

电力系统扰动后稳态频率预测快速算法

赵茜茜, 王晓茹

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 研究了基于广域量测系统的电力系统频率稳定分析直接法的精度和复杂度, 提出了电力系统扰动后稳态频率预测快速算法。利用电力系统仿真软件 PSS/E 对 IEEE50 机改进测试系统进行了仿真试验, 比较了不同负荷模型方案对系统扰动后稳态频率的影响。通过蒙特卡洛法求解实现了所提出的快速算法, 它利用扰动后瞬间的广域量测数据, 快速预测出系统扰动后的稳态频率。预测的稳态频率与 PSS/E 仿真得到稳态频率相比很接近, 表明该快速算法求解速度快, 精度高。

关键词: 电力系统; 频率稳定; 广域量测系统; 直接法; 蒙特卡洛法

A fast predictive algorithm for power system post disturbances steady frequency

ZHAO Qian-qian, WANG Xiao-ru

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The accuracy and complexity of power system frequency stability analysis direct methods based on the WAMS (wide area measurement system) are studied, and a fast predictive algorithm for power system post disturbances steady frequency is proposed. The power system simulation software PSS/E is used to simulate the IEEE's 50-generator modified test system. The impacts of different load models on power system post disturbances steady frequency are compared. The proposed fast algorithm is achieved by using the Monte Carlo method. WAMS data right after disturbances is used to fast predict the steady frequency. System steady frequency by prediction is quite close to the steady frequency by PSS/E simulation. The results prove that the proposed fast algorithm has fast resolving speed and high accuracy.

Key words: power system; frequency stability; wide-area measurement system (WAMS); direct method; Monte Carlo method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0072-06

0 引言

频率是电力系统运行的一项重要参数, 频率稳定是保证电力系统安全稳定运行的全局性问题。当系统受到扰动引起功率缺额时, 频率就要下降, 严重时可能引起频率失稳导致大停电事故。国内外广泛应用低频减载作为电力系统安全稳定控制的最后一道防线^[1-3], 但是当系统或地区功率短缺严重时, 低频减载可能来不及动作从而导致频率崩溃^[4-5]。因此, 快速精确地预测系统扰动后的稳态频率, 对于制定紧急控制决策和措施具有十分重要的意义。电力系统频率稳定分析的直接法不需要进行逐步积分, 它利用雅可比矩阵因子表, 近似求取系统加速功率, 进而通过代数运算求得系统扰动后的稳态频率^[6-9]。广域测量系统 (Wide Area Measurement

System, WAMS) 以同步相量测量技术为基础, 为电力系统动态过程实时监测、分析和控制提供信息支持^[10-13]。文献[8]在文献[6-7]的基础上, 结合了广域量测技术, 利用扰动后瞬间的广域量测数据来计算雅可比矩阵, 从而预测出系统在扰动后的稳态频率, 但是该算法中节点注入功率增量表达式是一个近似表达式, 不够精确。文献[9]根据直角坐标潮流二次型方程及其泰勒展开式, 推导了节点注入功率增量精确表达式, 提高了频率稳定预测的精度, 从而建立稳态频率预测方程, 利用扰动后瞬间系统广域量测数据, 计算出系统扰动后的稳态频率, 但是该算法在构建稳态频率预测方程时需要进行大规模矩阵运算, 复杂度较高。

本文从理论上对基于广域量测的电力系统频率稳定分析直接法在精度和复杂度方面进行了对比分析。在此基础上对文献[9]中稳态频率预测方程进行改进, 提出一种系统稳态频率预测快速算法。在

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90610026)

IEEE50 机改进测试系统上针对不同的负荷模型进行了仿真试验。进行 FORTRAN 编程, 通过蒙特卡洛法求解实现了所提出的快速算法, 将预测的稳态频率与 PSS/E 仿真得到稳态频率进行了比较。

1 电力系统频率稳定分析直接法

系统惯性中心频率 ω_{sys} 定义为^[14]:

$$\omega_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (1)$$

式中: H_i , ω_i 分别为第 i 台发电机的惯性时间常数和角频率; n 为系统中的发电机数。

1.1 极坐标下的直接法

节点电压以极坐标表示时, 即 $\dot{V}_i = V_i \angle \theta_i$, 节点注入功率方程为:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i 、 Q_i 为节点 i 的有功和无功注入功率; V_i 、 V_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 为节点 i 、 j 之间的相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵元素的实部和虚部; n 为系统节点数。

