

文章编号: 1001-0920(2008)12-1383-06

基于 SIP 算法的暂态稳定约束最优潮流计算

童小娇^{a,b}, 何伟^a, 周任军^b, 邓兴华^b

(长沙理工大学 a. 数学与计算科学学院, b. 电气与信息工程学院, 长沙 410076)

摘要: 提出一种基于约束转换方法的建立暂态稳定约束最优潮流(OTS)的算法. 运用函数转换技术等价变换 OTS 为半无限优化(SIP)问题, 转换后的 SIP 问题与常规的最优潮流(OPF)具有相同的维数; 基于有效集策略设计了转换后 SIP 问题的迭代法, 该方法减少了子问题中不等式约束的个数. 电力系统的 2 个数值仿真例子验证了所提出算法的有效性.

关键词: 暂态稳定约束最优潮流; 最优潮流; 半无限优化; 迭代法

中图分类号: TM712; O24

文献标识码: A

Calculation for optimal power flow with transient stability constraints based on SIP algorithm

TONG Xiaojiao^{a,b}, HE Wei^a, ZHOU Renjun^b, DENG Xuehua^b

(a. Institute of Mathematics, b. Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China. Correspondent: TONG Xiaojiao, E-mail: tongxj@csust.edu.cn)

Abstract: Optimal power flow with transient stability constraints (OTS) becomes an effective tool for power system operation since it considers economy and dynamic stability simultaneously. Therefore, a method to be establish OTS based on constraints conversion is proposed. By using the functional transformation technology, OTS is converted into a semi-infinite programming (SIP), which has the same dimension as common optimal power flow (OPF). Based on the active strategy, an iterative method is presented for the reformulated SIP problem, in which the number of inequality constraints in the subproblem is reduced. Two practical OTS examples show the effectiveness of the proposed method.

Key words: OTS; Optimal power flow; Semi-infinite programming; Iterative method

1 引言

电力系统暂态稳定约束最优潮流(OTS)是传统最优潮流(OPF)的扩展. OTS 因能将系统的经济性和动态安全性纳入同一框架, 已成为解决安全经济运行诸多问题的有效工具, 具有显著的技术经济意义. 由于电力工业市场化改革产生的市场竞争, 使系统在越来越接近其稳定极限的方式下运行, 系统的安全稳定性面临着更大的挑战. 因此, OTS 研究具有现实意义和实际应用价值.

传统的 OPF 属于典型的非线性优化问题, 已有大量的研究成果^[1-4]. OTS 由于问题的复杂性, 从模型的描述到算法设计均具有一定的挑战^[5-7]. 目前, OTS 的研究方法主要有 3 类:

1) 能量函数方法^[8-10]. 该类方法基于能量函数建立用代数表达式描述的动态稳定约束, 使 OTS 模型呈现常规的 OPF 形式, 从而可用数学上各类非线性规划算法求解. 但是, 由于能量函数本身的缺陷以及建立模型的非光滑性, 易导致能量函数方法失效.

2) 时域仿真优化方法^[11,12]. 该方法采用差分技术, 将稳定约束的微分方程离散化, 转化 OTS 问题为一般非线性优化问题. 时域仿真方法是求解 OTS 问题最常用的方法, 有些已运用于实际系统的经济稳定运行分析. 但是, 差分离散化后, 会导致特大规模的非线性优化的计算困难.

3) 约束转换方法^[13,14]. 该方法基于函数转换理论, 变换 OTS 为半无限优化(SIP). 约束转换方法最

收稿日期: 2007-10-11; 修回日期: 2008-01-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474070, 10871031); 湖南省科技项目(06FJ3038); 湖南省教育厅项目(07A001).

作者简介: 童小娇(1962—), 女, 湖北新州人, 教授, 博士, 从事优化理论与应用、计算数学及电力系统分析的研究; 周任军(1964—), 女, 教授, 博士, 从事电力系统规划、决策支持系统等研究.

