

考虑暂态稳定约束的可用输电能力的计算

汪天安, 蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350002)

摘要: 基于传统的最优潮流模型及多机电力系统的经典数学模型, 利用隐式梯形积分法, 将电力系统中所有发电机转子摇摆方程差分化为等式约束、发电机转子相对摇摆角稳定极限作为不等式约束, 将其作为暂态稳定条件加入最优潮流的等式约束和不等式约束方程中, 提出了一种考虑暂态稳定约束的可用输电能力计算的计算方法, 用原始-对偶内点法求解该模型, 并通过引入一个非线性互补函数改进原对偶内点法中的互补松弛变量在每次迭代中都必须保持正向的缺点, 使优化问题的求解效率得到提高。14 节点系统计算为例说明了该方法的有效性。

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

Calculation of available transfer capability with transient stability constraints

WANG Tian-an, CAI Jin-ding

(College of Electrical Engineering and Automatization, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Based on the general OPF model and multi-machine power system classical mathematic model, by using the implicit trapezoidal rule, all swing equations will be converted into numerical equivalent algebraic equations set which involved in equality constraints set, and all rotors' angles related to COI are used to be inequality constraints. According to the above, a new OPF module is proposed to calculate the available transfer capability with transient stability constraints. Using primal-dual interior point method to analyze the model, a nonlinear complementary function is proposed to overcome the disadvantages which in each iterations, the primal-dual interior method's complementarity relaxations must keep positive direction. Calculation result of 14-bus power system proves the methods effectiveness.

Key words: power system; available transfer capability; optimal power flow; transient stability; nonlinear complementary function

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)01-0068-04

0 引言

随着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就是其中之一。

ATC(Available Transfer Capability)不是一个新的概念, 北美电力可靠性委员会对ATC的定义是: 在已有的协议基础上实际的输电网络中可用于进行进一步商业活动的额外输电能力^[1]。

ATC的计算目前用得较多的是基于最优潮流的计算方法^[2], 且对ATC的计算大多集中在电力系统稳态领域内^[3~4], 关于考虑暂态稳定约束的ATC的研究还是在初级阶段, 文献[5]应用Lyapunov直接法构成Lyapunov函数, 并通过求解系统近视不稳定平衡点

快速计算系统稳定域的算法, 推导出暂态稳定约束方程。文献[6]将常微分方程差分化为一系列代数方程, 并将暂态稳定约束离散化为对应时间序列上的不等式约束, 使得该优化问题可以用常规优化方法求解, 但由于引入大量对应的中间变量以及相应的等式和不等式, 求解问题的规模急剧增长。

1 考虑暂态稳定约束的 ATC 计算模型

本文采用多机电力系统的经典数学模型, 即做如下假设条件:

1) 各发电机用 X_d' 后的电势 E' 来模拟。

2) 仅考虑第一摇摆周期的暂态稳定性, 认为原动机输入机械转矩为恒定。

3) 负荷采用恒定阻抗模型。

则发电机转子运行方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ M_i \dot{\omega}_i = \omega_0 (P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_i) \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_g} [C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} (\cos(\delta_i - \delta_j))]$$

$$C_{ij} = C_{ji} = E_i E_j B'_{ij}, D_{ij} = D_{ji} = E_i E_j G'_{ij}$$

且 $i, j=1, 2, \dots, n_g$; n_g 为发电机总数; ω_i 发电机 i 角速度; D_i 为发电机 i 阻尼系数; P_{mi} 为发电机 i 的机械功率输入; P_{ei} 为发电机 i 的电磁功率输出; ω_0 为同步转速; $Y'_{ij} = G'_{ij} + jB'_{ij}$ 为只含有发电机内节点的简化导纳矩阵中的元素。

基于最优潮流的考虑暂态稳定约束时的ATC的数学模型可以表示为:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & g(x) = 0 \\ \text{s. t.} & h_{\min} \leq h(x) \leq h_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: x 为系统的状态变量和控制变量及对应暂态稳定分析的变量组成的向量; $f(x)$ 为目标函数; $g(x)$ 为等式约束; $h(x)$ 为不等式约束; h_{\min} 、 h_{\max} 分别为不等式约束的上、下限。

