

小干扰稳定分析中特定模式降阶法的快速实现

刘畅, 崔惟, 王克文

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 对特定模式降阶法进行改进以提高计算速度。在降阶过程中, 采用共享保留机组的方法来减少确定保留状态变量的计算量; 在复矩阵运算的实数化表达基础上, 对外迭代算式矩阵结构进行调整, 改善对角元的数值大小, 从而可直接采用顺序消去法形成因子表, 实现复矩阵的快速求逆; 内层迭代中将顺序消去和主元消去相结合, 兼顾计算速度和精度 2 个因素; 三元组压缩的矩阵存储方式保证了矩阵运算的稀疏处理; 通过引入 OpenMP 编程接口的计算功能, 实现多核微机上对降阶模式的并行计算。70 机和 105 机算例验证了理论分析的正确性。

关键词: 电力系统; 稳定性; 振荡模式; 稀疏技术; 并行计算

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.017

0 引言

在电力系统小干扰稳定分析中, 特征值分析法^[1]是得到广泛应用的有效方法之一。通过求解系统状态矩阵的特征值、特征向量, 不仅可直接判断系统的稳定性, 还能得到更多的系统信息, 为稳定器设置提供指导^[1-4]。

求解全维特征值的 QR 算法具有鲁棒性强、收敛速度快等优点, 但矩阵阶数较高时, 结果可能存在较大误差。因此, 多种部分特征值方法^[5-10]相继提出。子空间迭代法^[5-6]计算模数较大的一组特征值及特征向量, 包括同时迭代法和 Arnoldi 法^[6]; 而降阶选择模式法^[7-10]则是将系统矩阵降阶处理, 使得降阶系统的特征值包含原系统的主导特征值, 以较小计算量得到所需的特征子集, 如 AESOPS 法^[7]、选择模态分析法^[8-9]等。

概率特征值分析法可以考虑更多的系统运行方式, 并得到特征值的统计特性。为了和概率特征值分析法^[11]配合使用, 文献[12]描述了特定模式降阶法。其大体计算思路与选择模态法^[9]类似, 由于采用了改进 Rayleigh 商逆迭代的完整表达, 可以直接得到较准确的特征值和特征向量, 而迭代初值的确定仍基于全系统状态矩阵的 QR 计算。文献[13]进而考核了降阶系统下特征值灵敏度的计算误差。文献[12]主要在算法方面实现了降阶系统特征值、特征向量的准确计算, 计算效率方面考虑不多。

本文进一步完善特定模式降阶分析法, 提高该方法计算振荡模式特征值的效率, 通过研究降阶过程, 从共享保留机组集、迭代算式调整以及并行计算等方面改进, 并用 70 机和 105 机算例进行验证。

1 特定模式降阶法

小干扰稳定分析中重点关注的是机电振荡模式

或阻尼不足的模式。省级电网状态矩阵的计算规模是几千阶, 用 QR 算法计算包括机电模式在内的全维特征值、特征向量, 作为准确计算的初值。

计算第 k 个特定模式 λ_k 时, 将状态空间方程中的变量分为两部分:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, X_1 为与模式 λ_k 强相关机组的状态列向量, X_2 为待消去的状态列向量, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为状态矩阵的分块子矩阵。

由式(1)消去 X_2 , 得:

$$\dot{X}_1 = [A_1 - A_2(A_4 - pI)^{-1}A_3]X_1 \quad (2)$$

其中, I 为单位矩阵, p 为微分算子。

通过 $B(p)$ 将式(2)简记为:

$$\dot{X}_1 = B(p)X_1 \quad (3)$$

文献[9]证明了当 $p = \lambda_k$ 时降阶系统的 2 个重要性质: λ_k 同时为原系统和降阶系统的特征值; 若降阶前、后 λ_k 的右特征向量分别为 U_{k0} 和 U_{kr} , 则 U_{kr} 等于 U_{k0} 中对应 X_1 的元素。因此, 降阶系统不会畸变原系统的振荡模式特征值及特征向量相应元素^[9]。因此, 当 $p = \lambda_k$ 时, 有:

$$\lambda_k U_{kr} = [A_1 - A_2(A_4 - \lambda_k I)^{-1}A_3]U_{kr} = B(\lambda_k)U_{kr} \quad (4)$$