对式 (2) 求增量, 参照修正方程形式表示^[8]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 为系统扰动后瞬间到稳态时的有功和无功注入功率增量; $\Delta \theta$ 、 $\Delta V/V$ 为电压幅值和相角增量; $\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}$ 与极坐标潮流方程中的雅可比矩阵表达式完全相同, 其元素值根据扰动后瞬间的系统广域量测数据结合节点导纳矩阵求出。

将扰动产生的发电机节点和负荷节点的功率增量方程代入式 (3), 考虑负荷的压变及频变效应, 得到扰动后系统稳态频率预测方程^[8]为:

$$\begin{bmatrix} H_G & N_G & -K_G \\ H_L & N_L & -\partial P_L / \partial \omega \\ J_L & L_L & -\partial Q_L / \partial \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_L / V_L \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_{\text{ag0}^+} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$N'_{L_{ij}} = N_{L_{ij}} - \partial P_{ij} / (\partial V_{ij} / V_{ij}) \quad (5)$$

$$L'_{L_{ij}} = L_{L_{ij}} - \partial Q_{ij} / (\partial V_{ij} / V_{ij}) \quad (6)$$

式中: 下标 G、L 分别表示发电机节点和负荷节点; $\Delta \theta$ 、 $\Delta V_L / V_L$ 、 $\Delta \omega$ 为待求未知量, 分别表示系统扰动后瞬间到稳态时的节点电压相位、电压幅值和系统频率的增量; K_G 为发电机的频率调节效应系

数; P_{ag0^+} 为发电机在扰动后瞬间的加速功率, 由广域量测系统提供; N'_L 、 L'_L 为 N_L 、 L_L 中的元素 $N_{L_{ij}}$ 、 $L_{L_{ij}}$ 减去负荷节点 j 上的负荷压变效应后的矩阵。

1.2 直角坐标下的直接法

节点电压以直角坐标表示时, 即 $\dot{V}_i = e_i + jf_i$, 节点注入功率方程为:

$$\begin{cases} P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_i 、 Q_i 为节点 i 的有功和无功注入功率; e_i 、 f_i 为节点电压的实部和虚部; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵元素的实部和虚部; n 为系统节点数。

对于 PV 节点, 电压有效值为设定值, 则:

$$V_i^2 = e_i^2 + f_i^2 \quad (8)$$

对式 (7) 和式 (8) 求增量, 根据直角坐标下潮流二次型方程的性质^[15-16], 参照修正方程形式表示^[9]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V^2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1(\Delta X) \\ F_2(\Delta X) \\ \vdots \\ F_{2n-1}(\Delta X) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 和 ΔV^2 分别为系统扰动后瞬间到稳态时的有功、无功注入功率增量和电压增量; Δf 、

Δe 为电压虚部和实部增量; $\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \\ R & S \end{bmatrix}$ 与直角坐标潮流

流方程中的雅可比矩阵表达式完全相同, 其元素值根据扰动后瞬间的系统广域量测数据结合节点导纳矩阵求出; $F_i(\Delta X)$ 为关于 ΔX 的二阶以上的残项。

将扰动产生的发电机节点和负荷节点的功率增量方程代入式 (9), 考虑负荷的压变及频变效应, 得到扰动后系统稳态频率预测方程^[9]为:

$$\begin{bmatrix} H_G & N_G & -K_G \\ H'_L & N'_L & -\frac{\partial P_L}{\partial \omega} \\ J'_L & L'_L & -\frac{\partial Q_L}{\partial \omega} \\ R & S & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta e \\ \Delta \omega \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_1(\Delta X) \\ F_2(\Delta X) \\ \vdots \\ F_{2n-1}(\Delta X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_{\text{ag0}^+} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$H'_{L_{ij}} = H_{L_{ij}} - \partial P_{ij} / \partial f_{ij} \quad (11)$$

