Dandachi N, Rawlins M, Alsac O, et al. OPF for Reactive Pricing Studies on the NGC System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (1): 226-232.
- [6] Federal Energy Regulatory Commission: Notice of Proposed Rulemaking. Docket RM95-8-000. Congressional Record [Z]. 1995.
- [7] Rider M J, Paucar V L. Application of a Nonlinear Reactive Power Pricing Model for Competitive Electric Markets [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 2004, 151 (3): 407-414.
- [8] WEI Hua, Sasaki H, Kubokawa J. An Interior Point Non-linear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (3): 870-877.
- [9] 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.
- [10] Baughman M L, Siddiqi S N, Zamikau J W. Advanced Pricing in Electrical Systems, Part II: Implications [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1): 496-502.
- [11] Xie K, Song Y H, Stonham J, Yu E K, et al. Decomposition Model and Interior Point Methods for Optimal Spot Pricing of Electricity in Deregulation Environments [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (1): 39-50.

收稿日期: 2005-09-22; 修回日期: 2005-11-29

作者简介:

刘悦 (1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化应用; E-mail: liuyuefeiyang@163.com

韦化 (1954-), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为现代内点最优化理论及其在电力系统的应用, 涉及最优潮流、水火电力系统最优潮流、电压稳定、状态估计、网格与分布计算。

Reactive power spot pricing and its applications based on OPF

LIU Yue¹, WEI Hua²

(1. Metallurgy Science Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China;

2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: This paper proposes a new model for calculating reactive power prices. To enrich its economic information, the static compensator (SVC) is added to. Furthermore, to reveal the relationship between the cost of reactive power production and the classical economic dispatch, the new Lagrange function for the reactive power price model, adopting complementary gap, is built, a spot pricing decomposed detailedly and the Lagrange multipliers analyzed totally. On the test system IEEE-4, numerical simulations for the different load conditions demonstrate that SVC has a positive effect on the reactive power price of the system, which displays the validity of

(下转第 74 页 continued on page 74)

1.6倍额定励磁电流: $1.6 \times 1200 \text{ A} = 1920 \text{ A}$
 折算到交流侧 $I = 1920 \times 0.816 = 1566 \text{ A}$
 折算到 13.8 kV 侧电流

$$I = 1566 \times \frac{0.49}{13.8} = 55.6 \text{ A}$$

$$I_{\text{op}} = \frac{55.6}{200/5} = 1.39 \text{ A} \quad 1.4 \text{ A}$$

定值取 1.4 A, 时间大于 1.6倍励磁额定电流反时限值取 25 s, 跳发电机开关、停机、灭磁。

C 低定值 3: 在 1.2倍额定励磁电流下动作

1.2倍额定励磁电流: $1.2 \times 1200 \text{ A} = 1440 \text{ A}$
 折算到交流侧 $I = 1440 \times 0.816 = 1175 \text{ A}$
 折算到 13.8 kV 侧电流

$$I = 1175 \times \frac{0.49}{13.8} = 41.7 \text{ A}$$

$$I_{\text{op}} = \frac{41.7}{200/5} = 1.04 \text{ A} \quad 1 \text{ A}$$

定值取 1 A; 时间大于 1.2倍励磁额定电流反时限值取 35 s, 动作于信号; 多点阶梯过流保护通过时间和励磁装置整定的转子电流反时限曲线配合, 达到防止可控硅失控引起的误强励。

5 结束语

发电机励磁强励对电力系统稳定性起着重要作

用, 各种励磁系统都存在可能引起误强励的因素, 本文仅从电子磁盘损坏、双 PT断线、IGBT脉冲触发板损坏、自并激可控硅失控四个方面探讨误强励的原因, 实际励磁系统还存在多种可能引起误强励的因素, 有必要对这些问题进行深入的研究和探讨。

参考文献:

- [1] 楼永仁, 黄声先, 等. 水电站自动化 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
LOU Yong-ren, HUANG Sheng-xian, et al Automation of Hydropower Station [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [2] SAVR2000 发电机励磁调节器技术说明书 (V2.0) [Z]. 国电自动化研究院南瑞电气控制公司, 2003.
Engineering Instructions of SAVR2000 Excitation Regulator (V2.0) [Z]. Nanjing Electric Automation Co., Ltd, 2003.

收稿日期: 2006-02-22; 修回日期: 2006-03-18

作者简介:

龙俊平 (1976 -), 男, 学士, 工程师, 从事发电厂自动化、继电保护工作。E-mail: lp0736@126.com

Discussion on the causes of the faulty forced excitation of the generator

LONG Jun-ping

(Xin anjiang Hydroelectric Power Plant, Jiande 311608, China)

Abstract: Exemplified by SAVR-2000 and the HWLT microcomputer-controlled excitation system adopted by Xin anjiang Hydroelectric Power Plant, this paper concerns the cause of the faulty forced excitation and proposes several ways to avoid faulty forced excitation including the confinement of the sudden variable of electric current to double PT broken line, electronic disk multiplication and so on and so forth. Designing the excitation circuit of the generator reasonably, selecting the adjusting resistance correctly and employing the high electricity of the excitation transformer are effective ways to eliminate the harm caused by faulty forced excitation as well as to ensure the sound operation of the generator.

Key words: excitation system; electronic disk; PT (voltage transformer)

(上接第 60 页 continued from page 60)

the model proposed. Extensive numerical simulations on the test systems that range in size from 4 to 118 buses show that the prime-dual interior point method (PDIPM) for solving the reactive power price has excellent robustness.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50467001) and Science Foundation of Guangxi Province (No. 024009).

Key words: reactive power price; PDIPM; SVC; spot pricing decomposition; optimal power flow (OPF)