

文章编号: 1001-0920(2011)11-1637-06

带可变速事故切除时间的暂态稳定约束最优潮流计算

童小娇^{1,2}, 贺恩锋^{2a}, 周任军^{2b}

(1. 衡阳师范学院 数学与计算科学系, 湖南 衡阳 421002; 2. 长沙理工大学 a. 数学与计算科学学院, b. 电气工程学院, 长沙 410114)

摘要: 在暂态稳定约束最优潮流(OTS)研究的基础上, 提出了电力系统事故切除时间为变量的暂态稳定约束最优潮流(OPF-TSCC)模型. 根据约束转换方法, 建立了OPF-TSCC对应的一类广义半无限优化(GSIP); 基于GSIP现有理论和算法, 提出了求解GSIP的一类新算法. 电力系统数值仿真结果验证了所提出的模型和算法的有效性. 新模型还可用于求解系统故障的临界切除时间(CCT).

关键词: 暂态稳定约束最优潮流; 事故切除时间; 广义半无限优化; 临界切除时间

中图分类号: TP206

文献标识码: A

Calculation of transient stability constraints optimal power flow with variable clearing time of faults

TONG Xiao-jiao^{1,2}, HE En-feng^{2a}, ZHOU Ren-jun^{2b}

(1. Department of Mathematics and Computational Science, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China; 2a. College of Mathematics and Computational Science, 2b. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China. Correspondent: TONG Xiao-jiao, E-mail: xjtong-csust@hotmail.com)

Abstract: Based on the research of optimal power flow with transient stability constraints(OTS), optimal power flow with transient stability constraints and variable clearing time of faults(OPF-TSCC) is proposed. By using a transformed strategy of constraints, the OPF-TSCC is reformulated to a generalized semi-infinite programming(GSIP). Then a new solution method based on GSIP is presented. Numerical examples of power systems show the effectiveness of the model and method, and the new model can be applied to the critical clearing time of faults(CCT) problems.

Key words: optimal power flow with transient stability constraints; clearing time of fault; generalized semi-infinite programming; critical clearing time

1 引言

电力工业的市场化改革和竞争机制要求系统在越来越接近其稳定极限状态下运行, 系统的安全稳定运行将面临更大的挑战. 因此, 考虑系统经济性和安全稳定性的暂态稳定约束最优潮流的研究具有更现实的意义和实际应用价值.

关于给定事故切除时间的暂态稳定约束最优潮流(OTS)问题已有部分研究成果^[1-3]. OTS的计算问题主要有以下3类方法:

1) 能量函数方法^[4]. 该方法基于能量函数来分析参数对暂态稳定的影响, 由于能量函数本身的缺陷和

模型的非光滑性, 该方法的计算精度偏低.

2) 离散方法^[5]. 该方法采用差分技术将微分方程离散化, 将OTS问题转化为一般非线性优化问题, 但离散化后会遇到非线性优化高维的计算困难.

3) 约束转换方法^[1,3,6-8]. 该类方法通过约束转换将包括微分方程约束的优化问题转化为隐式半无限优化(SIP)问题, 然后用SIP相关算法(典型的如牛顿法)求解. 该类方法的最大特点是转化后的优化问题维数与通常的OPF相同.

已有的关于OTS的研究考虑的均是事故切除时间给定的情况. 但是, 如何确定临界故障切除时间以

收稿日期: 2010-06-09; 修回日期: 2010-11-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11171095, 10871031, 10926189); 湖南省自然科学衡阳联合基金项目(10JJ8008); 湖南省教育厅重点项目(10A015).

作者简介: 童小娇(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 从事最优化理论与计算方法和电力系统分析等研究; 贺恩锋(1983-), 男, 硕士, 从事最优化理论与计算方法的研究.

及在保持稳定运行的情况下确定更宽松合理事故切除时间等工作更具挑战性. 因此, 将事故切除时间作为变量来研究暂态稳定约束最优潮流问题具有更重要的意义. 另外, 从优化的角度分析, 对于具有相同目标函数和约束条件的优化问题, 将常量扩展为变量所对应的优化问题具有更佳的最优值. 因此, 将事故切除时间作为变量的暂态稳定约束最优潮流 (OPF-TSCC) 问题可得到比 OTS 更优的运行结果. 同时, 将优化目标设为最大化事故切除时间可得到事故临界切除时间, 即保证系统安全稳定运行情况下的最大事故切除时间, 简称 CCT.