$$N'_{L_{ij}} = N_{L_{ij}} - \partial P_{ij} / \partial e_{ij} \quad (12)$$

$$J'_{L_{ij}} = J_{L_{ij}} - \partial Q_{ij} / \partial f_{ij} \quad (13)$$

$$L'_{L_{ij}} = L_{L_{ij}} - \partial Q_{ij} / \partial e_{ij} \quad (14)$$

式中：下标 G、L 分别表示发电机节点和负荷节点； Δf 、 Δe 、 $\Delta \omega$ 为待求未知量，分别表示系统扰动后瞬间到稳态时的节点电压虚部、电压实部和系统频率的增量； K_G 为发电机的频率调节效应系数； P_{ag0^+} 为发电机在扰动后瞬间的加速功率，由广域量测系统提供； H'_L 、 N'_L 、 J'_L 、 L'_L 为 H_L 、 N_L 、 J_L 、 L_L 中的元素 H_{Lij} 、 N_{Lij} 、 J_{Lij} 、 L_{Lij} 减去负荷节点 j 上的负荷压变效应后的矩阵。

1.3 两种算法的精度对比分析

极坐标下的频率稳定分析直接法中，对系统节点功率方程进行泰勒展开求增量，得到增量方程如式 (3)，增量方程中完全忽略了 ΔP_i 、 ΔQ_i 中二次及其以上的项，以和极坐标潮流计算中的雅可比矩阵形式类似的一阶求导式来构成稳态频率预测方程式 (4)，不够精确。

直角坐标下的频率稳定分析直接法的稳态频率预测方程式 (10) 在形式上与直角坐标系统下的潮流方程进行泰勒展开后得到的表达式相同，依据直角坐标下潮流二次型方程的特殊结构特点^[16]，对潮流方程进行泰勒展开后， $F_i(X)$ 对 X 的二阶偏导数是常数、二阶以上偏导数为零，即 $F_i(\Delta X)$ 中不包含 ΔX 的高于二阶的项，所以直角坐标下潮流二次型方程的泰勒展开式是一个精确的表达式，没有经过线性化处理，没有任何近似，因此与此形式相同的稳态频率预测方程式 (10) 也是一个精确表达式，没有任何近似。

1.4 两种算法的复杂度对比分析

假定系统有 n 个节点，其中 m 个 PV 节点，1 个平衡节点(节点编号为 s)，则 PQ 节点数为 $n-m-1$ 。

极坐标下的稳态频率预测方程式 (4) 中，设平衡节点为参考节点，参考节点电压的幅值和相角不变，即未知数不包括平衡节点的 $\Delta \theta$ 和 $\Delta V/V$ ，但增加一个未知数 $\Delta \omega$ ，因此方程式 (4) 的未知数和维数都是 $2n-m-1$ ，这是一个含有 $2n-m-1$ 个未知数的线性方程组。

直角坐标下的稳态频率预测方程式 (10) 中，未知数不包括平衡节点的 Δf 和 Δe ，但增加一个未知数 $\Delta \omega$ ， $F_i(\Delta X)$ 是 ΔX 的二阶部分，式 (10) 是一个含有 $2n-1$ 个未知数的非线性方程组。

另外，根据直角坐标系下潮流二次型方程的性质^[15-16]，式 (10) 中 $F_i(\Delta X)$ 的形式与 $F_i(X)$ 形式完全相同，即：

$$F_i(\Delta X) = \Delta X^T J_i \Delta X \quad (15)$$

式中： $i = 2n-1$ ； $\Delta X = [\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_{s-1}, \Delta f_{s+1}, \dots, \Delta f_n, \Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_{s-1}, 0, \Delta e_{s+1}, \dots, \Delta e_n]^T$ ， ΔX^T 、 ΔX 分别

为 $1 \times 2n$ 、 $2n \times 1$ 维矩阵； J_i 为 $2n \times 2n$ 常系数实对称稀疏矩阵。

由上述分析可知，构建式 (10) 要比构建式 (4) 多做 $2n-1$ 次 $(1 \times 2n) \times (2n \times 2n) \times (2n \times 1)$ 维矩阵连乘，即：

$$\begin{cases} (8n^3 - 2n) \text{次} \rightarrow \text{乘法运算} \\ (8n^3 - 4n^2 - 2n + 1) \text{次} \rightarrow \text{加法运算} \end{cases} \quad (16)$$

