

基于半张量理论的电力系统稳定域边界逼近 (二)应用

马 进¹, 程代展², 梅生伟³, 卢 强³

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京市 102206)

(2. 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京市 100080; 3. 清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要:电力系统稳定域边界的逼近一直是应用能量函数方法分析电力系统暂态稳定的难点。采用能量函数方法所应用的电力系统数学模型, 基于半张量理论所给出的电力系统稳定域边界逼近算法, 文中分别对单机无穷大系统及 IEEE 3 机 9 节点标准测试系统的稳定域边界进行逼近, 并依据近似的稳定域边界估计了临界切除时间。通过对近似稳定域边界的可视化及与传统的等能量函数曲线稳定域边界的对比, 充分显示近似稳定域边界提高了直接法分析电力系统暂态稳定的精度。进一步指出了应用半张量方法逼近电力系统稳定域边界仍需深入研究的问题。

关键词:电力系统暂态稳定; 稳定域边界; 能量函数方法; 半张量理论

中图分类号: TM712

0 引言

电力系统暂态稳定对电网的安全运行具有重要影响, 数次大停电事故都显示暂态失稳往往是引起大面积停电的起因^[1-4]。分析电力系统暂态稳定的方法主要有时域仿真法与直接法。由于时域仿真方法计算费时, 而且不能给出稳定裕度等信息, 因此不适于在线动态安全分析; 而直接法不需要逐步积分, 能够快速判定系统暂态稳定性, 因此在电力系统在线动态安全分析中得到广泛应用^[1-2]。

能量函数方法是直接法中的一类方法, 其理论基础是李雅普诺夫稳定性理论。李雅普诺夫稳定性理论指出: 非线性动力系统的稳定平衡点一定存在一个邻域, 从该邻域内出发的轨线都收敛于该稳定平衡点, 这个邻域就称为该稳定平衡点的吸引域, 简称稳定域。因此, 应用能量函数方法判定电力系统暂态稳定的关键在于: 判定电力系统拓扑结构不再改变(即开关最后一次动作)后, 电力系统的初始状态是否位于稳定平衡点的吸引域内。如果故障后系统的初始状态位于稳定域内, 则系统是暂态稳定的; 反之则暂态失稳。这使得对稳定域边界的正确描述成为应用能量函数方法的关键。另一方面, 对暂态稳定域的描述也是建立电力系统动态安全域的基础^[5]。

近 20 年来, 将能量函数方法应用于电力系统暂态稳定的实践中, 先后采用过最近不稳定平衡点的能量^[6-7]、势能界面^[8]、主导不稳定平衡点的能量^[9]来近似稳定域的边界。文献^[10-11]运用非线性几何动力学理论, 以电力系统为例, 描述了一类非线性系统稳定域边界的拓扑特性, 指出在一定条件下, 稳定域边界是由不稳定平衡点的稳定流形所组成。从此, 大量研究致力于描述不稳定平衡点的稳定流形^[12-16], 其中最为突出的是基于正规形法的二阶近似与逆轨迹法。然而由于电力系统稳定域边界的复杂性, 对其的逼近迄今仍是一个难题。文献^[17]基于半张量理论, 提出了一种基于矩阵运算的电力系统稳定域边界逼近算法, 可以实现对稳定域边界足够高阶的逼近, 而算法本身不需要进行任何形式的非线性变换, 易于计算机实现。

针对能量函数方法所应用的电力系统数学模型, 本文研究了半张量理论在电力系统稳定域边界逼近中的应用; 并以单机无穷大系统及 IEEE 3 机 9 节点标准测试系统为例, 显示了所提出的算法的有效性。本文进一步指出了应用半张量方法逼近电力系统稳定域边界仍需继续深入研究的问题。

1 电力系统数学模型

1 电力系统数学模型

将能量函数方法应用于电力系统暂态稳定分析的一个最大障碍就是模型问题。众所周知, 并非所有的电力系统模型都能够构造严格的李雅普诺夫函数。构造能量函数的难点在于对负荷的处理, 能量

收稿日期: 2005-12-11。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217901); 国家自然科学基金重大项目(50595410); 华北电力大学博士学位教师科研基金资助项目(Dr. 2004-11)