本文首先建立事故切除时间为变量的暂态稳定约束最优潮流模型; 进而基于约束转换技术^[7], 将 OPF-TSCC 问题转换为隐式 GSIP 问题, 转换后的模型保持常规 OPF 的维数^[9-10]; 然后根据 GSIP 的等价双层优化模型以及下层带界约束优化问题的 KKT 条件^[11]将复杂模型转换为通常非线性规划问题, 由此可用常规优化算法求解 OPF-TSCC; 最后, 对两个实测电力系统进行数值仿真, 计算结果表明了 OPF-TSCC 模型, CCT 问题以及对应求解算法的有效性.

2 OPF-TSCC 导出的 GSIP 模型

2.1 OPF-TSCC 模型

电力系统的动态特性可用微分-代数方程 (DAE) 描述为^[2,5]

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

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

其中: $x(t) \in R^{n_x}$ 为状态变量, 包括发电机的转角和转子角速度等; $y(t) \in R^{n_y}$ 为代数变量, 包括各个节点电压的幅值和相角等; $z(t) \in R^{n_z}$ 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; $F: R^{n_x+n_y+n_z} \rightarrow R^{n_x}$ 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. 除式 (2) 的等式约束外, 电力系统中还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的上下限等. 这些可用代数不等式表示为

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

其中 $H: R^{n_x+n_y+n_z} \rightarrow R^m$. 文中均假设 F, G 和 H 为连续可微函数. 系统在运行中受到某种故障扰动时, 须将故障切除以保证系统恢复正常运行. 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:

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

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

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

其中: $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 为系统的初始状态 ($t=0$ 时刻), t_{cl} 为故障切除时刻, T 为整个研究时段. 文中设 t_{cl} 为变量, 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. 系统受扰动下的某种经济运行 (最优运行) 的 OPF-TSCC 模型为

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

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

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

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

$$\dot{x} = F_1(x(t), y(t), \bar{z}), \text{ with } x(0) = \bar{x};$$

$$G_1(x(t), y(t), \bar{z}) = 0, t \in (0, t_{cl});$$

$$H_1(x(t), y(t), \bar{z}) \leq 0, t \in (0, t_{cl});$$

$$\dot{x} = F_2(x(t), y(t), \bar{z}), \text{ with initial value } x(t_{cl});$$

$$G_2(x(t), y(t), \bar{z}) = 0, t \in (t_{cl}, T];$$

$$H_2(x(t), y(t), \bar{z}) \leq 0, t \in (t_{cl}, T]. \quad (7)$$

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) 描述的分段可微函数. 与 OTS 模型比较, OPF-TSCC 模型中增设了故障切除时间为变量, 因此 OPF-TSCC 是传统 OTS 模型的扩展. 设 $f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = -t_{cl}$, 则式 (7) 描述的为 CCT 问题.

2.2 OPF-TSCC 模型的 GSIP 转换

本节利用约束转换方法^[3]实现式 (7) 的转换. 首先给出如下假设:

假设 1 对满足 $G_k(x(t), y(t), \bar{z}) = 0, H_k(x(t), y(t), \bar{z}) \leq 0$ ($k=1, 2$) 的所有点列 $(x(t), y(t)), t \in (0, T]$, 函数 $G_k(x(t), y(t), \bar{z})$ 关于 y 的雅克比矩阵非奇异, 即 $\det(D_y G_k(x(t), y(t), \bar{z})) \neq 0$, 此处 $D_y G_k = \partial G / \partial y$.

假设 1 可以保证隐函数的存在性, 即由该假设和 $G_k(x(t), y(t), \bar{z}) = 0$ 在点 $(x(t), y(t))$ 的某一邻域内必然存在唯一映射 $q^k: R^{n_x+n_z} \rightarrow R^{n_y}$, 使得 $y(t) = q^k(x(t), \bar{z})$ ($t \in [0, T]$) 满足

$$\begin{cases} G_1(x(t), q^1(x(t), \bar{z}), \bar{z}) = 0, (t \in [0, t_{cl}]); \\ G_2(x(t), q^2(x(t), \bar{z}), \bar{z}) = 0, (t \in [t_{cl}, T]). \end{cases}$$