对于一个具有 100 个节点的系统来说，相当于进行 7 999 800 次乘法运算、7 959 801 次加法运算；在具体编程实现算法的过程中，这样大规模的高维矩阵运算会占用大量计算机内存；而实际的电力系统中又往往包含有成千上万个节点，因此，直角坐标直接法的算法复杂度要高于极坐标直接法。

2 电力系统扰动后稳态频率预测快速算法

2.1 扰动后稳态频率预测快速算法

对于式 (10)，考虑到 ΔX^T 是 ΔX 的转置矩阵，其矩阵元素相同； J_i 是由节点导纳矩阵元素的实部和虚部构成的稀疏矩阵^[15]；凭借稀疏矩阵的特点和节点导纳矩阵中元素对称相同的特性，基于本文 1.4 节中假定的系统，将式 (10) 展开，推导出 $F_i(\Delta X)$ 的表达式。

$F_i(\Delta X)$ 中的有功部分， $F_{ip}(\Delta X) = \Delta X^T J_{ip} \Delta X$ ，其中 J_{ip} 为有功注入二次型方程中的 J_i 矩阵； $i_p = 1, 2, \dots, n$ ，即共有 n 个方程。

当 $i_p = 1, 2, \dots, n$ 且 $i_p \neq s$ 时，即除平衡节点外的节点的有功部分表达式可以写为：

$$\begin{aligned} F_{ip}(\Delta X) = \Delta X^T J_{ip} \Delta X = & \Delta f_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s \text{ 且 } j \neq i}}^n (\Delta e_j B_{ij} + \Delta f_j G_{ij}) + \\ & \Delta e_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s \text{ 且 } j \neq i}}^n (\Delta e_j G_{ij} - \Delta f_j B_{ij}) + \\ & \Delta e_i^2 G_{ii} + \Delta f_i^2 G_{ii} \end{aligned} \quad (17)$$

式中： i 为系统中除平衡节点外的所有节点的节点编号， $i = 1, 2, \dots, n$ 且 $i \neq s$ ； $j = 1, 2, \dots, n$ ， $j \neq s$ 且 $j \neq i$ 。

当 $i_p = s$ 时，即平衡节点的有功部分表达式可以写为：

$$F_{i_p=s}(\Delta X) = 0 \quad (18)$$

$F_i(\Delta X)$ 中的无功部分， $F_{iQ}(\Delta X) = \Delta X^T J_{iQ} \Delta X$ ，其中 J_{iQ} 为无功注入二次型方程中的 J_i 矩阵； $i_Q = 1, 2, \dots, n-m-1$ ，即共有 $n-m-1$ 个方程。

$$F_{i_0}(\Delta X) = \Delta X^T J_{i_0} \Delta X =$$

$$\Delta f_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s \text{ 且 } j \neq i}}^n (\Delta e_j G_{ij} - \Delta f_j B_{ij}) -$$

$$\Delta e_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s \text{ 且 } j \neq i}}^n (\Delta e_j B_{ij} + \Delta f_j G_{ij}) -$$

$$\Delta e_i^2 B_{ii} - \Delta f_i^2 G_{ii}$$
(19)

式中: i 为系统中 PQ 节点编号;
 $j=1, 2, \dots, n, j \neq s \text{ 且 } j \neq i$ 。

$F_i(\Delta X)$ 中的电压部分, $F_{i_v}(\Delta X) = \Delta X^T J_{i_v} \Delta X$, 其中 J_{i_v} 为节点电压二次型方程中的 J_i 矩阵, $i_v=1, 2, \dots, m$, 即共有 m 个方程。这是因为取平衡节点为参考节点时, 参考节点对应的增量方程只有有功方程而没有电压方程。

$$F_{i_v}(\Delta X) = \Delta X^T J_{i_v} \Delta X =$$

$$\Delta e_i^2 + \Delta f_i^2$$
(20)

式中, i 为系统中 PV 节点的编号。

由式 (17) ~ (20) 构建直角坐标系下频率稳定分析直接法稳态频率预测方程式 (10) 中的 $F_i(\Delta X)$ 部分, 不用先建立 J_i 矩阵, 不用经过式 (15) 的 $2n-1$ 次 $(1 \times 2n) \times (2n \times 2n) \times (2n \times 1)$ 维矩阵连乘, 只需结合广域量测提供的扰动后瞬间的系统参数和系统节点导纳矩阵元素, 即可建立整个稳态频率预测方程。

