

电力市场初期两部制无功定价方法

牛怀平,刘俊勇,吴集光,段登伟

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610005)

摘要:提出了一种电力市场初期的两部制无功定价方法,以有功电能成本和无功电量成本最优为目标函数,以潮流方程为等式约束,以运行及安全约束为不等式约束。建议的内点非线性规划法原理简单、计算量小。所提两部制无功电价模型的核心想法为:一方面,提出电力市场下无功源以运行成本参与竞争,以解决现有的一部制电价对无功的运行成本补偿不足的问题;另一方面,提出一种新的无功容量电价分解方案,以解决现有的一部制电价对无功投资成本回收不明确的问题。电量电价加容量电价形成了建议的两部制无功电价。IEEE-30 节点系统算例验证了建议的无功优化算法和无功价格模型的有效性和实用性。

关键词:电力市场;无功优化;内点非线性规划法;两部制无功电价

中图分类号: F 123.9; TM 73

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)02-0011-05

0 引言

无功的定价研究主要涉及 2 方面的内容:完善的无功优化方法和合理的无功价格机理。早期的无功优化或者强调无功对减少系统有功网损的贡献^[1]或者强调无功对改善系统电压特性的贡献^[2],其主要特征是忽略对无功供给的经济性分析。在电力市场下,学者们转而关心无功的经济性贡献,文献[3-4]提出了使无功成本最优的无功优化方法,文献[5-6]提出了使无功成本和系统有功网损最优的无功优化方法。本文提出一种有功、无功联合优化的多目标无功优化方法,以达成电网对有功、无功总的付费最优,同时以合理的约束条件保证系统的安全稳定性和优化的电压特性。随后,提出了一种改进的内点非线性规划法用于优化潮流的求解,其主要特点是带新型数据结构的改进内点法原理简单、收敛可靠和节省 CPU 时间。

早期的无功定价主要是基于边际成本理论无功实时电价理论^[7-8]较多,但由于无功的地域垄断性使无功的实时电价常常高于无功的实际成本。文献[9]提出了依据区域的无功定价方法,但其缺乏详细的无功成本信息。最近,文献[10]提出了统一补偿型的两部制无功定价机理,但其统一补偿的无功费用来源缺乏理论依据。本文提出的两部制无功价格机理是文献[3]的发展,其贡献有二:一方面,依据无功投资成本占主体的成本特性,制订了两部制无功价格政策,其中,容量电价用于补偿无功的投资成本,而电量电价参与竞争以补足无功的运行成本(因原一部制电价缺少对运行成本的补偿);另一方面,考虑电力市场初期电价政策与原一部制电价政策的

接口,合理制订了无功容量电价从原一部制电价解耦的办法,并且有功、无功交易并行进行,在依据所建议的优化算法确定有功、无功交易的同时分离出无功的容量电价。另外,需强调的是,由于无功的辅助服务地位和其地域垄断的特性,特有针对性地制订了无功的电量电价为其平均运行成本报价和容量电价为从有功平均报价分离出来的电价政策,以抑制无功的价格尖峰,达到打击市场投机行为的作用。因而,所提两部制无功电价政策具有双重功效:一方面,合理补偿无功成本;另一方面,制约市场投机行为。

以下将以 POOL 市场模式为基础以发电机和电容器为研究对象建立无功的两部制定价理论。

1 数学模型

1.1 无功优化建模

在电力系统中,无功的主要作用体现在安全和经济 2 方面上。一方面,从经济角度看,无功对有功电能的传输具有支撑作用,因而减少有功损耗或降低有功购买成本是无功的主要任务之一,最终的目的是达成有功费用的节余;同时,在电力市场下,无功本身的购买成本不再是可以忽略的因素,因而降低无功自身的购买成本是电网的另一经济需求。另一方面,保障系统的安全稳定是无功的另一必需义务,这可用优化潮流的安全约束来保证。综上所述,可用一带安全约束的优化潮流来达成无功的优化水平,其目标为有功、无功购买成本最优,其约束为等式和不等式约束。