将此式代入模型 (7) 中的 DEA 和不等式约束中, 可得

$$\dot{x}(t) = F_k(x(t), q^k(x(t), \bar{z}), \bar{z}), x(0) = \bar{x}; \quad (8)$$

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

记微分方程 (8) 的解为 $x(t) \equiv \phi_t^k(\bar{x}, \bar{z})$, 则

$$\begin{aligned} \phi_t^l(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}) &= \\ \bar{x} + \int_0^t F_1(\phi_\tau^l(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), q^1(\phi_\tau^l(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z})d\tau, \\ & \quad t \in (0, t_{cl}); \\ \phi_t^2(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}) &= \\ \phi_{t_c}^l\left(t_{cl} + \int_0^t F_2(\phi_\tau^l(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), q^2(\phi_\tau^l(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z})d\tau\right), \\ & \quad t \in (t_{cl}, T]. \end{aligned} \tag{10}$$

最后, 式 (7) 转化为如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}), \text{ for } (t_{cl}, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}). \\ \text{s.t. } F_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0; \\ G_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0; \\ H_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq 0; \\ H_1(\phi_t^l(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), q^1(\phi_t^l(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z}) \leq 0, \\ \quad t \in [0, t_{cl}]; \\ H_2(\phi_t^2(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), q^2(\phi_t^2(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z}) \leq 0, \\ \quad t \in [t_{cl}, T]. \end{aligned} \tag{11}$$

上式变量为 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, t_{cl})$, 最后 2 个不等式约束为无限约束, 且约束区间包括变量 t_{cl} , 数学上称该类优化为广义半无限优化 (GSIP)^[9]. 因 q^k 的隐式关系导致模型 (11) 为隐式 GSIP, 其计算相对困难. 如上所述, 对 OPF-TSCC 模型的约束转换方法同样适合于系统多事故情况, 不同的只是包括更多的半无限约束^[6].

3 基于 GSIP 的 OPF-TSCC 计算

基于双层优化的处理方法, 建立由 OPF-TSCC 导出的 GSIP 求解^[10]. 记

$$\omega = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}), g_0(\omega) = \begin{bmatrix} F_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \\ G_0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \end{bmatrix},$$

$$s_1(\omega, t_{cl}, t) = H_1(\phi_t^1(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), q^1(\phi_t^1(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z}),$$

$$s_2(\omega, t_{cl}, t) = H_2(\phi_t^2(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), q^1(\phi_t^2(t_{cl}, \bar{x}, \bar{z}), \bar{z}), \bar{z}).$$

其中: $\omega \subset R^{n_x+n_y+n_z}$; $g_0: R^{n_x+n_y+n_z} \rightarrow R^{n_x+n_y}$; $s_1, s_2: R^{n_x, n_y, n_z+2} \rightarrow R^m$; 分量函数用 $s_1^j, s_2^j (j = 1, 2, \dots, m)$ 表示. 则式 (11) 可写成

$$\begin{aligned} \min_{\omega, t_{cl}} f(\omega). \\ \text{s.t. } g_0(\omega) = 0; \\ H_0(\omega) \leq 0; \\ s_1(\omega, t_{cl}, t) \leq 0, t \in T_1(t_{cl}) \equiv [0, t_{cl}]; \\ s_1(\omega, t_{cl}, t) \leq 0, t \in T_1(t_{cl}) \equiv [0, t_{cl}]. \end{aligned} \tag{12}$$

此处: $f: R^{n_x+n_y+n_z+1} \rightarrow R, H_0: f: R^{n_x+n_y+n_z+1} \rightarrow R^{m_0}$. 约束条件 $t \in [t_{cl}, T]$, 则式 (12) 等价于如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\omega, t_{cl}} f(\omega). \\ \text{s.t. } g_0(\omega) = 0; \\ H_0(\omega) \leq 0; \\ \phi_1^j(\omega, t_{cl}) = \max_{t \in T_1(t_{cl})} s_1^j(\omega, t) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m; \\ \phi_2^j(\omega, t_{cl}) = \max_{t \in T_2(t_{cl})} s_2^j(\omega, t) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \tag{13}$$

记式 (13) 中下层优化问题为

$$\begin{aligned} Q_k^j(\omega, t_{cl}): \max_{t \in T_k(t_{cl})} s_k^j(\omega, t) = - \min_{t \in T_k(t_{cl})} -s_k^j(\omega, t), \\ k = 1, 2, j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \tag{14}$$

