

基于 OpenMP 并行简约空间内点法的暂态稳定紧急控制

王 云,江全元

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 电力系统暂态稳定紧急控制问题是一类复杂的非线性动态优化问题,计算效率是其实用化瓶颈所在。利用差分后紧急控制问题自由度很低的特点,应用简约空间内点算法进行求解。算法在 C++ 环境下编程实现,对关键耗时部分多线程并行计算。算例测试结果表明,所提并行算法是有效的,且与传统内点算法相比,该算法消耗的计算时间和内存更少,能够求解大规模的电力系统紧急控制问题。

关键词: 电力系统; 暂态; 稳定性; 控制; 简约空间内点法; 并行计算; OpenMP

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.014

0 引言

暂态稳定紧急控制是维持电力系统安全稳定运行的重要手段。暂态稳定紧急控制问题通常建模为考虑暂态稳定约束和系统经济运行的最优化问题。

目前,求解暂态稳定紧急控制问题的算法主要有试凑法或启发式算法^[1-3]、基于暂态能量函数的直接法和基于最优控制理论的优化算法。暂态稳定紧急控制问题的难点之一在于暂态稳定约束的描述,基于能量函数的方法在暂态稳定预防控制和暂态稳定紧急控制方面已有广泛的研究^[4-11]。时域仿真法是解决暂态稳定紧急控制的另一种方法,基于最优控制理论,各种紧急决策计算均描述为以控制代价最小为目标、以维持系统安全稳定为约束条件的最优控制问题,这类最优控制问题实质上就是最优参数选取问题。文献[12-13]将切负荷问题描述为最优控制问题,提出了一种系统化地决定最小切负荷量及其在各切负荷点分配的算法。文献[14]基于时域仿真得到的系统受扰轨迹给出暂态稳定紧急控制的非线性模型,然后采用近似规划法和拟贪婪法求解。

简约空间技术主要用来求解自由度较小的非线性规划问题,已在化工领域获得了广泛应用^[15]。文献[16-17]用简约空间内点算法求解暂态稳定最优潮流问题,计算效率获得极大的提升。文献[18]应用简约空间二次规划法求解暂态电压稳定紧急控制问题,显著提高了计算效率。由于暂态稳定紧急控制问题中可切负荷/发电机节点相对于问题规模非常小,即该类问题自由度很低,本文运用简约空间内点算法

进行求解。此外,算法采用 C++ 编程实现,对于算法的关键耗时环节,充分利用多线程并行技术。多个算例测试结果表明,本文提出的基于 OpenMP 并行简约空间内点法在求解紧急控制问题中,计算时间明显缩短,占用内存减小,能够求解大规模系统的紧急控制问题。

1 暂态稳定紧急控制数学模型

电力系统最优切机切负荷控制问题是一个大规模动态优化问题,其一般形式为:

$$\begin{aligned} \min_x & F(x) \\ \text{s.t.} & H(x, \dot{x})=0 \\ & \underline{G} \leq G(x, \dot{x}) \leq \bar{G} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, x 为优化变量; F 为优化问题目标函数; H 为含微分方程等式约束; G 为含微分方程不等式约束; \bar{G} 、 \underline{G} 分别为不等式约束上、下限。

采用隐式梯形积分方法对上述动态优化问题差分化,动态优化问题(1)可转化为如下非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \min_x & f(x) \\ \text{s.t.} & h(x)=0 \\ & \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (2)$$

1.1 目标函数

暂态稳定紧急控制的目的是切除最少的发电机和负荷来保持系统暂态稳定,因此,本文将优化目标函数设为切机和切负荷量加权最小:

$$F(u) = c_G(P_G)^T u_G + c_L(P_L)^T u_L \quad (3)$$

其中, $u = [u_G, u_L]$, 为优化控制变量, u_G, u_L 分别为各可切发电机节点切机比例组成的向量和可切负荷节点切负荷比例组成的向量; c_G, c_L 分别为切机、切负荷控制代价的权值,用来表征可切发电机和负荷的重要性,本文中权值均取为 1,即所有可切发电机、可切负荷重要性相同; P_G, P_L 分别为各可切发电机节点装机容量和各可切负荷节点总负荷。

