

基于时变状态矩阵的故障系统稳定性分析

马静¹, 彭明法², 李益楠¹, 王上行¹, 高健³, 王增平¹

(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 102206; 2. 嘉兴市供电公司, 浙江 嘉兴 314033;
3. 湖州电力局, 浙江 湖州 313000)

摘要: 针对能量函数法无法分析系统的时变状态矩阵与稳定性之间的关系, 提出一种基于时变状态矩阵的故障电力系统稳定性分析方法。首先, 通过系统在故障消失点的状态及运行方式, 逐步计算系统在故障后各运行点的状态及状态矩阵。然后求取差分方程的解, 并根据时变系统稳定性判据, 判定故障后系统能否渐进稳定。最后, 2机系统和16机系统仿真算例表明, 该方法能够准确判断系统在不同故障位置及故障持续时间等情况下系统的稳定性。

关键词: 时变状态矩阵; 时变系统; 故障系统; 稳定性

Stability analysis of fault system based on time-varying state matrix

MA Jing¹, PENG Ming-fa², LI Yi-nai¹, WANG Shang-xing¹, GAO Jian³, WANG Zeng-ping¹

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Jiaying Power Supply Company, Jiaying 314033, China;
3. Huzhou Power Supply Company, Huzhou 313000, China)

Abstract: A novel method is proposed to analyze the stability of fault power system based on time-varying state matrix, since the energy function method cannot analyze the relationship between the time-varying state matrix and the system stability. First, through the state and operation mode of the system at the failure vanishing point, the real-time state matrix after the fault is calculated gradually. Then, the solution of the differential equation is calculated, and the stability of the fault system can be judged based on the stability criterion of the time-varying system. Finally, simulation results of the equivalent two-generator and sixteen-generator system illustrate that the method can accurately analyze the stability of the system when the fault occurs at different position and with different duration time.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215200), National Natural Science Foundation of China (No. 51277193), the Chinese University Scientific Fund Project (No. 2014ZZD02), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of State Education Ministry ([2011] No. 1139), Natural Science Foundation of Hebei province (No.E2012502034), Beijing Nova Program (No.Z141101001814012), the Excellent Talents in Beijing City (No.2013B009005000001), and the Fund of Fok Ying Tung Education Foundation (No.141057).

Key words: time-varying state matrix; time-varying discrete system; fault system; stability

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0009-06

0 引言

随着电网运行规模的扩大和运行方式的复杂多变, 系统遭受扰动的概率将不可避免地增大^[1-3]。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2012CB215200); 国家自然科学基金项目(51277193); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014ZZD02); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2011] 1139号); 河北自然科学基金项目(E2012502034); 北京市科技新星支持计划(Z141101001814012); 北京市优秀人才支持计划(2013B009005000001); 霍英东教育基金(141057)

在系统遭受扰动, 尤其是故障扰动时, 扰动后系统能否渐进稳定对电网的安全至关重要。因此, 为故障后系统提供稳定性判据, 具有重要的现实意义^[4]。

目前, 在平衡点特征根对系统稳定性影响方面, 已开展了大量的研究^[5]。在平衡点处, 通过一阶泰勒展开, 获得系统在该点的振荡频率及阻尼比, 从而判断系统在平衡点处遭受扰动后能否稳定运行。然而, 仅依靠阻尼比这个单一指标, 并不能判断系统在大扰动影响下的稳定性^[6]。尤其在短路故障发生后, 系统的运行点将大幅偏离原平衡点, 且时变因素急剧增强, 此时, 基于平衡点的特征根分析方法将无法判断故障后系统能否稳定运行^[7]。

通过求取系统故障后的状态运行轨迹判断系统稳定性^[8-10], 需事先求得系统的不返回点, 而不返回点受系统的模型、扰动场景等多因素影响, 因而, 直接通过系统的受扰轨迹判断稳定性极其困难^[11]。能量函数法通过描述系统在故障中及故障后不同时刻系统的能量, 可判定系统在大扰动下是否渐进稳定^[12]。然而, 该方法从能量角度而非时域角度分析稳定性问题^[13-14], 因此, 无法计及系统的时变状态矩阵与系统稳定性之间的关系。

