基于网损微增量的节点电价计算法

王永强，侯志俭

（上海交通大学电气系，上海 200030）

摘要：节点电价体制是我国区域市场发展的标准模式，随着电力市场的阻塞管理方法日益完善，并且考虑输电阻塞出现的数学期望值，网损成为影响节点电价中的不可忽略的因素。从一般节点电价模型出发，推导出网损微增量的修正的计算公式，并基于直流潮流法计算网损微增量，得到一种计算简单快速的考虑输电网络损耗的节点电价计算方法。并以 IEEE-14 母线系统算例仿真表明考虑网损后的节点电价能有效反映不同地理位置电价信号，可以协助调度部门安排经济的运行方式，提高输电资源的利用效率，引导电源和输电网的合理投资。

关键词：电力市场；节点电价；输电阻塞；网损成本；网损微增量；网损修正系数

Calculation of nodal price modified by incremental transmission loss

WANG Yong-qiang，HOU Zhi-jian

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Nodal pricing system is the standard form for regional power market in our country. The loss cost must be taken into account because of the small probability of transmission congestion and the increasingly perfect method of transmission congestion. The paper presents a simple and fast method for nodal pricing in consideration of incremental transmission loss. The incremental transmission loss for nodal pricing is presented by using DC power load flow model, and the results based on IEEE-14 bus system show that the price considering loss modification factor can indicate the price signal of different location, which can lead the dispatcher to change the power net operation mode to a more economical operation one and improve the efficiency of transmission resource and result in logical investment of power supply and transmission circuitry.

Key words: power market; nodal price; transmission congestion; loss cost; incremental transmission losses; loss factor

中图分类号： TM73; F123.9 文献标识码： A 文章编号： 1003-4897(2006)24-0047-05

0 引言

在竞争的电力市场中，现货价格是非常关键的信息，它可以影响合同价格，鼓励生产、消费和投资。因此，制定正确的价格是保证系统高效运行的关键。基于 OPF 优化模型节点电价理论正是能够充分实现这一市场目标的电价体制。节点实时电价理论有着实现全社会效益最优的丰富的经济学信息，能够反映电能在系统中不同地理位置的节点在不同时刻的价值，反映电力资源的稀缺程度，为电力生产者、消费者、投资者和管理者提供正确的电价信号，提高电力资源的使用效率，优化电力资源的配置，促进电力市场的稳定发展。

节点电价机制是目前美国标准化电力市场设计中推荐的模式，在美国PJM电力市场有着成功的运作经验[1]。文献[2]对节点电价理论进行了定性的分析，指出某一给定地点为某一负荷供电的边际成本是系统调度机构接受的边际电厂的报价、输电阻塞成本和输电网络损耗成本的函数。然而在实际的电力市场运行中（如PJM、NYISO电力市场）[1,3]，均认为网络损耗占输送能量的比例很小，相对于输电阻塞成本而言在节点电价中可以忽略不计，而使用其他方法进行分摊。与此相对应建立的节点电价模型是基于直流潮流约束的线性最优数学模型[4]。

目前我国正在运营的区域电力市场内，除高峰负荷外，出现输电线路阻塞的情况并不多见。尽管网损一般只占电能交易量的5%左右，考虑到阻塞成本的数学期望值，网损的累计效果不容忽视。对于提高输电网络的利用效率，对发电投资以及输电网规划有着越来越重要的影响。因此，比较准确地计算交易引起的系统网损，公平、合理地分摊交易

网损、以及有效地对网损进行补偿显得十分重要，关系到电力市场是否能有效发挥配置资源的作用。目前使用网损分摊方法大多数或者采用预先设定的网损系数[5,6]或者分摊时不能与实时潮流尽可能保持一致[7]，在潮流时刻变化而网损分摊系数不变或者不能及时更新的情况下，会遭遇分摊的公平性问题，而把网损成本融入节点实时电价中随现货市场更新则可避免这类情况。因此，考虑网损的节点电价的研究工作是很有意义的。

