

# 一种考虑暂态稳定约束的 可用输电能力计算的新方法

李国庆, 郑浩野

(东北电力学院, 吉林省 吉林市 132012)

## A NOVEL ALGORITHM FOR AVAILABLE TRANSFER CAPABILITY CONSIDERING TRANSIENT STABILITY CONSTRAINTS

LI Guo-qing, ZHENG Hao-ye

(Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, Jilin Province, China)

**ABSTRACT:** An algorithm for available transfer capability (ATC) with transient stability constraints calculation is proposed, in which a optimization problem including differential equations in functional space can be transformed to an static optimization problem in Euclidean space via constraint transcription techniques. The transformed optimization model is solved by a nonlinear complementarity method. This method is based on primal-dual interior method and employ a property function to handle the complementarity conditions, without requiring positive conditions be satisfied at every iteration. Numerical results illustrate the viability of the proposed model and method as applied to 7-bus and 36-bus systems.

**KEY WORDS:** Power system; Available transfer capability(ATC); Optimal power flow; Transient stability; Nonlinear complementarity method

**摘要:** 提出了一种考虑暂态稳定约束的可用输电能力计算的新方法。采用约束转换技术处理系统动态方程中的微分方程, 将函数空间的优化问题转换为 Euclidean 空间的优化问题, 并利用非线性互补方法求解。该方法以原-对偶内点法为基础, 通过引入一个特性函数来处理互补性条件, 克服了原对偶内点法在每次迭代中都必须保持正方向的缺点, 在效率上有很大的提高。该文以 7 节点系统和 36 节点系统的计算结果为例证实了该方法的有效性和合理性。

**关键词:** 电力系统; 可用输电能力; 最优潮流; 暂态稳定; 非线性互补方法

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (50177004); 吉林省杰出青年科学研究计划项目 (2001017); 吉林省科技发展计划项目 (20040522)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50177004).

## 1 引言

随着国家逐步放松对电力行业的管制, 以及电力市场在全国的大范围推广, 我国的电力行业出现了许多有待解决的新问题, 如何准确计算输电网络可用输电能力 (ATC, Available Transfer Capability) 就是问题之一。

ATC 不是一个新的概念, 在传统的计划经济体制下, ATC 是系统调度员调度时所参考的一个安全信息, 用以了解系统当前运行状态与各种约束间的距离。在电力市场这个新环境下, ATC 又被赋予了新的经济含义<sup>[1]</sup>, 旨在现有的输电合同基础上, 实际输电网络中剩余的、还可用于商业使用的传输容量, 这是所有电力市场参与者进行交易活动时都必须了解的重要信息。因此, ATC 除了作为安全信息, 又可以作为引导市场参与者进行电力交易、刺激商业竞争以充分利用现有资源的市场信息。所以, 准确计算 ATC 的值比以往任何时候都具有更重要的意义。

目前, 对 ATC 的计算大多集中在电力系统稳态领域内<sup>[2-4]</sup>。但是由于在 ATC 计算中没有考虑暂态稳定约束, 在其得出的运行方式下系统可能会遭遇暂态稳定问题<sup>[5]</sup>, 特别是在电力市场环境下, 如何把系统的安全性和经济性融为一体, 就显得更为重要。

基于优化潮流 (OPF, Optimal Power Flow) 计算 ATC 的方法可以方便地处理各种系统约束, 又可以对系统资源进行优化调度, 兼顾安全性和经济性, 因此该方法在考虑暂态稳定约束的 ATC 计算方

面得到了广泛的应用<sup>[6]</sup>。使用考虑暂态稳定约束的优化潮流方法 (OTS: OPF with transient stability constraints) 来计算 ATC, 实际上是求解一种包含微分和代数方程的函数空间的非线性优化问题。因为该问题包含微分方程且变量定义在函数空间, 所以求解难度很大。