针对上述问题, 本文提出了一种适用于分析故障系统稳定性的方法。首先, 通过系统在故障消失点的状态及运行方式, 逐步推算系统在故障后各运行点的运动轨迹及时变状态矩阵, 在此基础上, 求取差分方程的解, 并根据时变系统稳定性判据, 判定系统是否稳定。2机系统和16机系统仿真算例表明, 该方法能够准确判断系统在不同故障位置及故障持续时间等情况下的系统稳定性情况。

1 电力系统时变状态矩阵

发电机转子运动方程在工作点附近线性化后可表达为

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \quad (1)$$

其中: \boldsymbol{x} 为系统的状态向量, 当系统采用六阶模型时, 其为 $[\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta E'_q, \Delta E'_d, \Delta E''_q, \Delta E''_d]^T$; \boldsymbol{A} 为系统的状态矩阵。

电力系统正常运行时, 稳定运行于平衡点处, 系统的状态矩阵为定常矩阵。当系统发生短路故障时, 故障消失后, 设系统的结构不发生改变, 因此状态矩阵 \boldsymbol{A} 中的结构参数将不发生变化, 仅运行工况偏离原平衡点并随时间发生变化, 转子运动方程仍满足式(1)。在 t 时刻将转子运动方程按泰勒级数 1 阶展开, 得 t 时刻线性化后的转子动态方程, 记为 $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}(t)$ ^[15]。设故障持续时间为 t_c , 故障线路占整条线路的全长为 α , 故障消失点处系统的运行工况记为 $(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{y}_0, \boldsymbol{y}_0$ 为非状态向量)。显然 $(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{y}_0)$ 与故障条件 (t_c, α) 和系统的初始运行点(平衡点)密切相关, 并且 $(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{y}_0)$ 将对故障后系统能否稳定运行起决定性作用。

系统在 t_k 时刻故障消失, 由系统的运动方程可推得在 t_{k+1} 时刻系统的状态变量如式(2)^[16]。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}(t_{k+1}) &= \boldsymbol{x}(t_k) + \dot{\boldsymbol{x}}(t_k)\Delta t = \\ & \boldsymbol{x}(t_k) + \boldsymbol{A}(t_k)\boldsymbol{x}(t_k)\Delta t = \\ & (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{A}(t_k)\Delta t)\boldsymbol{x}(t_k) \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\boldsymbol{x}(t_k)$ 、 $\boldsymbol{x}(t_{k+1})$ 分别为 t_k 、 t_{k+1} 时刻系统经过扰动后的状态向量; Δt 为时间步长。

已知 t_k 时刻系统的状态, 通过式(2)可得系统在 t_{k+1} 时刻的状态, 进而逐步计算系统各运行点的状态及时变状态矩阵。式(2)可简化表述为

$$\boldsymbol{x}(t_{k+1}) = \boldsymbol{G}(k, k+1)\boldsymbol{x}(t_k) \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{G}(k, k+1) = \boldsymbol{I} + \boldsymbol{A}(t_k)\Delta t$ 为系统的时变状态矩阵。

2 时变系统稳定性分析

2.1 线性时变系统渐进稳定充要条件证明

首先, 选取李雅普诺夫函数:

$$V[\boldsymbol{x}(k), k] = \boldsymbol{x}^T(k)\boldsymbol{P}(k)\boldsymbol{x}(k) \quad (4)$$