文中目标函数表示为: 从送电区域到受电区域通过联络线传送的有功功率最大化。

等式约束包括系统的潮流方程, 发电机转子运动约束, 对于发电机转子约束运行方程, 这里采用隐式梯形积分法将转子运动方程差分化得:

$$\begin{cases} \delta_i^t - \delta_i^{t-1} - \frac{\Delta t}{2} [(\omega_i^t - \omega_0) + (\omega_i^{t-1} - \omega_0)] = 0 \\ \omega_i^t - \omega_i^{t-1} - \frac{\Delta t}{2 M_i} \omega_0 [(-D_i \omega_i^t + P_{mi} - P_{ei}^t) + (P_{mi} - P_{ei}^{t-1} - D_i \omega_i^{t-1})] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_G 为发电机集合; S_T 为积分时刻集合; Δt 为积分步长。

发电机初值方程, 用稳态运行时发电机状态作为发电机的状态变量初值^[7]:

$$\begin{cases} E_i V_{gi} \sin(\delta_i^0 - \theta_{Gi}) - x_{di} P_{gi} = 0 \\ V_{gi}^2 - E_i V_{gi} \cos(\delta_i^0 - \theta_{Gi}) + x_{di} Q_{gi} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

不等式约束反映了限制TTC的系统物理和电气特性, 包括:

1) 运行约束

分别为有功电源和无功电源出力的约束; 节点电压模值和线路功率约束, 详见[7]。

2) 暂态稳定约束

取系统的惯性中心COI作为参考, 当 M_i 为发电机的转动惯量时, COI的角度定义为^[8]:

$$\begin{cases} \delta_{COI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{n_g} M_i \delta_i \\ M_T = \sum_{i=1}^{n_g} M_i \end{cases} \quad (5)$$

为保证系统在受到扰动后保持暂态稳定, 以惯性中心作为参考, 则系统中每台发电机与惯性中心之间的转子角度差应在某一范围内, 可描述为:

$$\begin{cases} \underline{\delta} \leq \delta_i^0 - \delta_{COI}^0 \leq \bar{\delta} \\ \underline{\delta} \leq \delta_i^t - \delta_{COI}^t \leq \bar{\delta} \end{cases} \quad i \in S_G, t \in S_T \quad (6)$$

2 原始-对偶内点算法

1984年Karmarkar提出的具有多项式时间可解性的线性规划内点算法。随后其无论在理论上还是在实践上都取得了大量的研究成果^[9~11]。典型的非线性规划问题的数学模型为:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t.} & h(x) = 0 \\ & \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{cases} \quad (7)$$

对上面的模型 $x \in R^n$, $h(x)$ 为等式约束, $g(x)$ 为不等式约束。 $h(x) = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]^T$, $g(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)]^T$ 。

首先引入松弛向量 $(l, u) \in R^r$, 则式(7)转化为:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ h(x) = 0 \\ g(x) - \underline{g} - l = 0 \\ g(x) - \bar{g} + u = 0 \\ (l, u) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

定义(8)的拉格朗日函数为:

$$L(x, l, u, y, z, w, \tilde{z}, \tilde{w}) = f(x) - y^T h(x) - z^T (g(x) - \underline{g} - l) - w^T (g(x) - \bar{g} + u) - \tilde{z}^T l - \tilde{w}^T u \quad (9)$$

式中: $y \in R^m$ 和 $(z, \tilde{z}, w, \tilde{w}) \in R^r$ 为拉格朗日乘子; 且存在关系 $\tilde{z} = z$, $\tilde{w} = -w$ 。对式(9)中和各变量求一阶偏导, 则可得其最优条件, 即基于KKT的一阶最优条件^[12], 得到:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_x = \frac{\partial L}{\partial x} = \nabla f(x) - \nabla h(x)y - \nabla g(x)(z+w) = 0 \\ L_y = \frac{\partial L}{\partial y} = h(x) = 0 \\ L_z = \frac{\partial L}{\partial z} = g(x) - \underline{g} - l = 0 \\ L_w = \frac{\partial L}{\partial w} = g(x) - \bar{g} + u = 0 \\ L_l = LZ e - \mu e = 0 \\ L_u = UW e - \mu e = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

