

DOI: 10.7667/PSPC160141

## 基于集群计算的特大型电网特征值搜索策略

徐伟, 刘建坤, 胡昊明, 赵静波

(国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 针对隐式重启动 Arnoldi 算法无法自动搜索指定区域所有特征值的问题, 设计了一种基于集群计算的特征值搜索策略, 满足特大型电网小干扰稳定在线分析对计算结论准确性和实时性的要求。将待搜索区域划分为多个面积相同的区域, 通过对搜索圆盘无法完全覆盖的区域设置更多的位移点来提高计算速度。采用正方形来划分待搜索区域, 通过比较搜索圆盘内切正方形和待搜索正方形区域的大小实现待搜索区域是否被完全覆盖的自动判别。对华东电网的在线数据进行了分析计算, 验证了搜索策略的正确性和有效性。

**关键词:** 小干扰稳定分析; 隐式重启动 Arnoldi 算法; 位移求逆变换; 集群计算

### Eigenvalue searching strategy for ultra large scale power grid based on cluster computing

XU Wei, LIU Jiankun, HU Haoming, ZHAO Jingbo

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Since implicit restarted Arnoldi algorithm cannot obtain all eigenvalues in a designated area automatically, an eigenvalue searching strategy based on cluster computing is proposed to satisfy the requirements of accuracy and speed of online small signal stability analysis for ultra large scale power grid. Searching area is divided into several areas with same size and shift is appointed in each area to determine areas consisting more eigenvalues. Such area will be designated multi shifts to improve calculating speed. Square will be chosen to divide the searching area. Uncovered square can be identified automatically by comparing with the inscribed square of the circle area formed by the eigenvalues of a shift. The analysis results of East China Power Grid online data validate the correctness and efficiency of the proposed strategy.

This work is supported by China Postdoctoral Science Foundation (No. 2016M591738) and Postdoctoral Science and Technology Program of Jiangsu Province (No. 1601160C).

**Key words:** small signal stability analysis; implicit restarted Arnoldi algorithm; shift-invert transformation; cluster computing

## 0 引言

互联电网的动态稳定性问题是影响特大型交直流电网稳定运行的重要因素<sup>[1-5]</sup>。随着在线安全稳定分析系统的推广应用, 根据状态估计结果和元件模型参数在线进行小干扰稳定性分析和改善弱阻尼模式阻尼比的控制策略计算, 已经成为提高电网动态稳定性的重要手段<sup>[6-7]</sup>。

当小干扰稳定分析的状态矩阵维数很大时, 需要采用部分特征值方法求解对稳定性判别有关键影响的特征值, 以确保计算精度和速度都可以满足大

规模电力系统的要求, 但不能保证计算出所有的弱阻尼模式<sup>[8-10]</sup>。电网规模的扩大和装机容量的增加会导致振荡模式频率的下降, 而模式的分布更加密集。除了弱阻尼模式, 调度运行人员还关心电网中的典型振荡模式及其相关特征, 而这些模式的阻尼比可能比较大, 距离虚轴比较远, 这就需要通过穷尽式的搜索来计算指定区域的所有特征值。

对特大型电网进行小干扰稳定分析时, 特别是进行在线安全稳定分析时, 求解特征值的串行算法难以满足计算速度的要求。隐式重启动 Arnoldi(IRA)算法可以通过在复平面上指定多个位移点, 通过多次位移求逆及 IRA 算法实现并行计算, 其优点是各计算任务之间没有信息交换, 便于通过多进程实现<sup>[11-12]</sup>。文献[11]根据指定的特征值频率搜索范围

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2016M591738); 江苏省博士后科研资助计划项目(1601160C)

在虚轴上设置等间距的若干个位移点, 为了保证虚轴被完全覆盖需要设置足够多的位移点, 而且无法求取阻尼比较大的特征值。文献[12]基于前一断面的特征值分布情况, 以搜索圆盘相交面积极小且交点阻尼比绝对值极大为原则选择位移点, 根据计算得到的搜索圆盘是否相交以及交点的阻尼比大小确定是否需要增加新的位移点, 由于新增加位移点的选择依赖于相邻位移点的计算结果, 需要通过多轮迭代计算才能够完全覆盖待搜索区域。