函数方法中,广为使用的负荷模型是恒阻抗模型,相应的发电机模型往往采用经典模型,并将网络结构收缩到发电机内节点。对于一个含有 n 台机的电力系统,第 i 台机的动态可以描述为:

$$\dot{\delta}_i = \Delta\omega_i\omega_0 \quad (1)$$

$$2H_i\Delta\dot{\omega}_i = -d_i\Delta\omega_i + P_{mi} - P_{ei} \quad (2)$$

$$P_{ei} = (E_i')^2 G_{ii} + \sum_{j=1}^n E_i' E_j' B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3)$$

式中: δ_i, δ_j 分别为第 i 台与第 j 台发电机相对于同步旋转轴的转子角; ω_0 为同步转速; $\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_0$ 为第 i 台发电机的转速偏差; $2H_i$ 为第 i 台发电机的惯性时间常数; d_i 为第 i 台发电机的阻尼系数; P_{mi} 为第 i 台发电机的机械功率输入; P_{ei} 为第 i 台发电机的电磁功率输出; E_i' 与 E_j' 分别为第 i 台与第 j 台发电机的内电势; G_{ii} 为第 i 台发电机所连母线的自电导; B_{ij} 为 i, j 母线间的互电纳。

对于式(1)~式(3)的电力系统,存在严格的李雅普诺夫函数如下:

$$V(\delta, \Delta\omega) = \sum_{i=1}^n \omega_0 H_i \Delta\omega_i^2 - \sum_{i=1}^n (P_{mi} - (E_i')^2 G_{ii}) \delta_i - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i' E_j' B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4)$$

如果考虑线路的互电导,则只存在近似的能量函数:

$$V(\delta, \Delta\omega) = \sum_{i=1}^n \omega_0 H_i \Delta\omega_i^2 - \sum_{i=1}^n (P_{mi} - (E_i')^2 G_{ii}) \cdot (\delta_{ci} - \delta_{si}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i' E_j' B_{ij} \cdot (\cos \delta_{ij}^c - \cos \delta_{ij}^s) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i' E_j' \cdot G_{ij} \frac{a}{b} (\sin \delta_{ij}^c - \sin \delta_{ij}^s) \quad (5)$$

式中:

$$\frac{a}{b} = \frac{(\delta_{ci} + \delta_{cj}) - (\delta_{si} + \delta_{sj})}{\delta_{ij}^c - \delta_{ij}^s} \quad (6)$$

$$\delta_{ij}^c = \delta_{ci} - \delta_{cj} \quad (7)$$

$$\delta_{ij}^s = \delta_{si} - \delta_{sj} \quad (8)$$

δ_{ci} 与 δ_{cj} 分别为故障切除瞬间节点 i 与节点 j 的发电机功角; δ_{si} 与 δ_{sj} 分别为故障后系统平衡点所对应的节点 i 与节点 j 的发电机功角。

式(5)实际给出了故障切除瞬间系统初始状态所对应的能量 V_c 。为了判断故障后系统的初始状态是否位于稳定平衡点的吸引域内,需要根据式(5)进一步求出稳定域边界所对应的能量 V_{cr} , 并比较

V_c 与 V_{cr} 的大小。如果 $V_c < V_{cr}$, 则系统的初始状态位于稳定域内,系统是暂态稳定的;如果 $V_c > V_{cr}$, 系统的初始状态则位于稳定域外,系统是暂态不稳定的;而 $V_c = V_{cr}$ 意味着系统的初始状态位于稳定域边界上,系统是临界暂态稳定的。目前一般采用主导不稳定平衡点所对应的能量作为稳定域的边界,有可能引入较大的误差。

2 电力系统暂态稳定域边界逼近

$X \odot Y$ 表示向量 X 与 Y 的左半张量积。由式(1)~式(3)所示的电力系统数学模型,记 $x = [x_1, x_2, \dots, x_{2n}]^T = [\delta_1, \Delta\omega_1, \delta_2, \Delta\omega_2, \dots, \delta_n, \Delta\omega_n]^T$, 则在半张量乘法下,二次多项式与三次多项式的自然基可以写为^[17]:

$$x_{(2)} = [x_1, x_2, \dots, x_{2n}]^T \odot [x_1, x_2, \dots, x_{2n}]^T = [x_1^2, x_1 x_2, \dots, x_1 x_{2n}, x_2^2, x_2 x_3, \dots, x_2 x_{2n}, \dots, x_{2n}^2]^T \quad (9)$$

$$x_{(3)} = x_{(2)} \odot [x_1, x_2, \dots, x_{2n}]^T = [x_1^3, x_1^2 x_2, \dots, x_1^2 x_{2n}, x_1 x_2 x_3, x_1 x_2 x_4, \dots, x_1 x_2 x_{2n}, \dots, x_{2n}^3]^T \quad (10)$$

