文章编号：1000-3673（2007）15-0039-05 中图分类号：TM714 文献标识码：A 学科代码：470·4054

基于直流潮流的网损微增率算法

孔祥玉，房大中，侯佑华

（天津大学 电气与自动化工程学院，天津市 南开区 300072）

An Incremental Transmission Loss Algorithm Based on DC Power Flow

KONG Xiang-yu，FANG Da-zhong，HOU You-hua

（School of Electrical Engineering & Automation，Tianjin University，Nankai District，Tianjin 300072， China）

ABSTRACT: In this paper a novel DC power flow based algorithm for incremental transmission losses, i.e., DC Jacobian matrix method, is proposed. Based on DC power flow, a pseudo load variable used to balance network losses is led into the proposed algorithm, and corresponding Jacobian Matrix for unbalanced active power equations with relax load variables is constructed. During the process of solving power flow, the incremental transmission loss of each node can be easily obtained by means of simply solving the transposed matrix of original *n*-order matrix. Results of calculation examples show that the proposed DC Jacobian matrix method is of superiority in computation speed and optimal result.

KEY WORDS: incremental transmission losses；economic load dispatch；Jacobian matrix；power system

摘要：介绍了一种基于直流潮流的网损微增率新算法直流雅可比矩阵法，该方法以直流潮流为基础，引入虚拟网损负荷变量并构造出带有松弛负荷变量的有功不平衡方程雅的可比矩阵，在解潮流过程中只需求解 *n* 阶矩阵的转置矩阵，即可获得各个节点的网损微增率。算例表明，直流雅可比矩阵法在计算速度和优化结果等方面都具有很大的优越性。

关键词：网损微增率；负荷经济分配；雅可比矩阵；电力系统

0 引言

电力系统经济调度中需要计算网损修正系数，而网损微增率的计算又是其核心[1-3]。目前计算网损微增率的方法很多，如 B 系数法[4-5]、导纳矩阵法[6]、雅可比矩阵法等[7-9]。B 系数法和阻抗矩阵法计算量小，但引入假设条件很多，计算大系统时的误差较大；以潮流计算为基础的转置雅克比矩阵法计算精确，但计算量相当大。

基金项目：教育部博士点基金支持项目(06D0006)。

Project Supported by Doctor Conferring Points Foundation of Ministry of Education (06D0006).

随着电力系统地发展和能量管理系统(EMS)系统的引入，人们对网损微增率在计算精度和计算速度上都提出了更高的要求[10-13]。现阶段我国实行全国联网，网络规模极大，使 B 系数法计算网损微增率在计算精度上的欠缺更加明显，而转置雅可比矩阵法由于计算量过大而不能满足在线要求[6,8]。本文在转置雅可比矩阵法基础上，提出一种基于直流雅可比矩阵的网损微增率算法—直流雅可比矩阵法，该算法克服了 B 系数法过分依赖网络结构、潮流状态和负荷水平的缺点，相对于转置雅克比矩阵法在计算量和计算速度上有了极大地提高。算例表明，所提算法在计算原理、计算速度和优化结果等方面的总体表现都可以满足现阶段大规模电力系统在线调度的要求，具有很大的优越性。

1 转置雅可比矩阵法的公式推导

设某电力系统共有 n 个节点，其中 m 个为 PQ 节点，由潮流计算可知，各节点注入功率的代数和等于网络的总损耗，可写出

$$\begin{aligned}\boldsymbol{S}_{\rm L} = \boldsymbol{P}_{\rm L} + {\rm j}\boldsymbol{Q}_{\rm L} = \sum_{i=1}^{n}(P_i + {\rm j}Q_i) = \\ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}V_iV_j(G_{ij}\cos d_{ij} + B_{ij}\sin d_{ij}) + \\ {\rm j}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}V_iV_j(G_{ij}\sin d_{ij} - B_{ij}\cos d_{ij})\end{aligned} \quad (1)$$