基于分布式并行计算技术采用同构的计算节点构建大规模集群计算平台, 将多个相同的计算任务分配到计算集群的计算节点上进行并行计算, 是提高在线安全稳定分析计算结论准确性和实时性的主要技术手段<sup>[13-15]</sup>。本文设计了一种基于集群计算的特征值搜索策略, 满足特大型电网小干扰稳定分析对计算结论准确性和实时性的要求。根据空闲的 CPU 核数将复平面上指定的待搜索区域划分为多个正方形区域, 选取正方形区域的中心作为 IRA 算法的位移点; 若搜索圆盘无法覆盖预先指定的正方形区域, 则将该正方形区域划分为 4 个新的正方形区域并确定下一轮计算的位移点, 重复上述过程直至搜索区域被完全覆盖; 在搜索过程中根据相邻位移点搜索圆盘对新增位移点搜索区域的覆盖情况, 剔除掉无需计算的位移点, 进一步提高计算资源的利用效率。

## 1 IRA 算法

### 1.1 Arnoldi 算法

为了计算矩阵  $A \in C^{n \times n}$  的若干个特征值, 可选择列数远小于矩阵维数的列正交矩阵  $V_m \in C^{n \times m}$  计算

$$H_m = V_m^H A V_m \quad (1)$$

若  $y \in R^m$  为  $H_m$  的单位特征向量, 满足  $H_m y = \theta y$ , 称  $x = V_m y$  为 Ritz 矢量,  $\theta$  为 Ritz 值。Arnoldi 算法通过计算  $H_m$  的  $m$  个 Ritz 对  $(\theta, x)$  作为矩阵  $A$  特征值和特征向量的近似。

### 1.2 隐式重启动

随着正交矩阵维数的增加, Ritz 对会逼近特征对。但实际计算中,  $m$  可能要非常大时, Ritz 对才满足精度要求。隐式重启动法利用迭代中非期望的 Ritz 值作为平移点, 用隐式 QR 分解产生新的重启动向量, 从而充分利用了期望 Ritz 值的信息, 提高计算的收敛速度。

### 1.3 位移求逆算法

小干扰稳定分析关心的是指定频率范围内(如

0.1~2.5 Hz)和阻尼比范围内(如-0.05~0.1)的振荡模式, 而 Arnoldi 算法易于收敛到  $k$  个模值最大的特征值。因此, 需要通过谱变换将感兴趣的特征值映射为模最大的特征值。位移求逆变换定义为

$$C = (A - \delta I)^{-1} \quad (2)$$

其中,  $\delta$  为位移点。在位移点附近的特征值  $\lambda_i$  映射为矩阵  $C$  模最大的特征值  $\theta_i$ 。设  $\lambda_i \neq \delta$ , 位移求逆变换将  $\lambda$  平面中圆心在  $\delta$ 、半径为  $|\lambda_i - \delta|$  的圆  $S_\delta(\lambda_i)$  映射为  $\theta$  平面上中心在原点、半径为  $|\theta_i|$  的圆  $S(\theta_i)$ 。因此, 位移求逆变换将  $\lambda$  平面中圆  $S_\delta(\lambda_i)$  内部的特征值映射到  $\theta$  平面中圆  $S(\theta_i)$  的外部。

## 2 集群计算的要求

集群计算的关键是计算任务的划分和分配。对于枚举类型的计算任务, 如暂态稳定分析, 可以将单个故障的暂态稳定分析作为计算任务, 计算任务数与故障数一致<sup>[13]</sup>。由于所有的故障均需要计算, 因此, 可以将所有的计算任务提交给集群平台。如果 CPU 核数大于计算任务数, 则通过一轮计算即可得到最终的计算结果; 否则, 某些 CPU 核可能承担多个计算任务。对于临界值类型的计算任务, 如最大输电能力计算, 需要求取系统临界安全时的断面潮流<sup>[14]</sup>。针对临界类型的计算任务, 有两种计算任务划分和分配方案: (1) 根据可用的 CPU 核数目和断面传输功率的上限和下限, 将断面传输功率划分为多个档位, 通过多次迭代不断缩小断面极限功率的搜索范围, 直至获得满足计算精度的极限功率; (2) 根据计算精度将断面传输功率划分为多个档位, 按断面潮流由小到大形成调度队列, 确定临界安全的断面潮流档位。

特征值搜索的目的是求取待搜索区域内所有的特征值。由于每个位移点的搜索圆盘大小未知, 无法直接采用枚举的方法来划分计算任务。文献[11]根据经验确定搜索圆盘完全覆盖虚轴的位移点个数, 文献[12]根据前一时刻断面的特征值计算结果来确定位移点位置, 但无论采用何种方法均无法保证预先设置的位移点能够完全覆盖指定搜索区域。因此, 只有对待搜索区域进行划分, 针对搜索圆盘无法完全覆盖的区域设置更多的位移点, 才能够通过不断缩小搜索范围来提高计算速度。

