

考虑远期合同及环路潮流约束的电力市场均衡分析

王瑞庆¹, 李渝曾², 张少华²

(1. 安阳师范学院计算机与信息工程学院, 河南 安阳 455000; 2. 上海大学自动化系, 上海 200072)

摘要: 环路潮流是电力网络的重要特征, 分析其对电力市场均衡和发电商策略性远期合同交易行为的影响具有重大的现实意义。建立了一个考虑环路潮流约束的策略性远期合同市场和现货市场联合古诺均衡模型, 该模型所描述的均衡问题是一个具有均衡约束的均衡问题, 可用非线性互补方法求解。仿真算例验证了模型的合理性和模型求解方法的有效性。结果表明, 环路潮流对电力市场均衡和发电商的策略性远期合同交易均具有不可忽视的影响, 若在分析中忽略环路潮流约束, 可能给出错误的价格信号, 得出不合理的结论。

关键词: 电力市场; 环路潮流约束; 策略性远期合同交易; 古诺均衡; 输电约束; 非线性互补方法

On equilibrium in electricity markets considering forward contracts and loop flow constraints

WANG Rui-qing¹, LI Yu-zeng², ZHANG Shao-hua²

(1. School of Computer and Information Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455000, China;
2. Department of Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Loop flow constraints are the important peculiarities of electric power systems, and it is meaningful to analyze the impact of loop flow constraints on electricity market equilibrium and generators' strategic forward contracting. A joint Cournot equilibrium model for strategic forward contracting and spot market competition is proposed by taking loop flow constraints into account. This model can be reformulated as an equilibrium problem with equilibrium constraints and be solved by a nonlinear complementarity method. A numerical example is presented to verify the effectiveness of the proposed model and solution method. The results show that loop flow constraints are more relevant to electricity market equilibrium and generators' strategic forward contracting. If neglecting loop flow constraints, error price signals and unreasonable results may be derived.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50377023).

Key words: electricity market; loop flow constraints; strategic forward contracting; Cournot equilibrium; transmission constraints; nonlinear complementarity method

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)17-0008-05

0 引言

目前, 国内外运营或试运营的电力市场大多数均包含远期合同、日前(现货)竞价、实时平衡等多个交易市场, 包括发电商在内的各个市场参与者将面临多市场的联合博弈问题^[1]。通常, 远期合同市场和现货市场中的电力交易量相对较大, 因此研究发电商面对这两个市场的联合决策问题无疑具有现实意义。虽然风险回避的发电商利用远期合同可有效回避现货电价的波动风险, 但风险中立的发电商也有可能利用远期合同交易对现货市场的策略性影响来增加收益, 从而进入合同市场, 这种合同行

为称为策略性远期合同交易^[2]。本文主要考虑发电商的这种策略性远期合同交易行为。

各种寡头市场竞争的均衡模型被广泛用于研究和分析电力市场中的竞争行为, 其中古诺均衡模型和供应函数均衡模型由于更加符合电力市场的实际情形而备受关注^[3]。目前, 考虑电力远期合同交易的均衡分析, 大多是将合同交易量作为已知量而非决策变量^[4~7]。也有少数研究涉及策略性远期合同市场和现货市场的联合均衡分析^[2,8~11], 然而都忽略了电力网络环路约束这一电力系统的重要特征。而考虑网络环路约束的均衡分析则大多仅局限于电力现货市场^[12~14]。

本文在考虑电力网络环路约束的基础上, 采用古诺猜测描述发电商在策略性远期合同交易市场和

基金项目: 国家自然科学基金项目(50377023); 上海市教委科技发展基金项目(05AZ28)

现货市场的竞争行为,建立了两市场联合博弈模型。该模型描述的均衡问题是一个具有均衡约束的均衡问题,可采用非线性互补方法^[12]对其进行求解。最后通过一个4节点网络,分析了环路潮流约束对电力市场均衡和发电商远期合同交易策略的影响。