2.2 蒙特卡洛法

本文采用蒙特卡洛法来求解所建立的稳态频率预测方程式 (10), 式 (10) 是一个非线性方程组。求解非线性方程组有许多数值方法, 最常用的为线性化方法和求函数极小值方法。蒙特卡洛法是一种与一般数值方法有本质区别的计算方法^[17], 属于试验数学的一个分支, 其研究的问题大致可分为两种类型, 一种是问题本身是随机的; 另一种是问题本身属于确定性问题, 但可以建立它的解与特定随机变量或随机过程的数字特征或分布函数之间的联系, 利用随机模拟方法来解决, 求解非线性方程组属于第二种类型。蒙特卡洛法具有普适、简洁、高效和精确等优于其他求解非线性方程组的数值方法的特点, 它可满足任意设定的精度要求, 且不受非线性方程组不同类型的约束。

对于非线性方程组 $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, 其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。采用蒙特卡洛法求解非线性方程组一组实根的过程如下^[17]。

定义模函数为 $\|F\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2}$; 选取初值 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 并计算模函数值 $F_0 = \|F\|$; 选

取一个 $b > 0$, 在 $[-b, b]$ 上反复产生均匀分布的随机数 (r_1, r_2, \dots, r_n) 。对于每组随机数 (r_1, r_2, \dots, r_n) 计算 $(x_1 + r_1, x_2 + r_2, \dots, x_n + r_n)^T$ 的模函数值 F_1 , 直到使 $F_1 < F_0$, 此时令 $x_i = x_i + r_i$ ($i=1, 2, \dots, n$), $F_0 = F_1$ 。若连续产生 m 组随机数仍不能满足 $F_1 < F_0$, 则将 b 减半后再进行。重复上述过程, 直到 $F_0 < \varepsilon$ 为止, 此时的 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 即为非线性方程组 $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 的一组实根。

采用上述蒙特卡洛法求解式 (10) 时, 先以一次增量方程的计算结果作为求解该二次非线性方程组的初值 X ; 由于一次增量方程的解已经具有一定的精确度, 在此基础上, 权衡设置蒙特卡洛法随机数的生成区间 $[-b, b]$, 从而在最大程度上缩小 x_i 的取值范围, 保障计算的快速性。求解出扰动后瞬间到稳态的频率增量 $\Delta\omega$ 后, 结合广域量测系统提供的扰动后瞬间系统频率 ω_0 , 从而得出系统在扰动后的稳态频率为 $\omega_\infty = \Delta\omega + \omega_0$ 。

3 算例分析

3.1 仿真系统

将本文提出的稳态频率预测快速算法用于 IEEE50 机改进测试系统, 利用 PSS/E 机电暂态仿真软件进行仿真计算。该系统由文献[18]提供, 其中 145 号母线是平衡母线, 恒阻抗负荷所占比例为 5.02%, 其余均是恒功率负荷。IEEE50 机改进测试系统的 500 kV 主线图如图 1 所示。

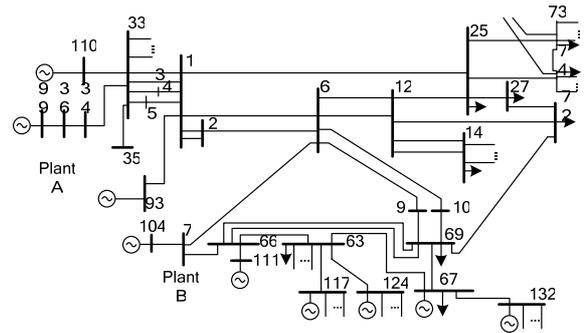


图 1 IEEE50 机改进测试系统的 500 kV 主线图
Fig.1 One line diagram of major 500 kV lines in the IEEE's 50-generator modified test system