式中：$\boldsymbol{P}_{\rm L}$、$\boldsymbol{Q}_{\rm L}$为系统有功网损和无功网损；V_i、d_i为节点i上的电压幅值和电压相角，且 $d_{ij} = d_i - d_j$；G_{ij}、B_{ij} 为节点导纳矩阵元素的实部和虚部。由于 $G_{ij} = G_{ji}$、$B_{ij} = B_{ji}$ 以及 $\sin d_{ij} = -\sin d_{ji}$，则由式(1)可得

$$\boldsymbol{P}_{\rm L} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}G_{ij}V_iV_j\cos d_{ij} \quad (2)$$

由式(2)可知，系统总网损是节点电压和相角的函数，而由潮流方程可知，节点电压和相角是各发电机有功功率和无功功率的函数[14]，在较粗略地进行有功功率分配时，无功功率对网损的影响可以忽略。若令节点n为平衡节点，用P_{Gi}表示节点i的发电机有功功率，根据上述关系可出完整的网损微增率方程式

$$\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial P_{Gi}}=\sum_{i=1}^{n-1}\left(\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial d_i}\frac{\partial d_i}{\partial P_{Gi}}+\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial V_i}\frac{\partial V_i}{\partial P_{Gi}}\right)=$$

$$\left[\frac{\partial d_1}{\partial P_{Gi}},\ \frac{\partial d_2}{\partial P_{Gi}},\ \cdots\ ,\frac{\partial d_{n-1}}{\partial P_{Gi}}\right]\left[\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial d_1},\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial d_2},\cdots\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial d_{n-1}}\right]^{\mathrm{T}}+$$

$$\left[\frac{\partial V_1}{\partial P_{Gi}},\ \frac{\partial V_2}{\partial P_{Gi}},\ \cdots\ ,\frac{\partial V_m}{\partial P_{Gi}}\right]\left[\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial V_1},\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial V_2},\cdots\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial V_m}\right]$$

用矩阵形式表示为

$$\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial \boldsymbol{P}_G}=\frac{\partial \boldsymbol{\delta}}{\partial \boldsymbol{P}_G}\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial \boldsymbol{\delta}}+\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial \boldsymbol{P}_G}\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial \boldsymbol{V}}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \boldsymbol{\delta}}{\partial \boldsymbol{P}_G} & \dfrac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial \boldsymbol{P}_G}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial \boldsymbol{\delta}}\\ \dfrac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial \boldsymbol{V}}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{P}_G$ 为网损对除平衡节点外所有其它发电机节点有功功率的导数矢量，若系统中共有 G 台发电机，则$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{P}_G$ 是$(G-1)\times 1$阶矩阵；$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{\delta}$ 为网损对除平衡节点外所有其它节点电压相角的导数矢量，是$(n-1)\times 1$阶矩阵；$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{V}$ 为网损对所有 PQ 节点电压幅值的导数矢量，是$m\times 1$阶矩阵；$\partial \boldsymbol{\delta}/\partial \boldsymbol{P}_G$ 为各节点(除平衡节点)电压相角对除平衡节点外所有其它发电机节点有功功率的导数矩阵，是$(n-1)\times(G-1)$阶矩阵；$\partial \boldsymbol{V}/\partial \boldsymbol{P}_G$ 为各 PQ 节点电压模对除平衡节点外所有其它发电厂节点有功功率的导数矩阵，是$m\times(G-1)$阶矩阵。转置雅可比矩阵法求取网损微增率的问题就转化为求取$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{\delta}$、$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{V}$ 和 $\partial \boldsymbol{\delta}/\partial \boldsymbol{P}_G$、$\partial \boldsymbol{V}/\partial \boldsymbol{P}_G$ 的问题。

（1）求取$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{\delta}$、$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{V}$。

