

暂态稳定约束的可用输电能力计算

匡文凯¹, 张红艳², 吴政球¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 岳阳电业局, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 提出了一种基于暂态约束的最大可用传输容量的发电计划调整方法, 利用单机等面积定则原理 (SGEAC) 对预想事故快速扫描, 找出严重故障, 并计算出临界机组的功率转移量的估计值, 进而提出发电计划调整策略。该方法既具有时域仿真方法的精确性与良好的适应性, 又能获得单机稳定裕度。与其他能量函数相比, 该方法不必进行失稳模式的判别, 避免了穷尽式搜索, 能够适应多重故障、多摆失稳场景和不同的失稳模式。同时, 该算法对所有严重故障集同时处理, 满足了实时预防控制的要求。通过对不同失步模式的实例分析验证了所提方法的有效性。

关键词: 单机等面积定则; 可用输电容量; 暂态稳定约束的可用输电能力; 暂态稳定评价; 发电计划调整

Calculation of available transfer capability with transient stability constraints

KUANG Wen-kai¹, ZHANG Hong-yan², WU Zheng-qiu¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Yueyang Electric Power Bureau, Yueyang 414000, China)

Abstract: A method is proposed for allocating generation so as to maximize available transfer capability between areas of interconnected systems under transient stability constraints. It consists of screening a large number of contingencies, scrutinizing the dangerous ones, calculating the shifting active power generation of critical generators and suggesting generation rescheduling patterns to stabilize them by SGEAC (Single Generator Equal Area Criterion). The method is as accurate and adaptable as the time domain simulation method, and can obtain stability margin of single machine energy. Compared with other energy functions, it is not necessary to identify the instability modes, and can be applied in multiple contingencies, multi-swing instability scenarios and different instability modes. It avoids exhaustive search. In addition, by controlling all dangerous contingencies simultaneously, the method succeeds in being fully compatible with requirements for real-time preventive monitoring and control. Lots of example analysis with different losing synchronism modes verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: single equivalent machine equal area criterion (SGEAC); available transfer capability (ATC); transient stability assessment (TSA); generation power allocation

中图分类号: TM731 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0037-06

0 引言

电力系统输电能力对于整个系统的安全可靠性有着很大的影响。在电力市场环境下, 系统运行不确定性增大, 电能交易瞬息万变, 支路过负荷、节点电压越限等故障更有可能发生。这就提出了如何计算输电网输电能力的问题, 在这方面已取得了卓越的成就, 但基于暂态稳定约束的输电网输电能力问题具有极大的挑战性, 牵涉到大量预想事故的扫描、对严重故障的辨识及采取的稳态措施。时域仿真法显然不适合这一任务, 该方法不但费时, 而且不能给出定量性的稳定指标, 更不能给出控制策

略。

北美电力可靠性委员会 (NERC) 给出了ATC的定义^[1]: ATC是指在现有输电合同的基础之上, 实际输电网络中剩余的、还可用于商业使用的传输容量。对ATC的研究可分为基于概率性模型的算法^[2-3]和基于确定性模型的算法两类^[4-12]。目前, 确定性模型算法有线性规划法^[4-5]、连续潮流法 (CPF)^[6-7]、最优潮流法 (OPF)^[8-10]、分布因子法^[11-12]。线性规划法^[4-5]使用直流潮流模型, 可以考虑各种安全约束, 算法简单, 但随着系统规模的增大, 计算时间急剧增加, 不适用大系统; 连续潮流法^[6-7]可以跟踪潮流解的轨迹, 克服了牛顿法求解潮流中可能引起的不