显然 $B(\lambda_k)$ 是 λ_k 的函数, 所以由 $B(\lambda_k)$ 只能准确计算特定模式 λ_k , 其余特征值存在不同程度的偏差。

振荡模式的特征值 λ_k 是复数, $B(\lambda_k)$ 也是复矩阵。为简化表达, 记降阶矩阵如式(5)所示, 并略去特征值的下标 k 。此外, 下文中 V 和 U 均对应于降阶后矩阵的左、右特征向量。

$$B = B_1 + jB_2 \quad (5)$$

文献[12]采用三重迭代格式, 主要迭代算式如式(6)~(8)所示。

$$\mathbf{B}_{1(l)} + \mathbf{j}\mathbf{B}_{2(l)} = \mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2(\mathbf{A}_4 - \lambda_{(l)}\mathbf{I})^{-1}\mathbf{A}_3 \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta\lambda^{(m)} = \frac{[\mathbf{V}^{(0)}]^T \mathbf{j}\mathbf{B}_2 \mathbf{U}^{(n-1)}}{[\mathbf{V}^{(0)}]^T \mathbf{U}^{(n-1)}} \\ \lambda^{(m)} = \lambda^{(0)} + \Delta\lambda^{(m)} \end{cases} \quad (7)$$

$$(\mathbf{B} - \lambda^{(m)}\mathbf{I})\mathbf{U}^{(n)} = \tau_{mm}\mathbf{U}^{(n-1)} \quad (8)$$

其中, l 、 m 和 n 分别为外层、次外层和内层的迭代次数, $\lambda_{(l)}$ 为特定模式特征值, τ_{mm} 为归一化系数。

外层迭代中, 先按式(6)计算降阶矩阵, 然后用 QR 法求解实部 $\mathbf{B}_{1(l)}$, 得到对应 $\lambda_{(l)}$ 的特征值 $\lambda^{(0)}$ 和左、右特征向量 $\mathbf{V}^{(n-1)}$ 、 $\mathbf{U}^{(n-1)}$ 。

而次外层迭代中, 将虚部 $\mathbf{j}\mathbf{B}_{2(l)}$ 作为 $\mathbf{B}$ 的复数形式的变化量, 按式(7)计算特征值修正量。其中, 初始值 $\mathbf{V}^{(0)}$ 的采用保证了算式的完整表达^[12]。

内层迭代, 按式(8)计算对应的右特征向量 $\mathbf{U}^{(n)}$ 。

2 降阶中保留机组集的共享

计算降阶矩阵的外层迭代式(6)中计及特征值的影响, 且式(7)采用完整表达, 因此特定模式降阶法得到的特征值具有较高的计算精度。但对于省网规模电力系统, 需关注的机电模式或弱阻尼模式较多, 计算量仍很可观。为减少计算量, 进行如下尝试。

尝试 1: 共享降阶矩阵。初值接近的多个特征值采用式(6)形成的同一降阶矩阵; 导致不同初值往往收敛于同一结果, 不可行。

尝试 2: 修正降阶矩阵。先按一个特征值形成降阶矩阵; 分析初值接近的其他模式时, 按特征值偏差量修正降阶矩阵, 由于泰勒级数固有的截断误差, 计算误差偏大。

尝试 3: 共享保留机组。降阶计算时需要确定各模式的保留机组, 对应于式(1)中的 $\mathbf{X}_1$ 。分析各模式的保留机组情况, 对保留机组相同或相近的模式, 采用同一保留机组, 即共享式(6)中的 $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$ 、 $\mathbf{A}_3$ 、 $\mathbf{A}_4$ 。部分减少降阶矩阵的重复计算量。

与 λ_k 强相关的机组构成 λ_k 的保留机组。强相关机组的确定可依据参与因子或特征值对 PSS 增益的灵敏度^[12]。出于计算速度的考虑, 本文采用参与因子评判各机组的参与度。

3 降阶算法的改进实现

3.1 计算效率的改善

降阶过程中的主要计算量由三部分组成: 式(6)的复矩阵求逆, 式(8)的线性方程组求解, 各算式中的矩阵乘法和加法运算。

a. 实数化表达。

为避免复数运算中类型自动转换产生的运算量和相应的累计误差, 将算式转换为实数表达。

b. 采用稀疏技术。

小干扰稳定分析中系统矩阵 $\mathbf{A}$ 的稀疏度与系统结构参数、运行参数和控制方式等因素有关。尽管 $\mathbf{A}$ 的稀疏度不如节点导纳矩阵, 但随着系统规模的扩大, 稀疏度有所提高。