式中: L_l , L_u 为补充条件; μ 为扰动因子; e 为单位列相量; $w \leq 0, y \neq 0, l \geq 0, z \geq 0$; L, U, Z, W 是分别以 l, u, z, w 元素为对角元的对角阵。

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。采用的非线性互补函数是Minimum函数^[13]:

$$\varphi(a, b) = \min\{a, b\} \Leftrightarrow a \geq 0, b \geq 0, ab = 0$$

除(0,0)点外, $\varphi(a, b)$ 在其它点都是光滑可微的, 加入扰动因子 μ , 得到非线性互补函数为:

$$a \geq 0, b \geq 0, ab = \mu \Leftrightarrow \varphi(a, b) = a + b - \sqrt{(a-b)^2 + 4\mu} = 0 \quad (11)$$

任何具有特性(11)的函数被称为NCP(Nonlinear Complementarity Problem)函数, 其中 μ 和在原-对偶内点法中定义障碍因子一样, 是一个逐渐减小至零的正数, 据NCP函数的特性可用其等值的转换(10)的互补条件, 这样正条件就被该函数自动满足而不用强加额外的限制, 提高了计算速度。

引入NCP函数后的式(10)变为:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_x = \frac{\partial L}{\partial x} = \nabla f(x) - \nabla h(x)y - \nabla g(x)(z+w) = 0 \\ L_y = \frac{\partial L}{\partial y} = h(x) = 0 \\ L_z = \frac{\partial L}{\partial z} = g(x) - \underline{g} - l = 0 \\ L_w = \frac{\partial L}{\partial w} = g(x) - \bar{g} + u = 0 \\ L_l = l_i + z_i - \sqrt{(l_i - z_i)^2 + 4\mu} = 0 \\ L_u = u_i + w_i - \sqrt{(u_i - w_i)^2 + 4\mu} = 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

对(12)用牛顿法求解可得如下修正方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 h(x)y + \nabla^2 g(x)(z+w) - \nabla^2 f(x)\Delta x + \nabla h(x)\Delta y + \nabla g(x)(\Delta z + \Delta w) = L_{x0} \\ \nabla h(x)^T \Delta x = -L_{y0} \\ \nabla g(x)^T \Delta x - \Delta l = -L_{z0} \\ \nabla g(x)^T \Delta x + \Delta u = -L_{w0} \\ A\Delta l + B\Delta z = -L_{l0} \\ C\Delta u + D\Delta w = -L_{u0} \end{array} \right. \quad (13)$$

其中: A, B, C, D 分别是以 a, b, c, d 元素为对角元构成的对角阵:

$$a = 1 - \frac{l-z}{\sqrt{(l-z)^2 + 4\mu}} \quad b = 1 - \frac{z-l}{\sqrt{(l-z)^2 + 4\mu}} \\ c = 1 - \frac{u-w}{\sqrt{(u-w)^2 + 4\mu}} \quad d = 1 - \frac{w-u}{\sqrt{(u-w)^2 + 4\mu}} \quad (14)$$

限于篇幅, 用原-对偶内点法求解最优问题算法的实现请参阅文献[15]。

3 仿真研究

为验证本文模型及所用方法的正确性和有效性, 本文对14节点系统进行ATC计算, 如下图所示, 该系统含14个母线, 5个发电机, 11个负载和20条支路。将14节点系统划分为区域一和区域二, 用Matlab进行仿真编程。考虑发电机故障后第一摇摆周期, 可取 $T=1$ s, 对于隐式梯形积分法求解微分方程, 积分步长取0.01 s可保证运算精度^[14], 暂态稳定极限功角一般取值范围为 $\pm 120^\circ$, 基准功率取100 MVA。