由式(2)对节点k的功角d_k求导，除$i=k,j\neq k$或$j=k,i\neq k$外，方程其它项均为零，故有

$$\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial d_k}=-\sum_{j=1,i=k,j\neq k}^{n}G_{kj}V_kV_j\sin d_{kj}+\sum_{i=1,j=k,i\neq k}^{n}G_{ik}V_iV_k\sin d_{ik}=$$

$$2\sum_{j=1}^{n}G_{jk}V_jV_k\sin d_{jk} \tag{4}$$

对于$k=1,2,\cdots,n-1$均做这样的运算即可得到所有的$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial d_k$。

同样对节点k的电压模V_k求导，除$i=k$或$j=k$外，其它项均为零，有

$$\frac{\partial \boldsymbol{P}_L}{\partial \boldsymbol{V}_k}=\sum_{j=1,i=k,j\neq k}^{n}G_{kj}V_j\cos d_{kj}+\sum_{i=1,j=k,i\neq k}^{n}G_{ik}V_i\cos d_{ik}+$$

$$2G_{kk}V_k\cos d_{kk}=2\sum_{j=1}^{n}G_{jk}V_k\cos d_{jk} \tag{5}$$

因此通过式(4)(5)可以分别得出矩阵$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{\delta}$、$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{V}$。

（2）求取$\partial \boldsymbol{\delta}/\partial \boldsymbol{P}_G$、$\partial \boldsymbol{V}/\partial \boldsymbol{P}_G$。

在极坐标形式的牛顿–拉夫逊法潮流计算中有修正方程式[14]

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{V}}\\ \dfrac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{V}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}=\boldsymbol{J}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{P}$ 为除平衡节点外系统全部节点上的注入有功功率不平衡矢量；$\Delta\boldsymbol{Q}$ 为注入无功功率不平衡矢量；$\Delta\boldsymbol{\delta}$ 为除平衡节点外全部节点电压相角变化量矢量；$\Delta\boldsymbol{V}$ 为 PQ 节点电压模变化量矢量；$\boldsymbol{J}$ 为潮流方程的雅可比矩阵，是$(m+n-1)\times(m+n-1)$阶方阵。使用 $\boldsymbol{J}$ 矩阵的逆矩阵表示，式(6)又可写为

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \boldsymbol{\delta}}{\partial \boldsymbol{P}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial \boldsymbol{P}}\\ \dfrac{\partial \boldsymbol{\delta}}{\partial \boldsymbol{Q}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial \boldsymbol{Q}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{V}}\\ \dfrac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{V}}\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\boldsymbol{J}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix} \tag{7}$$

式(7)反映出各节点(除平衡节点)电压相角变化量$\Delta\boldsymbol{\delta}$及 PQ 节点电压模变化量$\Delta\boldsymbol{V}$ 是各节点(除平衡节点)有功功率变化量$\Delta\boldsymbol{P}$及节点无功功率变化量$\Delta\boldsymbol{Q}$的函数。所求的$\partial \boldsymbol{\delta}/\partial \boldsymbol{P}_G$、$\partial \boldsymbol{V}/\partial \boldsymbol{P}_G$ 项包含在$\boldsymbol{J}^{-1}$的矩阵里，由矩阵中相对于有发电机节点的第$(G-1)$列元素构成。在求取$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{\delta}$、$\partial \boldsymbol{P}_L/\partial \boldsymbol{V}$ 和 $\partial \boldsymbol{\delta}/\partial \boldsymbol{P}_G$、$\partial \boldsymbol{V}/\partial \boldsymbol{P}_G$后，通过式(3)可获得网损微增率。

从上述推导可知，转置雅可比矩阵法需要通过求取一次$(n-1+m)\times(n-1+m)$矩阵的转置以及一个$(n-1+m)\times(G-1)$矩阵公式获得，计算量相当大，难以在速度上满足电力系统在线计算的要求。