收稿日期:2013-12-04;修回日期:2014-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(J20130002);教育部博士点基金资助项目(J20130014);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA05A118)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(J20130002),the Doctoral Fund of Ministry of Education of China(J20130014) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A118)

1.2 等式约束

a. 发电机动态方程。

电力系统经典模型对于系统第一摆稳定分析非常有效实用^[19]。本文中发电机模型采用经典模型,负荷采用恒阻抗模型,因此,各发电机可由如下两阶微分方程描述:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_i^t}{dt} = (\omega_i^t - 1)\omega_s \\ \frac{d\omega_i^t}{dt} = (P_{mi} - P_{ei}^t)/T_{Ji} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N_G$ (N_G 为发电机节点数); $P_{ei}^t = \text{Re} \left(E_i' \frac{\hat{E}_i' - \hat{U}_i^t}{-jx_{di}'} \right) = \frac{E_i'(e_i' \sin \delta_i^t - f_i' \cos \delta_i^t)}{x_{di}'}$, \hat{E}_i' 为发电机暂态电势,经典模型下为恒定值, E_i', x_{di}' 分别为发电机节点 i 暂态电势、直轴暂态电抗, $\delta_i^t, \hat{U}_i^t, e_i', f_i'$ 分别为发电机节点 i 在 t 时刻的功角、节点电压、节点电压实部、节点电压虚部; T_{Ji}, P_{mi} 分别为发电机节点 i 惯性时间常数和有功出力; ω_i^t 为发电机节点 i 在 t 时刻的角速度; ω_s 为同步角速度有名值。

b. 电网方程。

将发电机表示成电流源形式,并将发电机等值导纳和负荷等值导纳并入网络,电网方程可写成:

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} e_1^t \\ f_1^t \\ \vdots \\ e_{n_B}^t \\ f_{n_B}^t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{x1}^t \\ I_{y1}^t \\ \vdots \\ I_{xn_B}^t \\ I_{yn_B}^t \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} \\ B_{11} & G_{11} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{1n_B} & -B_{1n_B} \\ B_{1n_B} & G_{1n_B} \end{bmatrix} \\ \vdots & & \vdots \\ \begin{bmatrix} G_{n_B 1} & -B_{n_B 1} \\ B_{n_B 1} & G_{n_B 1} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{n_B n_B} & -B_{n_B n_B} \\ B_{n_B n_B} & G_{n_B n_B} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

其中, I_{xi}^t, I_{yi}^t 分别为 t 时刻发电机节点 i 的注入电流实部和虚部; G_{ij}, B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 节点导纳实部和虚部; n_B 为系统节点数。

对于可切机的发电机节点,有:

$$\begin{cases} I_{xi}^t = (1 - u_{Gi}) \frac{E_i'}{x_{di}'} \sin \delta_i^t \\ I_{yi}^t = -(1 - u_{Gi}) \frac{E_i'}{x_{di}'} \cos \delta_i^t \\ G_{ii} = G_{ii}' \\ B_{ii} = B_{ii}' - (1 - u_{Gi})/x_{di}' \end{cases} \quad (6)$$

对于不可切机的发电机节点,有:

$$\begin{cases} I_{xi}^t = \frac{E_i'}{x_{di}'} \sin \delta_i^t \\ I_{yi}^t = -\frac{E_i'}{x_{di}'} \cos \delta_i^t \\ G_{ii} = G_{ii}' \\ B_{ii} = B_{ii}' - 1/x_{di}' \end{cases} \quad (7)$$

对于可切负荷节点,有:

$$\begin{cases} G_{ii} = G_{ii}' + (1 - u_{Li})G_{Li} \\ B_{ii} = B_{ii}' + (1 - u_{Li})B_{Li} \end{cases} \quad (8)$$

对于不可切负荷节点,有:

$$\begin{cases} G_{ii} = G_{ii}' + G_{Li} \\ B_{ii} = B_{ii}' + B_{Li} \end{cases} \quad (9)$$