文献[8]在实时电价理论基础上给出了节点电价计算中的网损修正思路，但计算颇为复杂，且在考虑线路不等式约束时考虑不足。本文在此思路上给出了一种简捷的考虑网损成本的节点电价计算方法，并完善线路约束条件，经IEEE-14母线系统仿真计算表明可以达到理想的效果。

1 一般节点电价的计算模型

节点电价的计算模型如文献[1]所介绍，调度中心根据机组的报价曲线进行下一个调度时段的有安全约束的经济调度，这个线性最优潮流的数学模型如下：

$$\begin{aligned}&\min_{P_G} \quad \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}\\ &\text{S.T.} \quad \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}})=0\\ &\qquad \boldsymbol{T}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}})\leqslant\overline{\boldsymbol{F}}\\ &\qquad \underline{\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}}\leqslant\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}\leqslant\overline{\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}}\end{aligned}$$

其中: $\boldsymbol{p}$ 为发电机的报价矢量， $\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}$ 为发电机的出力矢量， $\boldsymbol{T}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}})\leqslant\overline{\boldsymbol{F}}$ 为表示线路的直流潮流约束，$\underline{\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}}\leqslant\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}\leqslant\overline{\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}}$ 表示发电机出力上下限。可以利用KKT条件分析上边线性规划问题。按常规取拉格朗日函数并根据最优条件可得第 i 节点的节点电价为：

$$\rho_i=-\lambda-\sum_k\mu_k T_{ki} \qquad (1)$$

或写为矢量形式为：

$$\boldsymbol{\rho}=-\lambda\boldsymbol{e}-\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu} \qquad (2)$$

其中:λ 和 $\boldsymbol{\mu}$ 为与约束相应的拉格朗日乘子；$\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}$ 为与阻塞成本对应的分量，$\boldsymbol{T}$ 为功率传输分布因子矩阵。

2 直流潮流计算在节点电价计算中的应用

根据直流潮流法原理，有以下假设：

$$b_{ij}\cong-1/x_{ij};V_i\cong V_j\cong 1\ \text{（电压幅值）}$$
$$\cos\theta_{ij}\cong 1-(\theta_i-\theta_j)^2/2$$

支路 ij 的有功损耗为：

$$P_{ij,\mathrm{loss}}=\Delta V_{ij}^2 g_{ij}=(V_i^2+V_j^2-2V_iV_j\cos(\theta_i-\theta_j))g_{ij} \qquad (3)$$

其中: $g_{ij}=g_{ji}$ 为支路电导，由上述假设可得：

$$P_{ij,\mathrm{loss}}=(\theta_i-\theta_j)^2 g_{ij}$$

则全系统网损：

$$P_{\mathrm{Loss}}=\frac{1}{2}\sum_i\sum_j(\theta_i-\theta_j)^2 g_{ij}=\boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}\boldsymbol{\theta} \qquad (4)$$

其中: $\begin{cases}G_{ii}=\sum\limits_{j,j\neq i}g_{ij}\\ G_{ij}=G_{ji}=-g_{ij}\end{cases}$

采用直流网络模型进行潮流计算时，假定边际机组为平衡节点提供系统损耗，节点注入功率与节点电压角度有如下关系：

$$[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}]=\boldsymbol{B}\boldsymbol{\theta} \qquad (5)$$

其中： $\begin{cases}B_{ii}=-\sum\limits_{j,j\neq i}b_{ij}\\ B_{ij}=B_{ji}=b_{ij}\end{cases}$

可得 $\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{B}^{-1}[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}]$ 代入（2）：

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{Loss}}=[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{B}^{-1}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}\boldsymbol{B}^{-1}[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}] \qquad (6)$$

$$\left[\frac{\partial P_{\mathrm{Loss}}}{\partial\boldsymbol{P}_D}\right]=-2[\boldsymbol{B}^{-1}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}\boldsymbol{B}^{-1}[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}] \qquad (7)$$

