

单边电力市场的电压稳定性分析

熊虎, 彭志炜, 洪绍云, 苏建

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 实时电价理论是现代电力市场理论的基础, 已应用于单边电力市场。论述了最优潮流不仅提高电网运行的经济性, 还提高电网电压的稳定性。发现了隐藏在实时电价中的电压稳定性信息, 和用户在实时电价驱动下改变购电节点和数量对电网电压稳定性的影响是积极的。最后用五节点系统算例验证上述观点。

关键词: 单边电力市场; 最优潮流; 实时电价; 电力系统; 电压稳定

Voltage stability analysis under unilateral open electricity market

XIONG Hu, PENG Zhi-wei, HONG Shao-yun, SU Jian

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: The theory of spot price is the foundation of modern electricity market, which has been used in unilateral open electricity market. This paper discusses that optimal power flow not only improves efficiency of power system, but also improves its voltage stability. It discovers voltage stability information hiding in the spot price and that the changing of purchasing point and quantity with the consumers is active to voltage stability under the spot price driving. Finally, five-bus power system is used to compute and testify the above viewpoint.

Key words: electricity market; OPF; spot price; power system; voltage stability

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)09-0021-04

0 引言

我国现行的是单边电力市场, 只开放发电侧, 模式是“1+N”模式, 也称作“单一购买者模式”, 只有一个电网经营企业, 各独立发电企业参与市场竞争, 用户不能与发电厂签订购电合同, 只能由电网经营企业采用趸售或零售的方式供电。在这种模式下, 实时电价理论具有很好的应用优势。目前, 美国 PJM 和纽约州、新西兰以及南美智利、玻利维亚、秘鲁等国均采用了基于实时电价理论的节点边际电价方案^[1]。基于实时电价的理论的“1+N”模式下, 电网公司根据购电费用最小的原则选择各发电厂的电量, 根据节点供电边际成本制定电价, 以及用户根据电价的不同改变购电节点和购电量的市场行为是否对电网电压稳定性造成影响? 目前, 针对这一疑问还没有人做出详细的分析, 本文将对这一疑问展开论述。

1 基于最优潮流的实时电价理论^[4]

实时电价的目标函数是社会效益最大, 若仅考虑发电侧的电力市场的竞争, 不考虑需求的竞价, 负荷需求量与电价无关, 也即假定负荷没有价格弹性, 则社会效益可以用支付的电能费用来衡量。假设各发电厂按其自身边际成本报价, 则目标函数可进一步反映为全网发电费用最小, 即:

$$\min C = \sum_{i \in N_G} (C_{P_i}(P_{G_i}) + C_{Q_i}(Q_{G_i})) \quad (1)$$

式中: $C_{P_i}(P_{G_i})$, $C_{Q_i}(Q_{G_i})$ 分别为机组 i 的有功和无功费用函数, 用二次曲线来描述, N_G 为发电机总数。

约束条件包括: 等式约束即节点平衡方程; 不等式约束即发电出力约束、支路传输功率约束、节点电压限制、可控支路电抗约束、移相变压器移相角约束等。包括以上各类约束条件的优化模型可以构造出扩展拉格朗日函数 $F(P_G, Q_G, V, \theta)$ 。实时电价是对给定时段向用户提供电能的边际成本, 即为系统总生产费用对各节点注入功率的微增:

基金项目: 贵州省创新基金资助项目 (2006001)

$$\rho_i^P = \left. \frac{\partial F}{\partial P_i} \right|_* = \lambda_{P_i} \quad (2)$$

$$\rho_i^Q = \left. \frac{\partial F}{\partial Q_i} \right|_* = \lambda_{Q_i} \quad (3)$$

式中: ρ_i^P 为节点的有功实时电价; ρ_i^Q 为节点的无功实时电价; λ_{P_i} 为潮流有功平衡方程的拉格朗日乘子; λ_{Q_i} 为潮流无功平衡方程的拉格朗日乘子; *表示最优解。

各节点的实时电价可以通过一个非线性最优潮流计算程序得到, 由于最优潮流采用偏导数来优化目标函数, 如果该目标函数为系统的总发电费用, 则有功和无功实时电价分别对应于最优潮流收敛时潮流功率平衡方程的拉格朗日乘子 λ_P , λ_Q [2]。

在不考虑网损和各种约束条件下, 整个系统所有节点实时电价完全相同, 然而, 在网损和各种约束条件的限制下, 电网中各节点的实时电价将各不相同。影响发电厂实时电价的主要因素是网损, 发电厂功率供应的改变将影响网损的大小, 同时改变了发电厂的边际成本, 即实时电价。影响 PQ 节点实时电价的主要因素是节点负荷的大小, 即等式约束条件, 节电负荷的改变将影响供电边际成本的大小。