收敛问题, 可以考虑系统非线性和电压无功特性, 但计算过程使用迭代, 计算速度也相当慢; 最优潮流法^[8-10]克服了连续潮流结果较保守的缺点, 有较好的精度, 但耗时较长, 还存在收敛性问题, 在大规模系统中应用较少; 分布因子法^[11-12]以直流潮流为基础, 忽略线路电阻和系统无功-电压问题, 算法简单, 计算速度快, 目前应用较为广泛, 文献[11]分别利用分布因子法与CPF法对两个大规模的电力网络进行ATC计算, 得出: 基于分布因子的ATC计算比基于CPF法精度稍差, 工程上是可以接受的, 但计算速度是CPF的25倍。目前关于ATC计算的研究很少考虑暂态稳定约束, 系统以这种运行方式可能会遇到暂态稳定性问题。即使考虑暂态约束, 其中多数是将暂态稳定约束条件建立在时域仿真法的功角约束上, 但总体运算时间较长, 况且无法给出控制策略信息。由于大规模电力系统属于非线性动态系统, 其暂态约束条件是随时间动态变化的, 因此极大地增加了求解问题的复杂性, 特别是包含安全稳定约束的雅可比矩阵的求解既耗时间, 计算量又大。为了提高计算效率, 文献[13]采用约束转化技术和伴随矩阵将函数空间的动态调度问题转化为静态优化问题, 将带有经验值的功角限值作为暂态约束, 但仍然没有改变时域仿真法固有的缺点。

由于判断系统暂态稳定性和处理暂态稳定约束条件在求解暂态稳定约束的最优潮流问题的计算中占有相当大的比例, 而且发电机的有功出力是影响系统暂态稳定性的最主要因素, 从能量角度看, 系统的分离不依赖于全系统的能量, 而是依赖于从系统其他部分分离出来的临界机组的暂态能量^[14-15]。而且以往对ATC计算时, 发电机的约束处理往往是以最大出力来考虑的, 考虑暂态稳定性问题时, 发电机的出力往往并非最大出力, 从单机等面积法可以看出, 发电机的出力直接影响到发电机的稳定裕度。本文利用单机等面积定则(SGEAC)来计算考虑暂态稳定约束的可用输电能力。利用SGEAC法对故障集进行扫描, 提前滤除不失稳故障, 找出最严重的故障及其临界机组, 然后根据能量裕度与发电机有功出力变化量的线性关系调整各发电机的有功出力, 对稳定机组计算出可调整量并以此为发电机的功率约束。最后, 重新进行潮流计算和暂态稳定性分析, 重复该过程直到所有的预想故障均不失稳。该算法可以适应失稳模式的变化, 避免了穷尽式搜索, 能够适应多重故障和多摆失稳场景。

1 暂态约束的 ATC 数学模型

根据电力市场下有关电力交易的定义^[1], 考虑

沿某一特定方向(电力市场环境下由交易双方决定)增加传输功率的ATC问题, 设传输功率的增量向量 \mathbf{d} (包含有功增量向量 \mathbf{d}_p 和无功增量向量 \mathbf{d}_q) 给定, 则ATC问题可以理解为: 在满足潮流方程和系统安全运行约束的条件下计算最大的 α 值, 以使实际最大的传输容量增量为 $\alpha \mathbf{d}$ ^[16]。其中安全运行约束包括母线电压、线路电流和发电机无功容量的限制。本文采用基于直流潮流的分布因子对式(1)求解。直流潮流假设节点电压幅值为常数, 计及支路电抗而忽略支路电阻, 因而不存在线损。直流潮流模型是线性的, 不需要迭代, 因而计算速度快, 目前在电力系统各个领域中得到广泛的应用。考虑暂态稳定约束的直流潮流模型下的ATC计算模型为:

$$F(\mathbf{x}, \alpha) = \begin{bmatrix} F_p(\mathbf{x}, \alpha) \\ h(\mathbf{x}) \\ \eta(\mathbf{x}, \alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_p(\mathbf{x}) + \alpha \mathbf{d}_p \\ \min\{h_L(\mathbf{x}), h_p(\mathbf{x})\} \\ \eta - \sigma \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中, σ 为一正数。其中的 η 是在牛顿-拉夫逊法得到的潮流基础上利用SGEAC法扫描预想故障集, 仅对严重故障进行暂态稳定分析得到的系统稳定裕度。 $\mathbf{f}_p(\mathbf{x}) + \alpha \mathbf{d}_p = 0$ 为在计及 $\alpha \mathbf{d}_p$ 功率注入增量后有功潮流方程; α 为待定的功率增长系数, 其最大值为ATC问题的解; $\min\{h_L(\mathbf{x}), h_p(\mathbf{x})\} = 0$ 为满足全部静态安全约束的等效表达式, 分别为线路热稳定约束、节点电压约束、发电机无功功率约束、发电机有功功率约束。如果式(1)最后一、二项成立, 即静态安全约束与动态安全约束都得到满足, 这时得到的 α 就是所求的ATC。