1 均衡模型的建立

1.1 基本假设

设有若干个策略性发电商参与某按 pool 模式组织的电力市场,该市场由一个具有若干个网络节点(N 表示所有网络节点的集合)的考虑基尔霍夫电压和电流定律的线性直流网络组成。设每个节点最多有一台发电机组,单个发电商的发电量不足以决定市场统一出清价,但对市场统一出清价具有相当的影响力。设发电商 g 控制的机组集合为 N_g^G , 节点 i 的机组的出力上、下限分别为 q_{gi}^{\max} 和 q_{gi}^{\min} , 且生产成本可用二次函数 $C_i(q_{gi})=0.5a_i q_{gi}^2 + b_i q_{gi}$ 描述,其中 q_{gi} 为节点 i 的机组的发电出力, a_i 和 b_i 为成本系数,且 a_i 大于 0。设某一小时时段节点 i 的逆需求函数为 $\lambda_i(q_{di})=r_i - s_i q_{di}$, 其中 λ_i 表示节点 i 的现货市场电价, q_{di} 表示节点 i 的负荷需求, r_i 和 s_i 为大于零的常数, s_i 反映了用户对电价变化的需求弹性。

设发电商在远期合同市场和现货市场的竞争行为可用一个两阶段古诺博弈模型描述:模型的第一阶段为策略性远期合同交易阶段,第二阶段为现货市场竞争阶段。在第一阶段,各发电商通过选择远期合同电量来追求自身收益的最大化,并在第二阶段按现货市场各节点电价的加权平均 $\bar{\lambda} = \sum_{i \in N} \delta_i \lambda_i$ 进行结算,其中 δ_i 是节点 i 的历史负荷占整个区域负荷的比重,且满足 $\delta_i \geq 0, \sum_{i \in N} \delta_i = 1$ 。设发电商 g 与用户以约定价格 f 签订了电量为 k_g 的远期合同,则当现货市场各节点电价的加权平均 $\bar{\lambda}$ 高于合同价格 f 时,发电商退还用户价差 $k_g(\bar{\lambda} - f)$; 当现货市场各节点电价的加权平均 $\bar{\lambda}$ 低于合同价格 f 时,用户支付发电商价差 $k_g(f - \bar{\lambda})$ 。因此,发电商 i 通过签署远期合同获得的净收益 y_i 可表示为:

$$y_i = k_g(f - \sum_{i \in N} \delta_i \lambda_i) \quad (1)$$

在第二阶段,各策略性发电商认为其竞争对手的发电量不随其现货市场发电量的变化而变化,通过选择其所属发电机组的出力来追求自身利润的最大化;独立系统运行人 ISO (Independent System Operator) 在考虑到各条输电线路上的容量限制和

网络环路潮流约束的基础上,利用各节点之间的价格差,通过控制各节点处的用电量来进行空间套利,使社会福利达到最大化。

1.2 发电商现货市场决策模型

在现货市场中,理性的发电商 g 通过选择其位于各个节点的发电机组的出力,追求自身收益的最大化。其收益等于现货市场的售电收入减去发电成本,再加上远期合同交易的净收益。因此,发电商 g 在现货市场中的决策问题可描述为:

$$\begin{aligned} \max_{q_{gi}} \quad & \sum_{i \in N_g^G} (\lambda_i q_{gi} - C_i(q_{gi})) + k_g(f - \sum_{i \in N} \delta_i \lambda_i) \\ \text{s.t.} \quad & q_{gi}^{\min} \leq q_{gi} \leq q_{gi}^{\max} \quad (\forall i \in N_g^G) \\ & q_{di} - q_{gi} + \mathbf{H}(i,:) \mathbf{T} = 0 \quad (\forall i \in N) \\ & \lambda_i = r_i - s_i q_{di} \quad (\forall i \in N) \\ & C_i(q_{gi}) = 0.5a_i q_{gi}^2 + b_i q_{gi} \quad (\forall i \in N_g^G) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \mathbf{T} 表示网络的支路潮流向量, \mathbf{H} 表示节点支路关联矩阵, $\mathbf{H}(i,:)$ 表示矩阵 \mathbf{H} 的第 i 行, $\mathbf{H}(i,:) \mathbf{T}$ 表示注入节点 i 的有功潮流^[15]。