3.2 仿真概述

0 s 时线路 1-25 在母线 1 端口处发生三相短路故障; 为清除故障, 在 0.15 s 时切除该故障线路, 由此可能造成系统暂态失稳; 选择在 0.18 s 切除 93 号发电机。仿真得到系统在不同负荷模型下的系统频率动态曲线如图 2 所示, 扰动后的稳态频率依次是 58.323 Hz、58.156 Hz、57.906 Hz 和 57.875 Hz。

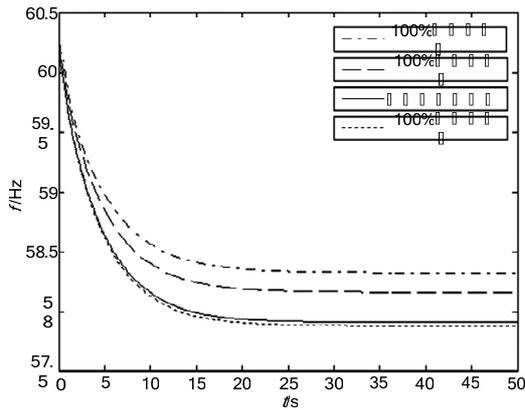


图 2 系统惯性中心频率曲线

Fig.2 System frequency curve of COI

3.3 仿真结果

分别采用极坐标直接法和直角坐标直接法计算系统在不同负荷模型下的扰动后稳态频率，与 PSS/E 仿真得到的稳态频率比较，结果如表 1 所示。

表 1 切机后仿真与计算的系统稳态频率

Tab.1 System steady frequencies after trip generator by simulation and calculation

负荷模型	PSS/E 仿真结果	计算结果	
		极坐标直接法	直角坐标直接法
100%恒阻抗负荷	58.323 Hz	58.484 Hz	58.420 Hz
100%恒电流负荷	58.156 Hz	58.166 Hz	58.158 Hz
原系统负荷模型	57.906 Hz	57.810 Hz	57.842 Hz
100%恒功率负荷	57.875 Hz	57.640 Hz	57.667 Hz

由表 1 可以看出，直角坐标直接法的算法精度要高于极坐标直接法，采用直角坐标直接法计算出的稳态频率更接近于实际仿真得到的结果。

应用本文提出的稳态频率预测快速算法构建直角坐标直接法中的稳态频率预测方程组，均采用蒙特卡洛法求解，通过 FORTRAN 编程实现算法，算法程序整体运行时间对比如表 2 所示。计算机配置为 Intel Core CPU T2300 1.66 GHz。

表 2 算法程序整体运行时间

Tab.2 The whole operation time of the algorithm programs

负荷模型	计算结果		算法程序整体运行时间	
	直角坐标直接法	本文快速算法	直角坐标直接法	本文快速算法
		结果		时间
100%恒阻抗负荷	58.420 Hz	92.500 00 s	58.420 Hz	0.437 500 s
100%恒电流负荷	58.158 Hz	91.781 25 s	58.158 Hz	0.421 875 s
原系统负荷模型	57.842 Hz	56.875 00 s	57.842 Hz	0.296 875 s
100%恒功率负荷	57.667 Hz	55.921 88 s	57.667 Hz	0.281 250 s

由表2可以看出，本文提出的稳态频率预测快速算法可以大大减少算法程序整体运算时间，该算法求解快、精度高。

4 结论

直角坐标下的频率稳定分析直接法预测出的稳态频率有较高的精度，但其算法在实际应用时的复杂度也较高。本文基于直角坐标直接法提出了电力系统扰动后稳态频率预测快速算法，进行 FORTRAN 编程，通过蒙特卡洛法求解实现了所提出的快速算法。该快速算法不仅能保持原直角坐标直接法的高精度，而且求解速度大大加快。不同负荷模型下的 IEEE50 机改进测试系统的仿真试验结果也证明了这一点。通过本文提出的电力系统扰动后稳态频率预测快速算法快速准确地预测系统扰动后的稳态频率，在此基础上判定扰动后的系统能否正常运行，然后根据预测结果制定合适的紧急控制策略，以保证电力系统的安全稳定运行，因此该算法对电力系统扰动后的频率安全稳定性分析与紧急控制具有重要的意义。