对式(1)的求解包括这几个方面: 直流分布因子可按文献[11]进行计算; 建立可能威胁电网安全的预想事故集; 指定送端与受端, 决定监测断面的最大传输功率及运行状况; 对预想故障集进行扫描、过滤、评价等措施, 找出潜在的严重故障及相应的临界机组; 采取调整、预防等措施同时消除所有的潜在严重故障。

2 基于 SGEAC 法的暂态稳定约束处理方法

在系统惯性中心(COI)坐标系下, 机组转子运动方程为:

$$\begin{cases} M_i \frac{d\tilde{\omega}_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ \frac{d\tilde{\delta}_i}{dt} = \tilde{\omega}_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tilde{\delta}_i = \delta_i - \delta_0$, $\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{i=g} M_i \delta_i$

$$\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0, \quad \omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{i=g} M_i \omega_i,$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{i=g} M_i, \quad P_{\text{COI}} = \sum_{i=1}^{i=g} (P_{\text{mi}} - P_{\text{ei}})$$

$$\text{定义: } P'_{\text{ei}} = P_{\text{ei}} + \frac{M_i}{M_T} P_{\text{COI}} \quad (3)$$

式中: ω_i 为转子角速度和同步速的偏差; δ_i 为转子角度; P_{mi} 为机组的机械功率; g 为系统发电机组总台数。

文献[17]在对失稳机组的物理观测与数学分析的基础上得出了暂态稳定的单机等面积稳定判据。在系统故障时可得出机组 i 的单机加速面积为:

$$S_{\text{aci}} = \int_{\delta_i^{\text{cl}}}^{\delta_i^{\text{cl},2}} (P_{\text{mi}} - f_f(\tilde{\delta}_i)) d\tilde{\delta}_i = \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^{\text{cl},2} \quad (4)$$

式中: $\tilde{\delta}_i^0$ 、 $\tilde{\delta}_i^{\text{cl}}$ 分别为故障起始时刻及故障切除时刻机组 i 相对惯性中心坐标下的角度; $\tilde{\omega}_i^{\text{cl}}$ 为故障切除时刻发电机相对惯性中心的转速; $f_f(\tilde{\delta}_i)$ 是故障期间机组 $P'_e - \tilde{\delta}_i$ 曲线。

故障切除后, 可定义如下机组最大减速面积:

$$S_{\text{dei}}^{\text{max}} = - \int_{\tilde{\delta}_i^{\text{cl}}}^{\tilde{\delta}_i^{\text{u}}} (P_{\text{mi}} - f_p(\tilde{\delta}_i)) d\tilde{\delta}_i \quad (5)$$

式中: $\tilde{\delta}_i^{\text{u}}$ 为机组 i 相对惯性中心坐标下的不稳定平衡点角度; $\tilde{\delta}_i^{\text{cl}}$ 为故障切除时机组 i 相对惯性中心坐标下的角度; $f_p(\tilde{\delta}_i)$ 是故障切除后机组功角曲线。

对稳定机组 i , 可定义其稳定裕度为:

$$\eta_{si} = (S_{\text{dei}}^{\text{max}} - S_{\text{aci}}) / S_{\text{aci}} \quad (6)$$

若 $\eta_{si} < 0$, 则机组 i 第一摇摆失稳, 此时系统将失去稳定; 若 $\eta_{si} > 0$, 则机组 i 第一摇摆稳定, 若系统中所有机组第一摇摆稳定, 则系统第一摇摆稳定。系统稳定裕度为:

$$\eta_s = \min \eta_{si} \quad (7)$$

在计算ATC的时候, 要求基态潮流满足式(1)的稳定约束。如果基态潮流不满足上述稳定约束, 则需要先通过预防措施消除不稳定现象, 即实行功率转移的方法, 然后, 再进行静态ATC计算, 之后, 再考虑暂态安全稳定约束, 如果还存在暂态稳定约束则需要减少受端机组出力。基于SGEAC法的暂态稳定分析根据稳定裕度可以一次性完成预想事故扫描、过滤、排序及评价, 并得到相应场景的临界机组。要使处于失稳场景恢复到稳定场景, 根据SGEAC法需要增大加速机组的减速面积而减小加速面积来实现稳定裕度为正(即恢复稳定), 这就需要减少发电机的机械功率。这牵涉到两个方面的问题:

一是减少多少机械功率才能满足要求; 二是为了满足负荷需要, 减少的出力如何分配到其他的机组上。

2.1 功率转移量的估计值

定义: 为满足负荷需要, 加速机组(群)减少的功率量由减速机(群)来承担, 称为功率转移量。

根据SGEAC方法, 如果发电机 i 失稳, 则减少 ΔP_{mi} 发电机就会稳定, 则 ΔP_{mi} 的估计值为:

$$\frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^{\text{cl},2} = - \int_{\tilde{\delta}_i^{\text{cl}}}^{\tilde{\delta}_i^{\text{u}}} [P_{\text{mi}} - \Delta P_i - P'_{\text{ei}}] d\tilde{\delta}_i \quad (8)$$

在不稳定平衡点则满足:

$$P_{\text{mi}} - \Delta P_{\text{mi}} - P'_{\text{ei}} \Big|_{\tilde{\delta}_i^{\text{u}}} = 0 \quad (9)$$

对于 P'_{ei} 按文献[18]的方法进行功角多项式拟合得到, 即 $P'_{\text{ei}} = \sum_{j=1}^N a_j \tilde{\delta}_i^{j-1}$, 代入式(8)、(9), 并联立求解可得单机功率减少量的估计值。

对于单台稳定发电机可增加的功率量的估计值:

$$0 = - \int_{\tilde{\delta}_i^{\text{max}}}^{\tilde{\delta}_i^{\text{u}}} \left[P_{\text{mi}} + \Delta P_i - \sum_{j=0}^N a_j \tilde{\delta}_i^j \right] d\tilde{\delta}_i \quad (10)$$

式中, $\tilde{\delta}_i^{\text{max}}$ 表示发电机 i 某摆次的最大功角。该式意味着发电机从最大功角到不稳定平衡点的剩余减速面积通过增大出力来抵消掉。

需要说明的是, 功率转移量的估计值是利用了能量裕度与发电机有功出力的变化具有良好的线性关系这一特点, 并作出如下假设: (1) 假设发电机电磁功率曲线不因机械功率的改变而改变; (2) 假设发电机的加速面积不变, 即故障切除前, 发电机的角速度不变。这些假设是不准确的, 因此有必要对转移量进行校定。

2.2 功率转移量的分配

对每一个失稳场景都需要按上述方法对相应场景的临界机组(稳定裕度小于0)进行功率转移量计算, 并保存下来, 取该机的转移量的最大值作为最终功率转移量估计值, 所有功率转移量的估计值之和为系统总的功率转移量。然后再在非临界机组(稳定裕度大于0)中进行分配。

临界机组的功率减少量必须在非临界机组中得到补偿。选择不同的分配对象会影响到ATC的变化。

(1) 假如只对属于非受端的非临界机组进行分配则有利于增加ATC或保持不变; (2) 假如需要对属于受端的非临界机组进行功率分配则会减少ATC。因此首先应在送端的非临界机组进行分配, 其次才

选择非受端非送端发电机，然后才是受端机组。

在非临界机组中分配功率转移量可以按该机组的剩余容量比例分配，也可以按机组转动惯量比例分配，本文采取根据式（10）计算出的可增加的功率量比例分配，即：

$$\Delta P_{ai} = \frac{\Delta P_i}{\sum_{i \in S} \Delta P_i} \Delta P_S \quad (11)$$

式中： S 为按上述优先级选择的非临界机组的集合； ΔP_i 为按式（10）计算出的第*i*台机的可增加功率量； ΔP_S 为总的功率转移量； ΔP_{ai} 为第*i*台机的转移功率分配量。

2.3 ATC 功率校定

考虑静态热稳定约束得到的指定机组间的 ATC 功率，可能存在暂态稳定问题。因此必须对其进行暂态稳定分析与校定，大量仿真实例表明，3~600 机系统，等值机的稳定裕度与机械功率之间近似线性关系^[19]，利用这个关系，可以通过二次左右的仿真，然后通过插值或线性外推方法就可以得到准确的 ATC 大小。图 1 为 ATC 功率校定示意图。