为了减少变量以简化求解,利用上述优化问题的约束条件,发电商 i 在现货市场的优化问题可重新描述为:

$$\begin{aligned} \max_{q_{gi}} \quad & \sum_{i \in N_g^G} (r_i - s_i(q_{gi} - \mathbf{H}(i,:) \mathbf{T}) - 0.5a_i q_{gi} - b_i) q_{gi} + \\ & k_g(f - \sum_{i \in N} \delta_i (r_i - s_i(q_{gi} - \mathbf{H}(i,:) \mathbf{T}))) \\ \text{s.t.} \quad & q_{gi}^{\min} \leq q_{gi} \leq q_{gi}^{\max} \quad (\forall i \in N_g^G) \end{aligned} \quad (3)$$

上述优化问题的解必满足其一阶条件,即 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件,它可以表述为下列有关对偶变量 $\eta_i^{\min}, \eta_i^{\max}$ 的等式和互补条件:

$$\begin{aligned} (q_{gi} : \forall i \in N_g^G) \quad & r_i - 2s_i q_{gi} + s_i \mathbf{H}(i,:) \mathbf{T} - \\ & a_i q_{gi} - b_i + \delta_i s_i k_g + \eta_i^{\min} - \eta_i^{\max} = 0 \\ (\eta_i^{\min} : \forall i \in N_g^G) \quad & 0 \leq \eta_i^{\min} \perp q_{gi} - q_{gi}^{\min} \geq 0 \\ (\eta_i^{\max} : \forall i \in N_g^G) \quad & 0 \leq \eta_i^{\max} \perp q_{gi}^{\max} - q_{gi} \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: η_i^{\min} 和 η_i^{\max} 分别表示发电商 g 位于节点 i 的发电机组上、下限出力约束的对偶变量。由于不等式约束的存在,在以上的 KKT 条件中出现了形如 $0 \leq a \perp b \geq 0$ 的表达式,其描述的是一组互补条件,等价于 $a \geq 0, b \geq 0, a \cdot b = 0$ 。

1.3 ISO 现货市场决策模型

在现货市场中,ISO 可以通过将低价节点处的电力卖到高价节点以进行空间套利,直到各个节点的电价相等或输电网出现阻塞,以实现社会福利(定义为用户的用电收益减去发电商的发电成本)最大化。根据定义,逆需求曲线为购电商的收益对其购电量的导数,则用户在现货市场的用电收益 π_d 可用

逆需求曲线下的面积表示^[16]:

$$\pi_d = \sum_{i \in N} \int_0^{q_{di}} (r_i - s_i x) dx \quad (5)$$

因此 ISO 在现货市场的决策问题可描述为:

$$\begin{aligned} \max_{q_{di}} \sum_{i \in N} \int_0^{q_{di}} (r_i - s_i x) dx - \sum_{i \in N^G} (0.5a_i q_{gi}^2 + b_i q_{gi}) \\ \text{s.t. } \quad q_{di} \geq 0 \quad (\forall i \in N) \\ q_{di} - q_{gi} + \mathbf{H}(i, :) \mathbf{T} = 0 \quad (\forall i \in N) \quad (6) \\ -T_{ij}^{\max} \leq T_{ij} \leq T_{ij}^{\max} \quad (\forall ij \in N^B) \\ \mathbf{L}(i, :) \mathbf{R} \mathbf{T} = 0 \quad (\forall i \in N^L) \end{aligned}$$