针对这类复杂的优化问题, 近来人们提出了两种求解方法。一种方法是将系统的动态方程差分为等值的代数方程, 并将功角稳定约束离散化为对应时间序列上的不等式约束, 从而建立起 OTS 的静态优化模型, 因此可采用各种常规的优化方法来求解<sup>[7-8]</sup>。但由于该方法通过差分化将动态方程等值为代数方程, 因此会产生一定的误差, 而且在每次迭代过程中引入的大量中间变量, 会使求解问题的规模急剧增长, 导致计算困难; 另一种方法是使用约束转换技术处理附加的暂态稳定约束, 将函数空间的优化问题转化为 Euclidean 空间的优化问题<sup>[9-10]</sup>。转化后的优化问题中不包含微分方程和随时间变化的量, 且求解规模增加不大, 是一种很有效的方法。但由于该方法每迭代一步都要进行数值积分, 因此对所采用优化算法的有效性和收敛性都有很高的要求。

文[10]采用原-对偶内点法来求解转换后的优化问题取得了较好的效果, 但由于原-对偶内点法要求各变量从初值到求解过程的中间值都要保证  $(s_u, \hat{u}) > 0$  和  $(s_v, v) > 0$ , 即各变量在迭代过程中的每一步都要沿着保证该正方向的路径迭代, 这就限制了求解的范围, 影响了该算法的效率。

本文建立了一种基于 OTS 的计算 ATC 的优化模型, 使用约束转换技术处理模型中的暂态稳定约束, 并采用非线性互补法<sup>[11]</sup> (Nonlinear Complementarity Method) 处理转换后的优化问题。该方法不但继承了原-对偶内点法的多项式时间性和良好的收敛性等优点, 而且各变量不用再沿着保证正方向的路径迭代, 其取值是在  $R^n \times R^n$  空间上, 因此在效率上有了进一步的提高。以 7 节点和 36 节点的实验系统为例, 证实了本文所提方法的正确性和有效性。

## 2 考虑暂态稳定约束的 ATC 计算模型

### 2.1 OTS 在函数空间的优化模型

本文所建立的考虑暂态稳定约束的 ATC 计算模型就是在常规 OPF 中引入一组附加的暂态稳定性约束。

为了简化, 本文进行了一系列的规定和假设:

(1) 发电机模型采用多机电力系统的经典数学模型, 各发电机用  $x'_d$  后的恒定电势  $E'$  来模拟, 即

$$P_{ei} = E_i'^2 G_{ii}' + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_g} (E_i' E_j' B_{ij}' \sin(d_i - d_j) + E_i' E_j' G_{ij}' \cos(d_i - d_j)) \quad (1)$$

式中  $i \in S_G$ ,  $S_G$  为发电机节点集合;  $P_{ei}$  为发电机的电磁功率;  $Y_{ij}' = G_{ij}' + jB_{ij}'$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n_g$ ) 为发电机内电势节点的自导纳 ( $i = j$ ) 和互导纳 ( $i \neq j$ )。

(2) 仅考虑第一摇摆周期的暂态稳定性, 认为原动机输入的机械功率保持不变, 其数值由扰动前的稳态运行情况决定。

(3) 负荷采用恒定阻抗模型。

(4) 系统在到达鞍结分叉点造成电压失稳前, 至少有一个节点电压越界。

(5) 暂态稳定性约束采用功角稳定约束, 即以惯性中心为参考, 采用系统中任意一台发电机的转子角相对于惯性中心之间的角度差不超过某一极限作为判据, 可描述为

$$\bar{h}_i^m = \left| d_{ii}^m - \frac{\sum_{l=1}^{n_g} M_l d_{li}^m}{\sum_{l=1}^{n_g} M_l} \right| - d_{\max} \leq 0, i \in S_G, t \in S_T \quad (2)$$

因此 OTS 在函数空间的优化模型为如下的含有微分方程的非线性规划问题

$$\min f(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} G_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) = 0 \\ H_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{x}}^m(t) = F^m(\mathbf{x}^m(t), \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) \quad (5)$$

$$\bar{H}^m(\mathbf{x}^m(t)) \leq 0 \quad (6)$$

$$t \in (0, T], m \in N_c$$

其中, 式(3)为目标函数, 本文采用负的 ATC, 这样就等同于求最大的 ATC; 式(4)是为保证系统稳态运行所满足的约束。  $G_0(\cdot)$  为潮流方程;  $H_0(\cdot)$  为系统静态安全约束, 包括发电机容量约束, 负荷水平约束, 节点电压约束, 线路热容量约束; 式(5)为发电机转子运动方程; 式(6)为功角稳定约束;