大的特点是转化后的 SIP 问题与常规的 OPF 问题具有相同的维数,且可同时考虑多事故的系统扰动,因而在 OTS 计算中具有一定的发展潜力。

本文提出的基于约束转换方法建立 OTS 的算法,以数学上 SIP 问题的发展作为理论和方法基础,利用新的 SIP 算法实现 OTS 的有效计算。具体地,基于文献[15,16]中 SIP 问题的研究成果,发展了文献[15]关于简单 SIP 求解的算法,利用有效集策略建立 OTS 一类迭代算法。理论上可证明其全局收敛性。电力系统的 2 个数值仿真例子验证了所提出算法对 OTS 求解的有效性。

2 OTS 导出的 SIP 模型

2.1 OTS 模型

电力系统的动态特性可用微分-代数方程(DAE)描述^[6,13]如下:

$$\dot{x} = F(x(t), y(t), \bar{z}), \quad (1)$$

$$G(x(t), y(t), \bar{z}) = 0. \quad (2)$$

式中: $x(t) \in R^{n_x}$, $y(t) \in R^{n_y}$, $\bar{z} \in R^{n_z}$; $F: R^{n_x+n_y+n_z}$

R^{n_x} 表示发电机、负荷和控制器的动态运动方程; $G: R^{n_x+n_y+n_z} \rightarrow R^{n_y}$ 表示动态过程中的潮流方程和无源设备的静态特性; \bar{z} 一般与时间无关,表示控制变量和系统参数,包括机械功率、负荷和线路参数等; $x(t)$ 为状态变量,包括发电机的转角和转子角速度等; $y(t)$ 为代数变量,包括各个节点电压的幅值和相角等。除式(2)的等式约束外,电力系统中包括运行环境的控制,如发电机以及系统各节点电压、线路电流和传输功率等的上下限等,可用如下代数不等式表示:

$$H(x(t), y(t), \bar{z}) \leq 0, \quad (3)$$

其中 $H: R^{n_x+n_y+n_z} \rightarrow R^m$ 。本文设 F, G 和 H 为连续可微函数。

当系统在运行中受到某种干扰时,须将故障切除,以保证系统的正常运行。系统从受到扰动到故障切除将经过 3 个阶段,数学上可用如下的分段微分-代数方程和不等式描述:

$$\begin{cases} F_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0, \\ G_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0, \\ H_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F_1(x(t), y(t), \bar{z}), \text{初值为 } \bar{x}; \\ G_1(x(t), y(t), \bar{z}) = 0, t \in (0, t_d]; \\ H_1(x(t), y(t), \bar{z}) \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F_2(x(t), y(t), \bar{z}), \text{初值为 } x(t_{cl}); \\ G_2(x(t), y(t), \bar{z}) = 0, t \in (t_d, T]; \\ H_2(x(t), y(t), \bar{z}) \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 为系统的初始状态($t=0$ 时刻), t_d 为

故障切除时刻, T 为扰动的研究时段。本文设 t_d 和 T 为给定常数。式(4)~(6)分别称为事故前、事故中和事故后系统的状态。考虑系统受到扰动下的某种经济运行的 OTS 模型为

$$\min f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}), \text{ for } (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}).$$

$$\text{s. t. } F_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0;$$

$$G_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0;$$

$$H_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq 0;$$

$$\dot{x}(t) = F(x(t), y(t), \bar{z}), x(0) = \bar{x};$$

$$G(x(t), y(t), \bar{z}) = 0;$$

$$H(x(t), y(t), \bar{z}) \leq 0, t \in [0, T]. \quad (7)$$

其中: f 为目标函数,可考虑为系统的发电燃料总费用最小或有功网损最小等; F, G, H 为式(4)~(6)所描述的分段可微函数。OTS 模型(7)在传统 OPF 模型中增加了时间相关状态变量的微分-代数方程和不等式关系式,因此 OTS 是传统 OPF 模型的推广。