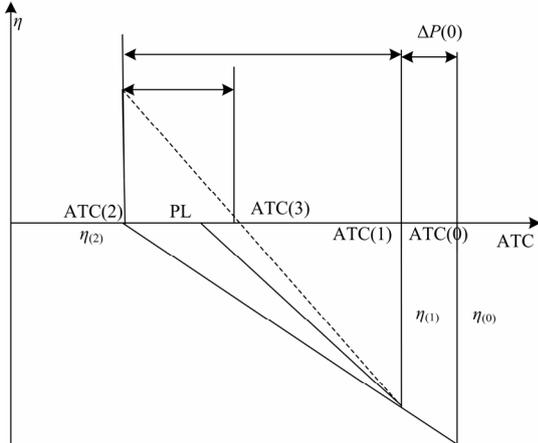


图 1 ATC 功率校定示意图

Fig.1 Schematic description of ATC calibration

图 1 中 ATC(0)为满足静态安全约束条件下的 ATC，这时如果存在暂态稳定约束，即系统稳定裕度 $\eta_{(0)}$ 小于 0，则按 2.1 的方法计算送端的临界机组的转移功率量，得到 ATC(1)，然后进行牛顿-拉夫逊法潮流计算与暂态稳定评估，得到稳定裕度 $\eta_{(1)}$ ，如 $\eta_{(1)} < 0$ ，则通过线性外推法得到 ATC(2)，如果此时系统稳定裕度 $\eta_{(2)} > \sigma$ ，则进行线性插值得到 ATC(3)，并计算其稳定裕度，如果此时 $0 < \eta_{(3)} \leq \sigma$ 则得到准确的 ATC。上述迭代方法具有快速性与鲁棒性，通过该方法，一般只需一次就

可以确定功率转移量。

3 算例分析

以 IEEE17 机系统^[20]为例对本文提出的方法进行验证，发电机采用经典模型，负荷用恒定阻抗代替。节点 108 为平衡节点，节点 6、73、99、101、114、118、121、125、130、131 为 PV 节点。

(1) 定义交易子系统：把系统分为 2 个子系统，受端为 3 号地区，含 114，118，121 号节点的发电机，其他为送端子系统。两系统通过四条线路 1-4，106-52，120-112，123-122 连接。

(2) 预想事故集的建立：在进行暂态稳定分析的过程中，仅考虑发生最严重的永久性三相短路时系统的稳定情况，短路点在靠近母线端，设 0 s 发生故障，0.2 s 通过跳开故障线路切除故障，实际上这个时间宽度远远大于实际操作需要。预想事故集包括 110 kV 至 330 kV 系统内所有线路，共 101 个预想事故。

(3) 预想事故过滤：利用 SGEAC 法对 101 个预想事故进行扫描，其中只有 4 个严重故障。分别为 25、26、75、110 号节点短路时稳定裕度为负。其中 110 号节点属于受端地区，该节点发生短路时，属于受端地区的 118 号节点出现多摆失稳，即两群多摆失稳，其他节点短路时出现多群单摆或多摆失稳。图 2 为 26 号节点短路时 73、76 号节点发电机出现多摆失稳时的摇摆曲线。

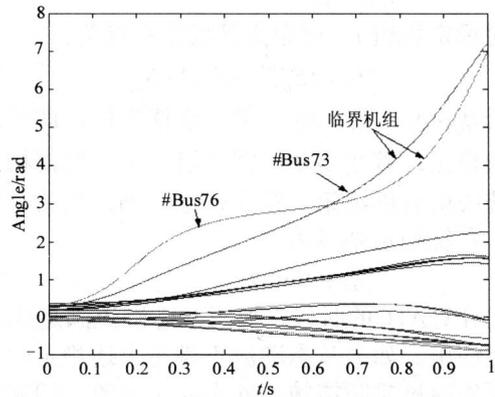


图 2 26 号节点短路时发电机摇摆曲线

Fig.2 Generator swing curve for fault happened at #bus 26

(4) 迭代搜索 ATC

第一次迭代：表 1 中的第 4 列为临界机组的（不）稳定裕度和功率转移量，对同一机组取最大值，表中用粗黑体表示，三台临界机组（节点号为 73，76，118）总的功率转移量为 570 MW，按 2.1 方法对功率转移量在非临界机组中进行分配，建立了新的发电计划，重新用牛顿-拉夫逊进行潮流计算确定新的