$\mathbf{x}^m(t) = [(d_i^m)^T, (w_i^m)^T]^T$ ;  $\mathbf{x}_0 = (\delta^T, \omega^T)^T$  为  $\mathbf{x}^m(t)$  的初值,  $\mathbf{y}_0 = [P_g^T, Q_g^T, P_d^T, Q_d^T, E^T, V^T, \theta^T]^T$ 。

其中,  $P_g, Q_g, P_d, Q_d$  分别为发电机和负荷的有功和

无功出力;  $\mathbf{E}'$  为发电机暂态电势向量;  $\mathbf{V}$  为节点电压幅值向量;  $\mathbf{q}$  为节点电压相角向量。

本文采用约束转换技术将这个函数空间的复杂优化问题等值转化成了 Euclidean 空间的一般优化问题, 使得问题的求解难度大大的降低。

## 2.2 约束转换技术

所谓约束转化技术就是对系统运动方程进行数值积分, 将其等值转化为各个积分段上的量并将这些量包含在功角稳定约束中。功角稳定约束是指系统中各发电机的转子角相对惯性中心的偏移不超过某一阈值。因此在几何上可理解为  $d-t$  坐标系中, 摇摆曲线在研究时间范围  $[0, T]$  内的振荡不超过  $d=d_{\max}$ , 这可以通过使摇摆曲线超出  $d_{\max}$  的部分为 0 来实现, 如图 1 所示。在数学上可表示为: 式(2)的越限部分在对应时间段上的积分小于等于 0, 因为实际计算中存在误差, 因此令其小于等于一个很小的正数  $s$ , 即

$$I_i^m(\mathbf{x}^m(t)) = \int_0^T \max\{0, \bar{h}_i^m(\mathbf{x}^m(t))\} dt \leq s \quad (7)$$

$$m \in N_c, i \in N_g$$

由于可以对式(5)进行数值积分将其等值为各个时刻的  $\mathbf{x}^m(t)$ , 因此可以把式(5)中各个时刻的  $\mathbf{x}^m(t)$  记为以  $\mathbf{x}_0$  和  $\mathbf{y}_0$  为自变量的函数, 即

$$\mathbf{x}^m(t) = \mathbf{x}_t^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) \quad (8)$$

将式(8)带入式(7)中得

$$I_i^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) = \int_0^T \max\{0, \bar{h}_i^m(\mathbf{x}_t^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0))\} dt \leq s \quad (9)$$

$$m \in N_c, i \in N_g$$

即

$$H^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) = I_i^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) - s \leq 0 \quad (10)$$

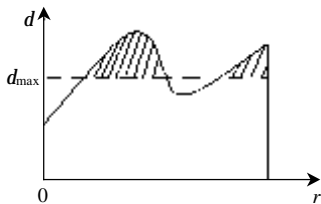


图1 暂态稳定约束的几何意义  
Fig.1 Geometrical meaning of transient stability constraints

简单的说约束转化技术就是对系统动态方程(5)进行数值积分, 使其变化为等价形式(8), 并隐含在式(9)中, 这样就将原约束中的微分方程化去, 且在优化过程中不引入随时间变化的量。

因此, 基于 OTS 的计算 ATC 的函数空间优化模型可等值变换为如下的 Euclidean 空间优化模型

$$\min f(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} G_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) = 0 \\ H_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$H^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) \leq 0 \quad (13)$$

转换后的模型可视为在常规的 OPF 问题中只增加了不等式约束(13), 问题规模增加不大, 可用常规的优化方法求解。

## 3 模型的求解方法

### 3.1 海森矩阵的计算

因为本文所使用的非线性互补方法是以原-对偶内点法为基础, 所以也需要目标函数和各约束的二阶偏导信息。因此, 与常规 OPF 相比, 求解式(13)的海森矩阵是求解转换后模型的一大难点。

由式(9)可得,  $\bar{h}_i^m(\mathbf{x}_t^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)) > 0$  时有

$$\frac{\partial I_i^m}{\partial p} = \int_0^T \frac{\partial \bar{h}_i^m(\mathbf{x}_t^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0))}{\partial p} dt \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 I_i^m}{\partial p \partial q} = \int_0^T \frac{\partial^2 \bar{h}_i^m(\mathbf{x}_t^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0))}{\partial p \partial q} dt \quad (15)$$