注意到, 式 (14) 为界约束 $T_1(t_{cl})$ 和 $T_2(t_{cl})$ 的一维优化问题, 对于任意情况, 其一阶必要条件 (KKT 条件) 可写成如下形式^[11]:

$$\begin{cases} v_1^j(t) = t - t_{cl}, \nabla_t s_1^j(\omega, t) > 0; \\ v_1^j(t) = t, \nabla_t s_1^j(\omega, t) \leq 0. \\ v_2^j(t) = t - T, \nabla_t s_2^j(\omega, t) > 0; \\ v_2^j(t) = t - t_{cl}, \nabla_t s_2^j(\omega, t) \leq 0. \end{cases} \tag{15}$$

进一步, 式 (15) 可写成

$$|v_k^j(t)| \nabla_t s_k^j(\omega, t) = 0. \tag{16}$$

其中 $\nabla_t s_k^j(\omega, t)$ 的计算见文献 [1,8]. 因此, 式 (13) 可简化为如下形式:

$$\begin{aligned} \min f(\omega), \text{ for } (\omega, t_{cl}, t_1^1, \dots, t_1^m, t_2^1, \dots, t_2^m); \\ \text{s.t. } g_0(\omega) = 0, \\ H_0(\omega) \leq 0, \\ s_1^j(\omega, t_1^j) \leq 0, \\ |v_1^j(t_1^j)| \nabla_t s_1^j(\omega, t_1^j) = 0, \\ s_2^j(\omega, t_2^j) \leq 0, \\ |v_2^j(t_2^j)| \nabla_t s_2^j(\omega, t_2^j) = 0. \end{aligned} \tag{17}$$

式 (17) 是建立求解 OPF-TSCC 的最后转化模型.

对该模型说明如下:

1) 当 $s_k^j(\omega, t)$ 关于 t 为凸函数时, 对于每个固定的 ω , 式 (16) 与 (14) 同解. 因此, 可认为式 (17) 是 OPF-TSCC 求解的简化形式. 关于 s_1^j 和 s_2^j 的凸性可参见文献 [12].

2) 用约束转换方法建立的优化问题的维数为 $n_x + n_y + n_z + 1$. 与传统 OPF 比较只多了变量 t_{cl} , 因此维数增加 1.

3) 所提出的下层优化中, 因其 KKT 条件未包括拉格朗日乘子, 故不增加转换后模型的维数.

4) 式 (17) 为带特殊互补条件的数学规划问题 (MPCC), 其求解方法有很多, 如正规与互补罚函数法、内点罚函数法和序列二次规划法等^[13].

4 数值仿真

本节选用电力系统的2个算例检测OPF-TSCC模型及其求解算法的有效性. 具体地, 用序列二次规划法求解优化问题(17), 以此获得系统(11)的解. 采用Matlab 7.0编程实现, 求解调用Matlab库函数中的优化和微分方程的求解程序fmincon和ode45. 计算运行环境为Intel Pentium III 936 MHz CPU, 256 MB RAM, XP operating system.

4.1 单机无穷大系统

考虑单机无穷大系统. 发电机节点通过双回路接入无穷大系统, 各节点电压标幺值为1.0, 发电机的电磁转矩 M 为5, 阻尼功率系数 D 为3. 设系统受单一扰动, 在扰动的整个过程中, 发电机A的有功功率 P 和无功功率 Q 可表示如下:

1) 扰动前, 系统($t=0$)

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

2) 扰动期间, 系统($t \in (0, t_{cl})$)

$$P_1(\delta(t)) = 0, \quad Q_1(\delta(t)) = 0;$$

3) 扰动后, 系统($t \in (t_{cl}, T]$)

$$P_2(\delta(t)) = \sin \delta(t)/0.9,$$

$$Q_2(\delta(t)) = (1 - \cos \delta(t))/0.9.$$

其中: $\bar{\delta} = \delta(0)$ 为转角初值, $\delta(t)$ 为转角随时间变化的函数关系, ω_0 为转角速度初值, $\omega(t)$ 为转角速度随时间变化的函数关系.