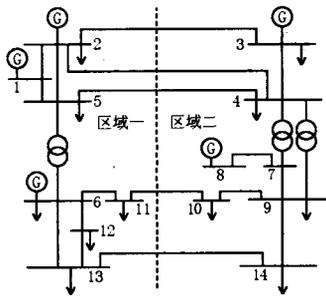


图1 14节点系统图

Fig.1 14-bus power system

假设系统发生三相短路故障, 0.1 s切除(系统故障发生在线路6-11靠近11端), 这里根据考虑暂态稳定和不考虑暂态稳定两种情况分别计算从区域一到区域二的ATC, 应用文献[15]提出的原-对偶内点法计算区域间的ATC(方法1)和本论文提出的算法(方法2)计算区域间的ATC, 结果见表1, 对偶间隙随迭代次数的变化如图2。

表1 ATC计算结果

Tab.1 Results of ATC

优化方法	基态潮流 (MW)	输电能力/MW		迭代次数
		不考虑暂态稳定	考虑暂态稳定	
方法1	69.97	72.13	64.92	31
方法2		75.28	67.76	22

从表1分析可见, 无论对方法1还是方法2, 当考虑暂态稳定约束时得到的区域一和区域二的交换功率比不考虑暂态稳定约束时偏小, 这说明, 暂态稳定约束是限制区域间功率交换能力的重要因素。也即忽略暂态稳定约束求得的区域间的功率交换值有时会给系统带不安全的因素。由表1可知, 方法1和方法2得到的计算的结果相当, 但方法2的迭代次数比方法1的迭代次数有所减小。

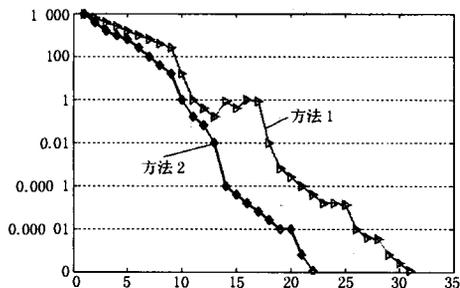


图2 两种方法的对偶间隙随迭代次数的变化

Fig.2 Dual gaps with iterations of two methods

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。从图2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适合计算考虑暂态稳定的ATC的问题, 但方法2的求解效率更好。

值得说明的是, 区域间的可用输电能力必须是考虑基于 $N-1$ 事故预选的, 选择事故最严重时的值作为其可用输电能力的值, 限于篇幅, 本文不做深入讨论。

4 结论

本文通过利用隐式梯形积分法将发电机转子运动方程转化为等式约束, 将暂态稳定约束转化为适合常规最优潮流问题求解的约束形式, 提出了一种基于最优潮流(OPF)考虑暂态稳定约束的可用输电能力的计算方法, 通过将非线性互补函数引入到现代内点法中, 使算法可以从任意点出发, 而不必保持互补松弛变量为正值, 14节点系统的计算结果为例说明该方法的合理性。

参考文献

- [1] Transmission Transfer Capability Task Force. Available Transmission Capability Definitions and Determination [A]. In: North American Electric Reliability Council (NERC)[C]. Princeton(NJ): 1996.
- [2] 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 Gui-chuan, WANG Jian-quan, HAN Zhen-xiang. Optimal Power Flow Under Electricity Market[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 67-71.
- [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 Hao-ming, LI Wei-xing, et al. ATC Calculation with Static 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] 刘肇旭, 童建中. 暂态稳定约束的电网供电能力的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 1987, 7(3): 57-63.
LIU Zhao-xu, TONG Jian-zhong. Calculation of Load Supplying Capability Restrained by Transient Stability in Electric Power Networks[J]. Proceedings of CSEE, 1987, 7(3): 18-23.
- [6] STuglie E D, Dicorato M, Scala M L, et al. Static Optimization Approach to Assess Dynamic Vailable Transfer Capability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1069-1076.
- [7] 袁越, 久保川淳司, 佐佐木博司. 考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 34-39.