2 隐藏实时电价理论中的电压稳定性信息

由于最优潮流的目标函数是生产费用最小, 在总负荷一定的情况下, 生产费用最小反映了电网中的电能损耗的经济代价最小, 即使电能损耗在各发电厂间的分摊费用最小, 不仅考虑了减少电能损耗, 而且考虑了损耗的经济分摊, 减少电能损耗实际上就是增强了电网的静态电压稳定性。对于任意线路(图1)的功率损耗的计算如下:

$$\dot{S}_{ij} = \dot{U}_i^* I_{ij} = \dot{U}_i^* [U_i y_{i0} + (U_i - U_j) y_{ij}] \quad (4)$$

$$\dot{S}_{ji} = \dot{U}_j^* I_{ji} = \dot{U}_j^* [U_j y_{j0} + (U_j - U_i) y_{ij}] \quad (5)$$

$$\Delta \dot{S}_{ij} = \dot{S}_{ij} + \dot{S}_{ji} \quad (6)$$

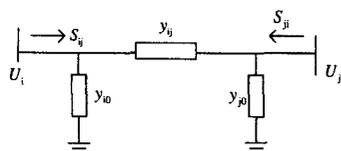


图1 支路功率计算

Fig.1 Branch power calculation

从式(4)、(5)、(6)可以知道, 电能损耗的减少就是两节点间的电压向量差减少, 即提高了电网电压

的静态稳定性。所以在电网负荷一定的情况下, 生产费用从侧面反映了电网电压的静态稳定性, 也就是生产费用越小, 电网电压稳定性越强, 反之则越弱。最优潮流不仅提高电网运行经济性, 而且提高了电压稳定性。

根据实时电价的定义, 实时电价是电网生产费用对各节点注入功率的微增, 则实时电价也反映了各节点功率的微增对电网电压稳定性的影响大小, ρ_i^P 越大说明节点 i 有功增长对电网电压稳定性影响越大, 同样 ρ_i^Q 反映了节点 i 无功增长对电网电压稳定性的影响。实时电价不仅提供了经济信息, 而且提供电网电压的静态稳定性信息。

假设各节点用电条件一样, 用户可以没有限制的在各节点购买电能, 那么由于实时电价不同的驱动, 促使用户改变购电节点和数量以降低自身成本。这种改变的结果是使各节点实时电价趋于一致, 并且由于减少高电价节点的购电量而增加低电价节点的购电量, 在总负荷一定的情况下, 这种改变正好符合改善电网电压的要求从而增强了电网的电压稳定性。

3 电力系统电压静态稳定性分析

电压静态稳定性分析不仅要反映全局电压静态稳定性, 还要确定电压不稳定发生的地点, 以及各节点的电压不稳定程度。本文采用最小模特征值分析法, 用以论证实时电价的电压稳定性信息。

3.1 电压静态稳定性全局指标 λ_{\min}

文献[3]中论述了电力系统发生电压静态分岔失稳的充要条件是潮流计算方程所形成的向量场的雅可比矩阵奇异, 也就是系统雅可比矩阵 J 奇异。 J 奇异必有一个零特征值, 当系统运行由正常工况向稳定极限过渡时, J 矩阵向奇异的方向变化, 其相应的最小模特征值必然率先单调的趋于零值, 因而我们可以选用最小模特征值作为电压静态稳定性全局指标, 记作 λ_{\min} 。研究表明, λ_{\min} 具有很好地描述性, 如果直接选用雅可比矩阵行列式的值 $|J|$ 作为静态稳定裕度, 则当系统工作点接近静稳极限时, $|J|$ 会发生突变, 描述性较差 [4]。

3.2 λ_{\min} 对控制变量的灵敏度

系统发生电压不稳定的地点一般都在 PQ 节点, 设系统有 m 个 PQ 节点。取控制变量 $\mu = (P_1, P_2, \dots, P_m, Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$ 。选取 λ_{\min} 对控制变量的灵敏度 $\partial \lambda_{\min} / \partial \mu_i$ ($i=1, 2, \dots, 2m$) (称作控制变量灵敏度), 反映了系统电压稳定性与各 PQ 节点控制参数关系。灵敏度越大说明系统电压稳定性对该