该问题以故障切除时间为变量的OPF-TSCC模型为

$$\min -P(\bar{\delta}), \text{ for } \bar{\delta}.$$

$$\text{s.t. } -2 \leq P(\bar{\delta}) \leq 2;$$

$$-2 \leq Q(\bar{\delta}) \leq 2;$$

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t), \quad \delta(0) = \bar{\delta};$$

$$\begin{cases} \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{\omega_0}{M}(P(\bar{\delta}) - P_1(\delta(t))) - \frac{D}{M}\omega(t), \\ \bar{\omega} = \omega(0) = 0; \end{cases}$$

$$\delta(t) \leq \delta_{\max}, \quad t \in [0, t_{cl}];$$

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t), \quad \delta(0) = \bar{\delta};$$

$$0 < t_{cl} < T;$$

$$\delta(t) \leq \delta_{\max}, \quad t \in (t_{cl}, T];$$

$$\delta(T) \leq \delta'_{\max}.$$

模型中的目标函数为从发电机A到无穷大系统的最大传输容量, 前2个为传输不等式约束, 最后的不等式为稳定约束, 数值仿真中相应的参数取 $\delta_{\max} = 2.5 \text{ rad} (\delta_{\max} \approx 0.8\pi)$, $\delta'_{\max} = 1.57 \text{ rad} (\delta'_{\max} \approx 0.5\pi)$, T

$= 2 \text{ s}$; 终止条件 $\text{eps} = 10^{-6}$.

为了比较模型OTS的计算结果, 对给定事故切除时间下的OTS进行计算以及CCT计算. 表1分别列出了固定故障事故切除时间的OTS计算, OPF-TSCC和CCT的计算结果. 结果表明: 在系统受扰动下OPF-TSCC计算所得有功功率大于OTS; CCT所得解较OTS设定的能使系统扰动后恢复稳定的临界切除时间长. 这些均与将事故切除时间设为常数和变量的理论结果一致.

表1 OTS, OPF-TSCC和CCT计算结果

参数值	OTS, SIP (初值给定)	OPF-TSCC, GSIP (初值给定)	OPF-TSCC, GSIP (初值任意)	CCT, GSIP (初值任意)
$p(\bar{\delta})$	0.4756	0.3866	0.9412	0.1997
t_{cl}/s	0.3	0.3	0.048	0.4735
$\bar{\delta}/\text{rad}$	0.2401	0.1945	0.4900	0.1000
Ite.No./g	28	3	2	3
CPU/s	31.92	6.099	3.515	4.436

以 $\bar{\delta}$ 以及对 $\bar{\delta}$ 进行小扰动后的 $\bar{\delta}'$ 为初值所描述的 $\delta(t)$ 的运行轨迹如图1所示, 其中 $\bar{\delta}$ 是以(0.45, 0.045, 0.01, 0.9)为初值时求解模型所得最优解. 当以最优解 $\bar{\delta}$ 作为运行的初始点时, 系统保持稳定; 对初始运行点进行小扰动后, 系统呈现不稳状况.

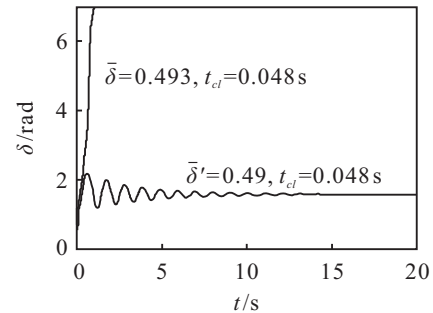


图1 目标函数为最大化有功功率所得转角的轨迹

图2为CCT计算的结果分析, 是分别以 t_{cl} 和对 t_{cl} 进行小扰动后的 t'_{cl} 为初值所描述的 $\delta(t)$ 的运行轨迹, 其中 t_{cl} 是以(0.09, 0.45, 0.1, 0.9)为初值时求解模型所得最优解. 当以最优解 t_{cl} 作为运行的初始点时, 系统保持稳定; 对初始运行点进行小扰动后, 系统呈现不稳状况.

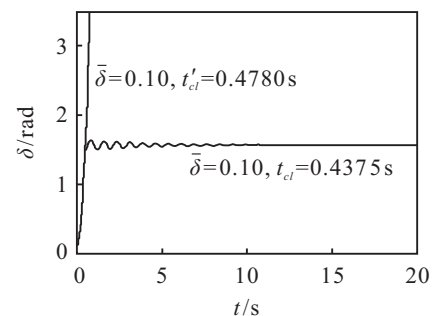


图2 目标函数为最大化故障切除时间所得转角轨迹

图 1 和图 2 还反映了一个实际的物理特性, 即一个稳定系统在受到扰动后将从原来的稳定状态点达到一个新的稳定状态点, 如图 1 从 0.490 达到 1.5667.