除特征向量、逆阵 $(\mathbf{A}_4 - \lambda_{(l)}\mathbf{I})^{-1}$ 和部分原始参数矩阵外, 对矩阵进行稀疏存储。

在稀疏存储基础上进行矩阵乘法和加法运算, 并利用因子表技术^[1]求解式(8)的线性方程组。

c. 利用 OpenMP 功能方便实现并行计算。

OpenMP 是为共享存储的多处理机编写并行程序而开发的应用编程接口^[15-16], 由编译器自动完成串程序的并行化处理, 可与 Fortran、C 或 C++ 结合工作, 只要在源代码中插入编译指导语句, 并进行少量修改, 就可以方便实现并行计算^[15-16]。

对于省级电力系统, 分析的机电模式较多, 利用 OpenMP 的并行计算模式便于同时使用多核 CPU。

3.2 用顺序高斯消去法进行复矩阵求逆

式(6)中的 $(\mathbf{A}_4 - \lambda_{(l)}\mathbf{I})^{-1}$ 表示对复矩阵求逆, 将其按实、虚部分开, 并设其逆矩阵为 $\mathbf{C} + \mathbf{j}\mathbf{D}$, 则有:

$$(\mathbf{A}_4 - \sigma\mathbf{I} - \mathbf{j}\omega\mathbf{I})(\mathbf{C} + \mathbf{j}\mathbf{D}) = \mathbf{I} \quad (9)$$

写成实矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_4 - \sigma\mathbf{I} & \omega\mathbf{I} \\ -\omega\mathbf{I} & \mathbf{A}_4 - \sigma\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, σ 、 ω 分别为特征值 $\lambda_{(l)}$ 的实部、虚部数值。

对式(10)中的矩阵 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{D}$, 可通过反复求解线性方程组得到。然而, 式(10)的系数矩阵虽然稀疏, 却不能保证对角优势, 因此文献[12]、[13]中按主元消去法解线性方程组。

特征值的虚部对应振荡频率, 当考虑 0.1~2.5 Hz 范围的机电振荡模式^[1]时, ω 取值 0.628~15.7 rad/s, 虚部的绝对值不至于太小。所以对式(10)重新排列, 将特征值虚部置于对角位置, 如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} \omega\mathbf{I} & \mathbf{A}_4 - \sigma\mathbf{I} \\ \mathbf{A}_4 - \sigma\mathbf{I} & -\omega\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

这样排列之后, 可以采用顺序高斯消去法形成因子表, 提高计算效率。

3.3 顺序消去和主元搜索相结合的内迭代计算

式(8)为内迭代算式, 其作用是通过迭代得到特征值 $\lambda^{(m)}$ 的右特征向量 $\mathbf{U}^{(n)}$ 。

由于在内迭代时, 矩阵 $\mathbf{B} - \lambda^{(m)}\mathbf{I}$ 恒定, 利用因子表技术提高求解速度。仿照式(11), 将式(8)按实、虚部展开, 对应特征值虚部的子矩阵置于对角元位置, 有:

$$\begin{bmatrix} \omega^{(m)}\mathbf{I} - \mathbf{B}_2 & \mathbf{B}_1 - \sigma^{(m)}\mathbf{I} \\ \mathbf{B}_1 - \sigma^{(m)}\mathbf{I} & \mathbf{B}_2 - \omega^{(m)}\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2^{(n+1)} \\ \mathbf{U}_1^{(n+1)} \end{bmatrix} = \tau_{mm} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1^{(n)} \\ \mathbf{U}_2^{(n)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

与式(11)相比, 式(12)中的对角元素不是仅由特征值虚部构成, 不能保证对角优势。

将顺序消去和主元消去结合, 在某对角位置出现

元素绝对值较小的情况下,搜索该列剩余行的主元,将待消去行与主元所在行交换。如此形成的因子表,既避免了计算失败,又不需要每次消去时都搜索主元。编程实现时考虑到数据类型的精度,将消去法的主元门槛值设为 10^{-5} ,并利用一维数组记录行交换信息。

3.4 矩阵相乘的稀疏处理

针对次外层迭代算式(7),编程时按三元组(矩阵非零元素值、对应行号及列号)压缩存储矩阵虚部 $j\mathbf{B}_2$,然后和特征向量相乘;式(6)中, $(\mathbf{A}_4 - \lambda_{(i)}\mathbf{I})^{-1}$ 是稠密矩阵,将 $\mathbf{A}_2$ 、 $\mathbf{A}_3$ 稀疏存储后再和 $(\mathbf{A}_4 - \lambda_{(i)}\mathbf{I})^{-1}$ 进行计算。由于仅有非零元素参与运算,提高了速度和精度。

