

功率圆确定稳定约束的可用输电能力分析

杨帮宇, 彭建春, 何禹清

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

A Novel Algorithm for Calculating Available Transfer Capability Using Power-circle Determine Stability Constraints

YANG Bang-yu, PENG Jian-chun, HE Yu-qing

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: A new method for calculating available transfer capability (ATC) in consideration of angle stability and voltage stability is presented in this paper. This method is aimed at the problem of complex expression of the angle stability and voltage stability constraints. Based on power-circle, it deduces a simplified formulation of line transfer stability limits and shows that when a transfer takes place in the system, at least one line reaches its transfer stability limits before the instability is occurred. Then it is integrated into standard optimal power flow (OPF) formulation, and set up a new ATC model considering angle stability and voltage stability. The problem here is solved by successive linear programming. The result shows that the proposed model and algorithm is effective and feasible.

KEY WORDS: available transfer capability; voltage stability; angle stability; line transfer stability limits; optimal power flow

摘要: 提出一种考虑功角和电压稳定约束计算可用输电能力的新方法。针对功角和电压稳定约束表达复杂的问题, 首先基于功率圆推导出线路传输有功功率极限值, 分析表明, 当电力系统发生功角失稳或电压失稳前, 输电网络中至少有 1 条线路传输的有功功率达到其传输有功功率极限。因此, 用线路传输有功功率极限近似简洁地表达这 2 种复杂约束的方法, 建立考虑功角和电压稳定约束的可用输电能力新模型。运用逐点线性化方法实现问题求解。算例仿真与分析的结果表明该文的方法有效、可行。

关键词: 可用输电能力; 电压稳定; 功角稳定; 线路有功功率极限; 最优潮流

0 引言

当前, 世界电力工业正在发生前所未有的变

革, 传统电力工业自上而下的生产和经营模式正在向发电公司、输电公司和配电公司的生产和经营模式转化。经济性伴随电力市场的发展得到进一步强化, 它一方面促进了电网的互联, 另一方面又促使输电线路传送的功率越来越接近其极限值, 特别是系统中存在大量频繁变化的电力交易, 可能将输电系统推向崩溃的边缘。

北美电力可靠性委员会在 20 世纪 90 年代提出了电网可用输电能力(available transfer capability, ATC)的概念^[1], 定义 ATC 为在已有的协议基础上, 在实际输电网中可用于进一步商业活动的剩余输电能力。显然, 如何准确地计算 ATC, 是电力市场环境 下输电系统运营中迫切需要解决的关键问题。从物理和电气特性来看, 互联输电网络特定输电截面上的 ATC 受限于多种约束: 发电机容量约束、节点电压约束、线路热容量约束、网络稳定性约束(含功角稳定约束和电压稳定约束)。要准确地计算 ATC, 应该全面考虑所有这些约束^[2]。基于最优潮流(optimal power flow, OPF)计算 ATC 的方法可方便地处理各种系统约束, 又可对系统资源进行优化调度, 兼顾安全性和经济性^[3-10]。

文献[11]首次综合考虑了热稳定、电压稳定和功角稳定问题, 用 St. Clair 曲线表示输电线路的传输能力。文献[12]验证了其结果, 并指出决定短线路功率传输极限的关键因素是线路热极限, 对于中等距离线路, 其输送功率极限由电压稳定极限决定, 对于长线路, 其输送功率极限由功角稳定极限决定。其中用电压降表示电压稳定, 用线路两端电压的相位差表示系统的功角稳定极限。然而, 用母线电压降极限约束无法反映出系统的无功裕量, 及与电压崩溃的距离; 用线路两端电压的相位差表示电网功

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677015)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677015).

角稳定潜在地放大了整体电网的静态稳定范围，而且不同电网，线路两端电压的相位差上限是不同的，也很难确定。基于小信号法分析的特征根^[13]、分析扩展潮流雅可比矩阵奇异值^[14]和能量函数法^[15]能有效地考虑功角稳定和电压稳定约束。然而这些方法计算量大，并难以将功角和电压稳定约束引入到 ATC 的数学模型中。可见，不考虑网络稳定性约束的 ATC 计算结果过于乐观。

本文首先基于功率圆推导线路传输功率极限，分析表明线路传输功率极限能有效描述功角和电压失稳，并将功角和电压稳定约束转化为支路有功功率约束，为系统运行方式的优化调整提供依据。算例表明本文的模型和算法能快速识别功角和电压失稳，确保 ATC 计算的准确性。