$\left[\frac{\partial P_{\mathrm{Loss}}}{\partial\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}}\right]$ 为节点的微增网损因子矩阵，反映节点增加单位负荷引起的网损增量。若系统平衡节点为s，则该数值为由节点s提供的补偿量[9]。

此外，支路潮流有如下关系：

$$P_{ij}\cong(\theta_i-\theta_j)/X_{ij}=-b_{ij}(\theta_i-\theta_j)$$

写成矩阵形式如下：

$$\begin{bmatrix}\vdots\\ P_{ij}\\ \vdots\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}&\vdots&&\vdots&\\ \cdots&-b_{ij}&\cdots&b_{ij}&\cdots\\ &\vdots&&\vdots&\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\vdots\\ \theta_i\\ \vdots\\ \theta_j\\ \vdots\end{bmatrix} \qquad (8)$$

简化写为 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{z}}=\boldsymbol{b}\boldsymbol{\theta}$， $\boldsymbol{P}_{\mathrm{z}}$ 为线路潮流矩阵。

由（5）可知 $\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{B}^{-1}[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}]$

则 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{z}}=\boldsymbol{b}\boldsymbol{B}^{-1}[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}]=\boldsymbol{H}[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}]$ （9）

其中 $\boldsymbol{b}$ 有式(8)给定，$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{b}\boldsymbol{B}^{-1}$ （10）

设网络有 L 条线路 N 个节点，则上述各式中，$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{H}$ 为 $L\cdot(N\text{-}1)$ 矩阵；$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{B}$ 为 $(N\text{-}1)\cdot(N\text{-}1)$ 矩

阵。

由于 $\boldsymbol{P}_z$ 方向任意制定，则潮流约束方程为：

$$-\boldsymbol{P}_{\max} \leqslant \boldsymbol{P}_z \leqslant \boldsymbol{P}_{\max}$$

$\boldsymbol{P}_{\max}$ 为线路最大输电容量。

写成矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{P} \\ -\boldsymbol{P} \end{bmatrix} \leqslant \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\max} \\ \boldsymbol{P}_{\max} \end{bmatrix}, \text{即} \begin{bmatrix} \boldsymbol{H} \\ -\boldsymbol{H} \end{bmatrix} \left[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}\right] \leqslant \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\max} \\ \boldsymbol{P}_{\max} \end{bmatrix}$$

考虑到线性规划约束维数，写成 $2L \cdot N$ 矩阵形式（包括参考节点注入功率向量）为：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{H} \mid \boldsymbol{0} \\ -\boldsymbol{H} \mid \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \left[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}\right] \leqslant \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\max} \\ \boldsymbol{P}_{\max} \end{bmatrix} \tag{11}$$

令 $\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H} \mid \boldsymbol{0} \\ -\boldsymbol{H} \mid \boldsymbol{0} \end{bmatrix}$，$\overline{\boldsymbol{P}}_{\max} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\max} \\ \boldsymbol{P}_{\max} \end{bmatrix}$

有 $$\boldsymbol{T}\left[\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}\right] \leqslant \overline{\boldsymbol{P}}_{\max} \tag{12}$$

3 考虑网损微增量的节点电价计算公式推导

消费电力产生的社会福利等于用电产生的效益与发电所需的成本的差额。如果在一定约束条件下，能够获得最大化社会福利时，此时的价格定义为最优价格，据此可以建立相应的目标函数。为了简化问题，忽略机组出力增加时，变化不明显的一些可变成本（如网络维护成本、发电质量、输电质量等）。在一定约束条件下，建立如下直流潮流模型并考虑优化问题：

$$\text{Max} \quad B_{\mathrm{e}}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}\right) - C_{\mathrm{FM}}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{g}}\right)$$