2.2 OTS 导出的 SIP 模型

为实现 OTS 的转化,作如下假设:

假设 1 对于满足 $G(x(t), y(t), \bar{z}) = 0$ 和 $H(x(t), y(t), \bar{z}) \leq 0$ 的所有点列 $(x(t), y(t)), t \in [0, T]$, 函数 $G(x(t), y(t), \bar{z})$ 关于 y 的雅克比矩阵非奇异,即 $\det(G_y(x(t), y(t), \bar{z})) \neq 0$, 此处 $G_y = \partial G / \partial y$ 。

根据假设 1 条件和隐函数定理,由 $G(x(t), y(t), \bar{z}) = 0$ 可得:在点 $(x(t), y(t), \bar{z})$ 的某一领域内必存在唯一映射 $q: R^{n_x+n_z} \rightarrow R^{n_y}$, 使得 $y(t) = q(x(t), \bar{z}), t \in [0, T]$, 满足 $G(x(t), q(x(t), \bar{z}), \bar{z}) = 0$ 。将此式代入模型(7)中的 DAE 和无限不等约束,有

$$\dot{x}(t) = F(x(t), q(x(t), \bar{z}), \bar{z}),$$

$$x(0) = \bar{x}; \quad (8)$$

$$H(x(t), q(x(t), \bar{z}), \bar{z}) \leq 0. \quad (9)$$

记微分方程(8)的解为 $x(t) = \phi(\bar{x}, \bar{z})$, 则

$$\phi(\bar{x}, \bar{z}) =$$

$$\bar{x} + \int_0^t F(\phi(\bar{x}, \bar{z}), q(\phi(\bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z}) dt. \quad (10)$$

最后,OTS 模型(7)转化为如下的一类优化问题:

$$\min f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}), \text{ for } (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}).$$

$$\text{s. t. } F_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0;$$

$$G_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0;$$

$$H_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq 0;$$

$$H(\phi(\bar{x}, \bar{z}), q(\phi(\bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z}) \leq 0,$$

$$t \in [0, T]. \quad (11)$$

式(11)中最后一个不等式约束包括无限个约束条件,为一类典型的 SIP 问题,其变量为 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 。

因此,等价转换的 SIP 模型只是故障发生初始时刻的变量 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 的优化问题. 此外,该 OTS 模型的转换方法适合于系统多事故情况,实际转换中只增加了半无限约束 H 的个数^[13].

3 基于 SIP 优化的 OTS 算法

文献[13,14]采用积分的方法将 SIP 模型(11)转化为常规的非线性优化问题,并用 SQP 方法求解. 该方法的困难在于积分的计算,以及转化后的非线性优化问题约束规范化条件的满足. 本文将文献[15]的 SIP 算法应用于模型(11)的计算,建立 OTS 问题的逐步逼近算法. 记

$$\begin{aligned}
 &= [0, T], w = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}), \\
 h_i(w, t) &= H_i(\phi(\bar{x}, \bar{z}), q(\phi(\bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z}), \\
 & \quad i \in \{1, \dots, m\}, t \in [0, T]. \quad (12)
 \end{aligned}$$

设 Ω_k 为 Ω 的第 k 次近似有限子集,则可构造模型(11)的第 k 次近似问题为

$$\begin{aligned}
 &\min f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}), \text{ for } (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}). \\
 \text{s. t. } &F_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0; \\
 &G_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0; \\
 &H_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq 0; \\
 &h(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, t_i) \leq 0, t_i \in \Omega_k. \quad (13)
 \end{aligned}$$

其中 $h = (h_1, \dots, h_m)^T$, h_i 的定义见式(12). 称模型(13)为 SIP 问题(11)的子问题,其解记为

$$w^k = (\bar{x}^k, \bar{y}^k, \bar{z}^k).$$

式(13)为一般非线性优化问题,有很多行之有效的计算方法,典型的包括 SQP 方法和牛顿型方法等^[2-4,17].