其中, G_{ii}', B_{ii}' 分别为发电机等值导纳和负荷等值导纳并入网络前节点自导纳实部和虚部; G_{Li}, B_{Li} 分别为负荷等值导纳的实部和虚部; u_{Gi}, u_{Li} 分别为切机点切机比例和切负荷点切负荷比例。

1.3 不等式约束

a. 控制变量上下界约束:

$$\begin{cases} 0 \leq u_{Gi} \leq 1 \\ 0 \leq u_{Li} \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

b. 暂态稳定约束。

暂态稳定判据采用中性惯量形式表示:

$$\underline{\delta} \leq \delta_i^t - \delta_{\text{CoI}}^t \leq \bar{\delta} \quad (11)$$

其中, $\delta_{\text{CoI}}^t = \sum_{i=1}^{N_G} M_i \delta_i^t / \sum_{i=1}^{N_G} M_i$, M_i 为发电机惯性常数; $\underline{\delta}, \bar{\delta}$ 分别为功角上、下界约束。

2 基于 OpenMP 并行简约空间内点法

2.1 简约空间内点算法

采用预测-校正内点法求解非线性规划问题(2),其一阶最优必需条件(KKT 条件)求解包括预测和校正 2 步,其主要计算量在求解以下对称线性方程组^[20]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}' & \nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ \nabla_x^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}'_x \\ -\mathbf{L}_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$; $\mathbf{h}(\mathbf{x}): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$; $\mathbf{H}' \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为约束条件和目标函数对应海森矩阵的线性组合; $\nabla_x^T \mathbf{h}(\mathbf{x})$ 表示等式约束 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 对变量 \mathbf{x} 的雅可比矩阵; \mathbf{L}'_x 和 \mathbf{L}_y 为库恩-塔克系统的右端残差向量,具体定义参考文献[21]。

简约空间技术适用于自由度较低的非线性规划问题,用来求解对称线性方程组(12)。将变量 \mathbf{x} 分成程空间 \mathbf{D}_Y 和零空间 \mathbf{D}_Z 两部分, \mathbf{D}_Y 由 m 个非独立变量组成, \mathbf{D}_Z 由 $n-m$ 个独立变量组成。变量 \mathbf{x} 的解可写成:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{Y} \mathbf{p}_Y + \mathbf{Z} \mathbf{p}_Z \quad (13)$$

其中, $\mathbf{p}_Y \in \mathbf{D}_Y$; $\mathbf{p}_Z \in \mathbf{D}_Z$; $\mathbf{Y} \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $\mathbf{Z} \in \mathbf{R}^{n \times (n-m)}$ 分别称为程空间和零空间基矩阵, $[\mathbf{Y} \ \mathbf{Z}]$ 非奇异。零空间基矩阵 \mathbf{Z} 满足:

$$\nabla_x^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) \mathbf{Z} = 0 \quad (14)$$

取 $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} -\mathbf{C}^{-1} \mathbf{N} \\ \mathbf{I}_{n-m} \end{bmatrix}$, $\nabla_x^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) = [\mathbf{C} \ \mathbf{N}]$, $\mathbf{I}_m, \mathbf{I}_{n-m}$ 分别为 m 维和 $n-m$ 维单位对角矩阵,令 $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_m \\ \mathbf{I}_{n-m} \end{bmatrix}$, 则:

$$CZ_m = -N \quad (15)$$

则 $p_Y, p_Z, \Delta y$ 分别如下求得:

$$Cp_Y = -L_Y \quad (16)$$

$$C^T \Delta y = L_m \quad (17)$$

$$Bp_Z = Z^T L'_x - \omega \quad (18)$$

其中, $B = Z^T H' Z$; $\omega = Z^T H' Y p_Y$; $L'_x - H' \Delta x = \begin{bmatrix} L_m \\ L_{n-m} \end{bmatrix}$ 。

