

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.020

基于伴随灵敏度的暂态稳定预防控制快速算法

林翔宇, 耿光超, 江全元*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对已有算法难以适应现代电力系统在线预防控制的实时性要求的问题,研究了一种基于伴随灵敏度分析的暂态稳定预防控制快速算法,采用了约束转换技术来缓解大规模电力系统暂态稳定预防控制中的“维数灾”问题,提出了一种优化层-仿真层的双层结构以实现算法:优化层基于预测-校正内点法,利用近似海森矩阵的扩展生成方法以提高算法的准确性和收敛性;仿真层中采用伴随灵敏度方法实现了灵敏度快速计算,并使用非诚实牛顿法和雅克比矩阵重用技术以进一步提高计算速度。研究表明,该算法能够显著提高大规模电力系统的暂态稳定预防控制求解效率,且相较其他已有算法体现出极大的速度优势,完全能够达到现代电力系统在线预防控制对控制算法的实时性要求。

关键词:伴随灵敏度分析;暂态稳定;预防控制;内点法

中图分类号:TM7

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0916-06

Efficient method based on adjoint sensitivity analysis for transient stability constrained optimal power flow

LIN Xiang-yu, GENG Guang-chao, JIANG Quan-yuan

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

Abstract: Aiming at the real-time requirement of online preventive control in modern power system, an efficient method based on adjoint sensitivity analysis for transient stability constrained optimal power flow was proposed. Constraints conversion technology was adopted to relieve the curse of dimensionality. A two-layer-structure was proposed to implement the algorithm; extended approximate Hessian matrix was adopted to improve the accuracy and convergence in optimization layer which was based on predictor-corrector interior point method; in simulation layer, adjoint sensitivity analysis was adopted to achieve fast calculation of dynamic sensitivity, and very dishonest Newton method and Jacobian matrix reusing approach were applied to speed up calculation. The results indicate that the proposed approach can significantly improve computing efficiency of solving transient stability constrained optimal power flow. Comparison with existing method also shows the great speed advantage of the proposed method, which can meet the requirement of online preventive control in modern power system.

Key words: adjoint sensitivity analysis; transient stability; preventive control; interior point method

0 引言

预防控制作为电力系统安全运行的第一道防线,其主要任务是通过调整发电机出力,寻求一个最优的系统运行点,使系统在遭受故障时仍能保证其稳定性。

暂态稳定预防控制本质上是考虑系统暂态稳定约

束的最优潮流问题(TSCOPF)^[1]。相较于常规的最优潮流问题,TSCOPF 加入了描述系统动态特性的微分代数方程组(DAE),如何处理该 DAE 就成为求解 TSCOPF 的关键。

目前,处理 TSCOPF 中的 DAE 主要有以下几种主流的方法:(1)数值差分离散法^[2-3]。即采用隐式梯形

收稿日期:2016-11-18

作者简介:林翔宇(1991-),男,广西河池人,硕士研究生,主要从事电力系统暂态稳定预防控制的研究。E-mail: lxysnowdream@163.com

通信联系人:江全元,男,教授,博士生导师,E-mail: jqy@zju.edu.cn

积分等数值差分公式,将 DAE 多个离散时间点上的状态变量施加稳定性约束,该方法的缺陷是极大地增加了优化问题的维数,当系统较大时将面临维数灾的困境;(2)序贯类方法^[4-5]。通过对 DAE 进行数值积分,计算暂态稳定约束对 DAE 初值的灵敏度,再用梯度优化方法求解该非线性优化问题,但是当考虑复杂动态元件模型时,该方法在数值积分上的耗时会显著增加;(3)基于能量函数的方法^[6]。建立一个基于暂态能量函数的稳定性判据,从而将预防控制问题转换为一个常规的非线性优化问题,但是对于能量函数的选取往往会面临困难。

基于伴随灵敏度的 TSCOPF 算法,本研究采用预测-校正内点法求解转换后的非线性优化问题^[7]。

1 TSCOPF 问题的数学描述

TSCOPF 问题可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} & \min_u \varphi(u) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} 0 = P(u) \\ \underline{J} \leq J(u) \leq \bar{J} \\ 0 = Z(u, x_0) \\ \dot{x}^k(t) = F^k(u, x^k(t), y^k(t)) \\ 0 = G^k(u, x^k(t), y^k(t)) \\ \underline{\Phi}^k \leq \Phi^k(u, x^k(t), y^k(t)) \leq \bar{\Phi}^k \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