本文利用进化博弈理论分别分析在电力供给紧张和充裕时,采用按报价结算和按市场出清价统一结算这两种竞价规则对发电商得益矩阵的影响,得出在供给紧张时应采用按出清价统一结算,在供给充裕时,按报价个别结算有利于稳定电价,促进电力市场稳定均衡发展。

参考文献

- [1] 王锡凡.有关当前我国电力市场若干问题的讨论[J].中国电力,2001,34(10):70-73.
WANG Xi-fan.Power Market and Power Industry Restructuring[J].Electric Power,2001,34(10):70-73.
- [2] 石铁,李春杰,赵会茹.发电商竞价策略行为的进化博弈分析[J].华北电力大学学报,2004,34(4):76-79.
SHI Tie,LI Chun-jie,ZHAO Hui-ru.Evolutionary Game Analysis of Generator's Price Strategies in Bids[J].Journal of North China Electric Power University,2004,34(4):76-79.
- [3] 谢识予.经济博弈论[M].上海:复旦大学出版社,2002.260-273.

XIE Shi-yu.Economic Game Theory[M].Shanghai:Fudan University Press,2002.260-273.

- [4] 谢识予.有限理性条件下的进化博弈理论[J].上海财经大学学报,2001,(10):3-9.
XIE Shi-yu.Evolutionary Game Theory in Condition of Bounded Rationality[J].Journal of Shanghai University of Finance and Economics,2001,(10):3-9.
- [5] Wen F S,David A K.Optimal Bidding Strategies and Modeling of Imperfect Information Among Competitive Generators[J].IEEE Trans on Power Systems,2001,16(1):15-21.

收稿日期:2006-07-10; 修回日期:2006-11-14

作者简介:

丁乐群(1947-),男,博士,教授,研究领域为能源与电力技术经济及管理;

常冬玲(1979-),女,硕士研究生,主要研究领域为电力市场分析;E-mail:changdongling@gmail.com

涂进(1981-),男,硕士研究生,主要研究领域为电力系统稳定与控制及电力市场分析。

(上接第71页 continued from page 71)

- YUAN Yue, Kubokawa J, Sasaki H. Available Transfer Capability Determination Considering Transient Stability Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 34-39.
- [8] Athay T, Podmore R, Virmani S. A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability[J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1979, 98(2): 573-584.
- [9] Wei H, Sasaki H, Kubokawa J, et al. An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with a Novel Data Structure[J]. IEEE Trans on PWRs, 1998, 13(2): 870-877.
- [10] Athay T, Podmore R, Virmani S. A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability[J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1979, 98(2): 573-584.
- [11] 刘明波, 王晓村. 内点法在求解电力系统优化问题中的应用综述[J]. 电网技术, 1999, 23(8): 61-64, 68.
LIN Ming-bo, WANG Xiao-cun. An Application of Interior Point Method to Solution of Optimization Problems in Power System[J]. Power System Technology, 1999, 23(8): 61-64, 68.
- [12] EL-Bakry A S, Tapia R A, Tsuchiya T, et al. on the Formulation and Theory of the Newton Interior-point Method for Nonlinear Programming[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1996, 89(3):

507-541.

- [13] Chen B, Chen B, Kanzow C. A Penalized Fischer-Burmeister NCP-function: Theoretical Investigation and Numerical Results[J]. Mathematical Programming, 2000, 88: 211-216.
- [14] YUAN Yue, Kubokawa J, Sasaki H, A Study of Transient Stability Analysis Using Optimization Method[A]. In: Proceedings of International Conference on Electrical Engineering[C]. Xi'an: 2001. 338-342.
- [15] 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 Guo-qing, SHEN Jie, SHEN Yan-jie. Study on Calculation of Available Transfer Capability Considering Transient Stability Constraints[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 67-71.

收稿日期:2006-06-30; 修回日期:2006-09-18

作者简介:

汪天安(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行与安全;E-mail:watianan@sohu.com

蔡金锭(1954-),男,博士、教授、博士生导师,从事人工智能技术在电力系统中的应用。

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告