详细的简约空间内点算法原理及实施细则可参考文献[16]。采用简约空间内点算法求解紧急控制问题时,方程组(15)~(17)的求解通过调用 KLU^[21] 计算,其对矩阵 C 的分解可复用,每次迭代只需做 1 次 LU 分解。算例分析表明,简约空间下紧急控制算法的主要计算时间集中在矩阵 B 和 Z_m 的计算上,本文通过多线程技术提高这部分的计算效率。

2.2 OpenMP 并行算法

2.2.1 OpenMP 编程模型

为充分利用多核处理器计算平台的计算性能,针对算法可解耦部分利用多线程技术实现并行计算从而加快计算速度。OpenMP^[22] 提供了一套共享存储体系结构下的多线程编程模型,从而实现本文算法多线程并行技术。

如图 1 所示,OpenMP 采用 Fork-Join 的并行执行模型:程序首先以单线程(主线程)开始,类似一个串行程序,当遇到并行结构,主线程会产生一组线程(Fork 动作),每个线程都执行并行动态扩展域中的代码;并行结构执行完后,只有主线程继续执行,其他所有的线程结束执行(Join 动作)。本程序并行化部分,系统给每个线程分配一个 CPU 核心。

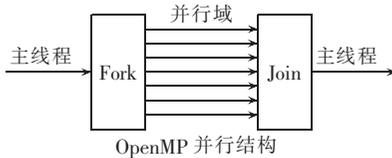


图 1 Fork-Join 模型
Fig.1 Fork-Join model

2.2.2 并行简约空间内点算法

在简约空间内点算法框架下,多线程技术可通过下面 2 种方式实现。

a. 矩阵 Z_m 的多线程求解。

矩阵 Z_m 的计算公式为式(15)。求解矩阵 Z_m 实质就是求解一稀疏线性方程组,本文调用 KLU 解法器计算矩阵 Z_m 。KLU 解法器是一性能优良的稀疏线性方程组解法器,其计算过程主要包含 LU 分解和回代 2 个步骤:首先对 C 进行分解,然后对 N 的各列向量逐步回代,最后得到 Z_m 。算例测试表明,回代过程占据了主要计算时间。

矩阵 N 是由 $n-m$ 个 m 维列向量构成,在回代过程,矩阵 N 各个列向量回代过程相互独立。将 N

分解成 p (p 为线程数)个 m 维列向量组成的矩阵,即 $N = [N_1 \ N_2 \ \dots \ N_p]$ 。可将这 p 个矩阵分配给各计算线程实现并行回代,从而加快计算速度,如图 2 所示。KLU 解法器是一个串行解法器,不支持并行计算。本文对 KLU 代码进行了修改,使其按图 2 所示支持多线程回代。

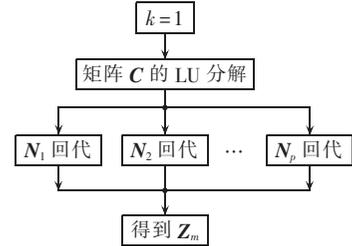


图 2 Z_m 多线程计算
Fig.2 Multi-thread calculation of Z_m

b. 矩阵 B 的多线程计算。

本文算法采用 C++ 编程实现,算法实施过程中涉及到较多矩阵操作,尤其是 B 的计算占据较多时间。目前有许多高性能线程代数库可供调用,很多都支持多处理器平台下的多线程并行。在本文中,基础线程代数库(BLAS)被用来作一些矩阵与矩阵相乘运算和矩阵与向量相乘运算,在计算矩阵 B 时主要调用 DCSRMM 和 DGEMM 函数进行求解,这 2 个函数均支持 OpenMP 下多线程计算,程序实现时通过调用 MKL_NUM_THREADS 函数设置线程数,开启多线程从而加快计算速度。此外,线性代数解法器(LAPACK)被用来求解稠密线性方程组(18)。

2.3 算法实施流程

采用本文提出的算法求解暂态稳定紧急控制问题的主要步骤如下:

- 读入算例数据,包括故障信息;
- 对故障后系统进行暂态稳定仿真计算,若系统保持稳定,不需要切机切负荷,跳到步骤 g;
- 按照第 1 节内容对暂态稳定紧急控制问题数学建模;
- 对系统变量及收敛条件初始化, $k=0$,算法优化开始;
- 按照第 2 节提出的并行简约空间内点算法计算变量 x 更新步长;
- 判断是否达到收敛条件,若未收敛, $k=k+1$,跳到步骤 e;
- 算法退出,输出结果。