4.2 6 条母线的两机系统

以受单个扰动的 6 条母线 4 节点的两机系统 (见图 3) 为例, 考虑暂态稳定约束下的经济调度 (ELD) 问题. 发电机的有功功率 P 和无功功率 Q 表示如下: 事故前、事故中和事故后消去非电势各节点的导纳矩阵可通过系统线路图计算得到^[14]. 其中: $\bar{\delta} = \delta(0)$ 表示转角差初值, $\delta_{g12}(t)$ 表示转角差随时间变化的函数关系, ω_0 表示转角速度差初值, $\delta_{g12}(t)$ 表示转角速度差随时间变化的函数关系.

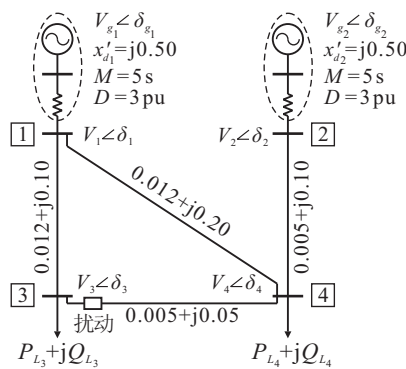


图 3 4 节点双机系统

事故前, 有

$$\begin{cases} V_{g1} V_1 \sin(\delta_{g1} - \delta_1) - x'_{d1} P_1 = 0, \\ V_1^2 - V_{g1} V_1 \cos(\delta_{g1} - \delta_1) - x'_{d1} Q_1 = 0, \\ V_{g2} V_2 \sin(\delta_{g2} - \delta_2) - x'_{d2} P_2 = 0, \\ V_2^2 - V_{g2} V_2 \cos(\delta_{g2} - \delta_2) - x'_{d2} Q_2 = 0, \\ P_{g1} = V_{g1}^2 G'_{11} + V_{g1} V_{g2} (G'_{12} \cos \delta_{g12} + B'_{12} \sin \delta_{g12}), \\ P_{g2} = V_{g2}^2 G'_{22} + V_{g1} V_{g2} (G'_{12} \cos \delta_{g12} - B'_{12} \sin \delta_{g12}). \end{cases}$$

其中: $\delta_{g12} = \delta_{g1} - \delta_{g2}$, $P_{gi} = P_i(\bar{\delta})$, $i = 1, 2$.

事故中. 以第 2 台发电机为基准, 采用相对位角的微分方程组表示, 即

$$\begin{cases} \frac{d\delta_{g12}(t)}{dt} = \omega_{g12}(t), \\ \frac{d\omega_{g12}(t)}{dt} = \frac{\omega_0}{M_1} [P_1(\bar{\delta}) - P_{E1}] - \frac{\omega_0}{M_2} [P_2(\bar{\delta}) - P_{E2}] - d_0 \omega_{g12}(t), \\ P_{gi}(\delta_{g12}(t)) = V_{gi}^2 G'_{ii} + V_{g1} V_{g2} (G'_{12} \cos \delta_{g12}(t) + B'_{12} \sin \delta_{g12}(t)), i = 1, 2. \end{cases}$$

其中 $\delta_{g12} = \delta_{g1} - \delta_{g2}$. 若 $D_1/M_1 = D_2/M_2 = d_0$, 则 $P_1(\bar{\delta})$, $P_2(\bar{\delta})$, $\delta_{g1}(t)$ 和 $\delta_{g2}(t)$ 初始值分别为发电机 G_1 和 G_2 在 $t=0$ 时的 P_{g1} , P_{g2} , $\delta_{g1}(0)$ 和 $\delta_{g2}(0)$, 且 $\omega_1(0) = \omega_2(0) = 0$.