1 基于功率圆的线路有功功率极限表达式

1.1 功率圆与新型线路有功功率极限表达式

输电线路采用π型如图 1 所示的等效电路。

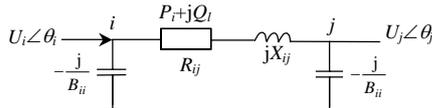


图 1 线路的π形等效电路
Fig. 1 Transmission line: π-model

对以*i*和*j*为端节点的线路*l*，从节点*i*流入线路*l*的有功*P_l*和无功*Q_l*可描述为

$$P_l = U_i^2 G_{ij} - U_i U_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \alpha_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_l = -U_i^2 B_{ii} - U_i^2 B_{ij} - U_i U_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_{ij}) \quad (2)$$

式中：*U_i*和*θ_i*分别为节点*i*的电压幅值和相角；*θ_{ij}* = *θ_i* - *θ_j*；*Y_{ij}*、*α_{ij}*为线路导纳 *G_{ij}* + *jB_{ij}* 的幅值和角度，*B_{ii}*为对地等效电纳。式(1)、(2)通过移项和平方相加，得出与线路复功率的关系：

$$(P_l - P_{l0})^2 + (Q_l - Q_{l0})^2 = S_{l0}^2 \quad (3)$$

如果节点*i*，*j*为 PV 节点，式(3)就是线路传输复功率的功率圆方程，功率圆半径 *S_{l0}* = *U_iU_jY_{ij}*，圆心 (*P_{l0}*, *Q_{l0}*) = (*U_i²G_{ij}*, -*U_i²B_{ii}* - *U_i²B_{ij}*)。它的形状如图 2 所示。

若节点缺乏足够的无功支持，传输功率的增加会导致节点电压下降，电网中的部分 PV 节点将转变为 PQ 节点。随节点电压的变化，式(3)中的圆心和半径均发生变化，线路复功率的轨迹近似椭圆。图 2 中，圆 C2 是一端为 PV 节点、一端为 PQ 节点的线路复功率轨迹，圆 C3 是两端均为 PQ 节点的线路复功率轨迹。圆 C1 包含圆 C2，圆 C2 包含圆 C3，故调整节点电压能提高线路的传输能力。

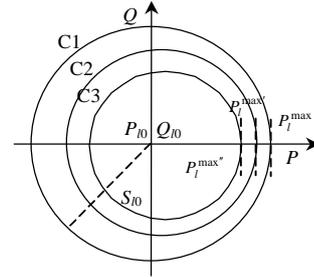


图 2 功率圆

Fig. 2 Power-circle diagram

设线路*l*的当前潮流为 *P_{l1}* + *jQ_{l1}*，对应线路潮流的增量 $\Delta P_l + j\Delta Q_l$ ，功率圆方程变为

$$(P_{l1} + \Delta P_l - P_{l0})^2 + (Q_{l1} + \Delta Q_l - Q_{l0})^2 = S_{l0}^2 \quad (4)$$

将式(4)展开，减去式(3)，线路潮流在 (*P_{l1}*, *Q_{l1}*) 附近变化时，可忽略二阶项 ΔP_l^2 和 ΔQ_l^2 ，则有

$$\Delta P_l / \Delta Q_l = (Q_{l1} - Q_{l0}) / (P_{l1} - P_{l0}) \quad (5)$$

式(5)即为线路*l*上的潮流在点 (*P_{l1}*, *Q_{l1}*) 附近的线性变化关系。可见，线路潮流 *Q_{l1}* 越接近值 *Q_{l0}*， $\Delta P_l / \Delta Q_l$ 越小。当 *Q_{l1}* = *Q_{l0}* 时， $\Delta P_l / \Delta Q_l = 0$ ，此时线路传输的有功功率达到最大值。故线路传输有功功率极限发生在功率圆上 $dP_l / dQ_l = 0$ 对应的点。