式中  $p$  和  $q$  可以任意代替  $\mathbf{x}$  或  $\mathbf{y}$  向量中的元素。

由多元复合函数的求导法则可得

$$\frac{\partial \bar{h}_i^m}{\partial p} = \frac{\partial \bar{h}_i^m}{\partial x_t} \cdot \frac{\partial x_t}{\partial p} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{h}_i^m}{\partial p \partial q} = \frac{\partial^2 \bar{h}_i^m}{\partial x_t^2} \cdot \frac{\partial x_t}{\partial p} \cdot \frac{\partial x_t}{\partial q} + \frac{\partial \bar{h}_i^m}{\partial x_t} \cdot \frac{\partial^2 x_t}{\partial p \partial q} \quad (17)$$

由于  $\bar{h}_i^m(\mathbf{x}_t^m(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0))$  是  $x_t$  的显函数, 所以求解式(13)的海森矩阵只需求出  $\partial x_t / \partial p$  和  $\partial^2 x_t / \partial p \partial q$  即可。式(5)两边对  $p$  求偏导得

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial x_t}{\partial p} = \frac{\partial F^m}{\partial x_t} \cdot \frac{\partial x_t}{\partial p} + \frac{\partial F^m}{\partial p} \quad (18)$$

由于  $F^m(x(t), \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)$  是  $x(t)$ 、 $\mathbf{x}_0$  和  $\mathbf{y}_0$  的显函数, 所以式(18)是以  $\partial x_t / \partial p$  为自变量的常微分方程。式(18)两边再对  $q$  求偏导得

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial^2 x_t}{\partial p \partial q} = \frac{\partial^2 F^m}{\partial x_t^2} \cdot \frac{\partial x_t}{\partial p} \cdot \frac{\partial x_t}{\partial q} + \frac{\partial F^m}{\partial x_t} \cdot \frac{\partial^2 x_t}{\partial p \partial q} + \frac{\partial^2 F^m}{\partial p \partial q} \quad (19)$$

式中的  $\frac{\partial x_t}{\partial p}$  可由式(18)求出, 所以式(19)是以  $\frac{\partial^2 x_t}{\partial p \partial q}$  为自变量的常微分方程。因此, 只需对式(18)、(19)进行数值积分即可求出所需的所有量。

### 3.2 非线性互补法

原-对偶内点法现在广泛地应用在大规模系统的优化问题中。该方法首先在优化模型中引入非负的松弛因子将不等式约束转化为等式约束，然后用拉格朗日法处理等式，用统一的障碍因子  $m$  (随迭代逐渐减小的正数) 处理各松弛因子，形成扩展的目标函数如下

$$L = f(x) - \mathbf{I}^T g(x) + \mathbf{v}^T (s_u + s_d - h_{\max} + h_{\min}) + \mathbf{u}^T (h(x) - h_{\max} + s_u) - m \left( \sum_i \ln s_{ui} + \sum_i \ln s_{di} \right) \quad (20)$$

式中  $s_u, s_d$  为松弛因子;  $x, s_u, s_d$  为原始变量;  $\mathbf{I}, \mathbf{u}, \mathbf{v}$  分别为对应的拉格朗日乘子, 称为对偶变量;  $g(x)$  为等式约束;  $h(x)$  为不等式约束。

对式(20)中的各变量求一阶偏导, 则可得式(20)的最优条件, 即 Kuhn - Tucker 条件

$$L_x = \nabla f(x) - \mathbf{J}^T(x)\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{B}^T(x)\mathbf{u} = 0 \quad (21)$$

$$L_l = -g(x) = 0 \quad (22)$$

$$L_u = h(x) - h_{\max} + s_u = 0 \quad (23)$$

$$L_v = s_u + s_d - h_{\max} + h_{\min} = 0 \quad (24)$$

$$L_{S_u} = S_u \hat{u} - m e = 0 \quad (25)$$

$$L_{S_d} = S_d v - m e = 0 \quad (26)$$

式中  $\hat{u}$  为  $u + v$ ,  $S_u, S_d$  分别为以  $s_u, s_d$  的元素为对角元构成的对角阵;  $\nabla f(x)$  为原目标函数的梯度向量;  $\mathbf{J}(x)$  为等式约束  $g(x)$  的雅可比矩阵;  $\mathbf{B}(x)$  为不等式约束  $h(x)$  的雅可比矩阵。