事故后. 与事故中不同之处在于导纳系数及其初值, 且 $P_1(\bar{\delta})$, $P_2(\bar{\delta})$, $\delta_{g12}(t)$ 和 $\omega_{g12}(t)$ 的初始值分别为 $t=t^1$ 时事故中方程计算所得到的 P_{g1} , P_{g2} , $\delta_{g12}(t^1)$ 和

$\omega_{g12}(t^1)$. 对于该问题, 以故障切除时间为变量的 OPF-TSCC 模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^2 \alpha_i P_i^2(\bar{\delta}, \bar{V}) + \beta_i P_i(\bar{\delta}, \bar{V}) + \gamma_i, \text{ for } \bar{\delta}, \bar{V}, t_{cl}. \\ \text{s.t.} \quad & G^0(\bar{\delta}, \bar{V}, t_{cl}) = 0; \\ & H^0(\bar{\delta}, \bar{V}, t_{cl}) \leq 0; \\ & H_1(\delta(t), \bar{V}, t_{cl}) \leq 0, t \in (0, t_{cl}); \\ & H_2(\delta(t), \bar{V}, t_{cl}) \leq 0, t \in [t_{cl}, T]; \\ & 0 < t_{cl} \leq T. \end{aligned}$$

模型中目标函数中的参数 (表示 2 台发电机的燃料成本特性) 见表 2.

表 2 1 号和 2 号发电机的燃料成本特性

发电机	系数		
	α	β	γ
Generator-1	0.0	4250	12068
Generator-2	1.13	1304.5	18720.0

约束函数 $G^0(\bar{\delta}, \bar{V}, t_{cl}) = 0$ 为 8 个潮流方程; $H^0(\bar{\delta}, \bar{V}, t_{cl}) \leq 0$ 分别为电压和发电机输出功率的界约束: $V_{\min} \leq V_{gi} \leq V_{\max}$, $i = 1, 2$, $V_{\min}, V_{\max} \in [0.9, 1.2]$; $P_{\min} \leq P_{gi} \leq P_{\max}$, $i = 1, 2$, $P_{\min}, P_{\max} \in [0.1, 2.5]$ ^[14]; $H_i(\delta(t), \bar{V}, t_{cl})$ ($i = 1, 2$) 为所采用的功角暂态稳定约束, 即 $|\delta_{gi}(t) - \delta_c(t)| \leq \delta_{\max}$, $i = 1, 2$, $\delta_{\max} = 2.5$ ($\delta_{\max} \approx 0.8\pi$)^[14], 其中 $\delta_c(t) = \sum_{i=1}^2 M_i \delta_{gi}(t) / \sum_{i=1}^2 M_i$.

模型求解时, 设 $\text{eps} = 10^{-6}$ 为终止条件; 事故分析时间为 $T = 2\text{s}$; 3, 4 节点负荷为 $P_{L_i} + jQ_{L_i} = 1.0 + j0.1$, $i = 3, 4$. 表 3 为传统 OPF 模型和固定故障切除时间 $t_{cl} = 0.13\text{s}$ 时 OTS 模型计算的解以及故障切除时间 t_{cl} 为变量时 OPF-TSCC 和 CCT 应用 GSIP 计算的解. 由对比分析可知, 在保证系统稳定的条件下, OPF-TSCC 计算所得燃料成本少于 OTS, 从而体现了故障切除时间为变量的价值. 而在燃料成本相当的情况下, CCT 模型较 OTS 模型的故障切除时间长, 这有利于对系统进行故障诊断和切除.

表 3 OPF, OTS, OPF-TSCC 和 CCT 计算结果

问题	OPF	OTS	OPF-TSCC	CCT
燃料成本	34112	34550	34093	35560
P_{g1}	0.2500	0.6053	0.5571	0.9312
P_{g2}	1.7310	0.9121	0.7188	0.6238
V_{g1}	1.0462	1.0400	1.0327	1.0455
V_{g2}	1.5000	1.2015	1.0630	1.0966
V_1	0.9796	1.0971	1.1916	1.1879
V_2	1.0110	1.0813	1.0000	1.0000
V_3	0.9680	0.9935	1.0980	1.2070
V_4	0.9738	0.9723	0.9761	0.9698

以 (δ_1, δ_2) 以及对其进行小扰动后的 (δ'_1, δ'_2) 为初值所描述出的运行轨迹如图 4 所示. 其中 δ_1 和 δ_2 是

以(0.1, 0.8, 0.6, 0.7, 1.1, 0.99, 0.97, 0.98, 1.1, 0.9, 1, 0.03, 0.8)为初值时求解模型所得最优解。