2 直流雅可比矩阵法

对上述电力系统，式(6)中节点i的有功功率不平衡方程式亦可表示为

$$\Delta P_i=P_{Gi}-P_{Di}-b_i y-P_i(d,V)=0 \tag{8}$$

式中：P_{Di}为节点i负荷输出功率；y 为系统网络总

损耗，视为虚拟网损负荷变量，用以代替平衡机；b_i 为节点i所承担的网损负荷变量比例，设其为该节点负荷量与系统总负荷量的比值，并有 $\sum_{i=1}^{n} b_i = 1$；$P_i(d,V)$ 为节点i的输入有功功率总和，是节点i及其相邻节点功角和电压的函数，可表示为

$$P_i(d,V)=V_i\sum_{j=1}^{n}V_j(G_{ij}\cos d_{ij}+B_{ij}\sin d_{ij})$$

采用直流潮流法，若忽略无功功率对系统网损的影响，且假定各节点电压幅值的标幺值均为1，则式(8)中共有n个未知变量(令 $d_n=0$ 为参考角，未知功角 d 共有n–1个，以及一个网损负荷变量 y)。由于引入了网损负荷变量，系统不需要发电机平衡节点，功率不平衡等值方程同样共有n个，因此系统方程可以解。在方程组中，令 $y=\{d,y\}$，于是潮流方程可以用牛顿—拉夫逊法求解。上述方程在以 P_{Gi} 为控制变量的解空间 $\{y,P_{Gi}\}$ 中，有 $\mathrm{d}\Delta\boldsymbol{P}/\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{Gi}=0$。对式(8)进行求导，用矩阵形式可表示为

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\boldsymbol{P}}{\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{Gi}}=\frac{\partial\Delta\boldsymbol{P}}{\partial\boldsymbol{P}_{Gi}}+\frac{\partial\Delta\boldsymbol{P}}{\partial\boldsymbol{y}}\frac{\partial\boldsymbol{y}}{\partial\boldsymbol{P}_{Gi}}=\boldsymbol{0}$$

整理得

$$\frac{\partial\boldsymbol{y}}{\partial\boldsymbol{P}_{Gi}}=-\frac{\partial\Delta\boldsymbol{P}}{\partial\boldsymbol{y}}^{-1}\frac{\partial\Delta\boldsymbol{P}}{\partial\boldsymbol{P}_{Gi}}\tag{9}$$

其中 $\partial\Delta\boldsymbol{P}/\partial\boldsymbol{P}_{Gi}$ 表示各节点的有功不平衡量对节点i发电机有功功率的导数矩阵，为 $n\times1$ 阶。由式(8)可知，因为 P_{Gi} 只在第 i 个有功不平衡等式中出现，矩阵除第 i 项为1外，其余项均为0。$\partial\Delta\boldsymbol{P}/\partial\boldsymbol{y}$ 为 $n\times n$ 阶方阵，类似极坐标下的雅可比矩阵，本文定义为带有松弛负荷变量y 的有功不平衡方程雅可比矩阵，同样由$\boldsymbol{J}$表示

$$\frac{\partial\Delta\boldsymbol{P}}{\partial\boldsymbol{y}}=\begin{bmatrix}\frac{\partial\Delta P_1}{\partial d_1} & \cdots & \frac{\partial\Delta P_1}{\partial d_{n-1}} & \frac{\partial\Delta P_1}{\partial y}\\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots\\ \frac{\partial\Delta P_n}{\partial d_n} & \cdots & \frac{\partial\Delta P_n}{\partial d_{n-1}} & \frac{\partial\Delta P_n}{\partial y}\end{bmatrix}=\boldsymbol{J}\tag{10}$$

当J_{ij}表示第i行第j列元素，则有

$$J_{ij}=\begin{cases}B_{ii} & (i=j;j\neq n)\\ B_{ij}\cos d_{ij}-G_{ij}\sin d_{ij} & (i\neq j;j\neq n)\\ -b_i & (i=1,2,\cdots,n;j=n)\end{cases}\tag{11}$$