式(25)、(26)是定义  $m$  的互补性条件, 可等价于  $s_u > 0, \hat{u} > 0, s_u \hat{u} = m$  和  $s_d > 0, v > 0, s_d v = m$ 。其中  $(s_u, s_d) \geq 0, (\hat{u}, v) \geq 0$ , 就是所谓的正条件。

原-对偶内点法虽然不用从严格的内点开始, 但它的每个解在每次迭代中都必须满足正条件, 这就使得其迭代轨迹只能沿着满足正条件的方向迭代, 大大限制了其求解效率。

本文给出的非线性互补方法引入了一个新函数对互补性条件进行等值转换, 所以这里先对该函数作简单的介绍。引入的函数被定义为含有如下特性的任何函数

$$j_m(a, b) = 0 \Leftrightarrow a > 0, b > 0, ab = m > 0 \quad (27)$$

任何具有特性(27)的函数被称为 NCP (Nonlinear Complementarity Problem) 函数。近几年人们提出了几个 NCP 函数, 其中比较著名的是 Chen 和 Harker 在文[12]中提出的 NCP 函数

$$j_m(a, b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2 + 2m} \quad (28)$$

其中  $m$  和在原-对偶内点法中定义的障碍因子一样,

是一个逐渐减小至零的正数。

由于 NCP 函数(28)具有式(27)的特性, 因此可以用函数(28)等值的转换互补性条件(25)、(26), 这样正条件被该函数所自动满足而不用强加额外的限制, 所以其初值和随后的迭代轨迹就不再被正条件所约束, 其求解空间为  $R^n \times R^n$ 。

引入 NCP 函数(28)后的新 Kuhn - Tucker 条件为

$$\begin{cases} L_x = \nabla f(x) - \mathbf{J}^T(x)\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{B}^T(x)\mathbf{u} = 0 \\ L_l = -g(x) = 0 \\ L_u = h(x) - h_{\max} + s_u = 0 \\ L_v = s_u + s_d - h_{\max} + h_{\min} = 0 \\ L_{S_u} = s_u + \hat{u} - \sqrt{s_u^2 + \hat{u}^2 + 2m} = 0 \\ L_{S_d} = s_d + v - \sqrt{s_d^2 + v^2 + 2m} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

对其用牛顿法求解可以获得如下的修正方程:

$$(\nabla^2 f(x) - \sum_i I_i \nabla^2 g_i(x) + \sum_i u_i \nabla^2 h_i(x)) \Delta x -$$

$$\mathbf{J}^T(x) \Delta \mathbf{I} + \mathbf{B}^T(x) \Delta \mathbf{u} = -L_{x0} \quad (30)$$

$$-\mathbf{J}(x) \Delta x = -L_{l0} \quad (31)$$

$$\mathbf{B}(x) \Delta x + \Delta s_u = -L_{u0} \quad (32)$$

$$\Delta s_u + \Delta s_d = -L_{v0} \quad (33)$$

$$\mathbf{A}_1 \Delta s_u + \mathbf{A}_2 \Delta \hat{u} = -L_{S_u0} \quad (34)$$

$$\mathbf{A}_3 \Delta s_d + \mathbf{A}_4 \Delta v = -L_{S_d0} \quad (35)$$

其中  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4$  分别为以  $a_1, a_2, a_3, a_4$  的元素为对角元构成的对角阵。

$$a_1 = 1 - \frac{s_u}{\sqrt{s_u^2 + \hat{u}^2 + 2m}}, \quad a_2 = 1 - \frac{\hat{u}}{\sqrt{s_u^2 + \hat{u}^2 + 2m}},$$

$$a_3 = 1 - \frac{s_d}{\sqrt{s_d^2 + v^2 + 2m}}, \quad a_4 = 1 - \frac{v}{\sqrt{s_d^2 + v^2 + 2m}}$$