记式(1)~式(3)所示的第 i 台发电机的功角动态与角速度动态分别为 f_{2i-1} 与 f_{2i} ($i=1, 2, \dots, n$), 则半张量乘法意义下,式(1)~式(3)的 Jacobi 矩阵^[17]为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{2n}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_{2n}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_{2n}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{2n}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{2n}}{\partial x_{2n}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & \dots & 0 \\ -\sum_{j=2}^n E_1' E_j' B_{1j} \cos(\delta_1 - \delta_j) & \frac{-d_1}{2H_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_n' E_1' B_{n1} \cos(\delta_n - \delta_1) & 0 & \dots & \frac{-d_n}{2H_n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

而半张量乘法理论中的 Hessen 矩阵是将 Jacobi 矩阵中的元素 $J_{ij} = \partial f_i / \partial x_j$ 用行向量 $[\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_1}, \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_2}, \dots, \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_{2n}}]$ 代替^[17]。从式(11)可以看出,半张量乘法中的 Jacobi 矩阵与普通矩阵运算无异,但半张量乘法中的 Hessen 矩阵则不同于普通矩阵运算,进一步可将 Hessen 矩阵中的元

素 H_{ij} 再用行向量 $\left[\frac{\partial H_{ij}}{\partial x_1}, \frac{\partial H_{ij}}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial H_{ij}}{\partial x_{2n}}\right]$ 代替,分别记 Hessen 矩阵与替换后的矩阵为 F_2 与 F_3 ,同法可得电力系统动态方程更高阶的泰勒展开多项式的系数矩阵 $F_k (k > 3)$,则按文献[17],主导不稳定平衡点 x_u 处的稳定域边界可近似为:

$$h(x) = H_1 x + G_2 x_{(2)} + G_3 x_{(3)} + \dots \quad (12)$$

式中: n 维向量 H_1^T 是 J^T 在 x_u 处不稳定特征根的右特征向量。 G_2 与 G_3 可通过下式求得:

$$G_k = \left[\sum_{i=1}^{k-1} G_i T_B(n, i) \Phi_{i-1} (I_n^{i-1} \otimes F_{k-i+1}) \right] \cdot T_N(n, k) C_k^{-1} \quad (13)$$

式中: $G_1 = H_1$, $T_B(n, i)$ 与 $T_N(n, k)$ 分别为半张量理论中非自然基与自然基之间的变换矩阵; Φ_{i-1} 为 x^{k+1} 微分的系数矩阵; I_n^{i-1} 是阶数为 n^{i-1} 的单位矩阵; C_k 为与 k 阶逼近系数矩阵 G_k 相关的常数系数矩阵。各矩阵的计算方法见文献[17]。

由式(9)、式(10)中 x 的阶数可以看出,式(12)的前3项是对稳定域边界的三阶逼近;更高阶的逼近按同理保留更多的项即得。

基于电力系统稳定域边界的逼近表达式(12),判断系统的暂态稳定性就变得非常简单。只要将稳定平衡点与故障后系统初始点代入稳定域边界的近似数学表达式中,对稳定性的判别就转化为对代数表达式符号的判定;如果符号相同,则系统的状态轨线没有穿越稳定域的边界,故障后的电力系统暂态稳定;如果符号相异,则系统的状态轨线已经穿越了稳定域的边界,故障后的电力系统暂态失稳;如果稳定域边界近似表达式的值接近0,则故障后的电力系统处于临界稳定状态。