式中: u —稳态变量; x_0 —状态变量初值; x —状态变量; y —代数变量; φ —目标函数; P —潮流方程; J —静态安全约束; Z —初值方程; F, G —DAE 的微分部分和代数部分; Φ —暂态稳定约束; k —第 k 个预想故障。

TSCOPF 采用全系统燃料费用最小作为目标函数,并设燃料费用为发电机有功出力的二次函数。

潮流方程方程采用直角坐标形式,静态安全约束包括线路潮流、节点电压、发电机有功无功的上、下限约束。

DAE 中微分部分为电力系统中动态元件的状态方程,代数部分为网络方程。其中,动态元件主要考虑同步发电机,负荷以恒定阻抗模拟。同步发电机采用六阶模型^[8],并考虑其励磁调节器和调速系统。初值方程为功角初值方程,其他状态变量初值可由功角初值和稳态变量显式计算。

本研究将发电机功角与中心惯量的偏差在允许范围内作为暂态稳定性的判据,表示为:

$$-\bar{\delta} \leq \delta_i^k(t) - \delta_{cor}^k(t) \leq \bar{\delta}, i = 1, \dots, N_c, t \in [0, T] \quad (2)$$

式中: $\delta_{cor}^k(t)$ —中心惯量。

式(2)表示的约束是一个过程约束,它实际上是一个无穷维的约束,运用约束转化技术对其进行聚合^[9],将式(2)写成:

$$\theta^k[x^k(t|u, x_0)] = \max\{(\delta_i^k(t|u, x_0) - \delta_{cor}^k(t|u, x_0))^2, i = 1, \dots, N_c\} - \delta_{max}^2 \leq 0 \quad (3)$$

式中: $x^k(t|u, x_0)$ —状态变量 x 由时间、稳态变量和状态变量初值决定。

式(3)需要在整个动态过程中都满足,故可将其进一步写为:

$$\Phi^k(u, x_0) \equiv \int_0^T \max\{0, \theta^k[x^k(t|u, x_0)]\} dt \equiv \int_0^T \tilde{\theta}^k[x^k(t|u, x_0)] dt = 0 \quad (4)$$

式(4)与式(2)等价,由此将无穷维的过程约束转换成了一个积分型约束。

对于 N_c 个预想故障,就会有 N_c 个形如式(4)的约束。注意到在任何情况下都有 $\Phi^k(u, x_0) \geq 0$, 因此可以把 N_c 个暂态稳定约束进行加和为一个暂态稳定约束:

$$\tilde{\Phi}(u, x_0) = \sum_{k=1}^{N_c} \Phi^k(u, x_0) = 0 \quad (5)$$

上式中每一项均恒大于等于零,要使其和为零,就必须是均为零,故该式与式(4)等价,但将 N_c 个暂态稳定约束合并为 1 个。

为了增加算法的数值稳定性,本研究加入很小的正常数 ε 对式(5)进行松弛,转化成如下不等式约束:

$$\tilde{\Phi}(u, x_0) \leq \varepsilon \quad (6)$$

于是, TSCOPF 中的 DAE 便被包含在约束(6)中,原问题便转换为如下非线性优化问题:

$$\begin{aligned} & \min_{u, x_0} \varphi(u) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} 0 = P(u) \\ \underline{J} \leq J(u) \leq \bar{J} \\ 0 = Z(u, x_0) \\ \tilde{\Phi}(u, x_0) \leq \varepsilon \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

2 基于变分原理的伴随灵敏度方法

基于变分原理的梯度求解方法已被广泛应用于电力系统的最优切机、切负荷问题的求解中^[10],文献[11]基于同样的思想,推导了电力系统中动态灵敏度计算的伴随方程方法,文献[12]将该伴随灵敏度方法应用于电力系统暂态稳定预防控制问题并在小型算例中验证了其有效性。本研究采用伴随灵敏度方法计算