线路潮流随发电机或负荷的功率变化而变化。用式(6)所示的有功传输分布因子 $\rho_{lk}^P(P)$ 能很好地描述线路有功功率 *P_l^b* 对节点 *k* 的有功功率 *P_kⁿ* 的这种变化关系^[16]：

$$\rho_{lk}^P(P) = \frac{\partial P_l^b}{\partial P_k^n} \quad (6)$$

式中上标*b*和*n*分别为支路和节点电气量。可通过线路潮流雅可比矩阵^[17]求得 $\rho_{lk}^P(P)$ 为

$$\rho_{lk}^P(P) = \frac{\partial P_l}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P} + \frac{\partial P_l}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P} + \frac{\partial P_l}{\partial U_i} \frac{\partial U_i}{\partial P} + \frac{\partial P_l}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{\partial P} \quad (7)$$

结合式(1)~(3)，式(7)各部分可表示为

$$\begin{cases} \partial P_l / \partial \theta_i = -(Q_l - Q_{l0}) \\ \partial P_l / \partial \theta_j = Q_l - Q_{l0} \\ \partial P_l / \partial U_i = (2P_{l0} + (P_l - P_{l0})) / U_i \\ \partial P_l / \partial U_j = (P_l - P_{l0}) / U_j \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\partial \theta_i / \partial P$ 、 $\partial \theta_j / \partial P$ 、 $\partial U_i / \partial P$ 和 $\partial U_j / \partial P$ 均可通过雅可比矩阵求得。

类似地，无功传输分布因子 $\rho_{lk}^Q(P)$ 描述了线路无功功率 *Q_l^b* 对节点有功功率 *P_kⁿ* 的灵敏度：

$$\rho_{lk}^Q(P) = \frac{\partial Q_l^b}{\partial P_k^n} \quad (9)$$

功率圆上 $dP_l / dQ_l = 0$ 处的点，结合式(6)、(9)表示为

$$\frac{dP_l}{dQ_l} = \frac{\rho_{lk}^P(P)}{\rho_{lk}^Q(P)} = 0 \quad (10)$$

式(10)表明, 线路传输的有功功率达到极限的2种情况为: 1) 随负荷变化, 线路无功变化不大, 而有功传输分布因子 $\rho_{lk}^P(P) = 0$ 。即线路的有功不再随负荷变化而变化; 2) 线路的有功随负荷变化而变化, 且变化有限, 而无功传输分布因子 $\rho_{lk}^Q(P) = +\infty$ 。情况1) 出现在潮流通过多条线路组成的断面传输的情况; 出现情况2) 的电网结构是: 输电断面只有1条线路^[18]。

令有功传输分布因子 $\rho_{lk}^P(P) = 0$, 并将式(8)代入式(7), 得新的线路有功功率极限表达式:

$$P_l^{\max} = P_{l0} + \frac{-2P_{l0} \frac{dU_i}{U_i dP} (\frac{dU_i}{U_i dP} + \frac{dU_j}{U_j dP}) \pm \frac{d(\theta_i - \theta_j)}{dP} \sqrt{\Delta}}{(\frac{dU_i}{U_i dP} + \frac{dU_j}{U_j dP})^2 + (\frac{d(\theta_i - \theta_j)}{dP})^2} \quad (11)$$

$$\text{式中 } \Delta = S_{l0}^2 [(\frac{d(\theta_i - \theta_j)}{dP})^2 + (\frac{dU_i}{U_i dP} + \frac{dU_j}{U_j dP})^2] - 4P_{l0}^2 (\frac{dU_i}{U_i dP})^2.$$

式(11)中线路潮流方向是由节点*i*流向节点*j*, 线路有功功率极限表示为 $P_l^{\max+}$; 当线路潮流逆向时, 线路有功功率极限表示为 $P_l^{\max-}$ 。线路有功功率的变化范围为 $[P_l^{\max-}, P_l^{\max+}]$ 。

1.2 新型线路有功功率极限式的特点

电力系统稳定是一个整体性问题, 客观上只有稳定或不稳定2种状态。通常根据动态过程的特征和参与动作的元件及控制系统, 将电力系统稳定分为功角稳定、频率稳定和电压稳定3大类及众多子类。电力系统中各个元件相互联系, 相互影响, 输电线路是组成电力系统的重要元件。当不考虑系统对各元件扰动作用时, 一般情况下各个元件单独组成的小系统本身是稳定的, 这也是电力系统这个大系统稳定的必要条件。