对于j=n项，根据式(8)有 $\partial\Delta P_i/\partial y=-b_i$，物理含义是发电机出力变化产生的网损在各节点上按节点负荷所占系统总负荷比重分配。矩阵 $\partial\boldsymbol{y}/\partial\boldsymbol{P}_{Gi}$ 中包含 $\partial d_1/\partial P_{Gi},\cdots,\partial d_{n-1}/\partial P_{Gi}$ 和 $\partial y/\partial P_{Gi}$ 等项，最后一项即为节点i发电机的网损微增率。将式(9)展开为

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial d_1}{\partial P_{Gi}}\\ \vdots\\ \frac{\partial d_{N-1}}{\partial P_{Gi}}\\ \frac{\partial y}{\partial P_{Gi}}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\frac{\partial\Delta P_1}{\partial d_1} & \cdots & \frac{\partial\Delta P_1}{\partial d_{N-1}} & -b_1\\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots\\ \frac{\partial\Delta P_N}{\partial d_N} & \cdots & \frac{\partial\Delta P_N}{\partial d_{N-1}} & -b_N\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}0\\ \vdots\\ \underbrace{1}_{i^{th}\text{项}}\\ \vdots\\ 0\end{bmatrix}\tag{12}$$

通过解式(12)获得转置的雅可比矩阵$\boldsymbol{J}^{-1}$后，第(n,i)项的相反数即为 $\partial y/\partial P_{Gi}$ (注意公式中有负号)。因此该方法只需求解式(10)的n阶带有松弛负荷变量y 的有功不平衡矩阵的转置矩阵，即可获得各个节点的网损微增率，其计算速度较转置雅可比矩阵法有很大地提高。另外，由于分散的网损负荷地引入，其潮流分布更接近实际电力系统，同时避免了选取不同平衡节点对结果的影响。该结果通过潮流计算得到，其精度远远高于B系数法。

如果把式(7)中的$\boldsymbol{J}$看成是解耦潮流中对应有功功率雅可比矩阵的话，可得到比式(10)计算规模简化的雅可比矩阵，然后仍需要根据式(3)求取网损微增率。同时解耦后求得的网损微增率只对应于除平衡节点以外的发电机节点，而平衡机节点的网损微增量不能获得，选取不同的平衡节点，获得的结果会略有不同。

应用直流雅可比法计算网损微增率，用解协调方程式的等微增率准则计算有功负荷经济分配的整个算法步骤和原理如图 1 所示。

需要说明的是，框图中步骤 6~12 实质是用牛顿–拉夫逊法解带有负荷网损变量y 的潮流模块，

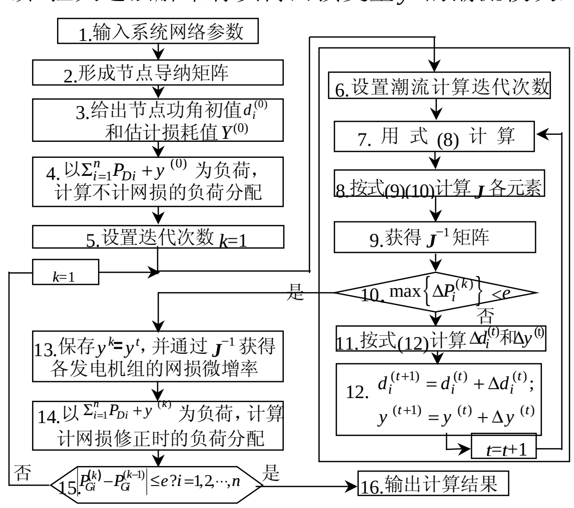

图 1　直流雅可比矩阵法在有功最优分配时应用框图

Fig.1　Flow chart for calculating active load economic dispatch with DC Jacobian matrix method

其修正方程为

$$\Delta \boldsymbol{y} = -\boldsymbol{J}^{-1}\Delta \boldsymbol{P} \tag{13}$$

步骤 14 中根据各发电厂的损耗微增率计算网损修正系数，将系统网损y 与各节点负荷有功功率一起作为系统总负荷有功功率，然后按照等微增率原理计算各发电厂应分配的发电有功功率 P_{Gi}。步骤 4 与 14 中的有功负荷经济分配方法，可从文献[14]中获得。