式中, $V[\boldsymbol{x}(k), k]$ 为正定实对称矩阵, 且为时间函数。

该函数的导数在小范围内可描述为

$$\dot{V}[\boldsymbol{x}(k), k] = \Delta\dot{V}[\boldsymbol{x}(k), k] = \quad (5)$$

$$\dot{V}[\boldsymbol{x}(k+1), k+1] - \dot{V}[\boldsymbol{x}(k), k]$$

将式(3)代入式(5)中, 经合并式(5)可表示为

$$\Delta V[\boldsymbol{x}(k), k] =$$

$$\boldsymbol{x}^T(k+1)\boldsymbol{P}(k+1)\boldsymbol{x}(k+1) - \boldsymbol{x}^T(k)\boldsymbol{P}(k)\boldsymbol{x}(k) =$$

$$\boldsymbol{x}^T(k)[\boldsymbol{G}^T(k+1, k)\boldsymbol{P}(k+1)\boldsymbol{G}(k+1, k) - \boldsymbol{P}(k)]\boldsymbol{x}(k) \quad (6)$$

由于 $V[\boldsymbol{x}(k), k]$ 为正定矩阵, 由线性时变系统大范围渐进稳定性的条件可知, $\Delta V[\boldsymbol{x}(k), k]$ 必须为负定, 描述为

$$\nabla_{\boldsymbol{x}}[Q(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})] = -\boldsymbol{x}_L(\boldsymbol{y})\boldsymbol{\delta}(\boldsymbol{y})\boldsymbol{x}(\boldsymbol{y}) \quad (7)$$

其中, $\boldsymbol{Q}(k) = -[\boldsymbol{G}^T(k+1, k)\boldsymbol{P}(k+1)\boldsymbol{G}(k+1, k) - \boldsymbol{P}(k)]$ 。

当 $\boldsymbol{Q}(k)$ 满足正定时, 可保证 $\Delta V[\boldsymbol{x}(k), k]$ 为负定, 即可保证系统渐进稳定。

2.2 线性时变系统稳定性判据

由 2.1 节可知, 式(3)表征的时变系统能够渐进稳定运行至平衡点的充要条件是: 对于任意给定正定实对称矩阵 $\boldsymbol{Q}(k)$, 必存在正定实对称矩阵 $\boldsymbol{P}(k+1)$, 使式(8)成立, 且 $V[\boldsymbol{x}(k), k] = \boldsymbol{x}^T(k)\boldsymbol{P}(k)\boldsymbol{x}(k)$ 是系统李雅普诺夫函数^[17-18]。

$$\boldsymbol{G}^T(k+1, k)\boldsymbol{P}(k+1)\boldsymbol{G}(k+1, k) - \boldsymbol{P}(k) = -\boldsymbol{Q}(k) \quad (8)$$

差分方程(8)的解为

$$\boldsymbol{P}(k+1) =$$

$$[\boldsymbol{G}^T(k, k+1)]^{-1}[\boldsymbol{P}(k) - \boldsymbol{Q}(k)][\boldsymbol{G}(k, k+1)]^{-1}$$

(9)

由式(9)可知, 通过给定的正定实对称矩阵 $Q(k)$, 系统的时变状态矩阵 $G(k, k+1)$, 以及 k 时刻矩阵 $P(k)$, 可求得系统在 $k+1$ 时刻差分方程的解 $P(k+1)$, 然后通过 P 阵的特征根判断系统在故障后是否渐进稳定。若 P 阵正定, 则系统在故障后能够渐进稳定; 若 P 阵中最小特征值变负, 则表明系统在故障后将失去稳定。本方法并不局限于拓扑不变的情况, 当系统故障导致拓扑发生改变时, 可将故障或拓扑改变对系统的影响视为正常分量和故障分量的叠加, 当用功率注入表示故障分量时, 依然可以用本方法进行分析。

3 算例分析

3.1 等值 2 机系统仿真算例

等值 2 机系统如图 1 所示, 系统在 0.1 s 时, 其中一条联络线某点发生三相短路, 其中短路点距离节点 M 的距离占整条线路的全长为 α , 短路的持续时间为 t_c , 故障消失后, 系统的结构不发生改变, 根据电力系统实时动态监测系统 (PMU) 技术规范^[19], 国内 PMU 最低采样频率为 200 Hz, 系统仿真时间步长为 0.005 s。