S. T. ：

机组 j 最大发电量约束：

$$P_{\mathrm{g},j} \leqslant P_{\mathrm{g},j,\max} \qquad j=1，2，\cdots，J$$

线路 k 最大输电功率约束：

$$\pm P_{z,k} \leqslant P_{z,k,\max} \qquad z=1，2，\cdots，K$$

系统能量平衡约束：

$$\sum_i P_{\mathrm{d},i} + P_{\mathrm{Loss}} - \sum_j P_{\mathrm{g},j} = 0$$

式中: $B_{\mathrm{e}}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}\right)$ 为用电效益；$C_{\mathrm{FM}}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{g}}\right)$ 为发电机总的燃料成本和维护成本；$P_{\mathrm{g},j}$ 为发电机 j 出力，$P_{\mathrm{g},j,\max}$ 为发电机 j 最大有功出力；$P_{z,k}$ 为线路 k 输电功率；$P_{z,k,\max}$ 为线路 k 最大输电功率；$P_{\mathrm{d},i}$ 为节点 i 负荷，P_{Loss} 为系统网损。

写成矩阵形式并形成拉格朗日函数为：

$$L = C_{\mathrm{FM}}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{g}}\right) - B_{\mathrm{e}}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}\right) + \boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r,max}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{g}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{g,max}}) + \boldsymbol{\mu}_{\mathrm{QS},\eta}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{T}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{g}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}) - \boldsymbol{P}_{\mathrm{z,max}}) + \lambda\left(\sum_j P_{\mathrm{g},j} - \sum_i P_{\mathrm{d},i} - P_{\mathrm{Loss}}\right)$$

式中:矩阵 $\boldsymbol{T}$ 由式（8）～（12）得到；$\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r,max}}^{\mathrm{T}}$ 为机组最大发电约束的拉格朗日乘子向量；$\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{QS},\eta}^{\mathrm{T}}$ 为线路最大输电功率约束的拉格朗日乘子向量；λ 为反映系统能量平衡约束的拉格朗日乘子。

在节点电价计算模型中，按机组报价曲线安排经济调度，机组发电功率一般不会越上限运行，故可设 $\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{r,max}}^{\mathrm{T}} = 0$，拉格朗日函数可写为：

$$L = C_{\mathrm{FM}}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{g}}\right) - B_{\mathrm{e}}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}\right) + \boldsymbol{\mu}_{\mathrm{QS},\eta}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{T}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{g}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}) - \boldsymbol{P}_{\mathrm{z,max}}) + \lambda\left(\sum_j P_{\mathrm{g},j} - \sum_i P_{\mathrm{d},i} - P_{\mathrm{Loss}}\right)$$

再将拉格朗日函数对节点负荷 i 求偏导：

$$\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}} = -\frac{\partial B_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}})}{\partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}} - \boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{QS},\eta} + \lambda\left(-1 - \frac{\partial P_{\mathrm{Loss}}}{\partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}}\right)$$

由负荷供电特性可知，$\partial B_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}) / \partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}$ 定义为节点电价 $\boldsymbol{\rho}$，由 KKT 条件可得：

$$\boldsymbol{\rho} = -\lambda\left(1 + \frac{\partial P_{\mathrm{Loss}}}{\partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}}\right) - \boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{QS},\eta} \tag{13}$$

即为得到的考虑网损修正的节点电价模型，其中 $\partial P_{\mathrm{Loss}} / \partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}$ 可认为是考虑网损的节点电价修正因子。当边际机组节点为参考节点时，式中，$-\lambda$ 的经济意义为系统发电成本微增率；$-\boldsymbol{\mu}$ 的经济意义为输电线路约束的影子价格[10]。

式（13）表明节点电价是系统发电成本、阻塞成本、网损成本的函数。由式（6）可知网络损耗是节点注入功率的二次函数，式（13）的求解过程已不是简单的线性规划问题。为了求解的简捷并且不影响结果分析，采取先从一般节点电价式（2）入手，求得 λ 和 $\boldsymbol{\mu}$，然后再利用已知结果，由式（7）计算网损微增量修正因子 $\partial P_{\mathrm{Loss}} / \partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}$，并将以上结果代入式（13）即可得到近似结果。