基于有限逼近的 SIP 计算技术的关键是有限近似 Ω_k 的选取和子问题的计算. 理论上, Ω_k 包括的元素越多,逼近于 Ω 的程度越好. 但另一方面, Ω_k 的元素过多将导致模型(13)的计算困难. 如何建立合适的近似集合 Ω_k 是 SIP 算法的关键. 本文用有效集策略建立近似集合 Ω_k ,并同时保证算法理论上的收敛性. 另一值得注意的问题是,由 OTS 转化后的 SIP 问题(11),由于隐函数定理和微分方程到积分方程的转化,函数 h 只有一阶导数是可应用的,因而子问题(13)的求解可考虑只用一阶导数的算法,如拟牛顿类型算法. 基于 SIP 迭代算法,OTS 问题(7)的求解算法如下.

算法 1(OTS 的迭代求解算法)

Step1: 给定正常数 $\delta_0, \varepsilon \in (0, 1)$ 和初始近似 $\Omega_0 \subset \Omega$,使得对于所有 $i \in \{1, \dots, m\}, \{w \in R^n : h_i(w, t) \leq 0, \forall t \in \Omega\}$ 非空. 去掉模型(11)中时间相关约束,求解常规 OPF 问题,得 OTS 的初值 w^0 ,置迭代指标 $k := 0$.

Step2: 基于近似集合 Ω_k ,求解 OTS 的第 k 次迭

代问题(13),得近似解 w^k . 如果对集合 Ω_k 内所有的时间 $t, h_i(w^k, t) \leq 0 (i \in \{1, \dots, m\})$ 成立,则 w^k 即为 OTS 的最优解,终止计算.

Step3: 寻找 $t_k \in \Omega_k$,使得对某扰动 $i \in \{1, \dots, m\}$ 有 $h_i(w^k, t_k) > \delta_k$,则添加 t_k 到集合 Ω_k ,即令 $\Omega_{k+1} := \Omega_k \cup \{t_k\}$,返回 Step2. 若不存在 $t_k \in \Omega_k$ 使得对于 $i \in \{1, \dots, m\}, h_i(w^k, t_k) > \delta_k$,则执行 Step4.

Step4: 应用有效集策略. 令 $E_k = \{t \in \Omega_k : h_i(w^k, t) = 0, i \in \{1, \dots, m\}\}$, $\Omega_{k+1} = E_k$,转 Step5.

Step5: 对于 $i \in \{1, \dots, m\}$,寻找 $t_k \in \Omega_k$ 使得 $h_i(w^k, t_k) > \delta_{k+1}$,记 $\Omega_{k+1} := E_k \cup \{t_k\}$. 令 $k := k + 1$,返回 Step3.

Step6: 如果不存在这样的 $t_k \in \Omega_k$ 和指标 i ,使得 $h_i(w^k, t_k) > \delta_{k+1}$,则 $\Omega_{k+1} := \Omega_k$,返回 Step5.

对算法 1 作如下说明:

- 1) Ω_k 是集合 Ω 的有限近似,是相容性检测量 δ_k 的减小因子.
- 2) Step4 中 E_k 为相关于无穷约束 Ω 的第 k 次近似计算的有效集,该集合的引入是本文算法的主要特点,由此可减少近似集合 Ω_k 中的元素个数(见 Step5),从而减少子问题(13)的约束个数.
- 3) δ_k 是算法中的关键标量,一方面由其可判断 w^k 的可行性(见 Step3),另一方面, δ_k 决定有效集 E_k 是否需要工作(见 Step4).
- 4) 算法中无限约束的可行性判断(或称相容性),即 $\max_{t \in \Omega} h_i(w^k, t) \leq 0 (i = 1, \dots, m)$ 是通过确定是否存在 $t_k \in \Omega_k$ 和指标 i 使得 $h_i(w^k, t_k) > \delta_k$ 实现的,以避免优化问题中求全局极大的困难.