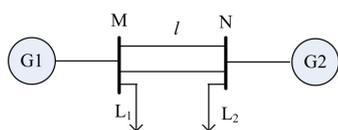


图 1 2 机系统线路图

Fig. 1 Two-machine system

以表 1 中故障情况为例, 分析系统在不同故障位置和故障切除时间下系统的稳定性, 仿真结果如图 2、图 3 所示。通过本方法计算可得, 在该仿真步长下, 当故障位置 α 为 0.5 时, 系统的准极限稳定切除时间为 0.205 s, 当故障位置 α 为 0.8 时, 系统的准极限稳定切除时间为 0.195 s (准极限稳定切除时间对应的系统为准临界稳定情况, 下一仿真步长对应的短路持续时间, 将使系统失去稳定)。并且通过计算可知, 平均每步迭代求解差分方程所需的时间为 0.001 6 s (联想-Y480, 4 G 内存, 32 位操作系统), 其效率较高。

图 2、图 3 为系统的准极限稳定切除时刻前后

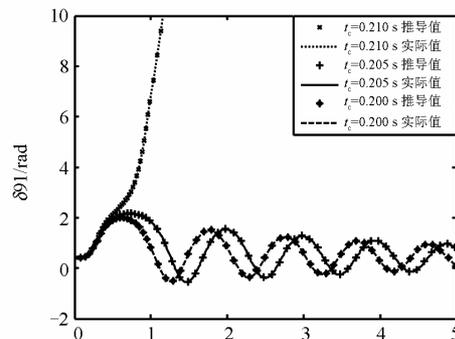
表 1 2 机系统的故障情况

Table 1 Fault cases of two-machine system

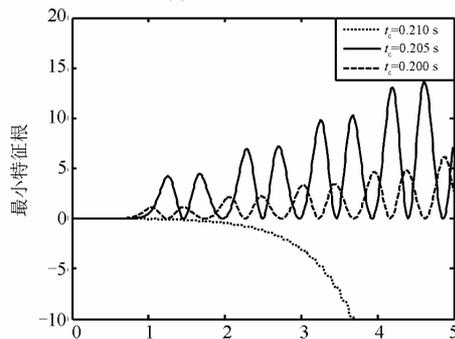
故障情况	1	2	3	4	5	6
α	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8
t_c/s	0.20	0.210	0.220	0.190	0.195	0.20

采用本方法的判别结果, 其中, 图 2(a)、图 3(a)中点线、实线、虚线分别对应不同短路持续时间下发电机 1 与 2 之间功角差的实际值, \times 线、+ 线、* 线分别对应不同短路持续时间下利用本方法推导得到的功角差; 图 2(b)、图 3(b)为各时刻矩阵 P 最小特征根。

由图 2(a)、图 3(a)可知, 本方法计算得到的发电机功角差曲线与实际系统功角差曲线较为接近。



(a) 发电机功角差曲线



(b) 矩阵 P 的最小特征根曲线

图 2 α 为 0.5 时故障系统稳定性

Fig. 2 Stability of fault system when α is 0.5

由图 2(a)、图 3(a)中实线和虚线可知, 发电机 1 和 2 之间的功角差呈振荡收敛趋势, 表明系统趋于稳定。由图 2(b)、图 3(b)中实线和虚线可知, 在故障切除时间均不大于准极限切除时间的情况下, 矩阵 P 的最小特征值都大于 0, 表明矩阵 P 始终保持正定, 系统最终可渐进稳定至平衡点, 这与实际系统的稳定趋势相符。

由图 2(a)和图 3(a)中点线可知, 当故障切除时间大于准极限切除时间时, 发电机之间的功角差呈发散趋势, 表明在此故障情况下系统已经失稳。再者, 图 2(b)和图 3(b)中点线显示矩阵 P 的最小特征值逐渐减小, 直至小于 0, 矩阵 P 不再为正定矩阵, 表明系统不能渐进稳定运行至平衡点, 与实际情况相吻合。需要注意的是, 初始矩阵 P 和 Q 均取决于

故障持续时间, 当故障持续时间改变时, 矩阵 P 和 Q 亦发生变化, 导致在同一时刻迭代的矩阵 P 差异较大, 因此故障持续时间不同时, 其最小特征值与系统故障时间之间并无特定关系。