假设发电机提供有功电能的成本具有二次函数的形式,可表述为

$$C_{PGi}(P_{Gi}) = a_{Pi}P_{Gi}^2 + b_{Pi}P_{Gi} + c_{Pi} \quad (1)$$

文献[11]详细地分析了发电机的无功成本组成,认为发电机提供无功的运行成本主要由损耗成

本和机会成本组成,并采用分段报价的方式给出了发电机的报价结构;同时,认为无功带来的损耗成本与无功出力具有线性的关系,而机会成本与无功出力有近似二次函数的关系。综合分析,在考虑合理的利润后,可近似认为发电机无功的运行成本报价在整个无功报价段都有二次函数的形式,可表达为

$$C_{QGi}(Q_{Gi}) = a_{Qi}Q_{Gi}^2 + b_{Qi}Q_{Gi} + c_{Qi} \quad (2)$$

由于电容器不会产生机会成本,故其运行成本可以线性函数形式表示为

$$C_{Ci}(Q_{Ci}) = m_{Ci}Q_{Ci} \quad (3)$$

因而,建议的优化潮流可如下表达。

a. 目标函数。

$$\text{Min} \left[\sum_{i=1}^{N_G} C_{PGi}(P_{Gi}) + \sum_{i=1}^{N_G} C_{QGi}(Q_{Gi}) + \sum_{i=1}^{N_C} C_{Ci}(Q_{Ci}) \right] \quad (4)$$

以上优化目标的约束为等式和不等式约束。

b. 等式约束—潮流方程。

$$P_{Gi} = P_{Li} + \sum_{j=1}^N [e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \quad (5)$$

$$Q_{Ri} = Q_{Li} + \sum_{j=1}^N [f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \quad (6)$$

c. 不等式约束—运行及安全约束。不等式约束主要包括发电机有功、无功出力约束、输电约束及节点电压约束。

考虑发电机有功出力约束

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \quad (7)$$

考虑发电机无功出力约束

$$Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \quad (8)$$

考虑电容器无功出力约束

$$Q_{Ci,\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,\max} \quad (9)$$

考虑输电约束

$$|P_{ij}| \leq P_{ij,\max} \quad (10)$$

考虑节点电压幅值约束

$$U_{i,\min}^2 \leq e_i^2 + f_i^2 \leq U_{i,\max}^2 \quad (11)$$

以上式(1)~(11)中各参数的含义如下: a_{Pi}, b_{Pi}, c_{Pi} 为发电机有功报价函数系数; a_{Qi}, b_{Qi}, c_{Qi} 及 m_{Ci} 分别为发电机和电容器无功电量报价函数系数; P_{Gi}, Q_{Gi} 为发电机有功、无功出力; Q_{Ci} 为电容器无功出力; N_G, N_C 为系统中的发电机数和电容器数; N 为系统的节点数; P_{Li} 为节点 i 的有功负荷; Q_{Ri} 为节点 i 的无功出力; Q_{Li} 为节点 i 的无功负荷; e_i, f_i 为节点 i 的电压实部和虚部; G_{ij}, B_{ij} 为线路 i, j 在导纳矩阵中的相应元素; $P_{Gi,\max}, P_{Gi,\min}$ 为发电机 i 有功出力的上、下限; $Q_{Gi,\max}, Q_{Gi,\min}$ 为发电机 i 无功出力的上、下限; $Q_{Ci,\max}, Q_{Ci,\min}$ 为电容器 i 无功出力的上、下限; $P_{ij}, P_{ij,\max}$ 为线路 i, j 间的传输功率及其上限; $U_{i,\max}, U_{i,\min}$ 为节点 i 电压幅值的上、下限;