特征值搜索的另外一个困难是需要自动判断搜索圆盘是否覆盖了指定搜索区域。文献[12]根据相邻搜索圆盘的相交情况, 取两相邻位移点的中点为新的位移点, 该方法只能不断缩小待搜索区域, 但是无法保证搜索圆盘能够完全覆盖指定搜索区

域。搜索圆盘可以完全覆盖其内切正方形区域，如果将待搜索区域划分为若干个正方形区域，则可以通过比较搜索圆盘内切正方形区域与待搜索正方形区域的大小来判断搜索圆盘是否覆盖了指定搜索区域。

### 3 特征值搜索策略

小干扰稳定分析需要求取指定频率和阻尼比范围内的特征值。特征值的实部  $\sigma$  和虚部  $\omega$  与阻尼比  $\xi$  和频率  $f$  的关系为

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

$$\sigma = -\omega\xi / \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4)$$

因此，待搜索区域为复平面上的梯形区域。

为了实现大规模集群计算和待搜索区域是否被完全覆盖的自动判断，可以将待搜索区域划分为多个面积相同的区域，在每个区域选择一个位移点，根据各位移点的特征值计算结果确定下一轮需要增加位移点的计算区域；采用正方形来划分待搜索区域，通过比较搜索圆盘内切正方形和待搜索正方形区域的大小确定该区域是否需要增加位移点。

#### 3.1 初次迭代时位移点的选择

设可用的 CPU 核数为  $N$ ，将梯形区域的上底按  $i$  由小到大进行等分 ( $i=1, \dots, M$ )。设梯形区域上底的长度为  $S$ ，当按  $i$  等分时正方形区域的边长为  $S/i$ 。以梯形左腰的上顶点为起点，依次确定每一行被完全覆盖的正方形个数，统计出将待搜索区域完全覆盖的正方形个数  $N_i$ 。当  $N_i \leq N$  且  $N_{i+1} > N$  时，完全覆盖待搜索区域的正方形个数  $N_i$  刚好小于或等于可用的核数  $N$ 。初次迭代时，使用边长为  $S/i$  的正方形覆盖待搜索区域。当频率上下限为 0.1 Hz 到 2.5 Hz，阻尼比范围为 -0.05 到 0.2 时，图 1 给出了  $i=2$  时待搜索区域的划分及位移点分布情况。若可用核数为 16，当  $i=3$  时正方形区域的个数为 24，而  $i=2$  时正方形区域的个数为 12，刚好小于可用核数，此时可以确保每个正方形区域都参与计算。

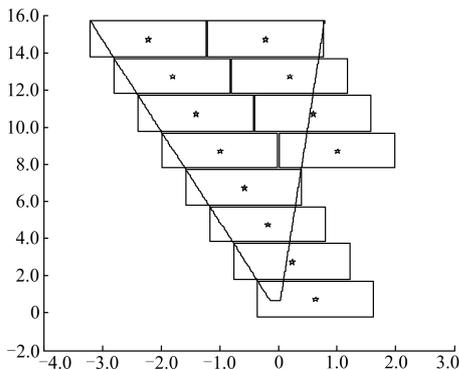


图 1  $i=2$  时待搜索区域的划分及位移点分布情况

Fig. 1 Division of searching area and shift location while  $i=2$

#### 3.2 充分利用相邻搜索区域的计算结果

设第  $j$  轮计算时每个正方形区域的边长为  $l_j$ ，位移点  $m$  的搜索圆盘半径  $l_m < l_j / \sqrt{2}$ ，位移点  $n$  的搜索圆盘半径  $l_n > l_j / \sqrt{2}$ ，在下一轮计算时需要将位移点  $m$  对应的正方形区域划分为 4 个边长为  $l_j / 2$  的正方形，作为下一轮计算的搜索区域。设下一轮待计算的位移点为  $m_s$  ( $S=1, \dots, 4$ )，若满足如下条件，则该位移点无需计算：

(1)  $l_n > |m - m_s| + l_j / 2\sqrt{2}$ ，即位移点  $n$  的搜索圆盘已经覆盖了位移点  $m_s$  对应的待搜索区域；