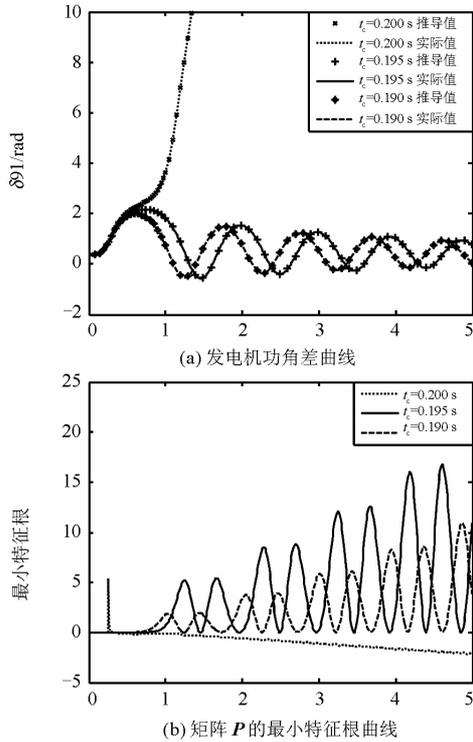


图 3 α 为 0.8 时故障系统稳定性

Fig. 3 Stability of fault system when α is 0.8

3.2 16 机系统仿真算例

采用 IEEE16 机 68 节点^[20-21]的新英格兰—纽约互联系统进一步验证本方法的有效性, 系统结构如图 4 所示, 该系统可分为 5 大区域。其中发电机采用六阶详细模型, 励磁采用 IEEE-DC1 型励磁, 负荷模型采用恒功率模型。系统在 0.1 s 时刻, 线路 28-29 某点发生三相短路故障, 故障位置为 α , 故障持续时间为 t_c , 故障消失后系统的结构不发生变化, 系统时间步长为 0.005 s。以表 2 中六种故障情况为例, 分析系统在故障后的稳定性。仿真结果如图 5、图 6 所示。

表 2 16 机系统的故障情况

Table 2 Fault cases of sixteen-machine system

故障情况	1	2	3	4	5	6
α	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8
t_c/s	0.09	0.095	0.10	0.080	0.085	0.090

通过本文方法分析可知, 在该仿真步长长下, 当系统在故障位置 α 为 0.5 时, 其准极限稳定切除时间为 0.095 s, 当故障位置 α 为 0.8 时, 其准极限

稳定切除时间为 0.085 s。通过仿真计算可得, 此时平均迭代求解时间为 0.002 4 s(联想-Y480, 4G 内存, 32 位操作系统), 其求解效率较高。

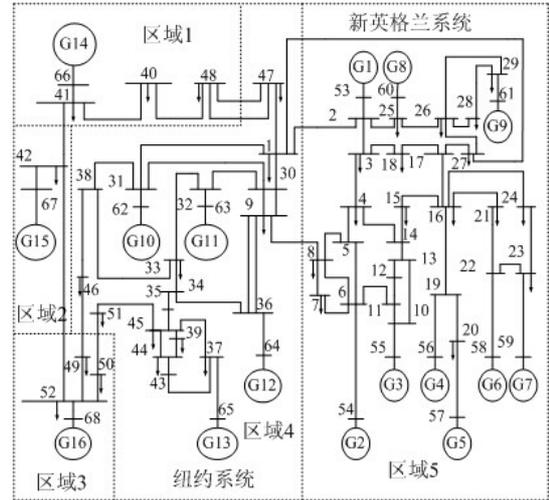


图 4 16 机 68 节点电网结构图

Fig. 4 Test system of sixteen-machine 68-bus

图 5、图 6 为系统的准极限稳定切除时刻前后采用本方法的判别结果, 其中, 图 5(a)、图 6(a)中点线、实线、虚线分别对应不同短路持续时间下发电机 1 与 2 之间功角差的实际值, \times 线、+线、*线分别对应不同短路持续时间下利用本方法推导得到的功角差; 图 5(b)、图 6(b)为各时刻矩阵 P 最小特征根。