3 算例分析

图 2 为一个 5 节点系统，支路参数以标幺值形式标注在图上。各节点功率和发电设备特性如表 1~2 所示，均以标幺值形式表示。其中节点 1~3 为 PQ 节点，节点 4、5 为 PV 节点，并令节点 5 的功角为 0。

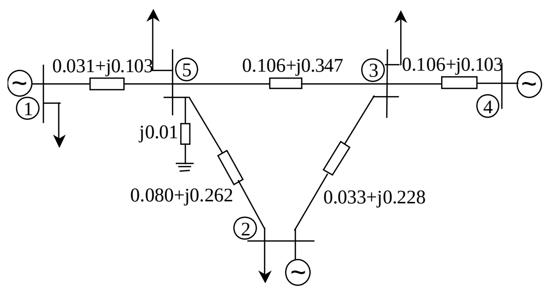

图 2 5 节点系统示意图

Fig. 2 Diagram of five bus system

表 1 各节点有功、无功功率

Tab. 1 Active and inactive power at each nodes

节点	P_D/pu	Q_D/pu	P_G/pu	Q_G/pu
1	0.86	0.20	待定	0.09
2	0.30	0.12	0	0.262
3	0.70	0.03	0	0.347
4	0	0	待定	待定
5	0.080	0.20	待定	待定

表 2 各发电设备特性

Tab. 2 Characteristics of generators

节点	P_{Gmin}/pu	P_{Gmax}/pu	dF/dP_G
1	0.50	2.00	$245+100P_G$
4	0.10	1.00	$351+100P_G$
5	0.10	1.00	$389+100P_G$

根据图 2 容易算出节点导纳矩阵，限于篇幅本文不列出。设各节点的初始功角均为 0，网络损耗 $y^{(0)}=0.06$，从而全系统应发有功功率为

$$\sum_{i=1}^{5} P_{Di} + y^{(0)} = 2.66 + 0.06 = 2.72$$

按不计网损的经济分配方法，得 3 台发电机有功功率分别为 1.74、0.68、0.30。然后进入潮流计算模块，求解各节点功角和网络损耗，每次潮流收敛后的 $d_i^{(k)}$ 和 $y^{(k)}$ 如表 3 所示。

保留潮流计算模块中最后一次 $\boldsymbol{J}^{-1}$ 矩阵，并从中获得各台发电机的网损微增率，利用式 $L_i = 1/(1-\mathrm{d}y/\mathrm{d}P_{Gi})$ 可获得网损修正系数，如表 4 所示。

表 3 每次潮流计算得到的各节点功角和系统损耗量

Tab. 3 The d_i and y of power flow calculation at every circulation time

k	d_1/(°)	d_2/(°)	d_3/(°)	d_4/(°)	y/pu
1	6.254	−9.165	−3.245	4.832	0.059 0
2	4.423	−3.931	−3.541	8.722	0.058 9
3	4.956	−3.864	−3.543	8.591	0.058 9

表 4 每次迭代的网损微增率和网损修正系数

Tab. 4 Incremental transmission losses and penalty factories at every calculation time

k	$\mathrm{d}y/\mathrm{d}P_{G1}$	L_1	$\mathrm{d}y/\mathrm{d}P_{G2}$	L_2	$\mathrm{d}y/\mathrm{d}P_{G3}$	L_3
1	0.094 3	1.104 1	0.076 6	1.082 9	0.075 3	1.081 5
2	0.032 9	1.034 0	0.082 0	1.089 3	0.095 8	1.105 2
3	0.085 7	1.093 7	0.032 5	1.033 6	0.029 1	1.031