3.5 并行计算的采用

随着电力系统规模的扩大,机电振荡模式的数目相应增加。本文借助 OpenMP 实现多模式特征值的并行计算,对计算程序稍加修改即可实现。

下列示例为 Fortran 程序中采用 OpenMP 多线程并行计算的一种格式,其他线程数类似。

```
!$OMP PARALLEL SECTIONS
!$OMP SECTION
BLOCK1
!$OMP SECTION
BLOCK2
!$OMP SECTION
BLOCK3
!$OMP END PARALLEL SECTIONS
```

其中以!\$OMP开头的语句是 OpenMP 编译指令,而 BLOCK1、BLOCK2 和 BLOCK3 则对应于独立的计算程序段。程序编译时,会将各程序段分配给 3 个不同线程,并分别使用多核计算机的不同 CPU。

OpenMP 功能使并行计算的实现变得简单,尤其是在多核微机上同时使用多个 CPU。当 BLOCK1、BLOCK2 和 BLOCK3 计算程序相同但特征值初值不同时,能同时进行 3 个降阶模式计算。对于在一个降阶模式计算中使用并行计算技术,需要进一步的算式处理,本文尚未考虑。

4 算例分析

算例数据来源于某省网系统等值,算例 1 中发电机数为 70 台;算例 2 为 105 台,接近省网规模。发电机采用五阶模型,励磁调节系统、原动机调速系统采用原有模型。系统矩阵 $\mathbf{A}$ 的有关信息如表 1 所示。

表 1 给出了状态矩阵阶数、矩阵非零元个数等信

表 1 系统状态矩阵信息
Tab.1 Information of system state matrix

算例	发电机数	矩阵 $\mathbf{A}$ 阶数	非零元个数	矩阵稀疏度
1	70	784	74554	87.87%
2	105	1177	166959	87.95%

息,而算例中稀疏度较高的原因,不仅与运行方式有关,还在于程序中将绝对值小于 10^{-12} 的元素当作零元素处理。

本文计算程序在 Visual Studio 2008 平台的 Intel Fortran 11 环境下编写,所有变量都采用双精度数据类型;在个别模块(如 QR 计算)采用记录有效数字位的方法进行乘除运算,减小舍入误差。程序在主频为 2.13 GHz 的双核计算机上编译运行。

用 QR 法算出状态矩阵的初始特征值、特征向量,用特征方程校核,最大偏差小于 10^{-7} ,因此本文按准确值处理。所以算例中只需按最外层迭代算式(6)形成降阶矩阵一次,然后反复进行次外层迭代和内层迭代。

4.1 共享保留机组的分析

研究机电模式时,先根据阈值(本文取各模式最大参与因子绝对值的 10%)确定各模式中的强相关机组;然后将强相关机组相同或较为相近的模式归为一类;对每一类包含的若干模式,同时保留与之强相关的所有机组,得到该类各模式降阶分析时可共享的保留机组。

在算例 1 中,依据强相关机组相同或相近模式归为一类的原则,将 69 个机电模式分成 7 类,如表 2 所示。以表中第 1 行数据为例,当计算第 1 类的 15 个机电模式时,只需采用可共享的 17 台强相关机组,而不必每次重新确定需保留的机组。

表 2 算例 1 中保留机组信息
Tab.2 Information of retained generators in case 1

类别号	保留机组数	降阶矩阵阶数	包含机电模式数
1	17	187	15
2	13	147	11
3	16	178	14
4	6	72	5
5	16	178	4
6	19	215	10
7	15	166	10

由上述结果可知,只需要较少的保留机组,就可以实现对所有机电模式的强相关机组划分。在减少降阶计算量的同时,使各模式的分析更加简洁。

4.2 稀疏技术的使用效果

形成降阶矩阵的外迭代算式(6)中,计算量是矩阵求逆和相乘。为验证改进效果,用 2 种方法实现。

方法 1:按本文所述,用稀疏技术计算逆阵,用三元组法处理矩阵运算。

方法 2:以主元消去法计算逆阵,满阵存储矩阵并进行相应运算。

表 3 列出算例 1 中弱阻尼模式的计算数据。比较计算结果,2 种方法所得到的降阶阵数值一致;而稀疏技术的采用,使方法 1 能较好地节省时间,算例

表 3 算例 1 中弱阻尼模式降阶阵计算数据
Tab.3 Calculation data of order reduction matrix
under low damping mode in case 1