在实时市场中，面临参考节点不好选择的问题，因为不同的参考节点算出的网损修正因子是不同的。本文假定系统网损由边际机组作为平衡节点提供，可先由式（2）得到不考虑网损的各节点的节点电价和发电机出力分布（计算结果与参考节点选择无关），再由式（7）以边际机组为参考节点得到网损修正因子。

4 算例分析

以简单 3 节点网络考虑阻塞情况下计算节点电价，以修改的 IEEE-14 母线系统分别计算无阻塞情况及阻塞情况下的考虑网络损耗的节点电价，分析节点电价信号。

4.1 不考虑网损情况下的节点电价计算

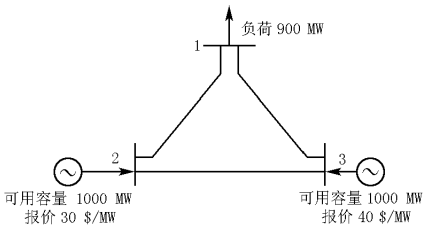

图 1　3 节点情况下节点电价计算

Fig.1　Nodal price calculation in case of 3-bus system

系统机组报价以及节点负荷如图 3 所示，假设线路阻抗相同均为 j1，容量基准值 1000 MW，线路 2-1 容量限制 500 MW，3-1，2-3 线路容量 1000 MW。

选择节点 3 为参考节点，进行直流潮流分析，建立以下优化数学模型：

$$\underset{P_G}{\mathrm{Min}} \quad 30P_{G2} + 40P_{G3}$$

$$\text{S. T.} \quad P_{G2} + P_{G3} - 0.9 = 0$$

$$\pm\begin{bmatrix} P_{12} \\ P_{13} \\ P_{23} \end{bmatrix} = \pm\begin{bmatrix} 1/3 & -1/3 & 0 \\ 2/3 & 1/3 & 0 \\ 1/3 & 2/3 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -900 \\ P_{G1} \\ P_{G2} \end{bmatrix} \leqslant \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$0 \leqslant P_{G2} \leqslant 1.0$$

$$0 \leqslant P_{G3} \leqslant 1.0$$

通过求解这个线性规划问题，可以得到：

$P_{G2} = 0.6$，$P_{G3} = 0.3$，$\lambda = -40$，

$\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}} = [0, 0, 0, 30, 0, 0]$

由式（12）可得 $\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{T}} = [50, 30, 40]$

4.2 考虑网损修正的 IEEE-14 系统节点电价计算

以修改的 IEEE-14 母线系统为例（网络结构和节点负荷不变，假设机组的报价参数），系统参数机组报价情况如表 1 所示。

表 1　机组报价参数

Tab. 1　Bidding process data

机组	报价/ $\$\cdot(\mathrm{MW\cdot h})^{-1}$	提供容量/MW	报价/ $\$\cdot(\mathrm{MW\cdot h})^{-1}$	提供容量/MW
1	36	150	42	200
2	40	60	48	100
3	38	60	46	100
6	48	50	52	100
8	45	50	50	100

4.2.1 全网无阻塞情况

按式（12）进行全网线性规划，机组出力分配如表 2 所示。

表 2　机组出力分配

Tab.2　Generation distribution

机组	提供容量/MW
1	150
2	49
3	60
6	0
8	0

以边际机组节点 2 为参考节点，计算各点网损修正因子，并修正如表 3 所示。

表 3　无阻塞情况下的节点电价修正

Tab.3　Nodal price modification without congestion

美元/(MW•h)

节点	系统出清价	网损修正因子	修正后节点电价
1	40	-0.031	38.76
2	40	0	40
3	40	0.0371	41.484
4	40	0.0445	41.78
5	40	0.0336	41.344
6	40	0.0345	41.38
7	40	0.044	41.76
8	40	0.044	41.76
9	40	0.0437	41.748
10	40	0.0473	41.892
11	40	0.0438	41.752
12	40	0.0495	41.98
13	40	0.0522	42.088
14	40	0.065	42.6