运行状态, 并对严重故障逐一进行稳定评价。

第二次迭代: 在进行发电计划调整后, 如果所有严重故障均能稳定则停止计算, 否则按功率转移量计算方法对 ATC 作进一步调整。表 1 中可以看出通过一次迭代后, 只有 75 号节点短路时, 73 号节点发电机处于临界状态, 其他机组均已稳定, 则只需减少 73 号节点发电机出力 9 MW 即可, 经过两次发电机出力调整后, 系统保持稳定, 最小稳定裕度为 0.031, 调整结束。

表 1 系统稳定裕度及功率转移量分配

Tab.1 System's stability margin and power shifted iterative rescheduling procedure

短路节点号	第 1 次迭代			第 2 次迭代		
	稳定裕度	ΔP_s	加速机群节点号及 ΔP_k	稳定裕度	ΔP_d	加速机群节点号及 ΔP_k
25	-0.2303	2.5	73 (-0.8387, -2.17) 76 (-0.1277, -0.33)	0.1071		
26	-0.2274	2.4	73 (-0.7589, -2.07) 76 (-0.1379, -0.33)	0.1049		
75	-0.3819	5.6	73 (-0.9986, -3.89) 76 (-0.4367, -1.71)	-0.0051	0.09	73 (-0.0051, -0.09)
110	-0.0087	0.1	118 (-0.0087, -0.1)	0.1257		

表 2 监测断面在迭代时 ATC 的变化

Tab.2 Monitor surface flows at successive iteration steps

迭代次数	联络线潮流/MW				ATC/MW	稳定裕度
	1-4	106-52	120-112	123-122		
0	251.09	93.84	150.63	93.84	589.4	-0.3819
1	278.99	80.78	146.63	7.98	515.38	-0.0051
2	279.96	81.15	145.58	8.11	514.8	0.0031

4 结论

本文结合 SGEAC 法的暂态分析与故障扫描方法及功率转移量算法, 提出了一种含暂态稳定约束的 ATC 计算方法, 以最严重故障的能量裕度作为暂态稳定约束条件, 对稳定裕度小于 0 的严重预想故障, 通过减少临界机组的出力而增加非受端机组中的非临界机组的出力以使系统恢复到稳定水平, 即通过功率转移的方式来获得正的稳定裕度, 并以直流分布因子为基础计算出 ATC。该方法的主要特点有:

(1) 在算法中以稳定裕度大于 0 为约束, 利用 SGEAC 法快速扫描, 滤除大量非严重故障, 在对严重故障的分析中可以得到临界机组及其(不)稳定裕度, 并通过稳定裕度与发电机出力近似线性关系来估计功率转移量, 减少了计算量;

(2) 算法简单明了, 可以适应失稳模式的变

(5) 稳定校核: 发电计划做出调整后对所有预想故障再做一次扫描, 以检查是否还有严重故障。

表 2 列出了每次迭代断面潮流及 ATC 的变化, 其中 0 次表示未考虑暂态稳定约束时的潮流及 ATC。即未考虑暂态稳定约束的 ATC 为 589.4 MW, 考虑暂态稳定约束后的 ATC 为 514.8 MW, 相对初值减少了 74.6 MW (12.7%), 而系统稳定裕度从 -0.3819 提高到了 0.0031。可以看出对发电计划的调整提高系统的稳定性而对 ATC 的影响相对较小。

化, 避免了穷尽式搜索, 能够适应多重故障和多摆失稳场景;

(3) 该算法的一个明显的优点是尽可能地减少负荷量的损失, 另外还可以根据目标函数选择不同的功率转移量的分配方式。

本文提出的含暂态约束的 ATC 计算方法与最优潮流法及跟踪潮流法相比, 精度上要稍差点, 但计算速度是其他方法不可比拟的。

参考文献

[1] North American Electric Reliability Council. Available transfer capability definitions and determination: a reference document prepared by TTC task force[S]. 1996.

[2] 崔雅丽, 别朝红, 王锡凡. 输电系统可用输电能力概率模型及计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 36-40.