3 算例分析

3.1 测试算例

本文采用基于 OpenMP 并行简约空间内点法对 4 个算例进行了计算,这 4 个算例是在

IEEE 标准算例的基础上修改得到,根据切机量和切负荷量相对功角稳定的灵敏度大小来确定可切发电机和负荷。表 1 给出 4 个测试算例的参数,其中 n_B 、 n_L 、 N_G 、 n_G 、 N_{load} 、 n_{load} 分别表示系统节点数、系统线路数、系统发电机数、系统可切发电机数、系统负荷数、系统可切负荷数。对所有测试系统,在 $t=0$ 时刻发生三相短路故障, $t=0.2$ s 切除故障线路, $t=0.3$ s 执行切机切负荷操作。 t_{sim} 为算法仿真时间,即为切负荷时刻至末端时刻的时间差。采用隐式梯形积分法进行暂态稳定分析时,积分步长在本文中取为 Δt 。程序中各发电机相对于惯性中心的偏差不超过 $\pm 110^\circ$ 作为暂态稳定判据。

表 1 测试算例参数
Table 1 Parameters for case tests

测试算例	n_B	n_L	N_G	n_G	N_{load}	n_{load}	t_{sim}/s
CASE300	300	411	69	27	199	57	1.5
CASE678	678	919	170	51	274	100	1.5
CASE2052	2052	2533	211	69	387	82	1.5
CASE2383	2383	2896	327	50	1822	100	1.5

表 2 给出了 4 个测试算例采用隐式梯形积分差分方法离散微分方程和网络方程后问题规模,其中 n 表示问题状态变量数, m 表示问题等式约束数, δ_{DOF} 表示问题自由度即为 n 与 m 之差, r_{DIM} 、 N_{NZ} 分别表示原对偶系统式(12)的维数和非零元数量。可以看出,差分后优化问题自由度很小,即满足 $\frac{n-m}{n} \ll 1$, 从而该问题非常适合简约空间下求解。

表 2 测试算例问题规模
Table 2 Scales of case tests

测试算例	n	m	r_{DIM}	N_{NZ}	δ_{DOF}	$\frac{n-m}{n}/\%$
CASE300	56034	55950	111984	1322527	84	0.150
CASE678	128707	128556	257263	4081877	151	0.117
CASE2052	343705	343554	687259	5350422	151	0.044
CASE2383	411416	411266	822682	13729141	150	0.036

本文算法采用 C++ 编程实现,测试环境为 Intel Xeon 2 quad-core CPU, OpenMP 被用来实现多线程并行。通过调用英特尔提供的高性能多线程线性代数库(BLAS 和 LAPACK)实现算法中的一些矩阵运算。KLU 解法器被用来对算法中稀疏线性方程组进行求解。

3.2 测试结果

本文算法是基于 OpenMP 并行简约空间内点法。为表述简洁,本文称传统内点算法为全空间内点算法。为了比较本文算法与常规算法的性能优劣,对上面 4 个算例用隐式梯形差分方法离散微分方程和网络方程,并在全空间、简约空间以及并行简约空间下求解,测试结果如表 3 所示。表 3 中“×”表示因时间或者内存不足导致问题不可解。

表 3 测试结果

Table 3 Results of case tests

测试算例	迭代次数	计算时间/s		
		全空间内点算法	简约空间内点算法	并行简约空间内点算法
CASE300	12	×	6.54	2.99
CASE678	21	×	60.5	22.8
CASE2052	33	×	193	71.5
CASE2383	17	×	184	71.8

从表 3 中可以看出,采用隐式梯形积分差分微分方程和网络方程,简约空间下计算速度明显比全空间下计算速度要快,并且可以求解更大规模系统紧急控制问题。因简约空间技术只是在求取式(12)时采取的策略,其并不改变迭代过程,简约空间和全空间下问题迭代进程是完全一样的,得出的优化结果也一样。因此,本文将把全空间和简约空间得出问题的迭代次数统一列出。