表 3 提供了无阻塞考虑网损情况下的各节点电价，全网网损计算 6.27 MW。结果与节点电价理论相对应，在全网无阻塞并且不考虑网损的情况下，各节点电价是一致的为市场出清价，考虑网损后，各节点电价都发生变化。参照系统线路数据发现，节点 12～14 与电源点之间联系着电阻较高的线路，这些线路产生较大的线路损耗。体现在表 3 中，远离电源点的节点，对系统网损影响较大，节点电价较高；对系统网损影响较小的节点，节点电价较低；甚至有些节点负荷的增加可以减小系统网损。有利于调度部门调整运行方式、合理安排负荷分配和利用输电资源。

4.2.2 线路发生阻塞情况时

在全网无阻塞时，计算可得节点 1～2 间线路潮流为 95.56 MW，假设此线路约束为 70 MW。按式（12）进行全网线性规划，机组出力分配如表 4。

表 4 阻塞时机组出力分配

Tab.4 Generation distribution with congestion

机组	提供容量/MW
1	114.15
2	60
3	60
6	0
8	24.85

以边际机组节点 8 为参考节点，计算各点网损修正因子，并按照考虑阻塞时的节点电价修正如表 5。

表 5 提供了在某线路阻塞情况下各节点考虑阻塞成本后的电价以及进行网损修正后的节点电价，全网网损计算 4.39 MW。与全网无阻塞的情况比较，除了考虑阻塞成本后的价格信号能主动激励各市场参与者缓解网络阻塞、维持系统安全外。不仅全网网损降低，而且各节点负荷对网损的贡献也减小。由于线路阻塞，节点 8 机组上网发电，使得本来远离电源点且网损较高的节点得到改善。显然，若在节点 8 投资较为经济的机组，则可有效降低网损。

表 5 阻塞情况下的节点电价修正

Tab.5 Nodal price modification with congestion

美元/(MW•h)

节点	系统出清价	考虑阻塞成本	阻塞节点电价	网损修正因子	修正节点电价
1	45	-9	36	-0.0472	33.876
2	45	2.4756	47.4756	-0.0248	46.3596
3	45	1.2227	46.2227	0.009	46.6277
4	45	0.1397	45.1397	0.0121	45.6842
5	45	-0.6394	44.3606	0.0058	44.6216
6	45	-0.3738	44.6262	0.0147	45.2877
7	45	0	45	0.0051	45.2295
8	45	0	45	0	45
9	45	-0.0726	44.9274	0.0046	45.1344
10	45	-0.126	44.874	0.0112	45.378
11	45	-0.2478	44.7522	0.0154	45.4452
12	45	-0.3505	44.6495	0.0283	45.923
13	45	-0.3313	44.6687	0.0295	45.9962
14	45	-0.1862	44.8138	0.033	46.2988

考虑网损的价格信号，能有效反映不同地理位置的负荷对网损贡献作用。网损贡献较高的节点电价较高，可以刺激用户主动减少用电量以降低网损。并为调度机构合理安排负荷分配、提高输电资源效率提供依据。并且为电网规划、电源投资提供价格信号。

与其他各种现行的网损分摊方法不同的是，节点电价的网损信号可随现货市场时刻更新，提供更加可靠、灵活、合理的网损成本分摊。

5 结论

节点电价机制目前有着良好的运作经验，而它本身具有的优点又决定这种机制会有更加良好的运用前景。本文提供了线性网损模型修正后节点电价计算方法，通过 IEEE-14 母线系统算例仿真表明，考虑网损成本的节点电价除了能有效缓解线路阻塞之外，还能体现不同节点负荷对网损的贡献，并以经济的手段刺激网损贡献较高的用户减少用电以降低网损。此外，节点电价中的网损信号，对于调度部门合理安排运行方式以降低网损、提高输电网络利用效率，对于整个电网、电源规划建设投资都具有十分重要的指导意义。

网损处理是一个十分复杂的问题，本文采用的网损模型在实时市场中会遇到参考节点选择的问题，当考虑到网损时，不同的参考节点选择会影响电价。此外本文采用直流潮流法计算网损微增量，并以此修正节点电价，结果的精确性相对受到影响。

参考文献

[1] For PJM Market[EB/OL]. http:// www. pjm. com .