3 单机无穷大系统的稳定域边界逼近

图1为一单机无穷大系统的单线图,系统参数见文献[6],其中, A, B 分别表示低压端与高压端。

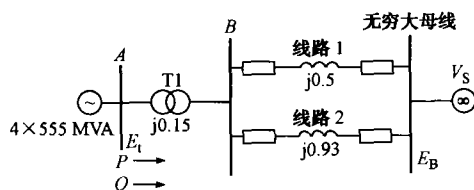
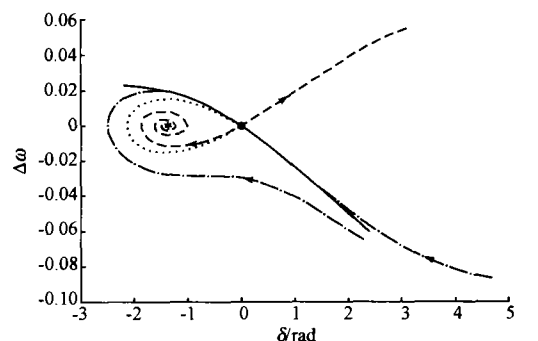


图1 单机无穷大系统
Fig. 1 One-machine infinite-bus system

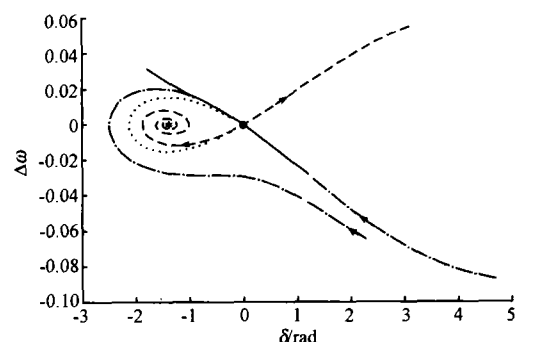
假设在1s时,线路2在靠近母线B侧发生三相短路,继电保护装置动作切除故障,故障后的系统只有线路1单线运行。图2至图4分别给出了对稳定域边界的二阶、五阶与六阶逼近以及不稳定平衡

点的稳定流形,即精确的稳定域边界。图中给出了近似稳定域边界的最大势能的等能量函数曲线,即势能界面。从图中可以看出:随着对稳定域边界逼近阶数的升高,稳定域边界的逼近效果越来越好;并且与等能量函数曲线相比,稳定域边界的逼近给出了更为精确的结果。图中, $\Delta\omega$ 采用标么值。



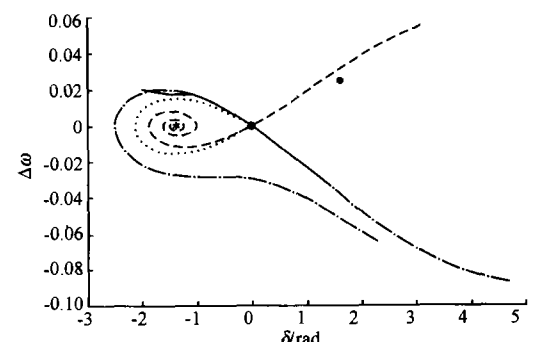
• 稳定平衡点; • 不稳定平衡点; --- 不稳定流形; —— 稳定流形
—— 稳定流行的二阶逼近; 临界等能量曲线

图2 稳定域边界的二阶逼近
Fig. 2 Second order approximation on the stability boundary



• 稳定平衡点; • 不稳定平衡点; --- 不稳定流形; —— 稳定流形
—— 稳定流行的二阶逼近; 临界等能量曲线

图3 稳定域边界的五阶逼近
Fig. 3 Fifth order approximation on the stability boundary

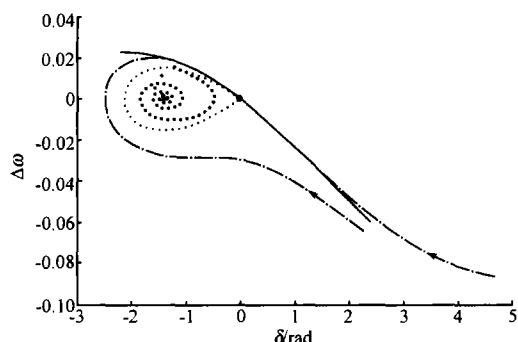


• 稳定平衡点; • 不稳定平衡点; --- 不稳定流形; —— 稳定流形
—— 稳定流行的二阶逼近; 临界等能量曲线

图4 稳定域边界的六阶逼近
Fig. 4 Sixth order approximation on the stability boundary

分别采用等能量函数曲线、稳定域边界的二阶近似、四阶近似,计算所得临界切除时间分别为 0.125 s, 0.154 s, 0.168 s, 采用时域仿真计算所得临界切除时间为 0.174 s。可以看出:当稳定域边界采用四阶近似时,所算出的临界切除时间已经非常接近于真正的临界故障切除时间。