互联的电力系统中, 输电网络的传输能力限制是导致电力系统失稳的主要原因。随传输功率的增加, 输电网络中的一条线路首先达到其传输有功功率极限 $P_l^{\max+}$ 。当系统传输功率再增加 $\Delta P = \varepsilon$ ($\varepsilon > 0$) 时, 假设系统仍然稳定, 则线路传输的有功功率为

$$P_l(P_l^{\max+} + \varepsilon) = P_l^{\max+} + \int_{P_l^{\max+}}^{P_l^{\max+} + \varepsilon} \rho_{lk}^P(P) dP \quad (12)$$

式中 $\rho_{lk}^P(P)$ 由输电网络拓扑结构和电路中基尔霍夫定理决定。当 $\rho_{lk}^P(P) > 0$ 时, 线路传输的有功功率 $P_l(P_l^{\max+} + \varepsilon) > P_l^{\max+}$ 。这与线路有功功率极限值为 $P_l^{\max+}$ 相矛盾, 即系统将进入失稳状态。当 $\rho_{lk}^P(P) \leq 0$ 时, 线路传输的有功功率 $P_l(P_l^{\max+} + \varepsilon) \leq P_l^{\max+}$, 系统稳定, 新增的系统传输有功功率通过输电截面上其他线路传输。因此, 系统中一条线路达到其有功功率极限与系统崩溃点的关系如图3所示。

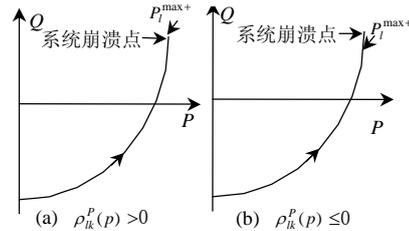


图3 线路有功功率极限与崩溃点的关系

Fig. 3 Relation between the line transfer stability limit and the point of collapse

线路达到其传输有功功率极限后, 当 $\rho_{lk}^P(P) > 0$, 线路传输有功功率为 $P_l^{\max+}$ 的点即为崩溃点; $\rho_{lk}^P(P) \leq 0$, 电力系统的崩溃点发生在线路传输有功功率极限之后, 所以, 线路有功功率极限是系统发生失稳的必要条件。同理, 可证明线路潮流逆向时, 线路达到其有功功率极限 $P_l^{\max-}$ 是系统失稳的必要条件。通过检测线路有功功率是否达到其有功功率极限, 就能预防电力系统失稳发生。电压失稳和功角失稳就是电力系统失稳的表现形式。由于重负荷状态下的电力系统, 有功功率/功角和无功功率/电压幅值之间具有很强的耦合关系, 电压失稳和功角失稳应该基于经受不平衡的一组特定相反作用力及随后发生不稳定时的主导系统变量加以区分^[19]。

可见, 线路有功功率极限表达式 P_l^{\max} , 反映了系统局部失稳导致系统全局失稳的关系。它是电力系统发生失稳的必要条件。因此, 它既有效描述了功角稳定的要求, 又包含了电压稳定的要求。

2 基于功率圆的 ATC 新模型

经典的 ATC 模型中, 通常假设负荷和发电机的节点注入功率缓慢变化, 系统无暂态稳定问题, 且系统有足够的阻尼保持动态稳定, 并假设在系统电压失稳前, 至少有1个节点电压越界, 所以只考虑如下静态物理约束: 发电机节点有功和无功出力约束、节点电压幅值上下限约束和线路容量约束。这样的假设没有考虑功角和电压稳定约束是由于: 1) 电力传输遭遇的约束条件中大部分是热容量约束,

其次是发电机节点功率约束和节点电压约束，功角和电压稳定约束很少是最先遭遇的约束条件；2) 确定电压和功角稳定需要大量非线性计算，算法复杂，计算时间长；3) 已有的确定电压和功角稳定的方法难以作为约束引入到 OPF 分析的数学模型中。可见，不考虑网络稳定性约束的 ATC 的经典模型计算结果过于乐观。

针对上述 ATC 模型结果不准确，及功角稳定和电压稳定约束表达和相应模型求解难的问题。本文将建立考虑网络稳定约束的 ATC 新模型。

以区域 i 所有发电节点有功出力和区域 j 所有负荷节点有功出力累加值最大化为目标，有 ATC 新模型的目标函数：

$$\max \sum_{i \in S} \Delta P_{Gi} + \sum_{j \in R} \Delta P_{Lj} \quad (13)$$

式中： S 为指定源点的集合； R 为指定受点的集合； ΔP_{Gi} 为源点 i 注入的有功功率增量； ΔP_{Lj} 为受点 j 接受的有功功率增量。通常 ATC 计算中的输电可靠性裕度 P_{TRM} 和容量效益裕度 P_{CBM} 均取为总传输容量 P_{TTC} 的一个固定百分比，本文不考虑它们的影响。