[2] 萨莉·亨特.电力市场竞争[M]. 易立云，译.北京：中信出版社, 2004.
Hunter S.Market Competition Work in Electricity[M].YI Li-yun,trans.Beijing:CITIC Publishing House, 2004.

[3] For NYISO Market[EB/OL]. http:// www. nyiso. com.

[4] 国家电力监管委员会. 美国电力市场[M]. 北京：中国电力出版社,2005.
State Electricity Regulatory Commission.America Electricity Power Market[M]. Beijing:China Electric Power Press,2005.

[5] Gonzalez J J, Basagoiti P. Spanish Power Exchange,Market and Information System, Design Concepts, and Operating Experience [A]. Proceedings of 21st IEEE International Conference. 1999. 245-252.

[6] Bialek J W, Ziemianek S, AbiSamra N. Tracking-based Loss Allocation and Economic Dispatch[A]. Proceedings of 13th Power Systems Computation Conference. Trondheim(Norway) :1999.

[7] Baldick R, Kahn E, Contract Paths, Path Shifters, and Efficient Electricity Trade [J]. IEEE Trans on Power Systems , 1997, 12(2): 74-92

[8] 丁晓莺, 王锡凡. 考虑输电网络损耗的节点电价计算方法[J]. 电力系统自动化,2005, 29(22): 14-18.

（下转第 55 页 continued on page 55）

4　结束语

本文提出的附加电阻测量电网绝缘阻抗的方法具有以下特点：

1）只要附加电阻得当，供电系统相当于正常不对称运行，测量装置的安全性高，对电网的正常运行的影响程度低。

2）绝缘阻抗的计算式中不含附加电阻，附加电阻的标称值与实际值的误差不会对绝缘参数的测量计算产生误差，附加电阻测量绝缘参数的原理精度高，误差不超过± 1 %。

3）附加电阻测量绝缘阻抗的方法可应用于中性点不接地的系统、中性点经消弧线圈间接地的系统、中性点经电阻接地的系统等小电流接地电网，该装置具有广泛的适应性。

4）电流分量法和相位法虽表现形式不同，但测量的实质是一样的。具体实施时，电流分量法要求直接测取零序电流的有功和无功分量，计算过程简单，适用于微机测量系统；相位法要求能测取零序电压和零序电流的相位，涉及三角函数的计算，用微机实现测量时，算法复杂，对 CPU 要求较高，可考虑用于人工测量。

5）附加电阻值的选取综合考虑电网的安全性和测量的灵敏性；如 6 kV 电网，附加电阻值可选为 500 Ω～1000 Ω，容量按短时工作考虑，选 2～3 kW。

6）基于附加电阻的测量方法的公式，利用 DSP 等专用计算机很容易实现电网绝缘阻抗测量的智能化。

参考文献

[1] 李润先.中压电网系统接地实用技术 [M].北京：中国电力出版社, 2002.
LI Run-xian. Practical Grounding Technology of Medium Pressure Network [M]. Beijing: China Electric Power Press,2002.

[2] 郑南雁, 楚方求, 程友发. 10 kV 系统对地电容电流的测试 [J]. 继电器, 2000,28(9):56 -58.
ZHENG Nan-yan, CHU Fang-qiu, CHENG You-fa. Measuring of Ground Capacitive Current of 10 kV System[J]. Relay,2000,28(9):56 -58.