图 5 给出了采用等能量函数曲线计算所得故障切除时间为 0.125 s 时的相平面内故障轨线。从图 5 可以看出,在这个临界切除时间下,故障后系统的相平面轨线撞到等能量函数曲线,然后返回并最终收敛到稳定的平衡点。显然,对应于等能量函数曲线,这是一条临界轨线。

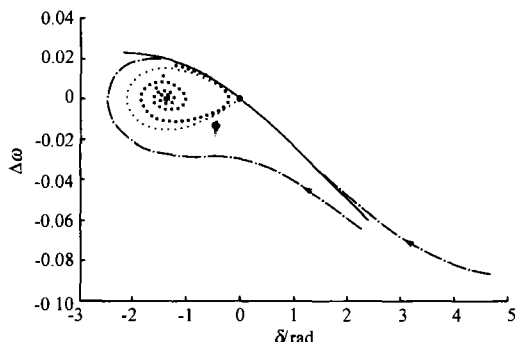


• 稳定平衡点; • 不稳定平衡点; — 稳定流形; — 稳定流行的二阶逼近
..... 临界等能量曲线; 系统受扰轨迹

图 5 运用等能量函数曲线计算故障临界切除时间

Fig. 5 CCT calculation based on the energy contour

图 6 给出了采用四阶逼近所得故障切除时间为 0.168 s 时相平面内的故障轨线。从图 6 可以看出,在故障切除时间为 0.168 s 时,系统的相平面轨线穿过等能量函数曲线,撞到了近似的稳定域边界,然后折回,最终收敛到稳定平衡点。这是一条对应于稳定域边界四阶逼近的临界轨线。



• 稳定平衡点; • 不稳定平衡点; — 稳定流形; — 稳定流行的二阶逼近
..... 临界等能量曲线; 系统受扰轨迹

图 6 运用四阶近似稳定域边界计算故障临界切除时间

Fig. 6 CCT calculation based on the fourth order approximation on the stability boundary

4 IEEE 3 机 9 节点标准测试系统的稳定域边界可视化

图 7 给出了电力系统稳定性分析的一个标准 3 机 9 节点测试系统,系统参数见文献[18]。

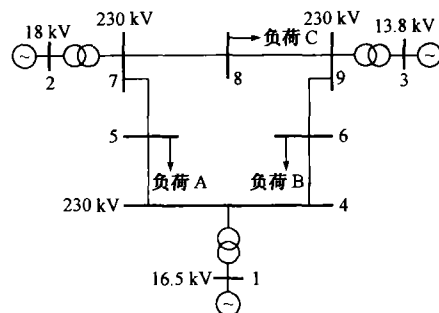
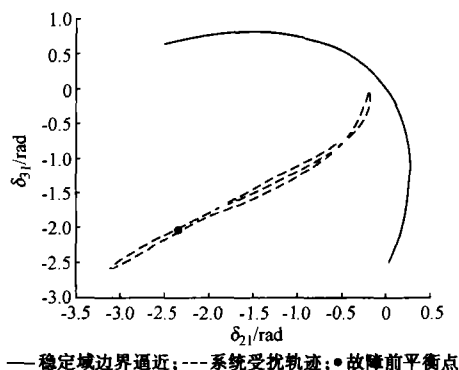


图 7 IEEE 3 机 9 节点测试系统
Fig. 7 IEEE 3-machine 9-bus test system

假设线路 5-7 在靠近母线 5 处发生三相短路,继电保护动作切除故障。图 8 显示了在相对于发电机 1 的功角空间内近似的稳定域边界,以及在应用近似的稳定域边界所得出的临界切除时间 ($t_{cl} = 0.166$ s) 下相平面内系统的动态轨线。从图 8 可以看出,故障后系统的相轨迹没有穿越近似的稳定域边界,因此系统是稳定的。



— 稳定域边界逼近; --- 系统受扰轨迹; • 故障前平衡点

图 8 近似的稳定域边界及 0.166 s 切除故障时的功角平面相轨线
Fig. 8 Approximated boundary of stability region and the phase portrait of trajectory with the fault clearing time at 0.166 s