基于 OpenMP 并行简约空间算法是在简约空间算法的框架下对一些计算步骤利用多线程技术并行求解,它不改变算法的计算进程,因而两者有相同的迭代进程和相同的优化结果。从表 3 可以看出,在 8 核处理器计算平台下,并行简约空间内点算法计算效率进一步提高。

本文选取切机切负荷作为紧急控制措施来保证暂态稳定性。以 CASE300 为例,列出优化后切机、切负荷量如表 4 所示。

表 4 切机切负荷优化结果

Table 4 Results of generator trip and load shedding optimization

切机点	切机量/MW	切负荷点	切负荷量/MW
30	397.3	3	294.98
46	1.82	21	73.54
		26	2.40

3.3 并行性能分析

首先对串行简约空间下算法各部分计算时间进行分析如表 5 所示。从表 5 可以看出,简约空间内点算法下暂态稳定紧急控制问题的计算时间主要集中在 B 计算时间和 Z_m 回代时间。因而本文对这部分进行多线程并行求解,提高计算效率。

表 5 串行简约空间内点算法计算效率分析

Table 5 Calculation efficiency analysis of serial reduced-space interior point method

测试算例	总时间	Z_m 回代时间	B 计算时间	其他时间
CASE300	6.54	2.08	2.71	1.75
CASE678	60.5	14.8	33.6	12.1
CASE2052	193	50.1	111	31.9
CASE2383	184	50	89.3	44.7

为了分析 B 计算和 Z_m 回代的并行效率,线程数 p 取 1 到 8 分别进行测试,测试结果如图 3、图 4 所示。从图 3、图 4 可以看出,当线程数较少时,本文算

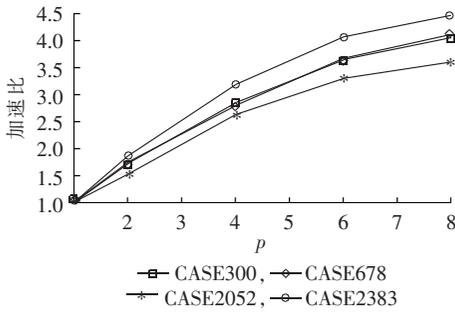


图 3 Z_m 回代过程加速比

Fig.3 Acceleration ratio of Z_m back substitution

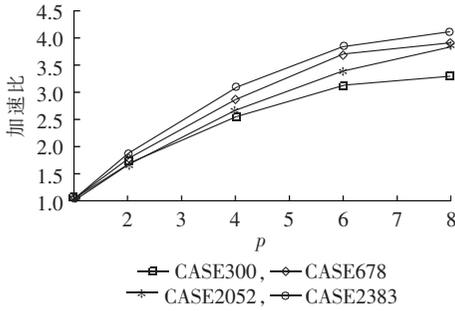


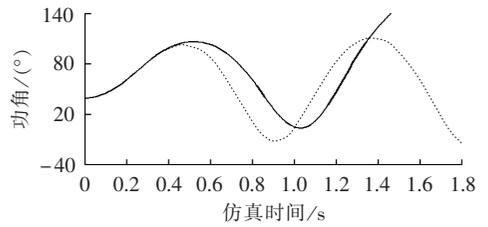
图 4 B 计算过程加速比

Fig.4 Acceleration ratio of B calculation

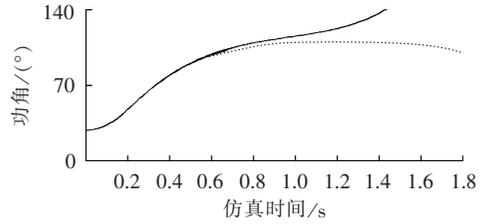
法几乎可以达到线性加速比,随着线程数的增加,加速比增长放缓,在 8 核处理器下,加速比最大可达 4.5。一般而言,测试算例规模越大,本文算法可获得越好的加速比。因此,本文算法对大规模系统暂态稳定紧急控制问题的求解有较好的潜力。