[3] 连鸿波，裴善鹏，曲轶龙, 等. 谐振接地电网的电容电流自动跟踪测量 [J]. 郑州大学学报, 2005,26（2）:51-54.
LIAN Hong-bo, PEI Shan-peng, QU Yi-long, et al. Automatic Tracing of Grounding Capacitance Current in Resonance grounding Power Systems[J]. Journal of Zhengzhou University, 2005,26（2）:51-54.

[4] 袁进伶, 张涛. 6～66 kV 电力系统电容电流自动跟踪补偿及接地选线装置原理及应用 [J]. 中国电力,1998,31（1）:67-68.
YUAN Jin-ling, ZHANG Tao.Theory and Application of Capacitive Current Automatic Tracing Compensation and Grounded Line Selection in 6-66 kV Power System [J]. Electric Power,1998,31（1）:67-68.

[5] 欧阳旭东, 孙岩洲, 邱毓昌. 配电网对地电容电流的注入信号测量法 [J]. 电力电容器,2004，(1)：39-40.
OUYANG Xu-dong, SUNYan-zhou, QIUYu-chang. Measurement of Capacitive Current in Power Distribution Network Using Current Injection Methods[J].Power Capacitor, 2004,(1):39-40.

[6] Griffel D，Harmand Y，Leitloff V，et al. A New Deal for Safety and Quality on MV Network [J]. IEEE Trans on Power Delivery，1997，12(4):1428-1433

收稿日期：2006-08-08；　修回日期：2006-10-10

作者简介：
赵建文（1973-），男，硕士，讲师,主要从事供配电安全方面的教学与研究。E-mail:xkdzhaojw@163.com

（上接第 51 页　continued from page 51）

DING Xiao-ying, WANG Xi-fan. Transmission Loss Modification in Location Marginal Prices Calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 14-18.

[9] Shu T，Gross G．Transmission Loss Compensation in Multiple Transaction Networks[J]．IEEE Trans on Power Systems，2000，15(3)：909-915．

[10] 张永正, 文福拴, 严正, 等. 电力市场阻塞管理综述[J].电网技术, 2003, 27(8): 1-9.
ZHANG Yong-zheng, WEN Fu-shuan, YAN Zheng, et al. A Survey of Transmission Congestion Management in Electricity Markets[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 1-9.

[11] Singh H, HAO Shang-you, Papalexopoulos A. Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets[J]. IEEE Transactions, 1998, 13(2): 672-680.

[12] 李卫东, 孙辉, 武亚光. 输电成本计算中损耗分摊原则的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 85-89.
LI Wei-dong, SUN Hui, WU Ya-guang. Research on Rule for Losses Allocation in Transmission Cost Calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 85-89.

[13] 刘琳, 侯志俭. 输电阻塞情况下电能记价 LMP 方法[J]. 华东电力, 2004, 32(8): 26-29.
LIU Lin, HOU Zhi-jian. LMP Method for Electricity Pricing During Power Transmission Congestion[J]. East China Electric Power,2004, 32(8): 26-29.

[14] 江辉, 彭建春. 支路损耗分摊方法在输电网损公正分配中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 7-12.
JIANG Hui, PENG Jian-chun. Application of Branch Power Loss Allocation Method in Fair Allocation of Transmission Power Losses[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 7-12.

[15] Bernard J T，Guertin C. Nodal Pricing and Transmission Losses[Z]. 2002.

[16] 王承民, 蒋传文. 电力市场均衡与网损分摊[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 35-38.
WANG Cheng-min, JIANG Chuan-wen. Network Losses Allocation Method Based on the Market Equilibrium Principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 35-38.

收稿日期：2006-07-18；　修回日期：2006-10-16

作者简介：
王永强(1976-)，男，硕士研究生，主要从事电力市场、电力系统分析方面的学习工作；E-mail: lyghall@163.com
侯志俭(1942-)，男，教授，博士生导师，长期从事电力市场、电力系统运行与控制等方面科研与教学工作。