暂态稳定约束的梯度信息。

对于某一故障下的 DAE, 构造其哈密顿函数:

$$\mathbf{H}^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}^k, \mathbf{y}^k, \boldsymbol{\lambda}^k, \boldsymbol{\beta}^k) = \tilde{\boldsymbol{\theta}}^k + (\boldsymbol{\lambda}^k)^T \mathbf{F}^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}^k, \mathbf{y}^k) + (\boldsymbol{\beta}^k)^T \mathbf{G}^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}^k, \mathbf{y}^k) \quad (8)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda}^k, \boldsymbol{\beta}^k$ 为如下伴随方程的解:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\lambda}}^k = -\frac{\partial \mathbf{H}^k[\mathbf{u}, \mathbf{x}^k(t), \mathbf{y}^k(t), \boldsymbol{\lambda}^k(t), \boldsymbol{\beta}^k(t)]}{\partial \mathbf{x}^k} \\ 0 = \boldsymbol{\lambda}^k(T) \\ 0 = \frac{\partial \mathbf{H}^k[\mathbf{u}, \mathbf{x}^k(t), \mathbf{y}^k(t), \boldsymbol{\lambda}^k(t), \boldsymbol{\beta}^k(t)]}{\partial \mathbf{y}^k} \end{cases} \quad (9)$$

则式(4)对控制量和状态变量初值的梯度可由下式计算^[13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{u}} = \int_0^T \frac{\partial \mathbf{H}^k[\mathbf{u}, \mathbf{x}^k, \mathbf{y}^k, \boldsymbol{\lambda}^k, \boldsymbol{\beta}^k]}{\partial \mathbf{u}} dt \\ \frac{\partial \Phi^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{x}_0} = \boldsymbol{\lambda}^k(0) \end{cases} \quad (10)$$

根据式(8,9), 伴随方程的具体形式为:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\lambda}}^k = -\frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\theta}}^k}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial \mathbf{F}^k}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda}^k - \frac{\partial \mathbf{G}^k}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\beta}^k \\ 0 = \boldsymbol{\lambda}^k(T) \\ 0 = \frac{\partial \mathbf{F}^k}{\partial \mathbf{y}} \boldsymbol{\lambda}^k + \frac{\partial \mathbf{G}^k}{\partial \mathbf{y}} \boldsymbol{\beta}^k \end{cases} \quad (11)$$

当某个预想故障暂态稳定时, 根据式(3~4)可知 $\partial \tilde{\boldsymbol{\theta}}^k / \partial \mathbf{x}^k \equiv 0$, 则式(11)退化为线性齐次微分-代数方程组, 由于其终值 $\boldsymbol{\lambda}^k(T) = 0$, 可知其解必为 $\boldsymbol{\lambda}^k \equiv 0$, $\boldsymbol{\beta}^k \equiv 0, t \in [0, T]$, 再代入式(10)中可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{u}} = \int_0^T \left\{ \frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\theta}}^k}{\partial \mathbf{u}} + \frac{\partial \mathbf{F}^k}{\partial \mathbf{u}} \boldsymbol{\lambda}^k + \frac{\partial \mathbf{G}^k}{\partial \mathbf{u}} \boldsymbol{\beta}^k \right\} dt = 0 \\ \frac{\partial \Phi^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{x}_0} = \boldsymbol{\lambda}^k(0) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

若要用伴随灵敏度方法计算第 k 个预想故障的暂态稳定约束梯度, 首先进行暂态仿真, 若系统是暂态稳定的, 则直接确定梯度为零, 否则需要对伴随方程进行反向积分, 由式(10)求出梯度。因此对于 N_c 个故障, 只需进行 N_c 次暂态仿真和最多 N_c 次反向积分即可求出所有暂态稳定约束的梯度。

当将各个预想故障下的暂态稳定约束合并为一个暂态稳定约束, 如式(6)所示时, 根据微分的加法特性有:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{\Phi}(\mathbf{u}, \mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{u}} = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{\partial \Phi^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{u}} \\ \frac{\partial \tilde{\Phi}(\mathbf{u}, \mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{x}_0} = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{\partial \Phi^k(\mathbf{u}, \mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{x}_0} \end{cases} \quad (13)$$

根据以上分析, 当某个预想故障轻微、系统暂态稳定时, 该预想故障的暂态稳定约束的梯度值为零, 它对式(13)没有贡献, 由式(13)求得的梯度信息中仅仅包含了那些使系统失稳的严重故障, 而轻微故障将被自动滤除, 从而实现了故障筛选。