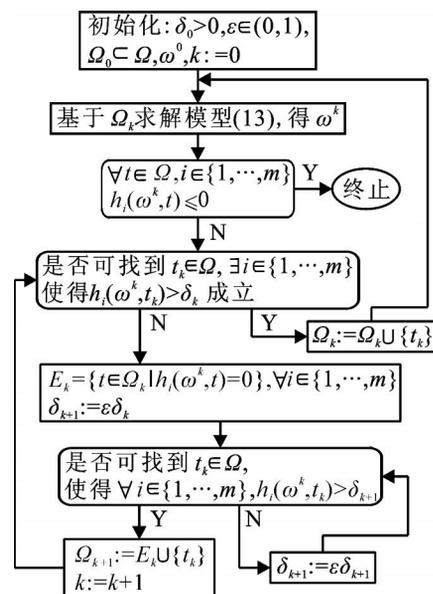


图 1 算法执行的程序框图

5) 该算法与文献[15]算法的区别在于本文考虑了多个无限约束 $h(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, t) \leq 0 (t \in \Omega)$ 问题.

此外,本文由OTS导出的SIP问题(11)比文献[15]中的模型更复杂,即本文算法推广和发展了文献[15]中的方法.

算法执行的程序框图如图1所示.

类似于文献[15]中的收敛性分析,可得到本文算法的全局收敛定理.

定理1 假设1成立,记求解子问题(13)的KKT(Karush-Kuhn-Tucker)点列为 $\{(w^k, \mu^k, u^k)\}$,其中 (μ^k, u^k) 为对应于子问题(13)的Lagrange乘子.设算法产生的点列 $\{(w^k, \mu^k, u^k)\}$ 有界,则该点列收敛到SIP问题(11)的KKT点.

证明略.

4 数值仿真

下面用电力系统的2个算例检测算法的有效性.采用Matlab7.0编程实现,子问题(13)的求解调用Matlab库函数fmincon,微分方程的转化(即式(10))的计算调用Matlab库函数ode45.计算运行环境为Pentium IV 2.50GHz,256Mbytes RAM.

4.1 单机无穷大系统

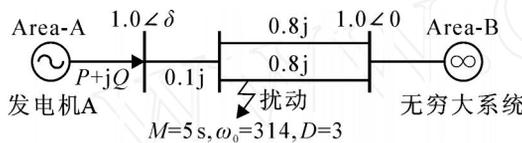


图2 单机无穷大系统

考虑单机无穷大系统(见图2).设系统受单一扰动,整个扰动过程中发电机A的有功功率P和无功功率Q可表示如下(其中 $T = 10\text{ s}$, $\bar{\delta} = \delta(0)$):

1) 扰动前,系统($t = 0$)

$$\begin{cases} P(\bar{\delta}) = \sin \bar{\delta} / 0.5, \\ Q(\bar{\delta}) = (1 - \cos \bar{\delta}) / 0.5; \end{cases}$$

2) 扰动期间,系统($t \in (0, t_d]$)

$$\begin{cases} P(t) = 0, \\ Q(t) = 0; \end{cases}$$

3) 扰动后,系统($t \in (t_d, T]$)

$$\begin{cases} P(t) = \sin \delta(t) / 0.5, \\ Q(t) = (1 - \cos \delta(t)) / 0.9. \end{cases}$$

该问题的OTS模型为

$$\begin{aligned} \min & -P(\bar{\delta}), \text{ for } \bar{\delta} \\ \text{s. t. } & -2 \leq P(\bar{\delta}) \leq 2; \\ & -2 \leq Q(\bar{\delta}) \leq 2; \\ & \begin{cases} d\delta(t)/dt = \omega(t), \\ \delta(0) = \bar{\delta}; \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \frac{d\delta(t)}{dt} = \frac{1}{M}(P(\bar{\delta}) - P(\delta(t))) - \frac{D}{M}\omega(t), \\ \delta(0) = \bar{\delta}; \\ \delta(t) \in [\delta_{\min}, \delta_{\max}], t \in [0, T]. \end{cases} \quad (14)$$