(2) 当位移点  $m$  和  $n$  的实部或者虚部相同时，如果搜索圆盘的相交弦长度  $X_{m,n}$  满足  $X_{m,n} > l_j$ ，即位移点  $m$  和  $n$  的搜索圆盘已经覆盖了距离位移点  $n$  较远的两个位移点对应的待搜索区域；

(3) 位移点  $m$  和  $n$  的实部和虚部均不一致时，如果搜索圆盘的相交弦长度大于位移点  $n$  的搜索圆盘与位移点  $m_s$  对应正方形区域两边交点长度时，则位移点  $m$  和  $n$  的搜索圆盘已经覆盖了位移点  $m_s$  对应的待搜索区域。

#### 3.3 计算任务的分配策略

IRA 算法的计算时间与位移点的位置和计算特征值的数量有关，每次计算的特征值数量越多计算时间越长，位移点对应的频率越低计算时间越长，而计算的特征值数量又与位移点的位置有关<sup>[12]</sup>。因此，每轮迭代的计算时间取决于耗时最长的位移点计算时间，这就可能导致计算时间短的 CPU 核处于空闲状态。文献[11-12]采取的任务分配策略是将位移点数目设置的大于可用的 CPU 核数，这样先完成计算任务的 CPU 核可以提取新的计算任务进行计算，从而近似实现各 CPU 核的计算时间均分。

在多任务并发计算(即多个类型的计算任务同时进行计算)的条件下，集群计算平台根据不同类型计算任务的预估计算时间和任务个数，可以将计算资源在不同类型计算任务之间进行动态分配，实现整体最优。因此，本文建议保持可用的 CPU 核数与位移点个数一致，同时根据各位移点所属的频率范围预估各计算任务的计算时间，由集群计算平台统一进行计算任务的调度。

### 4 流程设计

基于集群计算的特征值搜索流程如下：

(1) 数据准备。根据潮流数据进行潮流计算，获取稳态运行条件下各变量的稳态值；根据稳定数据将非线性微分-代数方程组在稳态值附近线性化，得

到线性微分-代数方程组。

(2) 初始位移点选择。根据用户定义的特征值频率、阻尼比范围和可用的 CPU 核数, 采用 3.1 节中的方法将待搜索区域划分为多个边长为  $l_k$  的正方形区域, 其中  $k$  为迭代次数。选取各正方形区域的中心作为位移点。

(3) 并行计算。将各位移点的特征值分析作为计算任务提交给集群计算平台, 等待并收集特征值分析结果。

(4) 结果分析。位移点  $p$  与各特征值之间的最大距离为搜索圆盘半径  $l_p$ , 若  $l_p > l_k / \sqrt{2}$  则终止该正方形区域的搜索; 否则, 将该位移点对应的正方形区域作为下一轮计算需要增加位移点的区域。

(5) 迭代过程中位移点选择。将边长为  $l_k$  的正方形区域划分为 4 个边长为  $l_k / 2$  的正方形, 作为下一轮计算的搜索区域, 采用 3.2 节中的方法剔除掉无需计算的位移点, 将  $l_k$  更新为  $l_k / 2$ , 返回步骤(3);

(6) 结束计算。当所有待搜索区域均被覆盖时, 将各位移点的特征值分析结果进行合并, 生成包含指定区域所有特征值的结果文件。

需要说明的是, 在迭代过程中位移点个数可能大于可用的 CPU 核数, 这就需要将计算任务分多次下发给集群计算平台。由于各个搜索区域之间没有信息交互, 第一次下发计算完成后可以先进行结果分析, 将新增位移点和本轮仍未计算的位移点一同下发给集群计算平台。

## 5 计算实例

采用华东电网某时刻的在线运行数据验证本文提出的小干扰稳定并行计算策略。数据中包含 3 063 个计算节点, 341 台发电机, 5 178 条支路; 发电机模型采用考虑次暂态电势  $E_q''$ 、 $E_d''$  变化并计及励磁系统和调速器作用的 6 阶模型; 负荷模型采用恒功率与恒阻抗组合的静态负荷模型; 直流系统采用直流准稳态模型, 整流侧采用定电流控制, 逆变侧采用定熄弧角控制, 并含直流电压与直流电流测量环节、低压限流环节和触发控制环节。

设集群计算平台为小干扰稳定分析分配了两个计算节点, 每个计算节点包含 8 个 CPU 核, 共计 16 个计算资源; 搜索范围为频率 0.1~2.5 Hz、阻尼比 -0.05~0.1。第一轮计算待搜索区域的划分及位移点分布情况参见图 1, 各正方形区域边长为 1.996 4。采用 IRA 算法的特征值计算结果及圆盘对搜索区域的覆盖情况参见表 1 和图 2。