3 TSCOPF 的预测-校正内点算法

3.1 用预测-校正内点法求解 TSCOPF 的基本步骤

本研究采用预测-校正内点法求解式(7)所述的非线性优化问题。该算法属于梯度优化算法, 稳态约束的梯度可以通过解析求导直接计算, 而暂态稳定约束的梯度则要通过伴随灵敏度分析求得, 而伴随灵敏度分析需要进行暂态仿真, 该部分的计算任务繁重, 且相对独立, 故可将其作为一个独立模块。

整个算法可分为两层实现, 主进程优化层进行预测-校正内点法的迭代, 子进程仿真层则进行伴随灵敏度分析。

算法的双层结构如图 1 所示。

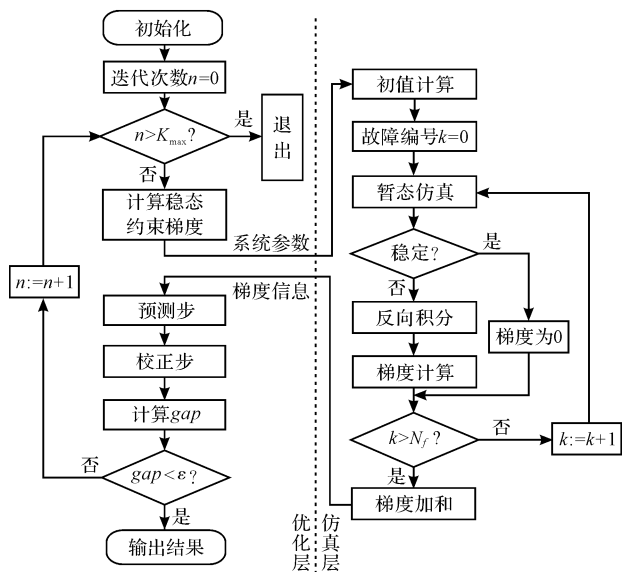


图 1 TSCOPF 的双层求解流程

3.2 用非诚实牛顿法进行暂态仿真

暂态仿真是算法中计算任务最繁重的部分, 本研究采用隐式梯形积分进行暂态仿真, 可采用非诚实牛顿法 (VDHN) 来提高其计算速度^[14]。当用隐式方法进行暂态仿真时, 每一时步需要求解一个非线性方程组, 但因相邻两个时步的变量变化很小, 可以在满足一定条件时才更新雅克比矩阵, 由此大大减少了雅克比矩阵的计算次数和 LU 分解次数, 这就是 VDHN 方法的基本思想。

本研究更新雅克比矩阵的判据为:本时步开始时的雅克比矩阵采用上一时步收敛时的雅克比矩阵,每次更新雅克比矩阵后开始计数,置计数值为 0,之后的牛顿法迭代中不更新雅克比矩阵且使该计数值加 1,当计数值超过设定值时,更新雅克比矩阵。收敛后进入下一时步的计算时将该计数值置 0。

3.3 反向积分中雅克比矩阵的重用

根据隐式梯形积分公式和系统 DAE 方程,暂态仿真中每一时步需要求解的非线性方程组的雅克比矩阵可表示为如下的分块形式:

$$J_{\text{forward}} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\Delta t} I - \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial y} \\ \frac{\partial G}{\partial x} & \frac{\partial G}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (14)$$

同样的,对于伴随方程,可推导得其反向积分时的雅克比矩阵如下:

$$J_{\text{backward}} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\Delta t} I - \left[\frac{\partial F}{\partial x} \right]^T & \left[\frac{\partial G}{\partial x} \right]^T \\ \left[\frac{\partial F}{\partial y} \right]^T & \left[\frac{\partial G}{\partial y} \right]^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

显然,反向积分和暂态仿真的雅克比矩阵互为转置。利用这一性质,反向积分可以重用暂态仿真中雅克比矩阵的 LU 分解结果,减少计算耗时。

3.4 暂态稳定约束二阶梯度的近似计算

伴随灵敏度分析能够给出暂态稳定约束的一阶梯度,却不能计算其二阶梯度。本研究采用拟牛顿法中的 BFGS 方法近似地计算暂态稳定约束的二阶梯度^[15],其递推公式为:

$$B_{n+1} = B_n - \frac{B_n s_n s_n^T B_n}{s_n^T B_n s_n} + \frac{y_n y_n^T}{y_n^T s_n} \quad (16)$$