等式约束为节点功率平衡方程：

$$P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (14)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (15)$$

式中： N 为节点数； P_{Gi} 、 P_{Li} 、 Q_{Gi} 、 Q_{Li} 分别为发电机和负荷的有功、无功功率。

不等式约束包括发电机有功出力上下限约束、可调无功电源出力上下限约束、节点电压幅值上下限约束和线路热容量约束、功角和电压稳定约束：

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, & i = 1, \dots, N_G \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, & i = 1, \dots, N_R \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, & i = 1, \dots, N \\ |I_l| \leq I_l^{\max}, & L(l) = 1, \dots, N_L \\ |P_l| \leq P_l^{\max}, & L(l) = 1, \dots, N_L \end{cases} \quad (16)$$

式中： P_l^{\max} 由式(11)求得，以计及电网的功角和电压稳定约束； I_l 为线路电流； N_G 为发电机集合； N_R 为可调无功电源集合； N_L 为线路集合； $|I_l| \leq I_l^{\max}$ 为线路热稳定约束。因为线路有功潮流由线路电流和节点电压共同决定， P_l^{\max} 不能充分反映对线路热容量的占用量，所以对于输电线路用 $|P_l| \leq P_l^{\max}$ 表示网络稳定约束，用 $|I_l| \leq I_l^{\max}$ 表示热稳定约束更准确。

可见，模型(13)~(16)中，扣除约束条件 $|P_l| \leq P_l^{\max}$ 就得经典的 ATC 模型。因为线路传输有功功率达到 P_l^{\max} ，是网络失稳的必要条件，电压失稳和功角失稳就是相应失稳的表现形式。所以用基于功率圆提出的线路有功功率约束 $|P_l| \leq P_l^{\max}$ 能有效描述功角和电压稳定问题。从而解决了在优化潮流计算中难以计及功角和电压稳定的问题。

3 求解方法

式(13)~(16)描述了一种求解 ATC 新模型。显然这是一个非线性规划模型(约束条件是非线性的)。本文选用逐次线性化优化方法求解。

假设当前点节点电压向量 \mathbf{x}^k 满足潮流方程。对以上非线性规划问题在 \mathbf{x}^k 点处线性化，转变为线性规划问题。用文献[20]所用的预测校正原始对偶内点法，求解得出 $\Delta \mathbf{x}$ ， \mathbf{x} 的值更新为： $\mathbf{x}^{k+1} \leftarrow \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}$ 。然后在 \mathbf{x}^{k+1} 点处对式(13)~(16)线性化，执行一次潮流计算，使更新后得到的 \mathbf{x}^{k+1} 严格满足潮流方程。不断重复以上过程，直至满足收敛条件： $\|\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k\| \leq \varepsilon$ 。以上过程称为逐次线性循环或外环。求解线性规划子问题时内点法的迭代过程则称为内环，它以满足非线性规划问题的 Kuhn-Tucker 优化条件为基础。ATC 新模型计算步骤如图 4 所示。

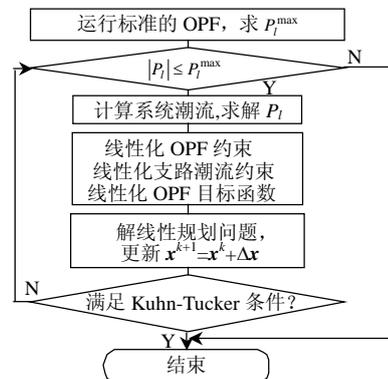


图 4 计算 ATC 新模型的最优潮流程序

Fig. 4 Overall procedure for stability constrained OPF

4 仿真算例

4.1 小系统算例 1

上述的模型和算法通过软件包MATPOWER实现。以图 5 所示的 2 机 4 节点系统为研究对象说明上述概念和现象。图中，节点 2 是PV节点，节点 4 是平衡节点，节点 3 是负荷节点，发电机暂态电抗后的电势 E 对应节点 1。近似考虑发电机的励磁调节作用，认为稳态时节点 2 的电压幅值为 1.0 pu。