由以上各式可以推导出如下的降阶修正方程:

$$\begin{bmatrix} \hat{H}(\cdot) & -\mathbf{J}^T(x) \\ -\mathbf{J}(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{g} \\ g(x) \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\Delta s_u = -(\mathbf{B}(x) \Delta x + L_{u0}) \quad (37)$$

$$\Delta s_d = -(L_{v0} + \Delta s_u) \quad (38)$$

$$\Delta v = -[a_4^{-1}](a_3 \Delta s_d + L_{S_d0}) \quad (39)$$

$$\Delta u = -[a_2^{-1}](a_1 \Delta s_u + L_{S_u0}) - \Delta v \quad (40)$$

其中

$$\hat{H}(\cdot) = \nabla^2 f(x) - \sum_i I_i \nabla^2 g_i(x) + \sum_i u_i \nabla^2 h_i(x) +$$

$$\mathbf{B}^T(x) (\mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_4^{-1} \mathbf{A}_3) \mathbf{B}(x) \quad (41)$$

$$\hat{g} = -L_{x0} - B^T(x)[A_2^{-1}(A_1 L_{u0} - L_{s,u0}) + A_4^{-1}(A_3(L_{u0} - L_{v0}) + L_{s,v0})] \quad (42)$$

至于本算法的其它部分，如障碍因子、对偶间隙以及迭代步长的设定与原-对偶内点法相同可见文[13]。

### 4 算例和结果分析

本文引用了文[8]中的7节点和36节点系统进行了ATC计算，并且通过和文[8]所提的差分原-对偶内点法（方法1）的计算结果进行比较，验证了本文所提方法（方法2）的正确性和有效性。

因为第一摇摆周期一般是1~2s，所以本文研究区间取为2s；积分步长取为0.02s；容许误差 $\epsilon$ 取为0.0001；上、下限值 $d_{max}$ 和 $d_{min}$ 分别取为+100°和-100°。

#### (1) 7节点系统

该系统包括3台发电机，7条线路，2个负荷，划分为两个区域，如图2所示。

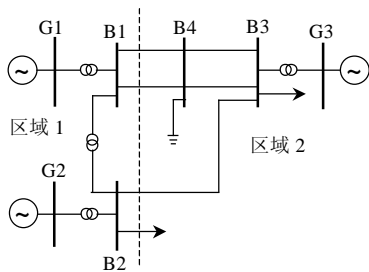


图2 7节点系统图  
Fig.2 Power system of 7-bus

假设在线路B4-B3靠近节点B4侧，系统发生三相短路故障，0.1s切除。这里根据考虑暂稳和不考虑暂稳两种情况分别计算从区域1到区域2的ATC，并将计算结果和方法1进行比较，如表1。

表1 两种计算方法的计算结果与比较  
Tab.1 The calculation results of two methods

优化方法	基况潮流	可用输电能力/MW	
		不考虑暂稳	考虑暂稳
方法1	498	507	450
方法2		527	465

该表不但显示出本文所使用方法的正确性，同时可以看出考虑暂态稳定约束后，ATC下降了约12%，所以在ATC计算中如果不考虑暂态稳定性约束很可能会高估ATC的值，使系统处于暂态不稳定。

#### (2) 36节点系统

该系统包括8台发电机，42条线路，9个负荷，

划分为3个区域，如图3所示。

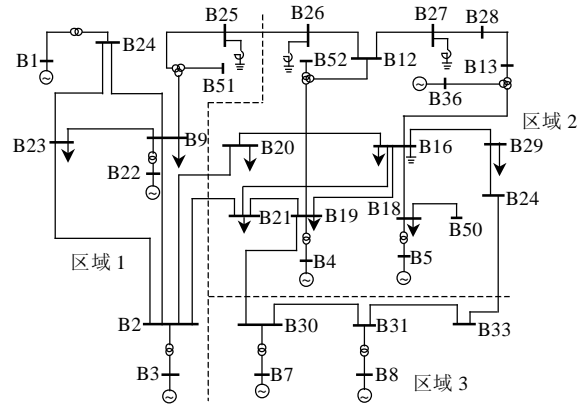


图3 36节点系统图  
Fig.3 Power system of 36-bus

假设在线路22-23靠近节点23侧系统发生三相短路故障，0.1s切除。计算表明，不考虑暂态稳定的情况ATC为126MW，考虑暂态稳定的情况ATC为96MW，说明了与表1相同的道理。