机电振荡 模式特征值	求逆 方程组 阶数	方法 1		方法 2	
		求逆运算	矩阵运算	求逆运算	矩阵运算
		耗时/s	耗时/s	耗时/s	耗时/s
-0.453 4+j8.709 5	1 138	3.969	0.735	12.891	3.828
-0.443 8+j8.142 8	1 212	4.813	0.614	15.640	3.406
-0.360 0+j8.025 6	1 138	3.907	0.745	13.343	3.812
-0.346 7+j7.219 6	1 138	4.047	0.761	20.343	3.828
-0.058 4+j5.224 0	1 138	3.891	0.750	25.812	3.828

1 中求逆和乘法运算的平均时间为 5 s(表 3 中第 3、4 列之和)。

对于降阶阵实部的 QR 计算、次外层迭代式(7)、内层迭代式(8),由于矩阵阶数低,耗时较短。算例 1 中平均用时 1.5 s。

因此,对于包含外层迭代、降阶阵实部 QR 计算、次外层迭代、内层迭代的 3 重运算,按方法 1 的稀疏技术进行计算时,算例 1 的平均耗时约为 6.5 s。

4.3 并行计算效果分析

方法 3:在采用稀疏技术的基础上,按 3.5 节的格式编程,实现并行计算。由于算例分析中采用双核计算机,仅可以实现双线程计算。

表 4 给出了在算例 1 中方法 1 和方法 3 的计算耗时。算例 1 计算 69 个模式,在总耗时中计及了确定共享保留机组的时间,但不含程序运行中数据输入、输出时间。

表 4 算例 1 中方法 1 和 3 的用时比较
Tab.4 Comparison of computation time between
method 1 and method 3 in case 1

状态矩阵 阶数	方法 1		方法 3	
	3 重迭代	降阶计算	3 重迭代	降阶计算
	平均耗时/s	总耗时/s	平均耗时/s	总耗时/s
784	6.5	454.1	3.5	244.3

采用并行计算后,降阶法的计算时间有明显改善。

4.4 算例 2

算例 2 含 105 台发电机,状态矩阵为 1 177 阶。

类似地,将 104 个机电模式共分成 9 类,各类中保留机组的数目在 9~21 台之间,即计算单个机电模式时的发电机数不超过 21 台。

仅采用稀疏技术时,即方法 1,平均 1 个振荡模式的计算时间是 25.1 s,计算 104 个机电模式的总耗时为 2 612.6 s。

进一步结合双线程并行计算,即方法 3,平均 1 个模式的计算时间是 13.1 s,计算 104 个机电模式的总耗时是 1 358.3 s。

为考核计算效果,本文在算例分析中计算了所有机电模式。对实际系统,仅需计算关注的振荡模式,计算用时会成比例降低;如果进一步采用更多线程,例如利用 4 核或 8 核微机,计算时间将进一步减少。

5 结论

特定模式降阶法采用完整表达形成降阶矩阵,能够得出精度较高的特征值。本文对该方法进行了改进。通过研究降阶过程,提出了机电模式共享保留机组集以减少降阶计算量。调整迭代算式采用顺序消去或将顺序消去和主元消去结合,提高计算速度;在矩阵运算中稀疏处理,以节省计算时间。引入 OpenMP 的并行计算功能,实现多核计算机上对降阶的快速计算。针对省级电力系统的规模,在 70 机和 105 机算例中具体讨论了机电模式共享保留机组集的情况,并详细分析了采用稀疏技术和并行计算的改进效果。

参考文献:

[1] 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,2000:387-398.

[2] 王康,金宇清,甘德强,等. 电力系统小信号稳定分析与控制综述[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):10-19.

WANG Kang,JIN Yuqing,GAN Deqiang,et al. Survey of power system small signal stability and control[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):10-19.

[3] 崔小磊,赵书强,闫健杰. 快速求解多机系统机电振荡模式的新算法[J]. 电力自动化设备,2006,26(6):36-39.

CUI Xiaolei,ZHAO Shuqiang,YAN Jianjie. Electromechanical mode fast calculation of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(6):36-39.

[4] 尹波,庞松龄,杨眉. 基于阻尼灵敏度指标的 PSS 参数优化[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(8):28-32.

YIN Bo,PANG Songling,YANG Mei. Optimization of PSS parameters based on damping sensitivity indices[J]. Power System Protection and Control,2011,39(8):28-32.

[5] ANGELIDIS G,SEMLYEN A. Improved methodologies for the calculation of critical eigenvalues in small signal stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems,1996,11(3):1209-1217.