参考文献

- [1] 陈俊山, 洪兰秀, 郑志远. 电力系统低频减载研究与应用发展[J]. 继电器, 2007, 35(14): 79-82. CHEN Jun-shan, HONG Lan-xiu, ZHENG Zhi-yuan. Investigation and application of under-frequency loading shedding[J]. Relay, 2007, 35(14): 79-82.
- [2] Anderson P M, Mirheydar M. An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 647-655.
- [3] 熊小伏, 周永忠, 周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 48-51. XIONG Xiao-fu, ZHOU Yong-zhong, ZHOU Jia-qi. Study of underfrequency load shedding scheme based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51.
- [4] 袁季修. 防止电力系统频率崩溃的紧急控制[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(4): 1-4. YUAN Ji-xiu. Emergency control for preventing frequency collapse of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(4): 1-4.
- [5] 王新超, 胡杰. 互联系统低频减载方案探讨[J]. 继电器, 2002, 30(2): 6-9. WANG Xin-chao, HU Jie. A new load shedding scheme for limiting underfrequency[J]. Relay, 2002, 30(2): 6-9.
- [6] 李秀卿, 蔡泽祥. 电力系统低频减载控制优化算法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 23-25. LI Xiu-qing, CAI Ze-xiang. An optimal algorithm of

- underfrequency load shedding in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 23-25.
- [7] 蔡泽祥, 徐志勇, 申洪. 电力系统频率稳定分析的直接法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5-6): 13-17.
CAI Ze-xiang, XU Zhi-yong, SHEN Hong. A direct method for frequency stability analysis of power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(5-6): 13-17.
- [8] 张薇, 王晓茹, 廖国栋. 基于广域量测数据的电力系统自动切负荷紧急控制算法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 69-73.
ZHANG Wei, WANG Xiao-ru, LIAO Guo-dong. Automatic load shedding emergency control algorithm of power system based on wide-area measurement data[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 69-73.
- [9] 王晓茹, 阮铮, 刘克天. 电力系统扰动后稳态频率预测直接法改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(4): 1-5.
WANG Xiao-ru, RUAN Zheng, LIU Ke-tian. Improvement of direct predictive algorithm of power system steady frequency after disturbances[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(4): 1-5.
- [10] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
CHANG Nai-chao, LAN Zhou, GAN De-qiang, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52.
- [11] 薛禹胜, 徐伟, 万秋兰, 等. 关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 1-5.
XUE YU-sheng, XU Wei, WANG Qiu-lan, et al. A review of wide area measurement system and wide area control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 1-5.
- [12] 丁剑, 白晓民, 王文平, 等. 电力系统中基于PMU同步数据的应用研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(6): 78-84.
DING Jian, BAI Xiao-min, WANG Wen-ping, et al. Overview of application researches based on synchronous data measured by PMUs in power System[J]. Relay, 2006, 34(6): 78-84.
- [13] Larsson M, Christian R. Predictive frequency stability control based on wide-area phasor measurements[C]. //IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago(USA): 2002.
- [14] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability[M]. Piscataway, N J IEEE Press: Wiley-Interscience, 2003.
- [15] 程浩忠. 电力系统直角坐标潮流二次方程新的表达式[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 211-213.
CHENG Hao-zhong. A novel quadratic formulation of load flow equations in rectangular coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 211-213.
- [16] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun, YAN Zheng. Advanced power system analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [17] Fishman G. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications[M]. Springer, 1999.
- [18] Thorp J S, Wang X R, Hopkinson K M, et al. Agent technology applied to the protection of power systems, chapter 7 of the book: autonomous systems and intelligent agents in power system control and operation[M]. Christian R, edited. Springer, 2003.

收稿日期: 2010-01-13; 修回日期: 2010-04-09

作者简介:

赵茜茜 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: zhaoqq_0921@163.com

王晓茹 (1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护和安全稳定控制、变电站自动化技术方面的教学与研究工作。

(上接第 71 页 continued from page 71)

- [13] Chung C Y, Wang K W, Cheng C K, et al. Machine and load modeling in large scale power industries[J]. IEEE Industry Applications Society, 1998: 7-15.
- [14] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Multi-machine eigenvalue sensitivities of power system parameters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (2): 741-747.

收稿日期: 2010-01-08; 修回日期: 2010-04-06

作者简介:

李奎奎 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: lexiao2008@163.com

王克文 (1964-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制;

邱磊 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。