位移点 5、7 和 9 对应的搜索圆盘未覆盖正

形区域, 第二轮计算各位移点的特征值计算结果参见表 2, 各正方形区域边长为 0.998 2。与位移点 7 关联的第二轮搜索圆盘对搜索区域的覆盖情况参见图 3。

表 1 第一轮计算结果  
Table 1 Results of the first iteration

序号	位移点值( $\sigma \pm j\omega$ )	圆盘半径	是否覆盖
1	-2.208 2+j14.709 8	3.198 4	是
2	-0.211 8+j14.709 8	3.494 0	是
3	-1.800 7+j12.713 4	1.731 5	是
4	0.195 7+j12.713 4	2.181 3	是
5	-1.393 2+j10.717 0	0.743 4	否
6	0.603 2+j10.717 0	1.755 1	是
7	-0.985 7+j8.720 6	0.628 8	否
8	1.010 7+j8.720 6	2.077 6	是
9	-0.578 1+j6.724 3	0.891 8	否
10	-0.170 6+j4.727 9	2.401 0	是
11	0.236 9+j2.731 5	1.874 7	是
12	0.644 4+j0.735 1	1.724 4	是

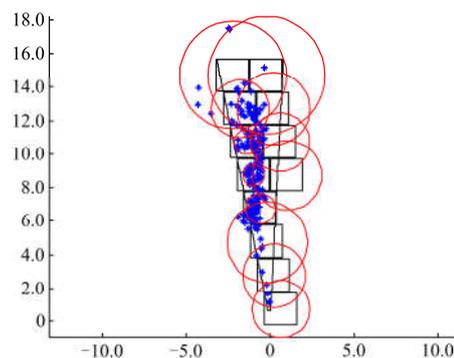


图 2 第一轮特征值计算结果

Fig. 2 Results of the first iteration

表 2 第二轮计算结果  
Table 2 Results of the second iteration

序号	位移点值( $\sigma \pm j\omega$ )	圆盘半径	是否覆盖
13	-1.892 3+j10.217 9	0.884 7	是
14	-0.894 1+j10.217 9	0.712 5	是
15	-0.894 1+j11.216 1	0.857 9	是
16	-1.892 3+j11.216 1	1.124 5	是
17	-1.484 8+j8.221 5	0.644 6	否
18	-0.486 6+j8.221 5	0.915 8	是
19	-0.486 6+j9.219 7	0.889 3	是
20	-1.484 8+j9.219 7	0.696 1	否
21	-1.077 2+j6.225 2	0.903 1	是
22	-0.079 1+j6.225 2	1.352 7	是
23	-0.079 1+j7.223 4	1.187 3	是
24	-1.077 2+j7.223 4	0.629 9	否

位移点 17、20 和 24 对应的搜索圆盘未覆盖对应的正方形区域, 考虑相邻区域的特征值计算结果

(对应条件 2), 位移点 17 对应搜索区域左边的两个位移点需要计算, 位移点 20 和 24 与此类似。因此, 第三轮只有 6 个位移点需要计算, 计算结果参见表 3, 各正方形区域边长为 0.499 1。

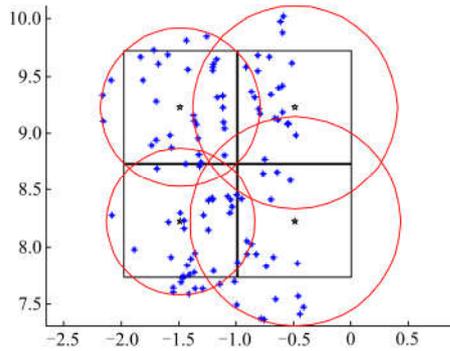


图 3 位移点 17~20 的特征值计算结果

Fig. 3 Results of the shift 17~20

表 3 第三轮计算结果  
Table 3 Results of the third iteration

序号	位移点值( $\sigma \pm j\omega$ )	圆盘半径	是否覆盖
25	-1.734 3+j7.972 0	0.717 8	是
26	-1.734 3+j8.471 1	0.712 0	是
27	-1.734 3+j8.970 2	0.750 1	是
28	-1.734 3+j9.469 3	0.758 2	是
29	-1.326 8+j6.973 8	0.659 1	是
30	-1.326 8+j7.472 9	0.624 3	是