式中: N^G 表示全体发电机组的集合, N^B 表示所有网络支路的集合, N^L 表示所有网络环路的集合, \mathbf{L} 为环路支路关联矩阵, $\mathbf{L}(i, :)$ 表示矩阵 \mathbf{L} 的第 i 行, \mathbf{R} 为对角矩阵, 其对角元素表示各支路阻抗^[15], T_{ij} 和 T_{ij}^{\max} 分别为连接节点 i 和节点 j 的支路的潮流和最大传输容量。在式(6)中, 机组发电量 q_{gi} 由发电商现货市场的决策问题(2)确定。

上述优化问题的 KKT 条件可以表述为下列有关对偶变量 $\lambda_i, \mu_{ij}^{\min}, \mu_{ij}^{\max}, \rho_i$ 的等式和互补条件:

$$\begin{aligned} (q_{di} : \forall i \in N) \quad 0 \leq q_{di} \perp -r_i + s_i q_{di} + \lambda_i \geq 0 \\ (T_{ij} : \forall ij \in N^B) \quad \mu_{ij}^{\min} - \mu_{ij}^{\max} - \mathbf{H}(i, i)^T \lambda - \\ \mathbf{R}(i, i) \mathbf{L}^T \rho = 0 \\ (\lambda_i : \forall i \in N) \quad q_{di} - q_{gi} + \mathbf{H}(i, :) \mathbf{T} = 0 \quad (7) \\ (\mu_{ij}^{\min} : \forall ij \in N^B) \quad 0 \leq \mu_{ij}^{\min} \perp T_{ij} + T_{ij}^{\max} \geq 0 \\ (\mu_{ij}^{\max} : \forall ij \in N^B) \quad 0 \leq \mu_{ij}^{\max} \perp T_{ij}^{\max} - T_{ij} \geq 0 \\ (\rho_i : \forall i \in N^L) \quad \mathbf{L}(i, :) \mathbf{R} \mathbf{T} = 0 \end{aligned}$$

式中: λ_i 表示节点 i 功率平衡约束的对偶变量, 也是节点 i 的现货电价, μ_{ij}^{\max} 和 μ_{ij}^{\min} 分别表示支路 ij 潮流约束上、下限的对偶变量, ρ_i 表示第 i 个环路约束的对偶变量, 其对应的向量分别用 λ 、 μ^{\min} 、 μ^{\max} 和 ρ 表示。

1.4 发电商远期合同市场决策模型

在策略性远期合同中, 假设有足够多的买方风险中立且具有理性的期望, 因而时间上的套利行为将使得合同电价 f 等于期望的各个节点现货电价的加权平均, 即 $f = \sum_{i \in N} \delta_i \lambda_i$ 。发电商 g 在远期合同市场通过选择其合同交易量来追求其期望收益的最大化, 因此发电商 g 在远期合同市场的优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} \max_{k_g} \sum_{i \in N^G} (r_i - s_i q_{di} - 0.5a_i q_{gi} - b_i) q_{gi} \\ \text{s.t. } 0 \leq k_g \leq \sum_{i \in N^G} q_{gi} \quad (8) \end{aligned}$$

$$q_{di} - q_{gi} + \mathbf{H}(i, :) \mathbf{T} = 0 \quad (\forall i \in N)$$

在该优化问题中, q_{gi} 为发电商现货市场决策模型的解, 节点需求电量 q_{di} 和支路潮流向量 \mathbf{T} 为 ISO 现货市场决策模型的解, 它们与每个发电商的竞争策略有关, 因此发电商的合同电量只有在求出 ISO 和发电商现货市场决策问题的解后才能确定。