3.4 时域仿真验证

通过时域仿真来验证上面 4 个算例的第一摆稳定性,图 5 给出了各个测试算例发电机摇摆曲线,图中实线为系统发生故障后不执行紧急控制操作的功角曲线;虚线为执行切机切负荷操作的功角曲线。因全空间内点算法、简约空间内点算法和并行简约空间内点算法三者有相同的迭代进程,因此 3 种算法得出的优化曲线一致,本文只给出简约空间下发电机摇摆曲线。由图 5 可以看出,电力系统发生故障



(c) CASE2052



(d) CASE2383

图 5 测试算例时域仿真结果

Fig.5 Time-domain simulative results of case tests

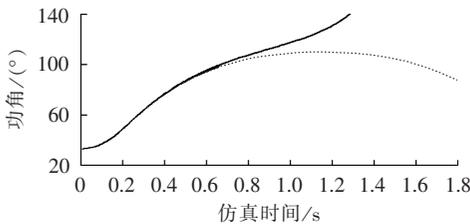
后不执行切机切负荷操作将失去稳定。采用本文提出的算法执行切机切负荷操作,系统能够保持暂态稳定。

4 结语

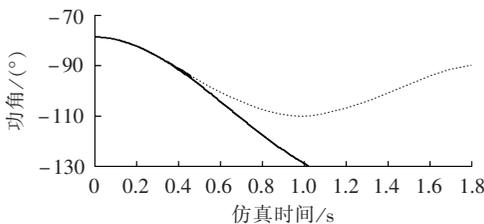
电力系统暂态稳定紧急控制问题是一类大规模非线性动态优化问题。本文提出了一种基于 OpenMP 的并行简约空间内点法求解该类问题。测试结果表明,相对传统内点算法,本文提出的并行简约空间内点算法计算效率明显提高,能计算更大规模系统,在多核处理器平台下,多线程技术进一步提高了算法计算速度。随着多核处理器的普及,本文算法实际效益更为明显。

参考文献:

- [1] 毕兆东,王健全,韩祯祥. 基于数值积分法灵敏度的快速切负荷算法[J]. 电网技术,2002,26(8):4-7.
BI Zhaodong,WANG Jianquan,HAN Zhenxiang. A fast load shedding algorithm based on integral sensitivity[J]. Power System Technology,2002,26(8):4-7.
- [2] OTA H,KITAYAMA Y,ITO H,et al. Development of Transient Stability Control system (TSC system) based on on-line stability calculation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1996,11(3):1463-1472.
- [3] 姚国强,江涵,江全元. 最优切负荷控制问题的并行模式搜索算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):11-15.
YAO Guoqiang,JIANG Han,JIANG Quanyuan. Parallel pattern search algorithm for optimal load shedding control problem[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(4):11-15.
- [4] 刘明波,阳曾. 含暂态能量裕度约束多故障最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):12-18.
LIU Mingbo,YANG Zeng. Optimal power flow calculation with transient energy margin constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(34):12-18.
- [5] 夏德明,梅生伟,沈沉,等. 基于暂态稳定裕度指标的最优潮流求