式中: n —第 n 次 BFGS 迭代; B —所要计算的近似二阶梯度; s_n —控制变量之差, $s_n = u_{n+1} - u_n$; y_n —一阶梯度之差, $y_n = (\partial h / \partial u)_{n+1} - (\partial h / \partial u)_n$ 。

在第一次 BFGS 迭代时,令 $B_1 = I$,之后的每次迭代中,若暂态仿真结果表明系统稳定,则暂态稳定约束的一阶梯度和二阶梯度都为 0,否则就利用式(16)求其近似的二阶梯度。

分析暂态稳定约束和系统的 DAE 可知,非发电机节点的电压不会影响暂态稳定约束值,因此暂态稳定约束对其梯度为零。因此,在使用 BFGS 方法近似计算暂态稳定约束的二阶梯度矩阵时,可以仅生成能够影响暂态稳定约束值的变量对应的分块,再将其扩展成为一个完整的二阶梯度矩阵。暂态稳定约束二阶梯度矩阵的扩展生成如图 2 所示。

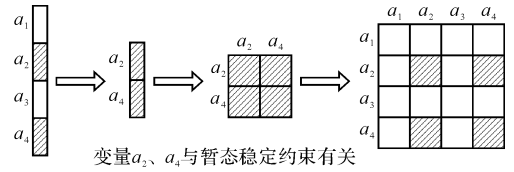


图 2 暂态稳定约束二阶梯度矩阵的扩展生成

这样做不但能够提高近似二阶梯度的准确性,从而提高优化算法的收敛性,而且使生成的二阶梯度矩阵较为稀疏,减少矩阵分解的计算量。

4 实验及结果分析

本研究算法采用 C++ 语言编程实现,处理器为 Intel Core i7-4790,其中,暂态仿真中牛顿法迭代时的线性方程组调用 KLU 解法器求解^[16],预测-校正内点法的修正方程采用 ma57 解法器求解^[17]。

测试算例的基本信息如表 1 所示。

表 1 测试算例的基本信息

算例	N_b	N_l	N_g	T_F/s	$\Delta t/s$
case39	39	46	10	3.0	0.01
case162	162	280	25	3.0	0.01
case300	300	409	69	3.0	0.01
case2052	2 052	2 463	211	3.0	0.01
case2383	2 383	2 886	327	3.0	0.01

N_b —系统节点数; N_l —线路数; N_g —发电机数; T_F —暂态仿真时长; Δt —暂态仿真步长

其中, case162 为经过修改的 IEEE 系统^[18], case2052 为根据日本实际电网简化的系统^[19], case39、case300、case2383 为 MATPOWER^[20] 给出的测试系统。

4.1 暂态仿真中采用 VDHN 法与牛顿法的效率对比

VDHN 方法与普通牛顿法来效率对比如表 2 所示。

表 2 VDHN 方法与牛顿法暂态仿真效率比较

算例	T_{CPU}/s		N_{iter}		N_{jac}	
	VDHN 法	普通牛顿法	VDHN 法	普通牛顿法	VDHN 法	普通牛顿法
case39	0.007	0.008	1 056	600	270	600
case162	0.037	0.068	827	589	200	589
case300	0.066	0.075	1 077	600	310	600
case2052	0.200	0.243	627	405	200	405
case2383	0.311	0.425	609	401	200	401

T_{CPU} —总耗时; N_{iter} —迭代次数; N_{jac} —更新雅克比矩阵的次数

从表 2 中可以看出,VDHN 方法相比普通牛顿法虽然增加了迭代次数,但是大大减少了雅克比矩阵的更新次数,而雅克比矩阵的 LU 分解是一个非常耗时的过程,因此采用 VDHN 方法能够减少暂态仿真的总耗时。