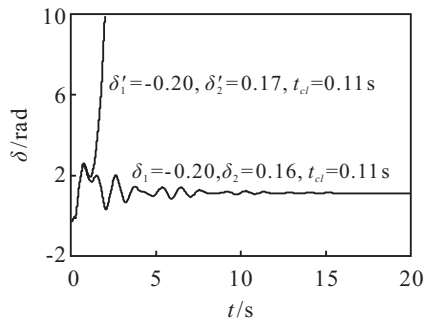


图4 目标函数为最小化燃料成本所得转角轨迹

以 t_{cl} 以及对 t_{cl} 进行小扰动后的 t'_{cl} 为初值所描述的 $\delta(t)$ 的运行轨迹如图5所示。其中 t_{cl} 是以(0.3, 0.5, 0.4, 0.3, 1.1, 0.99, 0.97, 0.8, 1.1, 0.9, 1, 0.03, 0.8)为初值时求解模型所得最优解。

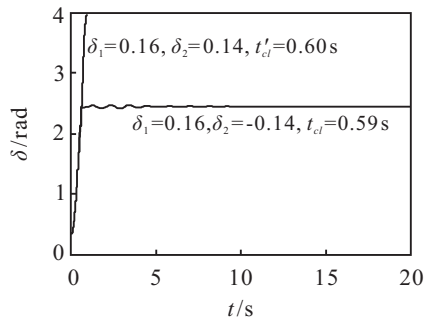


图5 目标函数为最大化故障切除时间所得转角轨迹

图4和图5分别表示以所求OPF-TSCC和CCT的解以及对解稍加改动后为初值时,系统受扰动的运行轨迹。由图可见,在系统受到扰动的情况下,用OPF-TSCC和CCT计算的初始运行点能使系统维持稳定;对计算所得结果稍加扰动后,系统便出现不稳定现象。因此,OPF-TSCC和CCT的计算结果既具有较好的经济性,又能保证系统稳定运行。

5 结论

本文建立了以事故切除时间为变量的暂态稳定约束最优潮流模型,并基于约束转换方法设计了求解该类模型的算法。该研究是OTS问题的发展,其方法既保持了约束转换技术求解OTS的优点,又由于增设了分析过程中的变量,理论上可得到更优的运行结果。进一步,该研究提出了临界切除时间的有效确定方法。此外,本文提出的基于双层优化的GSIP模型的算法,结合了以内层优化为界约束的特点,建立了无需用Lagrange乘子的KKT系统,减少了问题的维数。由于在将OPF-TSCC转换为GSIP的过程中应用了隐函数定理和微分方程的计算,在求解过程中均采用了近似方法,从而不可避免地会产生一定的误差,影响计算精度。如何保证OPF-TSCC计算的精度是有待进一步研究的问题。

参考文献(References)

- [1] Tong X J, Ling C, Qi L. A semi-infinite programming algorithm for solving optimal power flow with transient stability constraints[J]. J of Computational and Applied Mathematics, 2006, 217(2): 432-447.
- [2] 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, 29(25): 56-59.)
- [3] 童小娇, 何伟, 周任军, 等. 基于SIP算法的暂态稳定约束最优潮流计算[J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1383-1388. (Tong X J, He W, Zhou R J, et al. Calculation for optimal power flow with transient stability constraints based on SIP algorithm[J]. Control and Decision, 2008, 23(12): 1383-1388.)
- [4] Ju P, Handschin E, Karlsson D. Nonlinear dynamic load modelin: Model and parameter estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1689-1697.
- [5] 辛焕海, 甘德强, 邱家驹, 等. 一种包含不确定参数的暂态稳定分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 15-21. (Xin H H, Gan D Q, Qin J J, et al. A method for analyzing the impact of parameter uncertainties on transient stability[J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(20): 15-21.)
- [6] 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.
- [7] Chen L, Tada Y, Okamoto H, et al. Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 48(3): 327-339.
- [8] Tong X J, Wu S Y, Zhou R. New approach for the nonlinear programming with transient stability constraints arising from power systems[J]. Computational Optimization and Applications, 2010, 45(3): 495-520.
- [9] Still G. Generalized semi-infinite programming[J]. European J of Operational Research, 1999, 119(2): 301-313.
- [10] Stein O, Still G. Solving semi-infinite optimization programs with interior point techniques[J]. SIAM J on Control and Optimization, 2003, 24(3): 769-788.