(a) CASE300



(b) CASE678

- 解[J]. 电力系统自动化,2006,30(24):5-10.
- XIA Deming,MEI Shengwei,SHEN Chen,et al. Computation of optimal power flow with transient stability margin index[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(24):5-10.
- [6] 张瑞琪,闵勇,侯凯元. 电力系统切机/切负荷紧急控制方案的研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(18):6-12.
- ZHANG Ruiqi,MIN Yong,HOU Kaiyuan. A new method for generation shedding and load shedding in power system emergency control[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(18):6-12.
- [7] FOUAD A A,GHAFURIAN A,NODEHI K,et al. Calculation of generation-shedding requirements of the B.C. hydro system using transient energy functions[J]. IEEE Trans on Power Systems,1986,1(2):17-23.
- [8] VITTAL V,ZHOU E Z,HWANG C,et al. Derivation of stability limits using analytical sensitivity of the transient energy margin[J]. IEEE Trans on Power Systems,1989,4(4):1363-1372.
- [9] MIN Yong,HOU Kaiyuan,ZHANG Ruiqi,et al. A new method for generation shedding and load shedding in power system emergency control[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation,Restructuring and Power Technologies,2004. (DRPT2004). [S.l.]:IEEE,2004:210-214.
- [10] 兰强,方勇杰,鲍颜红,等. 基于EEAC的考虑暂态安全稳定约束的最优潮流计算[J]. 电力系统自动化,2010,34(8):34-39.
- LAN Qiang,FANG Yongjie,BAO Yanhong,et al. Transient security constrained optimal power flow based on EEAC method[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(8):34-39.
- [11] 王建全,王伟胜,朱振青,等. 电力系统最优切负荷算法[J]. 电力系统自动化,1997,21(3):33-36.
- WANG Jianquan,WANG Weisheng,ZHU Zhenqing,et al. Optimal load shedding algorithm in power system[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(3):33-36.
- [12] 王建全. 大规模动态电力系统最优参数选取问题的研究[D]. 杭州:浙江大学,1999.
- WANG Jianquan. Studies on optimal parameter selection for larger dynamic power system[D]. Hangzhou:Zhejiang University,1999.
- [13] 常乃超,陈得治,于文斌,等. 基于受控微分-代数系统灵敏度分析的紧急控制[J]. 电力系统自动化,2003,27(17):19-22.
- CHANG Naichao,CHEN Dezhi,YU Wenbin,et al. Emergency control based on sensitivity analysis of controlled differential-algebraic systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(17):19-22.
- [14] CERVANTES A M,WACHTER A,TUTUNCU R H,et al. A reduced space interior point strategy for optimization of differential algebraic systems[J]. Comput Chem Eng,2000,24(1):39-51.
- [15] JIANG Q Y,GENG G C. A reduced-space interior point method for transient stability constrained optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems,2010,25(3):1232-1240.
- [16] 夏小琴,韦华. 极坐标形式的暂态稳定约束最优潮流的简约空间内点算法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(4):14-20.
- XIA Xiaoqin,WEI Hua. A reduced-space interior point method for transient stability constrained optimal power flow in polar coordinate[J]. Power System Protection and Control,2012,40(4):14-20.
- [17] ANDERSON P M,FOUAD A A. Power system control and stability[M]. Ames,Iowa:The Iowa State University Press,1977.
- [18] JIANG Q,HUANG Z. An enhanced numerical discretization method for transient stability constrained optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems,2010,25(4):1790-1797.
- [19] DAVOS T A,NATARAJAN E P. Algorithm 907:KLU a direct sparse solver for circuit simulation problems[J]. ACM Trans Math Softw,2010,37(3):1-17.
- [20] CHAPMAN B,JOST G,van der PAS R. Using OpenMP:portable shared memory parallel programming[M]. Cambridge,UK:MIT Press,2007:23-31.
- [21] 王锡凡,杜正春,方万良. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2006:121-123.

作者简介:



王云

王云(1988—),男,江西南昌人,博士,主要研究方向为电力系统优化控制及并行计算、电力系统动态参数辨识;

江全元(1975—),男,湖北黄冈人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化控制与并行计算、牵引供电品质、分布式发电与集中式可再生能源发电(E-mail:jyq@zju.edu.cn)。

Transient stability emergency control based on OpenMP parallel reduced-space interior point method

WANG Yun,JIANG Quanyuan

(College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Transient stability emergency control of power system is a complex nonlinear dynamic optimization problem and the calculation efficiency is the bottleneck of its practical application. As the freedom degree of emergency control problem after differencing is very low, the reduced-space interior point method is applied to solve the problem. The algorithm is written in C++ and the key time-consuming part is programmed with multi-thread technique. Case tests show that, the proposed parallel algorithm is effective and it consumes less calculation time and memory than the traditional interior point method does, capable of solving the emergency control problem of large-scale power system.

Key words: electric power systems; transients; stability; control; reduced-space interior point method; parallel computing; OpenMP