2 均衡模型的求解

由于每个发电商的收益不仅与自己的竞争策略有关, 还依赖于其它发电商的竞争策略, 所以只有当每个发电商均没有动机改变其竞争策略时, 市场才达到纳什均衡。

通常在非线性规划问题中, 很难获得发电商各机组出力 q_{gi} 和各支路潮流 T_{ij} 与合同电量 k_g 的显函数, 而发电商合同市场决策模型的求解又必须在发电商和 ISO 现货市场的决策模型求解后才能进行, 但 q_{gi} 、 T_{ij} 与 k_g 的对应关系必然以隐函数的形式包含于发电商和 ISO 现货市场决策模型的 KKT 条件中。因此可将发电商和 ISO 现货市场决策模型的 KKT 条件作为发电商合同市场决策模型的约束条件, 直接求解由发电商合同市场决策模型、ISO 和发电商现货市场决策模型的 KKT 条件构成的非线性规划问题来获得每个发电商的最优竞争策略。这样, 发电商 i 在远期合同市场的决策问题(8)可转化为:

$$\begin{aligned} \max_{k_g} \sum_{i \in N^G} ((r_i - s_i q_{gi} + s_i \mathbf{H}(i, :) \mathbf{T}) q_{gi} - \\ 0.5a_i q_{gi}^2 + b_i q_{gi}) \\ \text{s.t. } 0 \leq k_g \leq \sum_{i \in N^G} q_{gi} \quad (9) \end{aligned}$$

式(4)、(7)所对应的 KKT 条件。

由此可见发电商合同市场的优化问题是一个混合非线性互补问题, 其解可用对应的 KKT 条件表示。本文使用非线性互补方法来求解各发电商策略性竞争的均衡解。利用 $\Psi(a, b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2}$ 的非线性互补函数将非线性互补条件转化为等式, 然后将各发电商合同市场决策问题转化为一组非线性方程组, 最后将各发电商相应的方程组联合到一起求解, 即可得出市场均衡解。但由于非线性互补函数在原点不可微, 使得该方程组中包含了一些不光滑的代数方程, 因而本文运用一种基于次梯度的改进的 Levenberg-Marquardt 算法进行求解, 详细步骤可参考文献[12]。

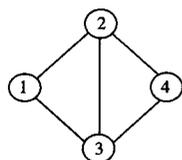


图1 算例系统

Fig.1 Illustrative example system

3 算例分析

采用与文献[13]相同的4节点电力网络(图1), 五条支路的阻抗均为 0.1Ω , 四个节点均为用户节点, 各个节点的电价权重都是 0.25。设四个节点逆需求函数的截距均为 $100\$/\text{MWh}$, 节点1和节点2逆需求函数的斜率为 $0.52\$/(\text{MWh})^2$, 节点3和节点4逆需求函数的斜率为 $0.65\$/(\text{MWh})^2$ 。设市场中有两个发电商, 发电商1拥有位于节点1的发电机组, 其对应的出力为 q_{11} ; 发电商2拥有位于节点2的发电机组, 其对应的出力为 q_{22} 。发电商1和发电商2的机组技术参数如表1所示。

表1 发电机组技术参数
Tab.1 Technical data for generators

发电商	成本函数 /\$	出力上限 /MW	出力下限 /MW
1	$0.175q_{11}^2 + 10q_{11}$	200	0
2	$0.225q_{22}^2 + 10q_{22}$	200	0

考虑三种情况: ①输电不阻塞, 假设5条输电线路的最大传输容量均为 50 MW; ②假设连接节点1

和节点3的输电线路的最大输电容量为 15 MW, 其余均为 50 MW; ③假设连接节点2和节点4的输电线路的最大传输容量为 15 MW, 其余均为 50 MW。分别计算在这三种情况下考虑环路潮流约束和不考虑环路潮流约束的均衡结果, 如表2所示。

从表2中可以看出, 不论是否考虑环路潮流约束, 发电商均会自愿参与远期合同交易, 只是其合同电力的交易量不同。考虑环路潮流时, 相对于不阻塞的情况, 13线阻塞时, 发电商1的合同电量由 92.2 MWh 下降到 9.0 MWh, 发电商2的合同电量却由 76.8 MWh 增加到 81.8 MWh; 而24线阻塞时, 发电商2的合同电量由 76.8 MWh 下降到 39.8 MWh, 发电商1的合同电量仅由 92.2 MWh 下降到 86.5 MWh。可见, 考虑环路潮流时, 发电商的合同交易量与网络阻塞位置有关, 靠近阻塞位置的发电商参与合同交易的激励会受到较大的负面影响。但不考虑环路潮流约束时, 13或24线的传输容量发生变化时, 发电商的合同电量均不受影响, 将得到发电商合同市场的策略行为与输电线路阻塞无关的错误结论。