下面提出一种具有新型数据结构的内点非线性规划法用于多目标 OPF 的求解。

1.2 改进内点法建模

提出的改进内点法主要用于优化潮流的解算。

考虑如下一般非线性优化问题:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{h}(x) = 0 \\ & \underline{\mathbf{g}} \leq \mathbf{g}(x) \leq \bar{\mathbf{g}} \end{aligned} \quad (12)$$

引入松弛变量 $(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \in R^m$,把式(12)转化为

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{h}(x) = 0 \\ & \mathbf{g}(x) - \mathbf{v} - \underline{\mathbf{g}} = 0 \\ & \mathbf{g}(x) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{g}} = 0 \\ & (\mathbf{u}, \mathbf{v}) \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

这里, $\mathbf{h}(x) \equiv [h_1(x), h_2(x), \dots, h_n(x)]^T$ 为等式约束,而 $\mathbf{g}(x) \equiv [g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)]^T$ 为不等式约束, $\mathbf{x} \in R^k$ 。

由式(13)建立拉格朗日函数如下:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}; \mathbf{w}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}) = & f(x) - \mathbf{w}^T \mathbf{h}(x) - \\ & \mathbf{y}^T [\mathbf{g}(x) - \mathbf{v} - \underline{\mathbf{g}}] - \bar{\mathbf{z}}^T - \\ & [\mathbf{g}(x) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{g}}] - \bar{\mathbf{y}}^T \mathbf{v} - \bar{\mathbf{z}}^T \mathbf{u} \end{aligned}$$

由上式可注意到恒有 $\mathbf{y} = \bar{\mathbf{y}}, \mathbf{z} = -\bar{\mathbf{z}}$ 成立。根据 KKT 条件,以下方程组成立:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_x & \equiv \nabla f(x) - \nabla \mathbf{h}(x) \mathbf{y} - \nabla \mathbf{g}(x) (\mathbf{y} + \mathbf{z}) \\ \mathbf{L}_w & \equiv \mathbf{h}(x) = 0 \\ \mathbf{L}_y & \equiv \mathbf{g}(x) - \mathbf{v} - \underline{\mathbf{g}} = 0 \\ \mathbf{L}_z & \equiv \mathbf{g}(x) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{g}} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_v & \equiv \mathbf{V} \mathbf{Y} \mathbf{e} = 0 \\ \mathbf{L}_u & \equiv \mathbf{U} \mathbf{Z} \mathbf{e} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

注意: $(\mathbf{v}, \mathbf{u}; \mathbf{y}) \geq 0, \mathbf{z} \leq 0, \mathbf{w} \neq 0$ 。 $\mathbf{w} \in R^n$ 及 $(\mathbf{y}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}) \in R^m$ 为拉格朗日乘子, $\mathbf{e}$ 为单位向量, $(\mathbf{V}, \mathbf{U}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) \in R^{m \times m}$ 为对应 $(\mathbf{v}, \mathbf{u}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ 的对角矩阵。由于补偿条件式(15)特殊的非线性,为了确保方程的收敛性能,引入壁垒参数 $\alpha > 0$ 得:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_v^\alpha & \equiv \mathbf{V} \mathbf{Y} \mathbf{e} - \alpha \mathbf{e} = 0 \\ \mathbf{L}_u^\alpha & \equiv \mathbf{U} \mathbf{Z} \mathbf{e} - \alpha \mathbf{e} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