[6] 谷寒雨,陈陈. 一种新的大型电力系统低频机电模式计算方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):50-54.

GU Hanyu,CHEN Chen. A new algorithm for the computation of low frequency electro-mechanical oscillation modes of large power system[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(9):50-54.

[7] SAUER P W,RAJAGOPALAN C,PAIM P. An explanation and generalization of the AESOPS and PEALS algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems,1991,6(1):293-299.

[8] PEREZ-ARRIAGA I J,VERGHESE G C,SCHWEPPE F C. Selective modal analysis with application to electric power systems,part I:heuristic introduction[J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems,1982,101(9):3117-3134.

[9] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:270-271.

[10] 岳涵,赵登福,夏道止,等. 求解大型电力系统机电振荡模态的逆幂方法[J]. 西安交通大学学报,2010,44(10):93-98.

YUE Han,ZHAO Dengfu,XIA Daozhi,et al. Inverse power algorithm for solving electromechanical modes of large-scale power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2010,44(10):93-98.

- [11] 谢志棠,宗秀红,钟志勇,等. 计及 FACTS 装置的概率特征值分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):13-17.
XIE Zhitang,ZONG Xiuhong,ZHONG Zhiyong,et al. Probabilistic eigenvalue analysis including FACTS devices[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(8):13-17.
- [12] 和萍,王克文,谢志棠. 利用改进 Rayleigh 商迭代法进行大系统特定模式降阶[J]. 电工技术学报,2007,22(4):130-135.
HE Ping,WANG Kewen,XIE Zhitang. Order reduction of large power systems for special modes using the improved Rayleigh quotient inverse iteration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(4):130-135.
- [13] 李奎奎,王克文,邱磊,等. 大系统特定模式动态降阶方法的误差分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(1):67-71.
LI Kuikui,WANG Kewen,QIU Lei,et al. Error analysis of the dynamic order reduction approach for specific mode in large-scale systems[J]. Power System Protection and Control,2011,39(1):67-71.
- [14] 刘涛,宋新立,汤涌,等. 特征值灵敏度方法及其在电力系统小干扰稳定分析中的应用[J]. 电网技术,2010,34(4):82-87.
LIU Tao,SONG Xinli,TANG Yong,et al. Eigenvalue sensitivity and its application in power system small signal stability[J]. Power System Technology,2010,34(4):82-87.
- [15] 蔡佳佳,李名世,郑锋. 多核微机基于 OpenMP 的并行计算[J]. 计算机技术与发展,2007,17(10):87-91.
CAI Jiajia,LI Mingshi,ZHENG Feng. OpenMP-based parallel computation on multi-core PC[J]. Computer Technology and Development,2007,17(10):87-91.
- [16] 王顺绪. 多核计算机上并行计算的实现与分析[J]. 淮海工学院学报:自然科学版,2009,18(3):30-33.
WANG Shunxu. Implementation and analyses of parallel computation on multi-core computers[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology:Natural Science Edition,2009,18(3):30-33.

作者简介:

刘 畅(1987-),男,河南商丘人,硕士研究生,从事电力系统稳定分析与控制方面的研究(E-mail:liuchang6581@163.com);

崔 惟(1986-),男,河南郑州人,硕士研究生,从事电力系统分析与计算方面的研究;

王克文(1964-),男,山西运城人,教授,博士,从事电力系统稳定分析与控制方面的研究。

Fast realization of special mode order reduction in small signal stability analysis

LIU Chang,CUI Wei,WANG Kewen

(School of Electrical Engineering,Zhengzhou University,Zhengzhou 450001,China)

Abstract: The method of special mode order reduction is improved to increase its calculation speed. During the process of order reduction,the retained generators are shared to reduce the computation load for determining the retained state variables. Based on the realification expression of complex matrix,the matrix structure in the outer iteration expression is adjusted to improve the absolute values of diagonal elements,by which,the sequence elimination approach can be directly used to form the factor table for realizing the fast inverse of complex matrix. With the consideration of both computation time and precision,the sequence elimination approach and the pivoting elimination approach are combined in the inner iteration process. Only the non-zero elements with their row and column numbers are stored to ensure the sparse processing in matrix operation. The parallel computation function of OpenMP technique is introduced for the parallel calculation of order reduction mode on multi-core computer. Case study for 70-machine and 105-machine verifies the correctness of theoretic analysis.

Key words: electric power systems; stability; oscillation mode; sparse technique; parallel computation