图 9 显示了逐步积分所求得的发电机功角曲线,曲线表明运用近似稳定域边界所得的判断是正确的。当故障切除时间增加 4 ms,即在 0.17 s 切除故障时,由图 10 可见,故障切除时刻系统功角的相平面轨线已经穿越了近似的稳定域边界,所以由图 10 可以判定,系统是失稳的。逐步积分获得的功角时域仿真曲线示于图 11 中。从图 11 可见,系统失去了同步。

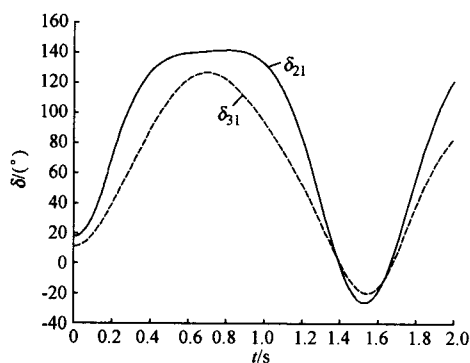


图 9 0.166 s 切除故障的功角曲线
Fig. 9 Rotor angle dynamics with the fault clearing time at 0.166 s

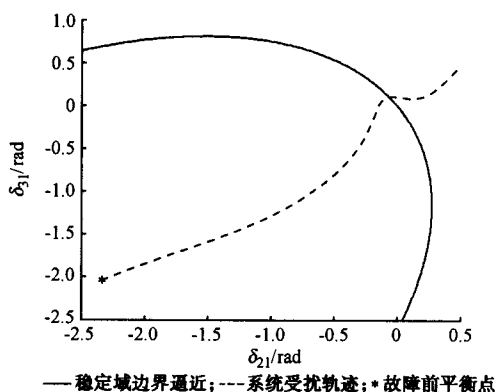


图 10 近似的稳定域边界及 0.17 s 切除故障的功角平面相轨线
Fig. 10 Approximated boundary of stability region and the phase portrait of trajectory with the fault clearing time at 0.17 s

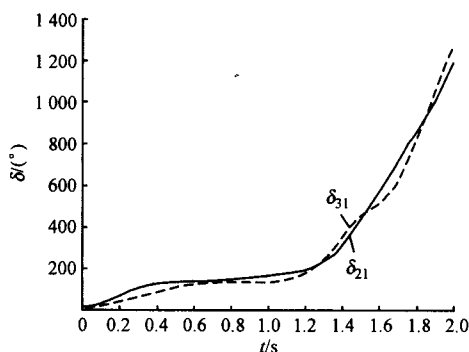


图 11 0.17 s 切除故障的功角曲线
Fig. 11 Rotor angle dynamics with the fault clearing time at 0.17 s

5 结语

本文在能量函数方法所应用的电力系统数学模型基础上,基于半张量理论所给出的电力系统稳定域边界逼近算法,分别对单机无穷大系统及 IEEE 3 机 9 节点标准测试系统的稳定域边界进行逼近,充

分显示近似稳定域边界提高了直接法分析电力系统暂态稳定的精度。仿真分析表明了基于半张量方法逼近稳定域边界算法的准确性。

半张量方法是一种非线性系统的矩阵方法^[19],在应用半张量方法求解电力系统稳定域边界的过程中,随着系统阶数的升高,半张量方法的中间计算结果所产生的矩阵阶数也迅速增大,限制了将半张量方法直接应用于实际电力系统。但同时也发现这些矩阵具备高度稀疏的特点,因此,如何将半张量方法与电力系统的稀疏技术相结合,就成为将半张量方法应用于更大规模电力系统的关键,这方面的研究工作仍需进一步深入。