应用牛顿法求解式(14)和(16),可得到以下修正方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{x0} & = [\nabla^2 \mathbf{h}(x) \mathbf{w} + \nabla^2 \mathbf{g}(x) (\mathbf{y} + \mathbf{z}) - \\ & \nabla^2 f(x)] \Delta \mathbf{x} + \nabla \mathbf{h}(x) \Delta \mathbf{w} + \\ & \nabla \mathbf{g}(x) (\Delta \mathbf{y} + \Delta \mathbf{z}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$-\mathbf{L}_{w0} = \nabla \mathbf{h}(x)^T \Delta \mathbf{x} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} -\mathbf{L}_{y0} & = \nabla \mathbf{g}(x)^T \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{v} \\ -\mathbf{L}_{z0} & = \nabla \mathbf{g}(x)^T \Delta \mathbf{x} + \Delta \mathbf{u} \\ -\mathbf{L}_{v0}^\alpha & = \mathbf{Y} \Delta \mathbf{v} + \mathbf{V} \Delta \mathbf{y} \\ -\mathbf{L}_{u0}^\alpha & = \mathbf{Y} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{U} \Delta \mathbf{z} \end{aligned} \quad (19)$$

式(17)~(19)的左部代表 KKT 方程的残差, $\nabla^2 \mathbf{h}(x)$ 和 $\nabla^2 \mathbf{g}(x)$ 为等式和不等式约束的海森矩阵。由式(19)可得到:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{v} & = \nabla \mathbf{g}(x)^T \Delta \mathbf{x} + \mathbf{L}_{y0} \\ \Delta \mathbf{u} & = (-\nabla \mathbf{g}(x)^T \Delta \mathbf{x} + \mathbf{L}_{z0}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \Delta y = -V^{-1}Y\nabla g(x)^T\Delta x - V^{-1}(YL_{y0} + L_{v0}^\alpha) \\ \Delta z = -U^{-1}Z\nabla g(x)^T\Delta x + U^{-1}(ZL_{z0} + L_{u0}^\alpha) \end{cases} \quad (21)$$

为了减少修正方程的数量,按文献[12]的方法把式(21)代入式(17)可得消去不等式约束后的具有新型数据结构的修正方程为

$$\begin{bmatrix} H(\cdot) & \nabla h(x) \\ \nabla h(x)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta w \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \varphi(\cdot, \alpha) \\ h(x) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{cases} H(\cdot) = [\nabla^2 h(x)w + \nabla^2 g(x)(y+z) - \nabla^2 f(x)] + \\ \nabla g(x)S\nabla g(x)^T, \quad S = U^{-1}Z - V^{-1}Y \\ \varphi(\cdot, \alpha) = -L_{u0} + \nabla g(x)[(U^{-1}(ZL_{z0} - L_{u0}^\alpha) - \\ V^{-1}(YL_{y0} + L_{v0}^\alpha))] = \nabla g(x)w - \nabla f(x) + \\ \nabla g(x)[U^{-1}(ZL_{z0} - V^{-1}YL_{y0} - \alpha(U^{-1} - V^{-1})e)] \end{cases} \quad (23)$$

建议的内点算法计算步骤如下:

- 选定一个合适的初始内点;
- 计算补偿间隙及壁垒参数;
- 解方程式(20)~(22)求得变量修正值;
- 确定原-对偶变量步长;
- 修正原对偶变量;
- 检查收敛性,如收敛则停止,否则转步骤 b。

建议的带新型数据结构的内点非线性规划法具有原理简单、节省 CPU 时间和收敛可靠的特点。需注意的是,建议的内点法一般采用直角坐标进行 OPF 求解,可确保算法的可靠、快速收敛。

2 两部制无功价格模型

无功支持的成本包括固定成本和可变成本 2 部分,可变成本部分通常为无功的运行成本,而固定成本部分通常为无功的投资成本。通常,无功具有投资成本占有其成本主体的特点,为了充分考虑无功的投资成本回收,显然两部制无功价格模式是最理想的解决方案。可表述为

$$\rho_q = \rho_e + \rho_v \quad (24)$$

式中 ρ_q 为两部制无功电价(元/Mvar·h); ρ_e 为无功电量电价(元/Mvar·h),主要针对无功运行成本的报偿; ρ_v 为无功容量电价(元/Mvar·h),主要针对无功投资成本的报偿。