CUI Ya-li, BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. Study on

- probabilistic models and algorithms of available transfer capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (14) : 36-40.
- [3] Li W, Wang P, Guo Z. Determination of optimal total transfer capability using a probabilistic approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (2) : 862-868.
- [4] Hamoud G. Assessment of available transfer capability of transmission system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (1) : 27-32.
- [5] Christie R D, Wollenberg B F, Wangenteed I. Transmission management in the deregulation environment[J]. IEEE Proc, 2000, 88 (2) : 170-195.
- [6] Feng Z, Xu W. Fast computation of post contingency system margins for voltage stability assessments of large scale power systems[J]. Proc Inst Elect Eng Gen Transm Dist, 2003, 147: 76-80.
- [7] de Souza, A C Z, et al. New techniques to speed up voltage collapse computation using tangent vector[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12: 1380-1387.
- [8] 吴艳娟, 李林川. 基于暂态能量裕度灵敏度计及暂态稳定约束的优化潮流计算[J]. 电网技术, 2005, 29 (15) : 28-33.
WU Yan-juan, LI Lin-chuan. Transient stability constrained optimal power flow based on sensitivity of transient energy margin[J]. Power System Technology, 2005, 29 (15) : 28-33.
- [9] 李国庆, 郑浩野. 一种考虑暂态稳定约束的可用输电能力计算的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (15) : 20-25.
LI Guo-qing, ZHENG Hao-ye. A novel algorithm for available transfer capability considering transient stability constraints[J]. Proc of the CSEE, 2005, 25 (15) : 20-25.
- [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 Ming-bo, XIA Yan, WU Jie. Calculation of available transfer capability with transient stability constraints[J]. Proc of the CSEE, 2003, 23 (9) : 28-33.
- [11] Ejebe G C, Waight J G, Santos-Nieto M, et al. Fast calculation of linear available transfer capability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (3) : 1112-1116.
- [12] Wenkai Kuan, Wu Z Q, et al. Sensitivity of available transfer capability based on DC distribution factors[J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36 (2) : 170-179.
- [13] 杨新林, 孙元章, 王海风. 考虑暂态稳定性约束的最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (14) : 13-17.
YANG Xin-lin, SUN Yuan-zhang, WANG Hai-feng. Optimal power flow with transient stability constraints in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (14) : 13-17.
- [14] Fang D Z, Chuang T S, David A K. Improved techniques for hybrid method in fast transient stability assessment[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144 (2) : 107-112.
- [15] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统的安全性与稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 245-312.
YU Yi-xin, CHEN Li-yi. Power system security and stability[M]. Beijing: Science Press, 1998: 245-312.
- [16] 吴伟杰, 童小娇, 等. 基于光滑化函数的 ATC 新模型及其有效算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (19) : 32-35, 79.
WU Wei-jie, TONG Xiao-jiao, et al. New smooth-function based ATC model and its effective algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (19) : 32-35, 79.
- [17] 吴政球, 陈辉华, 唐外文, 等. 以单机等面积稳定判据分析多机系统暂态稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (4) : 48-52.
WU Zheng-qiu, CHEN Hui-hua, TANG Wai-wen, et al. Using single machine equal area criterion to analyze multi-machine systems stability[J]. Proc of the CSEE, 2003, 23 (4) : 48-52.
- [18] 匡文凯, 黎伟, 吴政球, 等. 基于功角曲线拟合的快速暂态稳定预估分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (10) : 93-98.
KUANG Wen-kai, LI Wei, WU Zheng-qiu, et al. A fast transient stability predicting method by fitting[J]. Power System Protection and control, 2009, 37 (10) : 93-98.
- [19] Rovnyak S M, Ernst D, Ruiz-Vega D, et al. Discussion of a unified approach to transient stability contingency filtering, ranking, and assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (2) : 527-527.
- [20] Vittal V. Transient stability test systems for direct stability methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7 (1) : 37-43.

收稿日期: 2010-06-30; 修回日期: 2010-09-01

作者简介:

匡文凯(1973-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制; E-mail: Wenkaikuang@163.com

张红艳(1975-), 女, 学士, 长期从事电力系统的生产与调度工作;

吴政球(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 电力市场。