无论是方法1还是方法2，对偶间隙的大小都是判断解的最优性和算法的收敛性的重要指标。图4为方法1和方法2的对偶间隙随迭代次数的变化关系曲线。从图中可以看出两种方法的对偶间隙下降都很快，但方法2明显比方法1下降得更快。由此可以看出虽然两种方法都很适合求解考虑暂态稳定约束的ATC问题，但方法2的求解效率更高。

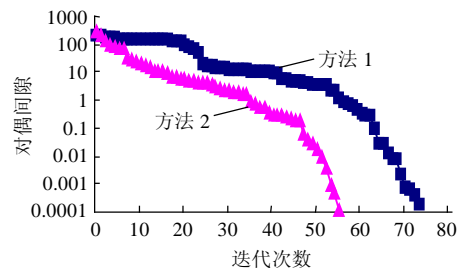


图4 对偶间隙随迭代次数的变化  
Fig.4 Dual gap with iterations

### 5 结论

本文提出了一种考虑暂态稳定约束的ATC计算的新方法。该方法以OPF为基础，将暂态稳定约束经过约束转换技术转换后直接加入优化模型中。转换后的优化模型各变量定义在Euclidean空间，不含有微分方程，因此是一种静态优化问题。同时，以原一对偶内点法为基础，提出了求解效率更高的非线性互补法。该方法通过引入NCP函数对互补性条件进行等值转换，使得其初值和随后的迭代可以在 $R^n \times R^n$ 空间内任意求解，算法效率得到进一步

的提高。最后，以 7 节点和 36 节点系统的计算结果为例说明了该方法的有效性和合理性。

## 参考文献

- [1] North American Electric Reliability Council. Available transfer capability definitions and determination : a reference document prepared by TTC task force[R]. New Jersey, 1996.
- [2] 李国庆, 王成山, 余贻鑫. 大型互联电力系统区域间功率交换能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 21-25.  
Li Guoqing, Wang Chengshan, Yu Yixin. A survey on transmission transfer capability of interconnected electric power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 21-25.
- [3] 默哈莫德·夏班, 刘皓明, 李卫星, 等. 静态安全约束下基于 Benders 分解算法的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 7-11.  
Shaaban M, Liu Haoming, Li Weixing *et al.* ATC Calculation with steady-state security constraints using benders decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 7-11.
- [4] Ejebe G C, Tong J, Waight J G *et al.* Available transfer capability calculation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(4): 1521-1527.
- [5] Bettiol A L, Wehenkel L, Pavella M. Transient stability-constrained maximum allowable transfer[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(2): 654-659.
- [6] 袁贵川, 王建全, 韩祯祥. 电力市场下的最优潮流[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 13-17.  
Yuan Guichuan, Wang Jianquan, Han Zhenxiang. Optimal power flow under electricity market[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 13-17.
- [7] Gan Deqiang, Robert J T, Zimmerman R D. Stability constrained optimal power flow[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(2): 535-540.
- [8] 李国庆, 沈杰, 申艳杰. 考虑暂态稳定约束的可用功率交换能力计算的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 67-71.  
Li Guoqing, Shen Jie, Shen Yanjie. Study on calculation of available transfer capability considering transient stability constraints [J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 67-71.
- [9] 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, 2001, 48(3): 327-339.
- [10] 刘明波, 夏岩, 吴捷. 计及暂态稳定约束的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 28-33.  
Liu mingbo, Xia Yan, Wu Jie. Calculation of available transfer capability with transient stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 28-33.
- [11] Torres G L, Quintana V H. Optimal power flow by a nonlinear complementarity method[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(3): 1028-1033.
- [12] Chen B, Harker P T. A noninterior-point continuation method for linear complementarity problems[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 1993, 14(10): 1168-1190.
- [13] 李彩华, 郭志忠, 樊爱军. 原-对偶内点法最优潮流在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(8): 4-7.  
Li Caihua, Guo Zhizhong, Fan Aijun. Application of primal-dual interior point method of optimal power flow to power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8): 4-7.

收稿日期: 2005-02-10。

作者简介:

李国庆 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统的安全性及稳定性分析, 供(配)电系统自动化;

郑浩野 (1978), 男, 硕士, 主要从事电力系统安全性分析方面的研究与开发工作。