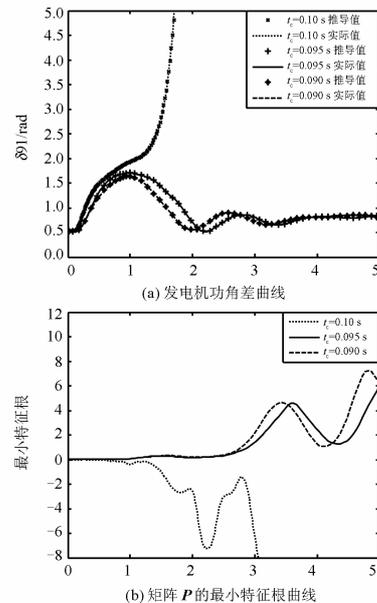
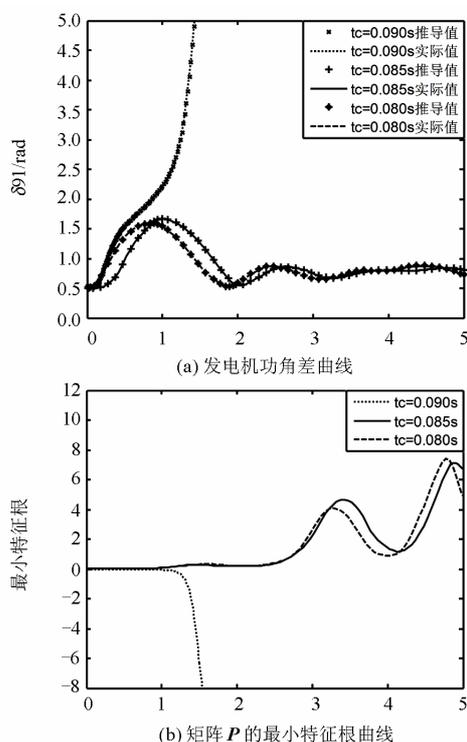


图 5 α 为 0.5 时故障系统稳定性

Fig. 5 Stability of fault system when α is 0.5

图6 α 为 0.8 时故障系统稳定性Fig. 6 Stability of fault system when α is 0.8

由图 5(a)、图 6(a)可知, 通过本方法计算得到的发电机功角差曲线与精确功角差曲线相吻合, 表明本方法的正确性。

由图 5(a)、图 6(a)中实线和虚线可知, 发电机 1 和 2 之间的功角差呈振荡收敛趋势, 表明系统趋于稳定。由图 5(b)、图 6(b)中实线和虚线可知, 当故障切除时间不大于准极限稳定切除时间时, 故障消失后, 矩阵 P 始终保持正定, 表明系统在故障消失后可以保持稳定运行, 这与实际仿真得到的功角差曲线相符合。

由图 5(a)和图 6(a)中点线可知, 当故障切除时间大于准极限切除时间时, 发电机之间功角差呈发散趋势, 表明在此故障情况下系统已经失稳。再者, 由图 5(b)和图 6(b)中点线可知, 当故障切除时间大于准极限稳定切除时间时, 矩阵 P 最小特征值逐渐变为负值, 表明系统在故障后失去稳定, 与实际情况相吻合。

4 结论

本文提出了一种分析故障系统稳定性的方法。该方法有效计及了系统的实变状态矩阵与稳定性之间的关系, 从而避免了能量函数方法的逐步积分, 并且可迅速判断故障切除后系统是否稳定。首先,

通过系统在故障消失点的运行工况, 逐步求得系统在故障后系统各运行点的运动轨迹及时变状态矩阵。然后, 通过各时刻差分方程的解, 判定系统是否渐进稳定。最后, 2 机系统和 16 机系统算例表明, 该方法能够正确, 快速分析系统在不同故障类因素下的稳定性。系统轨迹虽然可以定性判稳, 但无法对稳定性进行定量地分析。本方法通过计算系统时变状态矩阵, 还可对系统稳定裕度、灵敏度等指标进行定量分析。