目标函数为发电机A到无穷大系统的最大传输容量,稳定约束为最后一个不等式约束,取 $\delta_{\max} = 2.5\text{ rad}$ (0.8π), $\delta(t)$ 和 $\omega(t)$ 为无限维变量.算法中相应的参数取为 $\epsilon = 1e-5$, $\epsilon_0 = 0.01$;停止标准为 $\epsilon_k = 1e-6$.数值仿真中,令 $T = 2\text{ s}$.

对于不同的故障清除时间,OTS的计算结果、程序迭代次数和计算运行时间如表1所示.其中: $\bar{\delta}$ 为用OTS方法计算获得的最优解, t_d 为故障清除时间,Ite.No为迭代次数,CPU为系统运行时间.以 $t_d = 0.3\text{ s}$ 为例,最优解为 $\bar{\delta} = 0.2401\text{ rad}$.为了分析系统的稳定性能,考虑初始时刻发电机转角 $\delta_1 = 0.25\text{ rad}$,即对 $\bar{\delta}$ 作小扰动时系统的运行情况.

表1 单机无穷大系统不同故障清除时间的OTS计算结果

t_d/s	$\bar{\delta}/\text{rad}$	Ite.No/次	CPU/s
0.1	0.4589	22	20.81
0.2	0.3410	16	26.14
0.3	0.2401	28	31.92
0.4	0.1716	14	41.13
0.5	0.1271	13	29.92
0.6	0.0975	9	22.57
0.7	0.0770	10	23.45
0.8	0.0624	22	35.67
0.9	0.0517	8	16.16

两个初始值分别为 $\bar{\delta}$ 和 δ_1 的系统在事故过程中的运行轨迹如图3所示.其中:实线表示初始值为 $\bar{\delta}$ 时发电机转角随时间的变化情况,可见系统受到扰动后逐步趋于稳定;虚线表示初始时刻 δ_1 时发电机转角随时间的变化情况,显然此时系统是不稳定的.

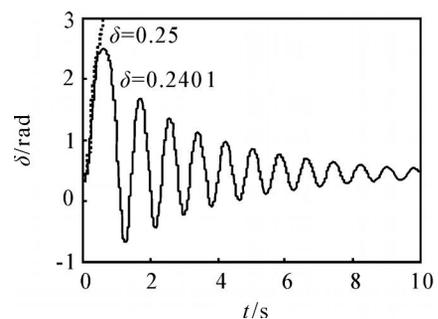


图3 单机无穷大系统OTS解的运动轨迹

4.2 6条母线的两机系统

考虑图4所示的6条母线4节点的两机系统,其中目标函数中的参数(表示两台发电机的燃料成本)如表2所示.

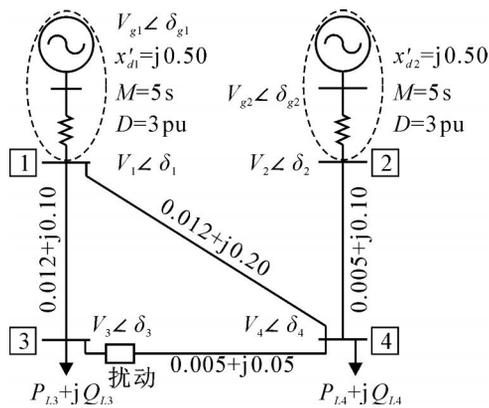


图 4 4 节点双机系统

表 2 1 号和 2 号发电机的燃料成本特性

Generator-1	0.0	4250	12068
Generator-2	1.13	1304.5	18720.0

考虑经济调度问题,目标函数为

$$\min_{i=1}^2 (i \bar{P}_{gi}^2 + i \bar{P}_{gi} + i).$$

令发电机有功功率输出上限和下限分别为 2.0 和 0.25,所有节点电压限制在 1.5 和 1.0 之间.再令 $G_3 + jB_3 = 1.0 + j0.1$, $G_4 + jB_4 = 1.0 + j0.1$.暂态稳定约束采用功角稳定标准,定义为