值得注意的是，与 B 系数法和转置雅可比矩阵法不同，由于本算例采用的是虚拟网损负荷进行有功平衡，故不存在“平衡节点”网损修正值设定为 1 的情况。本文方法所获得的网损修正系数与传统的转置雅可比矩阵法表达式相同，但含义并不相同。如果用 L_i^* 和 L_i 分别表示通过传统转置雅可比矩阵法和本文方法获得的网损修正系数，则 L_i^* 是相对值，即各发电机节点相对于平衡节点的值，而 L_i 是独立值，是 L_i^* 的 L_n(参考节点的网损微增率)倍，即有 $L_i^* = L_i/L_n$。虽因 $d_n = 0$ 选择节点的不同 L_i 会有所不同，但由于各个发电机节点的网损修正系数乘以同一个倍数，并不影响按协调方程分配功率的计算结果，所以该方法在数学意义上是严格的。

获得各发电机的网损修正系数和网络损耗后，就可以计及网损修正时的负荷分配，每次计算所得的各发电机设备应发功率如表 5 所示。

表 5 计及网损修正的有功负荷经济分配结果

Tab. 5 Results of economic load dispatch considering transmission losses

k	P_{G1}/pu	P_{G2}/pu	P_{G3}/pu
1	1.745 3	0.521 6	0.449 1
2	1.710 8	0.549 3	0.458 9
3	1.708 4	0.551 2	0.459 4

由于本方法在潮流计算中采用了直流近似，而 $\mathrm{d}y/\mathrm{d}P_{Gi}$ 的获得也采用了近似公式，为检验这种近似计算的可行性，将本例的计算结果与采用 B 系数法和转置雅可比矩阵法计算情况相比较，如表 6。表中还一并列出了不计网损修正时的负荷分配，以及在内蒙古系统上应用这些方法进行负荷经济分配所耗时间和计算精度(与雅可比矩阵法获得各机组出力比较的标准差)。

表 6 几种负荷经济分配计算方法的比较

Tab. 6 Comparisons between some economic load dispatch calculation methods

方法		B 系数法	本例	雅可比矩阵法[7]	不计网损修正
5 节点系统	迭代次数	3	3	8	1
	迭代时间/ms	8	26	110	<1
	P_{G1}/pu	1.725	1.708 4	1.703	1.740
	P_{G2}/pu	0.563	0.551 2	0.547	0.680
	P_{G3}/pu	0.428	0.459 4	0.469	0.300
	网损	0.059	0.059	0.059	0.060
内蒙古系统	迭代时间/s	0.84	3.3	38	0.03
	标准差/%	4.61	0.71	0	10.3

由上表可见，本文所采用的方法在计算速度上较转置雅可比矩阵法有了极大地提高，同时因为本方法和基于转置的雅可比矩阵法一样，网损微增率依赖于潮流状态的计算，而不是依赖于 B 系数，所以计算精度比 B 系数法高，接近转置雅可比矩阵法。

4 结束语

雅可比矩阵法是一个理论上完整、计算效率很高的网损微增率计算方法。与阻抗矩阵法和 B 系数法等相比，其假设前提少，计算精度高。但在大规模网络的 EMS 系统中不能满足在线的要求，本文提出的直流雅可比矩阵法在计算原理、计算速度和优化结果等方面的总体表现都可以满足现阶段大规模电力系统在线调度的要求，具有很大的优越性。

参考文献

[1] 王刚军，王承民，李恒，等．基于实测数据的配网理论网损计算方法[J]．电网技术，2002，26(12)：19-22．
Wang Gangjun，Wang Chengmin，Li Heng，et al．Calculation method of theoretical network loss in power distribution network based on measured data[J]. Power System Technology，2002，26(12)：19-22(in Chinese)．

[2] 江辉，彭建春，欧亚平．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 Jianchun， Ou Yaping. Application of branch power loss allocation method in fair allocation of transmission power losses [J]．Power System Technology，2003，27(6)：7-12(in Chinese)．