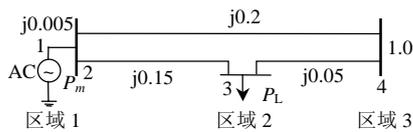


图5 2机4节点系统

Fig. 5 Sample system with 2 generator and 4 nodes

假设各算例下稳态负荷无功功率 Q_L 为有功功率 P_L 的一半, 节点电压幅值上下限约束为(0.9, 1.1) pu。

区域3的负荷恒定: $P_3 = 2$ pu, $Q_3 = 1$ pu。对节点3进行电压调节, 使其电压幅值为1.0 pu。在图5中, 区域1内发电机通过线路2-3、3-4和2-4传输功率至区域2, P_1 的初始值为4。随区域2内负荷的增加, 系统的功角稳定裕度变小。表1比较了ATC经典模型与ATC新模型的结果。其中ATC经典模型中考虑线路热容量约束, 线路视在功率不超过7, 在ATC新模型中忽略热容量约束。

表1 稳定约束下的ATC(算例1)

Tab. 1 Result of ATC for stability constrained (Case 1)

ATC模型	约束条件	ATC值/pu
经典模型	$ I_{23} \leq I_{23}^{\max}$	6.78
新模型	$ P_{24} \leq P_{24}^{\max}$	7.49

由表1可见, 当线路热容量足够大时, 系统首先遭遇线路有功功率极限约束, 线路有功功率极限有效反映了功角失稳, 故利用线路有功功率极限的约束有效而准确地考虑了功角稳定问题。

4.2 小系统算例2

区域1的发电机功率恒定为 $P_1=2$ pu, 节点3为PQ节点, P_3 的初始值为1 pu。在图5中, 区域2内发电机通过线路4-2、2-3和4-3向区域3传输功率。随负荷的增加, 系统的功角和电压稳定裕度变小。表2比较了ATC经典模型与ATC新模型的结果。其中新模型2考虑了功角和电压稳定约束, 但不考虑节点电压幅值上下限约束。

表2 稳定约束下的ATC(算例2)

Tab. 2 Result of ATC for stability constrained (Case 2)

ATC模型	约束条件	ATC值/pu
经典模型	$U_3^{\min} \leq U_3$	3.06
新模型	$U_3^{\min} \leq U_3$	3.06
新模型2	$ P_{34} \leq P_{34}^{\max}$	7.24

由表2可见, 由于系统首先遭遇节点电压幅值上下限约束, 所以ATC经典模型和ATC新模型结果一致。假设不考虑节点电压幅值上下限约束, 系统遭遇线路有功功率极限约束, 线路有功功率极限有效反映了电压失稳, 故利用线路有功功率极限的约束有效地考虑了电压崩溃问题。本文认为节点电压幅值上下限约束是为确保电压质量, 而电压崩溃

是由于系统的无功裕度不足引起的, 故应分别考虑, 这样才能保证尽管系统节点运行在幅值上下限范围, 而由于系统的无功裕度不足, 濒临电压崩溃的现象不发生。

4.3 IEEE 30 母线系统算例

利用本文提出的算法对IEEE9, 30, 57和118节点系统分别进行了测试, 收敛效果良好, 其结果与表3中方法2作了比较, 方法2用逐次线性化优化方法求解ATC经典模型, 每次迭代结束后用扩展潮流雅可比矩阵奇异值^[14]检查是否发生功角失稳或电压失稳。限于篇幅, 仅给出IEEE30节点的计算结果:

表3 IEEE 30 母线系统的计算速度和结果

Tab. 3 Calculation speed and result of IEEE 30 bus system

交 易 节点	发 电机 节点	负 荷 节点	本文方法			方法2		
			迭代 次数	ATC/ MW	耗时/s	迭代 次数	ATC/ MW	耗时/s
1	2	3	15	0.678	3.4	21	0.678	13.4
2	22	8	14	0.237	3.2	19	0.237	11.8
3	27	10	17	14.2	4.1	26	14.2	14.6

由表3可知, 用线路有功功率极限来考虑网络功角和电压稳定约束, 简化了计算过程, 提高了计算效率。并且, 线路有功功率极限式从物理意义上分析了电网的稳定情况, 能清晰地分析出电网运行中受限的线路, 克服了潮流雅可比矩阵奇异值仅仅从数学上分析判断电网的稳定情况, 无法具体指出电网中薄弱环节的缺点。