4.2 TSCOPF 算法结果分析

在不同规模算例中对本研究算法进行测试。分别选取不同的预想故障数,并假设在 0 s 时发生故障,经过 0.1 s ~ 0.2 s 故障被切除。

单预想故障 case2383 算例 OPF 和 TSCOPF 的优化结果中,失稳机组的相对功角曲线如图 3 所示。

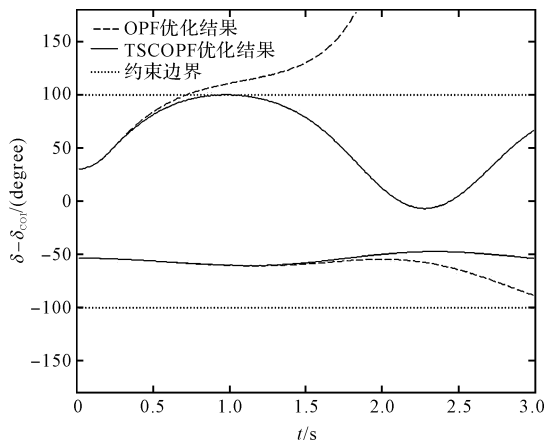


图 3 单预想故障 case2383 失稳机组相对功角曲线

从图中可以看出,OPF 的优化结果中,失稳机组的相对功角已飞出约束边界导致系统失去同步,而 TSCOPF 因在模型中考虑了暂态稳定约束,能够使失稳机组的相对功角约束在允许范围内,保证系统暂态稳定。

各个算例的预想故障数 N_f 、迭代次数 N_{iter} 、反向积分次数 N_{AC} 、总计算耗时 T_{CPU} 、仿真层耗时 T_{ASA} 和优化层耗时 T_{IPM} 如表 3 所示。

表 3 不同规模算例下 TSCOPF 的求解耗时

算例	N_f	N_{iter}	N_{AC}	T_{CPU}/s	T_{ASA}/s	T_{IPM}/s
case39	1	7	3	0.13	0.096	0.023
	4	7	5	0.34	0.26	0.016
case162	1	14	10	1.22	1.00	0.125
	4	15	13	3.45	3.21	0.14
case300	1	11	5	1.23	0.98	0.16
	4	12	27	6.26	5.53	0.64
case2052	1	18	8	9.98	6.67	1.74
	4	18	22	29.21	25.26	3.51
case2383	1	21	8	20.45	11.78	8.05
	4	23	37	58.89	44	13.38

表 3 显示,本研究算法各个算例中均能迅速收敛,即使求解考虑多个预想故障的大规模系统算例也能够 在 1 min 内得到最优解,由此可见本研究算法具有计算高效的优点。

算法耗时主要由两部分承担:

(1) 仿真层耗时。仿真层耗时占到总耗时的 70% 以上。从表 3 可以看到,反向积分的次数 N_{AC} 是小于

伴随灵敏度分析次数 $N_f \times N_{iter}$ 的,这是因为当暂态仿真显示系统稳定时不需反向积分而直接得到灵敏度为零,由此减少了伴随灵敏度分析的耗时,预想故障的严重程度是影响其耗时的主要因素,因为故障严重一方面会增加在暂态仿真中牛顿法的迭代次数,另一方面会增加系统失稳的概率,从而增加反向积分次数,本研究采用 VDHN 方法提高了暂态仿真的速度,采用雅克比矩阵重用技术提高了反向积分的速度,都能够有效提高算法的效率;

(2) 优化层耗时。优化层的计算任务主要是内点法中海森矩阵的求解。本研究方法基于约束转换和伴随灵敏度分析,极大地降低了海森阵的维数,从而使优化层的耗时仅占 20% 以下。但大规模系统中优化层耗时有明显上升,这是因为暂态稳定约束耦合的变量迅速增多导致海森阵变得稠密,带来海森阵求解耗时的增加。

4.3 与其他算法的对比

多重打靶法和全差分方法是另外两种求解 TSCOPF 问题的主流方法^[21-22],但它们在应用到大规模系统时会遇到收敛性或“维数灾”的问题。以下笔者将本研究算法与上述两种算法在不同规模算例中进行比较,测试其计算单预想故障 TSCOPF 的效率,其中,考虑的暂态过程为 3 s,差分步长或仿真步长为 0.01 s,考察的指标为迭代次数 N_{iter} 和总计算耗时 T_{CPU} 。本研究算法与其他算法的效率对比如表 4 所示。

表 4 本研究算法与其他算法的效率对比

算例	本研究方法		多重打靶法		全差分方法	
	N_{iter}	T_{CPU}/s	N_{iter}	T_{CPU}/s	N_{iter}	T_{CPU}/s
case39	7	0.12	22	0.72	9	1.34
case162	14	1.21	34	3.91	18	2.63
case300	11	1.23	113	23.41	23	41.89
case2052	18	9.98	/	/	36	661.66
case2383	21	20.45	/	/	26	1614.9