参考文献

- [1] 傅书通,倪以信,薛禹胜. 直接法稳定分析. 北京:中国电力出版社,1999.
FU Shuti, NI Yixin, XUE Yusheng. Direct methods on stability analysis. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] FOUAD A A, VITTAL V. Power system transient stability analysis using the transient energy function method. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1992.
- [3] NERC. Review of selected 1999 electric system disturbances in North American[EB/OL]. [2005-09-10]. <http://www.nerc.com>.
- [4] NERC. Review of selected 2000 electric system disturbances in North American[EB/OL]. [2005-09-10]. <http://www.nerc.com>.
- [5] 薛安成,梅生伟,卢强,等. 基于网络化模型的电力系统动态安全域近似. 电力系统自动化,2005,29(13):18-23.
XUE Ancheng, MEI Shengwei, LU Qiang, et al. Approximations for the dynamic security region of network-reduction power system. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 18-23.
- [6] KUNDUR P. Power system stability and control. New York, NY, USA: McGraw-Hill Inc, 1993.
- [7] EL-ABIAD A, NAGAPPAN H K. Transient stability regions of multimachine power system. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1966, 85(2): 169-178.
- [8] KAKIMOTO N, OHSAWA Y, HAYASHI M. Transient stability analysis of large-scale power systems by Lyapunov's direct method. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(1): 160-167.
- [9] FOUAD A A, VITTAL V. The transient energy function method. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1988, 10(4): 233-246.
- [10] CHIANG H D, HIRSCH M, WU F. Stability regions of nonlinear autonomous dynamical systems. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(1): 16-27.
- [11] ZABORSZKY J, HUANG G, ZHENG B, et al. On the phase

- portraits of a class of large nonlinear dynamic systems such as the power system. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(1): 4-15.
- [12] 侯凯元, 闵勇, 陈磊. 基于逆轨迹方法的简单电力系统稳定域的可视化. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 22-27.
HOU Kaiyuan, MIN Yong, CHEN Lei. The visualization of stability regions for simple power systems based on trajectory reversing method. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 22-27.
- [13] SALAM F M, ARAPOSTATHIS A A, VARAIYA P. Analytic expressions for the unstable manifold at equilibrium points in dynamical systems of differential equations// Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control; Vol 3, December 14-16, 1983, San Antonio, TX, USA. New York, NY, USA: IEEE, 1983: 1389-1392.
- [14] SAHA S, VITTAL V, KLIEMANN W, et al. Local approximation of stability boundary of a power system using the real normal form of vector fields// Proceedings of IEEE International Symposium on Circuit and Systems; Vol 3, April 30-May 3, 1995, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 2330-2333.
- [15] VENKATASUBRAMANIAN V, JI Weijun. Numerical approximation of $(n-1)$ dimensional stable manifolds in large systems such as the power system. Automatica, 1997, 33(10): 1877-1883.
- [16] CHENG Daizhan, MA Jin, LU Qiang, et al. Quadratic form of stable sub-manifold for power systems. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2004, 14(9/10): 773-788.
- [17] 马进, 程代展, 梅生伟, 等. 基于半张量理论的电力系统稳定域边界逼近: (一) 理论基础. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 1-5.
MA Jin, CHENG Daizhan, MEI Shengwei. Approximation on boundary of power system stability region based on semi-tensor theory; Part one theoretical base. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 1-5.
- [18] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system stability and control. Ames, IA, USA: Iowa State University Press, 1997.
- [19] CHENG Daizhan. Matrix and polynomial approach to dynamic control systems. Beijing: Science Press, 2002.

马进(1975—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统非线性分析与控制、电力系统动态仿真. E-mail: majin@tsinghua.org.cn

程代展(1946—), 男, 博士, 教授, 研究方向为非线性控制与哈密顿系统.

梅生伟(1964—) 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统非线性控制.

Approximation on the Boundary of Power System Stability Region Based on Semi-tensor Theory

Part Two Application

MA Jin¹, CHENG Daizhan², MEI Shengwei³, LU Qiang³

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control Under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(2. Academy of Mathematics and System Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(3. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Approximating the boundary of attraction region is very important to the application of the energy function method. Starting from the mathematical model of power system applied in energy function methods, the stability boundaries of one-machine infinite-bus system and IEEE three-machine nine-bus test system are approximated by applying the semi-tensor based stability boundary approximation algorithm. The critical clearing time is calculated based on the approximated boundary. Compared with the traditional stability boundary in the energy function method, the approximation enhances the accuracy of the direct method on transient stability analysis. The efficiency of the semi-tensor based stability boundary approximation algorithm is shown in the paper. The problems hindering the application of semi-tensor theory on large-scale power system are also pointed out in the paper.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217901), the Grand Project of National Natural Science Foundation of China (No. 50595410) and North China Electric Power University Fund for Faculty with Doctor Degree (No. Dr. 2004-11).

Key words: power system transient stability; boundary of attraction region; energy function method; semi-tensor theory