在电力市场初期,理清产权关系、合理划分成本属性是个难题。然而,仔细观察可发现,现有的一部制电价已包含无功的投资成本回收在内(传统的观点把发电机的投资成本回收完全归于有功)。因而,电力市场下,无功的容量电价应从有功电价中合理分离出来。同时,传统观点通常认为发电机无功的生产不会产生多少附加成本,在现有的一部制电价中忽略了无功的运行成本,这部分成本在电力市场下是应该补足的。补足的无功电量电价部分可描述为

$$\rho_e = C_i(Q_i)/Q_i \quad (25)$$

上式中,分别代入无功优化确定的 Q_i 和无功源的电量成本函数即可得出发电机及电容器的电量电价。显然,电量电价为无功源平均报价。

进一步考虑发电机视在功率、有功功率和无功功率之间的三角关系,当有功容量投资成本给定时,无功的投资成本^[13]可分解为

$$C_Q = C_S \sin \varphi = C_P / \lambda \times \sin \varphi (\arccos \varphi) \quad (26)$$

式中 $\lambda = \cos \varphi$ 为发电机的额定功率因数; C_P 和 C_S 分别为投资市场上平均单位有功投资成本(元/MW·h)和平均单位视在功率投资成本(元/MV·A·h); C_Q 为平均单位无功容量投资成本(元/Mvar·h)。

考虑发电机无功的容量成本与现有一部制电价的关系,则发电机无功的容量电价可确定如下:

$$\rho_q = \alpha(C_Q/C_P)\rho_p \quad (27)$$

$$\rho_p = (\sum_{i=1}^{N_G} \rho_{pi})/N_G \quad (28)$$

式中 ρ_p 为市场上平均有功电价(元/MW·h); ρ_{pi} 为发电机 i 的有功电价; α 为发电机投资成本在现有的一部制电价中所占的比例。

对电容器,可以元/Mvar·h 的形式分解其投资成本部分。建议的两部制无功定价流程如图 1 所示。

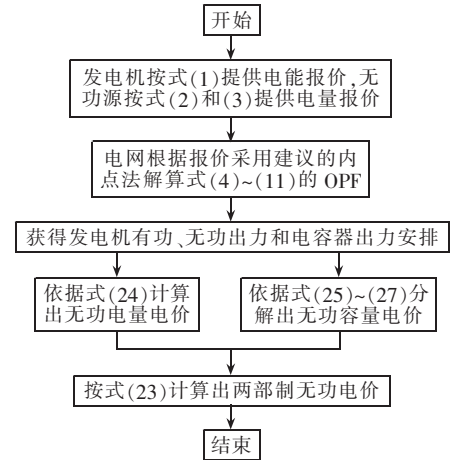


图 1 建议的两部制无功定价流程

Fig.1 Pricing flow of two-part tariff of reactive power

3 算例

本文以 IEEE-30 节点系统为例进行研究。IEEE-30 节点系统包括 6 台发电机组(分布于节点 1,2,5,8,11,13)和 2 个并联电容器站(分布于节点 10,24),算例中发电机和电容器分别顺序编号。

系统作如下假设。

a. 发电机及电容器的报价信息。发电机的有功电能报价组件(a_p, b_p, c_p)为(8,30,4);发电机的无功电量报价组件(a_Q, b_Q, c_Q)为(2,5,1)。电容器的电量报价组件 m_C 为 10,其容量成本信息为 10,单位都为元/Mvar·h。

b. 假设所有发电机的额定功率因数都为 0.95,式(27)中的 α 取为 0.1。

在 Matlab 下以 IEEE-30 节点系统为例进行所提内点非线性规划法的有效性验证。经不同目标的

优化潮流验算,发现以直角坐标表示的优化潮流一般经 8~21 次迭代即可收敛于优化潮流的最优解点,并且其计算时间对问题的规模不敏感,不会随问题规模的增大而显著增大。另外,经实验验证,所提带新型数据结构的内点非线性规划法比牛顿法节省解算时间约 15%。这充分证明了所提内点非线性