[3] 赵勇，韩春立，李建华，等．兼顾降低网损和抑制谐波要求的配电系统优化运行[J]．中国电机工程学报，2003，23(1)：6-12．
Zhao Yong，Han Chunli，Li Jianhua，et al．Distribution network optimal operation for loss reduction and harmonics mitigation [J]．Proceedings of the CSEE，2003，23(1)：6-12(in Chinese)．

[4] Fallon S A，Gibson C A．On-line calculation of incremental transmission losses in an electric power system[C]．Conference Proceedings：1998 IEEE Southeastcon，1998：278-282．

[5] 魏立明，李卫东，肖宏飞．输电开放下基于交叉影响矩阵的损耗分摊方案研究[J]．中国电机工程学报，2004，24(1)：54-59．
Wei Liming，Li Weidong，Xiao Hongfei．Research on the cross detraction matrix based loss allocation scheme under transmission open access[J]．Proceedings of the CSEE，2004，24(1)：54-59(in Chinese)．

[6] Chen K，Liu X Q．Comparing on simplified formulas calculating incremental transmission losses with the method of impedance matrix[C]．Proceedings of the Sixth Annual Conference of IEE Japan Power & Energy，1995：119-124．

[7] 陈悬，李小锐，徐敏．网损微增率新解法与转置雅可比矩阵法用于有功优化计算的比较[J]．中国电机工程学报，2000，20(7)：34-36．
Chen Ken，Li Xiaoru，Xu Min．Comparisons between new method and transposed Jacobian matrix method for calculating incremental transmission losses in active power economic dispatch[J]．Proceedings of the CSEE，2000，20(7)：34-36(in Chinese)．

[8] 刘梓洪，程浩忠，刘晓冬，等．边际网损系数法中节点无功功率对电力市场网损分摊的影响[J]．电网技术，2004，28(3)：51-54．
Liu Zihong，Cheng Haozhong，Liu Xiaodong，et al．Influence of node-injected reactive power on loss allocation in electricity market by marginal loss coefficient method[J]．Power System Technology，2004，28(3)：51-54(in Chinese)．

[9] 刘长义，柳进，潘毅，等．高峰运行模式下动态优化调度的网损修正[J]．电网技术，2002，26(11)：50-52．
Liu Changyi，Liu Jin，Pan Yi，et al．Network loss modification in dynamic optimal dispatching under peak load operation mode [J]．Power System Technology，2002，26(11)：50-52(in Chinese)．

[10] 刘焕志，李扬，柏瑞．区域电力市场中实用网损计算及分摊的研究[J]．电网技术，2003，27(3)：63-68．
Liu Huanzhi，Li Yang，Bo Rui．Practical calculation and allocation of transmission losses in regional electricity market[J]．Power System Technology，2003，27(3)：63-68(in Chinese)．

[11] 于尔铿，刘广一，周京阳，等．能量管理系统(EMS)[M]．北京：科学出版社，1998．

[12] 周兴华，杜松怀．双边交易电力市场下基于核仁理论的网损分摊方法[J]．中国电机工程学报，2005，25(1)：60-65．
Zhou Xinghua，Du Songhuai．A novel nucleolus theory based allocation method of power losses in bilateral electricity markets [J]．Proceedings of the CSEE，2005，25(1)：60-65(in Chinese)．

[13] 王爽心，韩芳，朱衡君．基于改进变尺度混沌优化方法的经济负荷分配[J]．中国电机工程学报，2005，25(24)：91-96．
Wang Shuangxin，Han Fang，Zhu Hengjun．Economic load dispatch based on improved mutative scale chaotic optimization[J]．Proceedings of the CSEE，2005，25(24)：91-96(in Chinese)．

[14] 骆济寿．电力系统优化运行[M]．武汉：华中理工大学出版社，1990．

收稿日期：2007-03-05。

作者简介：

孔祥玉(1978—)，男，博士研究生，研究方向为电力市场、电力系统优化及电力系统稳定性分析，E-mail：kongxy06@163.com；

房大中(1946—)，男，教授，博士生导师，从事电力系统稳定性分析与控制的研究。

（实习编辑 王晔）