注:/—收敛失败

从表 4 可以看出,本研究方法在不同规模的算例中都能够很好地收敛,而多重打靶法在大规模系统出现了收敛性的问题。从计算耗时上看,本研究方法在各个算例中都能够更快地得到最优解,尤其在大规模系统中其计算效率能达到全差分方法的 60 ~ 80 倍,体现出了巨大的速度优势。可见,本研究方法在求解 TSCOPF 问题时,相比其他方法具有较好的收敛性和极高的计算效率。

5 结束语

笔者研究了一种基于伴随灵敏度分析的暂态稳定

预防控制算法,该算法能够极大地缓解求解大规模电力系统暂态稳定预防控制时遇到的“维数灾”问题。

算例测试表明,本研究算法相较于改进于多重打靶法和全差分方法具有极大的速度优势,且该优势在大规模系统中体现得愈发明显。因此,本研究算法有望应用于区域电网的在线预防控制辅助决策中。

参考文献 (References):

- [1] 吕晓祥,王建全. 电力系统暂态稳定预防控制算法综述[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(20):144-153.
- [2] 江全元,黄志光,张铭泽. 暂态稳定约束最优潮流的降阶内点算法[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):21-25.
- [3] GAN D, THOMAS R J, ZIMMERMAN R D. Stability constrained optimal power flow[J]. **IEEE Trans on Power Systems**,2000,15(2):535-540.
- [4] CHEN L, TADA Y, OKAMOTO H, et al. Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints[J]. **IEEE Trans on Circuits Systems**,2001,48(3):327-339.
- [5] 孙 闻,房大中,袁世强,等. 基于轨迹灵敏度的暂态稳定预防控制方法[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,2010,43(2):109-114.
- [6] 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.
- [7] 覃振成,乐秀璠,蓝 澜,等. 基于改进非线性预报-校正内点法的最优潮流[J]. 电力系统自动化,2005,29(9):25-30.
- [8] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [9] TEO K L, JENNINGS L S. Nonlinear optimal control problems with continuous state inequality constraints[J]. **Journal of Optimization Theory and Applications**,1989,63(1):1-22.
- [10] 王建全. 电力系统暂态稳定最优辅助断续控制的研究[D]. 西安:西安交通大学电气工程学院,1997.
- [11] 孙元章,杨新林. 电力系统动态灵敏度计算的伴随方程方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(3):6-12.
- [12] 房大中,孙景强. 基于最优控制原理的暂态稳定预防控制模型[J]. 电力系统自动化,2005,29(1):18-21.
- [13] 姚国强. 电力系统暂态稳定控制优化算法研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
- [14] 江 涵,江全元. 一种可变步长的暂态稳定自适应修正牛顿组合法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):105-112.
- [15] SHANNO D F. Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization[J]. **Mathematics of Computation**,1970,24(111):647-656.
- [16] DAVIS T A. Algorithm 907: KLU, A direct sparse solver for circuit simulation problems[J]. **Acm Transactions on Mathematical Software**,2010,37(3):523-530.
- [17] DUFF I S. MA57-a code for the solution of sparse symmetric definite and indefinite systems[J]. **Acm Transactions on Mathematical Software**,2004,30(2):118-144.
- [18] CHRISTIE R. Power systems test case archive[EB/OL]. <http://www2.ee.washington.edu/research/pstca/index.html>.
- [19] 冯军基. 基于动态优化的电力系统暂态稳定紧急控制研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2015.
- [20] ZIMMERMAN R D, MURILLO S C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,2011,26(1):12-19.
- [21] GENG G, AJJARAPU V, JIANG Q. A hybrid dynamic optimization approach for stability constrained optimal power flow[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,2014,29(5):2138-2149.
- [22] 耿光超. 电力系统稳定约束最优潮流:模型、算法与并行化[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2014.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

林翔宇,耿光超,江全元. 基于伴随灵敏度的暂态稳定预防控制快速算法[J]. 机电工程,2017,34(8):916-921.

LIN Xiang-yu, GENG Guang-chao, JIANG Quan-yuan. Efficient method based on adjoint sensitivity analysis for transient stability constrained optimal power flow [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(8):916-921.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>