控制变量越敏感, 该控制变量的扰动引起的 $\lambda_{\min} \rightarrow 0$ 的速度越快, 越易使系统潮流雅可比矩阵 J 奇异, 使系统发生电压静分岔失稳。 $\partial\lambda_{\min}/\partial\mu_i$ 可以用来确定电压不稳定发生的地点以及程度, 同时回答为什么发生, 哪些因素起关键的作用等问题。

有功电价 ρ_i^P 的大小反映了有功负荷对节点 i 的电压稳定性影响程度, 与 $\partial\lambda_{\min}/\partial P_i$ 具有相同的意义, 同样无功电价 ρ_i^Q 反映了无功负荷对节点 i 的电压稳定性影响程度, 与 $\partial\lambda_{\min}/\partial Q_i$ 具有相同的意义。

4 单边电力市场电压稳定性分析

基于最优潮流的实时电价下的单边电力市场, 最优潮流有利于电网电压稳定, 实时电价反映了电网供电边际成本, 同时反映了电网电压的静态稳定性信息。现用最小模特征值分析方法, 通过算例论证上述判断。假设发电厂按照自身边际电价报价, 只考虑有功费用和有功实时电价; “1+N” 模式, 按实时电价结算; 最优潮流计算采用简化梯度法, 不考虑线路容量和发电厂无功约束 (静态分析中, 假设发电厂无功供应可以通过多种手段提供, 保证无功平衡)。

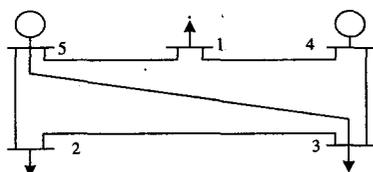


图2 五节点系统图
Fig.2 Five-bus system

图2是一个五节点系统的单线图。该系统的阻抗数据见表1, 费用函数的常数见表2, 约束条件见表3。

表1 五节点系统阻抗数据

起节点	止节点	R	X
5	3	0.10	0.40
5	2	0.15	0.60
5	1	0.05	0.20
4	3	0.05	0.20
4	1	0.05	0.20
3	2	0.10	0.40

表2 发电厂费用函数的数据

发电厂	A_p	B_p	C_p
5	50.0	351.0	44.4
4	50.0	389.0	40.6

$$C_{P_i}(P_{Gi}) = A_{P_i} P_{Gi}^2 + B_{P_i} P_{Gi} + C_{P_i} \quad (i=4, 5)$$

表3 五节点系统约束条件数据

节点号	U_{\min}	U_{\max}	P_{\min}	P_{\max}
1	0.9	1.05		
2	0.9	1.05		
3	0.9	1.05		
4	1.0	1.10	0.3	1.2
5	1.0	1.10	0.3	1.2

PQ 节点负荷情况: $S_1 = 0.60 + 0.20j$; $S_2 = 0.40 + 0.10j$; $S_3 = 0.60 + 0.30j$ 。节点4为PV节点, 节点5为平衡节点。

一般潮流计算、最优潮流计算后的有功实时电价和灵敏度结果见表4。从表4可以看出最优潮流后, 总费用比一般潮流有所减少, 电压稳定指标 λ_{\min} 明显变小, 向远离0的方向发展, 即电网电压稳定性得到了提高, 节点2的电压得到改善。对于PQ节点, 有功实时电价 ρ_i^P 和有功灵敏度 $\partial\lambda_{\min}/\partial P_i$ 计算结果的比较见图3、图4。

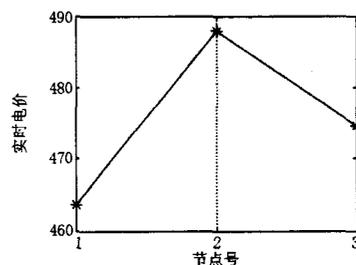


图3 实时电价图

Fig.3 Diagram of spot price

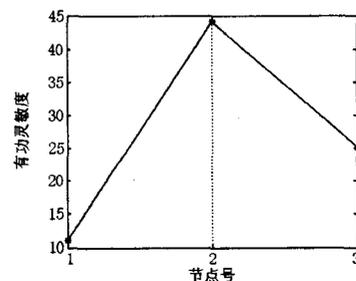


图4 有功灵敏度图

Fig.4 Diagram of active power

从图3、4的比较可以看出, 实时电价与电压静态分析的结果一致, 正确地反映了节点负荷的增加对电网电压稳定性的影响。节点2的负荷对电网电压影响最大, 即最危险节点, 节点2的实时电价也最大; 节点1的影响最小, 节点1的实时电价也最小。实时电价不仅提供了经济信息, 而且提供电网电压的静态稳定性信息。