$$| \dot{\delta}_{gi}(t) - \dot{\delta}_c(t) | \leq \max, i = 1, 2.$$

表 3 OPF 问题

燃料成本	P_{g1}	P_{g2}	V_{g1}	V_{g2}	V_1	V_2	V_3	V_4
34112	0.2500	1.7310	1.0462	1.5000	0.9796	1.0110	0.9680	0.9738

表 4 OTS 问题

燃料成本	P_{g1}	P_{g2}	V_{g1}	V_{g2}	V_1	V_2	V_3	V_4
35512.2	0.7381	1.2156	1.0000	1.4044	0.9538	1.0110	0.9538	0.9512

5 结 论

本文基于半无限优化(SIP)的迭代方法,提出了求解 OTS 问题的一类新算法.新方法具有 OTS 降维、减少子问题中不等式约束个数的特点;合适的有效集策略较好地避免了传统 SIP 近似算法中大量的不等式约束导致非线性规划的计算困难;该算法在理论上有很好的全局收敛性,是数学上近期发展的 SIP 问题的一类迭代方法的推广.与已有的 OTS 研究比较,特别是与函数转换方法^[13,14]比较,本文方法避免了函数积分的计算,且理论上可保证满足计算过程中非线性优化问题约束规范化条件.

应该注意,所讨论的 OTS 问题是基于事故清除时间 t_d 给定情况下的研究,而 t_d 的确定本身也是 OTS 待考虑的问题.因此,如何结合可变事故清除时间建立 OTS 的求解方法是本文的后续工作.此

其中 $\dot{\delta}_c(t) = \frac{\sum_{i=1}^2 M_i \dot{\delta}_{gi}(t)}{M_i}$ 为惯性中心参考系.

对于未加暂态稳定约束的传统 OPF 模型,计算所得到的解如表 3 所示;对于增加暂态稳定约束后,OTS 模型采用新算法计算所得到的解如表 4 所示.清除时间为 $t_d = 5$ s.计算显示,不加暂态稳定约束的 OPF 解处于不稳定状态.对于增加暂态稳定约束的情况,系统受扰动后以 OTS 的解为初值的系统运行轨迹如图 5 所示.计算表明,用 OTS 方法计算,所需的燃料成本比用传统 OPF 方法高,但从稳定性而言,受到扰动的情况下用 OTS 计算的初始运行点使系统维持稳定.

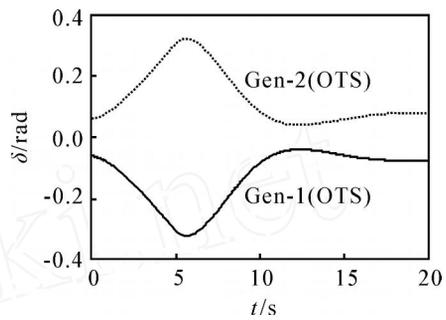


图 5 OTS 解的系统运行轨迹

外,在 OTS 转换为 SIP 的过程中,本文应用了隐函数定理和微分方程的计算,这些在算法实现的过程中均采用了近似方法,不可避免地产生了一定的误差,影响了计算的精度.如何保证 OTS 计算的精度也是有待研究的问题.

参考文献(References)

[1] El-Hawary M E. Optimal power flow: Solution technologies, requirement and challenges[R]. Piscataway: IEEE Tutorial Service, IEEE Service Center, 1996.

[2] Tong X J, Wu F F, Zhang Y P, et al. A semismooth Newton method for solving optimal power flow[J]. J of Industrial and Management Optimization, 2007, 3(3): 553-567.