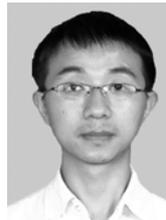
5 结论

本文提出了一种考虑网络功角和电压稳定约束的ATC新模型。该模型中用支路有功功率约束有效简洁地替代了功角和电压稳定约束, 结合ATC经典最优模型, 建立了系统考虑网络稳定的ATC新模型。有效地解决了在最优潮流计算中难以计及功角和电压稳定的问题。从而进一步增强了系统的稳定性, 优化了系统的资源配置。采用逐次线性规划方法求解了所建立的非线性优化模型, 并以简单系统为例进行了计算。通过对考虑网络稳定约束和不考虑网络稳定约束电网可用输电能力比较, 不仅说明在ATC模型中考虑网络稳定的必要性, 而且也表明本文的模型是正确的。

参考文献

- [1] North American Electric Reliability Council. Available transfer capability definitions and determination: A reference document prepared by TTC task force[R]. New Jersey: North American Electric

- Reliability Council, 1996.
- [2] Sauer P W. Sources of uncertainty and error in available transfer capability computation[C]. Proceedings of the 1999 IEEE/PES Summer Meeting, Edmonton, Canada, 1999: 18-22.
- [3] 汪峰, 白晓民. 基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 35-40.
Wang Feng, Bai Xiaomin. OPF based transfer capability calculation [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 35-40(in Chinese).
- [4] 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 Guoqing, Zheng Haoye. A novel algorithm for available transfer capability considering transient stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 20-25(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 潘雄, 徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定性约束的区域间可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 86-91.
Pan Xiong, Xu Guoyu. OPF based ATC calculation with statistic voltage stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 86-91(in Chinese).
- [7] Tuglie E D, Dicorato M. A static optimization approach to assess dynamic available transfer capability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 1069-1076.
- [8] 李国庆, 赵钰婷, 王利猛. 计及统一潮流控制器的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 44-49.
Li Guoqing, Zhao Yuting, Wang Limeng. Available transfer capability calculation with unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 44-49(in Chinese).
- [9] 李国庆, 唐宝. 计及发电报价的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 18-22.
Li Guoqing, Tang Bao. Available transfer capability calculation considering generation bidding in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 18-22(in Chinese).
- [10] Gan Deqiang, Robert J T, Zimmerman R D. Stability constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 535-540.
- [11] Clair H P. Practical concepts in capability and performance of transmission lines[J]. AIEE Transactions on Power Apparatus and System, 1953: 72(3): 1152-1157.
- [12] Dunlop R D, Guntman R, Marchenko P P. Analytical development of loadability characteristics for EHV and UHV transmission line[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2): 606-613.
- [13] Padiyar K P, Bhasker K. An integrated analysis of voltage and angle stability of a three node power system[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(6): 498-501.
- [14] 韩文, 韩祯祥. 一种判别电力系统电压稳定和功角稳定的新方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 367-369.
Han Wen, Han Zhenxiang. A new method identifying voltage stability and angle stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 367-369(in Chinese).
- [15] Qverbye T J, Pai M A, Sauer P W. Some aspects of the energy function approach to angle and voltage stability analysis in power systems [C]. Proceeding of the 31st IEEE Conference on Decision and Control, New York, 1992: 2941-2946.
- [16] Grijalva S. Complex flow-based nonlinear ATC screening[D]. Dissertation, Urbana: University of Illinois, 2002.
- [17] Craig A A, Tapan K S. Determination of power system coherent bus group by novel sensitivity based method for voltage stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1157-1164.
- [18] Lie T, Schlueter R A, Rusche P A, et al. Methods of identifying weak transmission network stability boundaries[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 293-301.
- [19] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 31-35.
Sun Huadong, Tang Yong, Ma Shiyong. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 31-35(in Chinese).
- [20] Xi Huiyan, Quintana V H. Improving an interior-point-based OPF by dynamic adjustments of step sizes and tolerances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 709-717.



杨帮宇

收稿日期: 2008-03-24。

作者简介:

杨帮宇(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, duoluoyu@yahoo.com.cn;

彭建春(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力市场、电力系统优化运行、控制的研究, jcpeng@163.com。

(编辑 谷子)