用户根据实时电价改变购电节点和购电量, 用

λ_{\min} 来衡量电网电压稳定性, 总有功负荷不变, 无功按照原功率因数随有功变化, 各节点实时电价差

额相差小于 1 为准 (此时认为用户已经没有改变购电状态的经济动力), 计算结果如表 4 后部。

表 4 五节点系统一般潮流计算、最优潮流计算、电压稳定性分析和用户改变用电状态计算结果

Tab.4 Five-bus system's common power flow calculation, optimal power flow calculation, voltage stability analysis and the optimal power flow calculation after power exchanging of consumer

节点	一般潮流计算结果		最优潮流计算结果			电压稳定性分析结果		改变状态最优化潮流计算		
	U	S	U	S	ρ_i^p	$\frac{\partial \lambda_{\min}}{\partial P} / (\%)$	$\frac{\partial \lambda_{\min}}{\partial Q} / (\%)$	U	S	ρ_i^p
1	1.0352	-0.60-0.20j	1.0554	-0.60-0.20j	463.644	11.0734	8.6558	1.0468	-0.8267-0.2756j	467.194
2	0.9828	-0.40-0.10j	1.0034	-0.40-0.10j	487.870	44.1219	20.6829	1.0463	-0.1765-0.0441j	468.001
3	1.0082	-0.60-0.20j	1.0299	-0.60-0.20j	474.675	25.1528	14.8967	1.0469	-0.5968-0.1989j	467.938
4	1.0800	0.6800+0.4756j	1.0839	0.6616+0.2996j	455.393			1.0907	0.6777+0.3247j	453.842
5	1.0800	0.9667+0.4110j	1.0958	0.9804+0.3684j	449.040			1.1000	0.9574+0.3342j	446.740
	总费用 C=758.6771 稳定指标 $\lambda_{\min}=-2.0625$		总费用 C=756.4195 稳定指标 $\lambda_{\min}=-2.1429$			稳定指标 $\lambda_{\min}=-2.1429$		总费用 C=753.4474 稳定指标 $\lambda_{\min}=-2.2207$		

从表 4 可以看出电能实时电价的驱动下的重新分布, 不仅使实时电价趋于相等, 而且使各节点电压也趋于相等, 维持在较高的水平; 电能总生产费用降低; 更重要的是电网电压稳定指标 λ_{\min} 有明显的变小, 向远离 0 的方向发展, 这说明电压稳定性得到了提高。

5 结论

节点实时电价理论是现代电力市场理论体系的基石, 基于最优潮流的实时电价理论适应“1+N”发电侧电力市场模式, 最优潮流不仅提高电网运行的经济性, 同时提高了电网电压稳定性。实时电价不仅反映了电网向节点提供电能的边际成本, 给出了经济信息, 而且反映了节点负荷对电网电压稳定性的影响程度, 给出了电网电压的静态稳定性信息。通过以上算例分析表明, 在单一购买者市场, 发电企业根据自身生产的边际成报价的条件下, 电网公司为了降低购电成本所做的电厂调度, 根据节点供电边际成本制定的实时电价来指导用户购电, 以及用户根据节点间实时电价不同, 改变购电节点和购电数量的市场行为, 是有利于电网电压稳定的。

参考文献

[1] 郭剑. 电力市场环境下的电力系统分析方法研究(博士学位论文)[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.
GUO Jian. Study on Power System Analysis Method under Electricity Market Environment, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2001.

[2] 谢开, 宋永华, 余尔铿, 等. 基于最优潮流的实时电价分解模型及其内点法实现——兼论最优潮流中 λ_p, λ_q 乘

子的经济意义[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(2): 5-10.
XIE Kai, SONG Yong-hua, YU Er-keng, et al. Optimal Power Flow Based Spot Pricing Algorithm via Interior Point Methods—on the Economic Meanings of λ_p and λ_q [M]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(2): 5-10.

[3] 彭志炜, 胡国根, 韩桢祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.41-60.
PENG Zhi-wei, HU Guo-gen, HAN Zhen-xiang. Voltage Stability Analysis of Power System Based on Bifurcation Theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.41-60.

[4] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.196-210.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Voltage Stability and Control of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.196-210.

[5] Weber J D, Overbye T J. A Two-Level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies[A]. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 1999.682-687.

收稿日期: 2007-10-11; 修回日期: 2007-12-14

作者简介:

熊虎 (1977-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: xh5233063@163.com
彭志炜 (1958-), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制;
洪绍云 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机理论与控制。