参考文献

- [1] 王彤, 马静, 杨奇逊. 交直流互联系统区间振荡广域阻尼控制系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 30-37.
WANG Tong, MA Jing, YANG Qi-xun. Design of wide-area damping control system for inter-area oscillations in AC/DC hybrid power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 30-37.
- [2] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.
YU Yi-xin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.
- [3] 杨慧敏, 易海琼, 文劲宇, 等. 一种实用的大电网低频振荡概率稳定性分析方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 124-129.
YANG Hui-min, YI Hai-qiong, WEN Jin-yu, et al. A practical stability analysis method for large-scale power system based on low-frequency-oscillation probability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 124-129.
- [4] 董明齐, 杨东俊, 黄涌, 等. 华中电网 WAMS 实测区域低频振荡仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 64-69.
DONG Ming-qi, YANG Dong-jun, HUANG Yong, et al. Simulation of regional low frequency oscillation based on data measured by WAMS of Central China Power Grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 64-69.
- [5] 薛禹胜, 郝思鹏, 刘俊勇, 等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 1-8.
XUE Yu-sheng, HAO Si-peng, LIU Jun-yong, et al. A

- review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 1-8.
- [6] 郝思鹏, 薛禹胜, 唐茂林, 等. 通过轨迹特征根分析时变振荡特性 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 1-5.
HAO Si-peng, XUE Yu-sheng, TANG Mao-lin, et al. Trajectory eigenvalues analysis time variant oscillation characters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 1-5.
- [7] 倪敬敏, 沈沉, 谭伟, 等. 一种基于非平衡点处线性化的同调识别方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 7-12.
NI Jing-min, SHEN Chen, TAN Wei, et al. A coherence identifying method based on linearization at non-equilibrium point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 7-12.
- [8] 刘尹, 罗建, 陈刚, 等. 基于解相关 LMS 自适应滤波算法的低频振荡模式在线辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 72-76.
LIU Yin, LUO Jian, CHEN Gang, et al. Online identification of low frequency oscillation modes based on de-correlation LMS adaptive filtering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 72-76.
- [9] 邓集祥, 欧小高, 姚天亮. 基于小波能量系数的主导低频振荡模式检测[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 141-146.
DENG Ji-xiang, OU Xiao-gao, YAO Tian-liang. Detection of the dominant inertial modes based on wavelet energy coefficient[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 141-146.
- [10] 王娜娜, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于 EMD-TEO 及信号能量分析法的主导低频振荡模式识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 198-204.
WANG Na-na, LIU Di-chen, LIAO Qing-fen, et al. Identification of dominant inertial modes based on EMD-TEO and signal energy method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 198-204.
- [11] 贾勇, 何正友. 基于受扰轨迹的低频振荡分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 140-148.
JIA Yong, HE Zheng-you. Review on analysis methods for low frequency oscillations based on disturbed trajectory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 140-148.
- [12] 宫璇, 刘涤尘, 董超, 等. 基于能量函数的低频振荡新型预警指标[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 28-34.
GONG Xuan, LIU Di-chen, DONG Chao, et al. Early warning indicator of low frequency oscillation based on energy function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 28-34.
- [13] 刘笙, 汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [14] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 344-351.
- [15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [16] 潘学萍, 薛禹胜, 张晓明, 等. 轨迹特征根的解析估算及误差分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 10-14.
PAN Xue-ping, XUE Yu-sheng, ZHANG Xiao-ming, et al. Analytical calculation of power system trajectory eigenvalues and its error analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 10-14.
- [17] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [18] 施鼎汉. 关于线性时变离散系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 1995, 12(3): 389-396.
- [19] 张道农, 王兆家, 蒋宜国. 电力系统实时动态监测系统技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2006.
- [20] 刘豹, 唐万生. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [21] ROGERS G. Power system oscillations[M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.

收稿日期: 2013-10-30; 修回日期: 2014-03-30

作者简介:

马静(1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: hdmajing@aliyun.com

彭明法(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析及控制。