从表2中还可看出, 考虑环路潮流约束, 相对于不阻塞的情况, 当13线传输容量为 15 MW 时, 整个市场的用电量由 222.4 MWh 下降到 180.8 MWh, 当24线传输容量为 15 MW 时, 整个市场的用电量由 222.4 MWh 下降到 193.8 MWh。可见, 考虑环路潮流时, 若阻塞位置靠近低成本发电商, 所受的影响较

表2 考虑或不考虑环路潮流约束时的均衡结果
Tab.2 Equilibrium result with or/and without loop flow constraints

		不考虑环路潮流约束			考虑环路潮流约束		
		无阻塞	13线阻塞 /15MW	24线阻塞 /15MW	无阻塞	13线阻塞 /15MW	24线阻塞 /15MW
需求量 /MWh	节点1	61.8	61.8	61.8	61.8	63.8	61.9
	节点2	61.8	61.8	61.8	61.8	49.4	71.6
	节点3	49.4	49.4	49.4	49.4	31.9	41.8
	节点4	49.4	49.4	49.4	49.4	35.7	18.5
发电出力 /MWh	发电商1	121.6	121.6	121.6	121.6	70.7	118.1
	发电商2	100.8	100.8	100.8	100.8	110.1	75.7
合同电量 /MWh	发电商1	92.2	92.2	92.2	92.2	9.0	86.5
	发电商2	76.8	76.8	76.8	76.8	81.8	39.8
节点电价 /(\$/MWh)	节点1	67.9	67.9	67.9	67.9	66.8	67.8
	节点2	67.9	67.9	67.9	67.9	74.3	62.8
	节点3	67.9	67.9	67.9	67.9	79.3	72.8
	节点4	67.9	67.9	67.9	67.9	76.8	88.0
支路潮流 /MW	12线	15.9	45.1	11.8	18.9	-8.1	22.4
	13线	44.0	14.7	48.1	41.0	15.0	33.8
	23线	22.2	41.4	37.4	22.1	23.1	11.5
	24线	32.7	42.7	13.4	35.8	29.4	15.0
	34线	16.7	6.7	36.0	13.7	6.3	3.50
发电商收益 /\$	发电商1	4449.4	4449.4	4449.4	4449.4	3141.2	4385.5
	发电商2	3547.1	3547.1	3547.1	3547.1	4352.4	2704.8
社会福利/\$		11570.9	11570.9	11570.9	11570.9	10231.2	10705.3

大。但不考虑环路潮流约束时,整个市场的发电量并不受 13 或 24 线传输容量变化的影响,这将得出市场均衡结果不受 13 或 24 线传输容量变化影响的错误结论。

不考虑环路潮流时,当 13 线传输容量为 50 MW 时,发电商 1 由节点 1 通过传输线 12 和 13 输送的发电出力分别为 15.9 MWh 和 44 MWh;当 13 线最大传输容量下降为 15 MW 时,发电商 1 由节点 1 通过传输线 12 和 13 输送的发电出力分别为 45.1 MWh 和 14.7 MWh,其输送的发电出力不变,因而市场各节点电价不受影响。但考虑环路潮流时,当 13 线传输容量下降到 15 MW 时,由于受环路潮流的约束,12 线的潮流并不能任意增加,此时发电商 1 的发电出力不能完全通过 12 和 13 线传输,其发电出力将被迫下降,导致了市场中各节点电价的不同。可以对发电商 2 和 24 线传输容量变化时的情况做类似的分析。由此可见,若分析时不考虑环路潮流,将得出输电线路传输容量充足,无需进行新的输电投资的错误结论。