规划法的有效性和实用性。

3.1 无功优化算法的有效性分析

为了分析所提无功优化算法的有效性,分别以有功网损(见文献[1])、无功成本(式(4)的后 2 项)及有功、无功成本和(式(4))最优为目标进行无功优化以进行对比研究。其解算结果见表 1。

表 1 不同目标下的无功优化结果

Tab.1 Reactive power optimization results under different objectives

设备 序号	网损最优目标			无功成本最优目标			有功、无功成本最优目标		
	C_P /元	Q /Mvar	C_Q /元	C_P /元	Q /Mvar	C_Q /元	C_P /元	Q /Mvar	C_Q /元
G ₁	8 104.00	*46.51	4 559.80	30 251.29	9.69	237.19	32 206.55	10.52	275.13
G ₂	8 104.00	65.97	9 036.00	15 586.68	8.56	190.26	36 044.24	9.34	222.29
G ₃	201 819.58	51.93	5 654.40	189 887.24	7.96	167.60	82 096.95	8.79	199.48
G ₄	18 888.51	*20.45	939.70	30 101.77	6.89	130.52	39 177.33	7.59	154.26
G ₅	83 004.00	27.86	1 692.20	8 104.00	3.12	35.98	19 257.72	3.41	41.27
G ₆	12 182.53	*2.44	25.10	28 245.16	4.50	64.11	30 554.61	5.02	76.53
C ₁		32.88	328.80		53.16	531.65		53.66	536.63
C ₂		20.00	200.00		20.00	200.00		20.00	200.00
合计	332 102.62		22 436.00	302 176.15		1 557.32	239 337.41		1 705.59

注: C_P 为有功成本, C_Q 为无功成本, Q 为无功出力;*号代表发电机进相吸收无功;3 种目标下的有功网损分别为 3.96 MW, 4.26 MW, 4.67 MW;3 种目标下的有功、无功总成本分别为 354 538.62 元、303 733.46 元、241 043.00 元。

从解算结果可看出以下几点。

a. 以网损最优为目标的无功优化可达成系统有功网损的节余。从表 1 可见,网损目标比无功成本目标节余网损 0.3 MW,比有功、无功总成本目标节余网损 0.71 MW。

b. 以无功成本最优为目标的无功优化可达成无功成本的节余。该目标比有功网损目标节余无功成本约 93%,而比有功、无功总成本目标节余无功成本约 9%。

c. 以有功、无功总成本最优为目标的无功优化可达成有功、无功总成本费用的节余。该目标比有功网损目标节余有功、无功总费用约 32%,而比无功成本目标节余有功、无功总费用约 21%。

综合分析,可得出以下 3 点结论。

a. 单一的以网损最优为目标的无功优化虽然可达成网损的优化,但其总体的经济性能较差,往往是以有功发电的不合理分布和无功的大量消耗为代价的。另外,从表 1 可看出,同样的负荷水平,为了达成网损的节余,多达 3 台的发电机组被迫进相运行,从而带来了更大的附加成本。故电力市场下,以网损为目标的无功优化不是电网的最佳选择。

b. 同理,单一的无功成本目标虽然可达成无功费用节余的目的,但其有功、无功总费用仍然很高,即系统的总体经济性能仍得不到保证。在电力市场下,该目标仍不是电网无功优化的最佳选择。

c. 仔细观察有功、无功总成本目标,虽然其有功损耗和无功成本都不是最优,但由于其有功费用的大幅度节余,致使系统的总体经济性能得到保证,产生了最佳的社会效益。故电力市场下,以有功、无功成本的节余为目标的无功优化是电网的最佳选择。