[3] 罗可,林睦纲,童小娇.最优潮流的解耦半光滑牛顿型算法[J].控制与决策,2006,21(5):580-584.

- (Luo K, Lin M G, Tong X J. Decoupled semismooth Newton algorithm for optimal power flow problems[J]. Control and Decision, 2006, 21(5) : 580-584.)
- [4] 罗可, 童小娇. 求解最优潮流 KKT 系统的一类新模型及算法设计[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2) : 245-250.
(Luo K, Tong X J. New model and algorithm for solving the KKT system of optimal power flow [J]. Control Theory and Applications, 2006, 23(2) : 245-250.)
- [5] Gan De-qiang, Thomas R J, Zimmerman R D. Stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2) : 535-540.
- [6] 孙元章, 杨新林, 王海风. 考虑暂态稳定性约束的最优潮流问题[J]. 电力系统自动化, 2005, 2(16) : 56-59.
(Sun Y Z, Yang X L, Wang H F. Optimal power flow with transient stability constraints in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 2(16) : 56-59.)
- [7] Momoh J A, Koesslwer R J, Bond M S. Challenges to optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1) : 444-447.
- [8] Kita H, Nishiya K, Hasegawa J. On-line preventive control for power systems based on energy function method[J]. Electrical Engineering in Japan, 1991, 111(7) : 30-39.
- [9] 孙景强, 房大中, 钟德成. 暂态稳定约束下的最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2001, 25(13) : 17-21.
(Sun J Q, Fang D Z, Zhong D C. Optimal power flow with transient stability constraints [J]. Proc of the CSEE, 2001, 25(13) : 17-21.)
- [10] Davaid A K, Lin Xu-jun. Dynamic security enhancement in power market systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2) : 431-438.
- [11] Yuan Y, Kubokawa J, Sasaki H. A solution of optimal power flow with multicontingency transient stability constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3) : 1094-1102.
- [12] Gan D, Thomas R J, Zimmerman R D. Stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2) : 535-540.
- [13] Chen L, Tada Y, Okamoto H, et al. Optimal operation solution of power system with transient stability constraints [J]. IEEE Trans on Circuits & Systems-I : Fundamental and Applications, 2001, 48(3) : 327-339.
- [14] 陈洛南, 多田泰之, 冈本浩, 等. 基于经济和稳定的电力系统最优运行策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10) : 8-13.
(Chen L N, Tada Y, Okamoto H, et al. Optimal operation solution of power system with transient stability constraints [J]. IEEE Trans on Circuits & Systems-I : Fundamental and Applications, 2004, 28(10) : 8-13.)
- [15] Wu S Y, Li D H, Qi L Q, et al. An iterative method for solving KKT system for the semi-infinite programming[J]. Optimization Methods and Software, 2005, 20(6) : 629-643.
- [16] Qi L Q, Ling C, Tong X J, et al. A smoothing projected Newton-type algorithm for semi-infinite programming [J]. J of Computational Applied Mathematics, 2008, 217(2) : 432-447.
- [17] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
(Yuan Y X, Sun W Y. Optimal theory and methods [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1997.)

(上接第 1377 页)

- [9] 张春雨, 方炜, 姜长生. 基于 T-S 模糊系统的空天飞行器鲁棒自适应轨迹线性化控制[J]. 航空学报, 2007, 28(5) : 1153-1161.
(Zhang C Y, Fang W, Jiang C S. Robust adaptive trajectory linearization control of an aerospace vehicle based on T-S fuzzy system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5) : 1153-1161.)
- [10] 朱亮, 姜长生, 陈海通, 等. 基于单隐层神经网络的空天飞行器直接自适应轨迹线性化控制[J]. 宇航学报, 2006, 27(3) : 338-344.
(Zhu L, Jiang C S, Chen H T, et al. Direct adaptive trajectory linearization control of aerospace vehicle using SHLNN [J]. J of Astronautics, 2006, 27(3) : 338-344.)