比较发现,考虑环路潮流约束,当输电线 13 的最大传输容量为 15 MW 时,发电商 2 的收益大于无阻塞时的情况,这表明当输电阻塞位置靠近低成本的发电商时,处于阻塞有利位置的发电商可通过策略性竞争获得更大利润。

需要说明的是,上述分析均是针对本文的算例进行的,网络结构不同时,不考虑环路潮流与考虑环路潮流的均衡结果可能不像本算例结果有如此大的差别。但无论如何,在分析电力市场均衡和发电商策略行为时均不应忽略网络环路潮流这一电力系统的重要特征,否则有可能得出不合理的结论。

4 结束语

本文在计及输电网络环路潮流约束的基础上,建立了一个策略性远期合同市场和现货市场的联合古诺均衡模型。该模型描述的均衡问题是一个具有均衡约束的均衡问题,可采用非线性互补方法对其求解,最后通过一个 4 节点电力网络算例,验证了模型的合理性和模型求解方法的有效性。结果表明,环路潮流约束对电力市场均衡和发电商的远期合同交易策略具有不可忽视的影响,若在分析中忽略环路潮流约束,可能得出不合理的结论。

参考文献

- [1] 张显,王锡凡,王建学,等.发电商长期电能分配策略研究[J].中国电机工程学报,2005,25(1):6-12.
ZHANG Xian, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. A Long-term Allocating Strategy of Power Generators[J].

- Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (1): 6-12.
- [2] Chung T S, Zhang S H, Wong K P, et al. Strategic Forward Contracting in Electricity Markets: Modeling and Analysis by Equilibrium Method [J]. IEEE Proceeding-C, 2004, 151(2): 141-149.
- [3] David A K, Wen F S. Market Power in Electricity Supply [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2001,16(4): 352-360.
- [4] HUI Niu, Baldick R, Zhu G D. Supply Function Equilibrium Bidding Strategies with Fixed Forward Contracts [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1895-1867.
- [5] 张少华,王晔,李渝曾.考虑远期合同交易的发电市场分段线性供应函数均衡模型[J].电力系统自动化,2003,27(21):17-22.
ZHANG Shao-hua, WANG Xian, LI Yu-zeng. Piecewise Linear Supply Function Equilibrium Model for Power Generation Markets with Forward Contracts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 17-22.
- [6] Villar J, Rudnick H. Hydrothermal Market Simulator Using Game Theory: Assessment of Market Power[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003,18(1): 91-98.
- [7] Garcia A, Arbelaez L. Market Power Analysis for the Colombian Electricity Market[J]. Energy Economics, 2002, 24(3): 217-229.
- [8] Newbery D M. Competition, Contracts, and Entry in the Electricity Spot Market [J]. Rand Journal of Economics, 1998, 29(4):726-749.
- [9] Bushnell J. Oligopoly Equilibria in Electricity Contract Markets[R]. CSEM WP 148, University of California Energy Institute, 2005.
- [10] Yao J, Oren S S, Adler I. Computing Cournot Equilibria in Two Settlement Electricity Markets with Transmission Constraints[A]. In: Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences[C]. Hawaii(USA):2004.
- [11] Mi X B, Zhang S H, Wang X, et al. Cournot Equilibrium Analysis for Spot and Forward in a Transmission Constrained Electricity Market[A]. In: Proceedings of 2006 International Conference on Power System Technology[C]. Chongqing(China):2006.
- [12] Wang X, Li Y Z, Zhang S H. Oligopolistic Equilibrium Analysis for Electricity Markets: a Nonlinear Complementarity Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1348-1355.
- [13] Berry C A, Hobbs B F, Meroney W A, et al. Understanding How Market Power Can Arise in Network Competition: a Game Theoretic Approach[J]. Utilities Policy, 1999, 8(3): 139-158.