另外,需强调的是:电力市场中,由于有功、无功的优化分配考虑了有功、无功源的地理位置和成本函数特性,故与传统的调度方式有显著的不同,最明显的就在于传统的调度认为达成了有功网损的节余就达成了系统的经济节余,但电力市场下,这一论断被新的市场构架和经济目标所推翻。算例结果表明,虽然有功、无功总成本最优的无功优化方案产生的有功网损最大,但却取得了有功、无功总成本最优的优化效果。

综上所述,文中所提无功优化算法是有效而实用的。

3.2 两部制无功电价研究

以 3.1 节有功、无功总成本为目标的无功优化结果为两部制无功定价基础,则两部制无功电价仿真结果见表 2。表中,无功容量电价根据式(27)计算出来,由于假设所有的发电机额定功率因数相同,故所有的发电机容量电价相同。而电量电价与无功的成本函数相关,且随无功出力不同而有不同的电量电价。

表 2 两部制无功电价计算结果
Tab.2 Calculative results of two-part tariff of reactive power
元/Mvar·h

无功源	电量电价	容量电价	两部制电价
G ₁	26.14	18.60	44.74
G ₂	23.79	18.60	42.39
G ₃	22.69	18.60	41.29
G ₄	20.32	18.60	38.92
G ₅	12.11	18.60	30.71
G ₆	15.24	18.60	33.84
C ₁	10.00	10.00	20.00
C ₂	10.00	10.00	20.00

根据表 2 可得出如下结论。

a. 根据无功成本分析,两部制无功电价注重无功的容量回报。发电机容量电价为从有功平均报价中分离出来、针对无功投资成本的报偿,电容器的容量电价为对其投资成本的分解。

b. 电力市场下,无功的电量电价弥补了原一部制电价忽略无功运行成本补偿对策的缺陷。提出的无功成本参与市场竞争的方式,提高了市场效率。

c. 两部制无功电价既具有符合无功成本特性的特点,又具有抑制价格尖峰的优势。一方面,由于无功投资成本占有无功成本的多数,因而两部制无功电价注重容量回报的模式尤其适合于对无功定价。另一方面,由于无功的辅助服务地位,特制订了无功的电量电价为平均运行成本报价的策略,因而其具有抑制价格尖峰、打击市场投机行为的作用。

正因所提两部制无功价格模型具有强调与一部制电价的接口、注重无功成本的充分回报和抑制价格尖峰等特性,故其特别适用于电力市场初期。

4 结论

本文提出了一种电力市场初期的两部制无功定价模型,得出了以下 4 点结论。

a. 所提无功优化模型达成了有功、无功总成本的节余,达到了社会效益最优的目标。

b. 带新型数据结构的内点非线性规划法具有原理简单、收敛可靠和节省 CPU 时间的特点。

c. 所提出的容量电价分解方案解决了当前体制下对无功付费的难题。从一部制电价中分离出来的容量电价部分合理地解决了现有条件下无功补偿资金的来源问题。因而其具有激励无功投资的作用。

d. 两部制无功电价模式准确地描述了无功的成本特性。相对于有功生产,无功的投资成本占有其成本的大部分,因而需对容量单独补偿;一部制电价失于对运行成本的补偿,而电量电价的提出合理解决了这一缺陷。

正因上述优势,所提两部制无功价格模型尤其适用于电力市场初期。

参考文献:

[1] MAMANDUR K R C, CHENOWETH R D. Optimal control of reactive power flow for improvements in voltage profiles and for real power loss minimization[J]. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1981, 100(7): 3185 - 3194.

[2] ZOBAN A, ILIC M D. A steady state voltage monitoring and control algorithm using localized least square minimization of load voltage deviations[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1996, 11(2): 929 - 938.

[3] 牛怀平, 刘俊勇, 吴集光. 一种新的两部制无功定价方法[J]. **电网技术**, 2005, 29(7): 1 - 6.

NIU Huai-ping, LIU Jun-yong, WU Ji-guang. A new method

to draw up two-part tariff for reactive power[J]. **Power System Technology**, 2005, 29(7): 1 - 6.