## 6 结语

本文针对在线小干扰稳定分析无法自动搜索指定区域所有特征值的问题, 设计了一种基于集群计算的特征值搜索策略, 满足特大型电网小干扰稳定分析对计算结论准确性和实时性的要求。将待搜索区域划分为多个面积相同的区域, 在每个区域选择一个位移点, 确定复平面上特征值分布较为密集的区域, 通过在该区域设置更多的位移点来提高计算速度。采用正方形来划分待搜索区域, 当搜索圆盘内切正方形的面积大于待搜索正方形区域时终止该区域的特征值分析, 否则进一步缩小搜索范围并设置下一轮计算的位移点, 确保待搜索区域可以被完全覆盖。通过对实际系统的计算验证了该策略的正确性和有效性。

## 参考文献

- [1] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.  
ZHU Fang, ZHAO Hongguang, LIU Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7.
- [2] 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 Mingqi, YANG Dongjun, 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.
- [3] 张祥宇, 付媛, 王毅, 等. 含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合 PSS 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 159-169.  
ZHANG Xiangyu, FU Yuan, WANG Yi, et al. Integrated PSS controller of variable speed wind turbines with virtual inertia and damping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 159-169.
- [4] 李从善, 刘天琪, 刘利兵, 等. 直流多落点系统自抗扰附加阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 10-17.  
LI Congshan, LIU Tianqi, LIU Libing, et al. An auto-disturbance rejection controller of multi-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 10-17.
- [5] 耿天翔, 张竹竞, 项丽, 等. 基于起振特性的强迫振荡扰动源定位及解列方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 98-103.  
GENG Tianxiang, ZHANG Zhujing, XIANG Li, et al. A locating and splitting scheme for disturbance source of forced power oscillation based on the propagation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 98-103.
- [6] 鲍颜红, 徐伟, 徐泰山, 等. 基于机组出力调整的小干扰稳定辅助决策计算[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 88-91.  
BAO Yanhong, XU Wei, XU Taishan, et al. Small-signal stability auxiliary decision-making calculation based on power generation adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 88-91.
- [7] 于之虹, 李芳, 孙璐, 等. 小干扰稳定调度控制策略在线计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6191-6198.  
YU Zhihong, LI Fang, SUN Lu, et al. An enhanced algorithm of online small signal stability control strategy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6191-6198.
- [8] LIMA L T G, BEZERRA L H, TOMEI C, et al. New methods for fast small-signal stability assessment of large scale power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4): 1979-1985.
- [9] ANGELIDIS G, SEMLYEN A. Improved methodologies

- for the calculation of critical eigenvalues in small signal stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(3): 1209-1217.
- [10] 励刚, 苏寅生, 陈陈. 面向对象的多谱变换隐式重启动 Arnoldi 算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 24-27.  
LI Gang, SU Yinsheng, CHEN Chen. Object-oriented multi-spectrum transformation implicit restarted Arnoldi algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 24-27.
- [11] 仲悟之, 宋新立, 汤涌, 等. 基于多进程的电力系统频域特征值并行搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 11-16.  
ZHONG Wuzhi, SONG Xinli, TANG Yong, et al. A multi-process based frequency domain eigenvalue parallel search algorithm for power system small signal stability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 11-16.
- [12] 王永昆, 鲍颜红, 方勇杰, 等. 基于 IRAM 的大型电力系统特征值在线并行计算策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 144-148.  
WANG Yongkun, BAO Yanhong, FANG Yongjie, et al. Parallel computing strategy of online eigenvalue calculation based on IRAM method for large-scale power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 144-148.
- [13] 徐泰山, 鲍颜红, 杨莹, 等. N-2 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 122-126.  
XU Taishan, BAO Yanhong, YANG Ying, et al. Online fast transient angle stability assessment of N-2 contingency set[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 122-126.
- [14] 鲍颜红, 徐泰山, 许立雄, 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 32-35.  
BAO Yanhong, XU Taishan, XU Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive control implementation and total transfer capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 32-35.
- [15] 傅志生, 白晓清, 李佩杰, 等. 一种快速求解大规模安全约束最优潮流的多核并行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 29-37.  
FU Zhisheng, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. A high-speed multi-core parallel method for solving large-scale security constrained OPF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 29-37.

收稿日期: 2016-01-25; 修回日期: 2016-03-22

作者简介:

徐伟(1982-), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: 125481905@qq.com

刘建坤(1980-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析和仿真;

胡昊明(1987-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。

(编辑 周金梅)