(下转第 23 页 continued on page 23)

本文针对配电变压器提出了一种基于短期负荷预测的较为实用的变压器目标节能控制方法。根据变压器经济运行理论, 通过短期负荷预测曲线, 利用节能目标函数求出节约电量, 根据节约电量合理地对变压器的运行方式进行优化。实例表明, 本控制方法运算简单、明了, 在实际运行的配电系统中易于实现, 能够较好地解决变压器投切时机的选取问题; 最大限度地降低了变压器自身的综合损耗, 也延长了变压器、开关等设备的使用寿命, 既提高了自动化水平, 又减少了投资, 做到了经济运行, 满足工程应用的要求。

参考文献

- [1] 胡景生. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
HU Jing-sheng. Economic Operation of Transformers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] 徐建政, 王剑, 杨君, 等. 变压器经济运行的神经网络控制系统[J]. 电网技术, 2001, 25 (9): 44-47.
XU Jian-zheng, WANG Jian, YANG Jun, et al. An Artificial Neural Network Based System for Transformer Economic Operation[J]. Power System Technology, 2001, 25 (9): 44-47.
- [3] 郝治国, 赵学文, 张保会. 变电站变压器经济运行实时监控[J]. 继电器, 2002, 30 (1): 18-21.
HAO Zhi-guo, ZHAO Xue-wen, ZHANG Bao-hui. Resarch on Real-time SCADA System for Economic Operation of Transformers in Substations[J]. Relay, 2002, 30 (1): 18-21.
- [4] 熊小伏, 王志勇. 基于SCADA实时数据的变压器经济运行方式研究[J]. 电网技术, 2003, 27 (7): 9-11.
XIONG Xiao-fu, WANG Zhi-yong. Economic Operation of Power Transformer Based on Real-time Data from SCADA[J]. Power System Technology, 2003, 27 (7): 9-11.
- [5] 汪峰, 谢开, 于尔铿. 一种简单实用的超短期负荷预报方法[J]. 电网技术, 1996, 20 (3): 41-43.
WANG Feng, XIE Kai, YU Er-keng. A Simple and Effective Ultrashort Term Load Forecasting Method[J]. Power System Technology, 1996, 20 (3): 41-43.
- [6] 周劭英, 张伯明, 等. 基于日周期多点外推法的超短期负荷预测及其误差分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (2): 15-17.
ZHOU Jie-ying, ZHANG Bo-ming, et al. Very Short Term Load Forecast Based on Multi-sample Extrapolation and Error Analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (2): 15-17.
- [7] 杨争林, 宋燕敏, 曹荣章, 等. 超短期负荷预测在发电市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (11): 14-17.
YANG Zheng-lin, SONG Yan-min, CAO Rong-zhang, et al. Application of Ultra-short Term Load Forecasting in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (11): 14-17.
- [8] Lee K Y, Cha Y T, Park J H. Short-Term Load Forecasting Using an Artificial Neural Network[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7 (1): 124-132.

收稿日期: 2007-11-26; 修回日期: 2008-03-05

作者简介:

熊小伏 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行、控制及保护;

赵志杰 (1977-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zzj818616@yahoo.cn

姚旭 (1961-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行、控制及保护。

(上接第 12 页 continued from page 12)

- [14] Hobbes B F, Metzler C B, Pang J S. Strategic Gaming Analysis for Electric Power Systems: an MPEC Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 638-645.
- [15] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Electric Power Network Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [16] Batstone S. An Equilibrium Model of an Imperfect Electricity Market[A]. In: Proceedings of the 35th ORSNZ Conference[C]. Wellington(New Zealand):2000:

169-178.

收稿日期: 2007-09-14; 修回日期: 2008-03-21

作者简介:

王瑞庆 (1965-), 男, 博士, 副教授, 主要从事金融衍生工具在电力市场中的应用研究; E-mail: ayrqwang@163.com

李渝曾 (1947-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场输电定价、可中断负荷管理、博弈分析等研究;

张少华 (1966-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场风险管理、远期合同定价、可中断负荷管理等研究。