[4] AHMED S, STRBAC G. A method for simulation and analysis of reactive power market[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2000, 15(3): 1047 - 1052.

[5] 舒立平, 陈允平. 一种新的无功电力定价算法[J]. **电网技术**, 2004, 28(5): 59 - 63, 68.

SHU Li-ping, CHEN Yun-ping. A novel pricing algorithm for reactive power[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(5): 59 - 63, 68.

[6] 方军, 张永平, 陈寿孙, 等. 计及无功功率成本及其资源价值的无功采购方法[J]. **电力系统自动化**, 2002, 26(20): 29 - 34.

FANG Jun, ZHANG Yong-ping, CHEN Shou-sun, et al. A method of dynamic reactive power procurement considering cost and resource value of reactive power[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2002, 26(20): 29 - 34.

[7] CHOI Joon - young, RIM Seong - hwang, PARK Jong - keun. Optimal real time pricing of real and reactive power[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1998, 13(4): 1226 - 1231.

[8] 戴彦, 倪以信, 文福拴, 等. 电力市场下的无功定价研究[J]. **电力系统自动化**, 2000, 24(5): 9 - 14, 53.

DAI Yan, NI Yi-xin, WEN Fu-shuan, et al. Analysis of reactive power pricing under deregulation[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2000, 24(5): 9 - 14, 53.

[9] HAO S, PAPALEXOPOULOS A. Reactive power pricing and management[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1997, 12(1): 95 - 104.

[10] 孔飘红, 刘俊勇, 潘蕾蕾, 等. 基于统一优化补偿的无功电力市场[J]. **电网技术**, 2004, 28(15): 16 - 20.

KONG Piao-hong, LIU Jun-yong, PAN Lei-lei, et al. Auxiliary reactive power market based on global optimal compensation[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(15): 16 - 20.

[11] ZHONG Jin, KARKAR B. Toward a competitive market for reactive power[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2002, 17(4): 1206 - 1215.

[12] WEI Hua, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1998, 13(3): 870 - 877.

[13] LAMONT J W, FU J. Cost analysis of reactive power support[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1999, 14(3): 890 - 898.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

牛怀平(1969-), 男, 四川邻水人, 博士研究生, 从事电力市场辅助服务定价研究(E-mail: nhuaiping@tom.com);

刘俊勇(1963-), 男, 四川成都人, 教授, 博士研究生导师, 长期从事电力市场等领域的研究;

吴集光(1967-), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 从事电力市场辅助服务定价研究;

段登伟(1974-), 男, 重庆人, 博士研究生, 从事电力市场配电侧定价研究。

(下转第 20 页 continued on page 20)

Two-part tariff method for reactive power in initial stages of power marker

NIU Huai-ping, LIU Jun-yong, WU Ji-guang, DUANG Deng-wei
(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A method to draw up the two-part tariff of reactive power for initial electricity market is proposed, which takes the power flow equation as the equality constraint, the operation and security constraints as the inequality constraints, the active power energy cost and reactive power operating cost as the objective function. The suggested interior-point nonlinear programming algorithm is simple and has little calculation. The concept of the proposed two-part tariff model is: the reactive power source in electricity market participates competition with its operating cost to avoid the deficient compensation of reactive power operating cost under existing one-part electricity pricing mode, while a price decomposition scheme of reactive power capacity is put forward to avoid the uncertainty of reactive power investment return under existing one-part electricity pricing mode. Thus reactive power energy price plus capacity price forms the proposed two-part tariff of reactive power model. The effective-ness and practicability of the proposed optimization algorithm and price model of reactive power are verified by the calculation results of IEEE-30 bus system.

This project is supported by the National Basic Research Program(973 Program)(2004CB217905).

Key words: electricity market; reactive power optimization; interior-point nonlinear programming algorithm; two-part tariff for reactive power