

交直流系统可利用传输能力的评估

唐国栋¹, 李华强¹, 肖玲¹, 程超²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川南充电业局, 四川 南充 637000)

摘要: 提出了一种基于内点法的适用于交直流系统求解可利用传输能力的新方法。由交直流网络间的耦合关系和换流器转换方程, 推导出直角坐标系交直流系统的 Jacobi、Hessian 矩阵, 进而用原始-对偶内点法求解计及电压幅值和热稳定约束的交直流系统 ATC。针对静态电压稳定约束下交直流系统直流控制方式会发生调整的情况, 提出分段求解交直流系统 ATC 的方法, 该方法能方便考虑直流变量约束及运行方式的调整。经算例验证该算法在交直流系统 ATC 计算中对初始值选择要求不高, 收敛迅速。

关键词: 可利用传输能力; 交直流系统; N-1 准则; 内点法; 分段求解法

Evaluation of available transfer capability for AC/DC power systems

TANG Guo-dong¹, LI Hua-qiang¹, XIAO Ling¹, CHENG Chao²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Nanchong Electric Power Bureau, Nanchong 637000, China)

Abstract: A new method, based on interior point algorithm, for solving available transfer capability for AC/DC power system is proposed in this paper. Firstly, the Jacobian and Hessian matrix of AC/DC system in the rectangular coordinates is extrapolated with the coupled relationship of AC/DC network and the conversion function of converters. Then, the ATC of AC/DC system with respect to thermal and voltage magnitude limits can be calculated by interior point method. Secondly, considering the switch of the DC control mode with respect to voltage stability limits, a segment method for solving ATC of AC/DC power system is proposed. The method is characterized by its convenience of considering variable constraints of DC system and adjustment of DC operation mode. Simulation results show that the method is not sensitive to the initial value and convergent swiftly.

Key words: available transfer capability; AC/DC power systems; N-1 outage contingencies; interior point method; segment method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0012-06

0 引言

在电力市场的环境下, 可利用传输能力 ATC (Available Transfer Capability) 既是电力系统的一个技术指标, 更是反映电网输电容量的市场信号和重要指标。根据 ATC 的定义^[1-2], 是指在现有输电协议的基础上, 考虑各种裕度和约束后系统还能安全可靠地输送电能的能力。从方法学的角度来看, 现有的 ATC 计算方法概括而言可分为两类: 基于确定性的方法和基于概率性的方法。目前, 基于确定性的 ATC 计算方法主要有: 线性分布因子法 (LDF)^[3-4]、重复潮流法 (RPF)^[5-6]、连续潮流法 (CPF)^[7-8]、最优潮流法 (OPF)^[9-10] 等。基于概率性的 ATC 计算方法主要有: 随机规划法^[11]、枚举法^[12]、蒙特卡罗模拟法^[13] 等。

随着直流输电的广泛应用, 势必会形成大规模的交直流互联运行的电网, 如何准确地确定交直流系统的可利用传输能力, 成为一个新的亟待解决的研究课题。目前, 关于交直流系统的可利用传输能力的评估的研究尚未见文献报道。

本文提出一种基于原始-对偶内点法 PDIPM (the Primal-Dual Interior Point Method) 的计算交直流系统 ATC 的方法, 将直流控制方式不变的交直流系统 ATC 归结为一个非线性规划问题, 并计及包括热稳定约束、电压幅值约束和电压稳定约束一系列安全约束条件, 并且满足“N-1”准则。同时, 本文还提出一种分段求解计及电压稳定约束的交直流系统 ATC 的新方法, 方便地解决了在电压稳定约束条件下系统运行过程中直流系统控制方式调整的问题。

1 交直流系统 ATC 的数学模型

由 ATC 的定义可知, ATC 的计算需要计及几

基金项目: 国家教育部回国人员科研启动基金

个基本要素^[14]: 基态潮流、传输方向、安全约束集和 N-1 准则。数学上, 计算交直流系统 ATC 可归结为一个非线性规划问题, 即^[15]:

$$\begin{aligned} & \text{Min}(-\lambda) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ G_{\min} \leq G(x) \leq G_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\lambda \in R^1$ 是反映 ATC 的参数; $f(x, \lambda) = [f_1(x), \dots, f_m(x)]^T$ 是扩展交直流系统潮流方程; $h(x) = [h_1(x), \dots, h_n(x)]^T$ 是常规交直流系统潮流方程; $x \in R^n$ 是状态控制变量; $y_d \in R^m$ 为负荷变化方向, 功率输出区域的发电机的出力总计和负荷区域的负荷总计分别为 1 个单位, 即:

$$\sum_{i \in \text{source}} y_{dPi} = \sum_{j \in \text{sink}} y_{dPj} = 1 \quad (2)$$

式(2)中: source 为功率输出区域; sink 为负荷区域; y_{dPi} 表示发电机集合的有功变化方向; y_{dPj} 表示负荷集合的有功负荷变化方向。 $G(x) = [G_1(x), \dots, G_r(x)]^T$ 为安全约束条件。

1.1 等式约束

交直流系统 ATC 的非线性规划数学模型与交流系统相比, 数学模型中等式约束的雅可比矩阵和海森矩阵不同, 而不等式约束条件和目标函数海森矩阵相同。交流系统 ATC 的非线性规划模型已经作了很多研究, 交直流系统中与其相同的部分不做深入探讨, 本文主要根据交直流系统的耦合项, 推导交直流系统等式约束的雅可比矩阵和海森矩阵。

1.1.1 交直流系统间的关系概述

交直流系统中某个节点含有换流站即关联直流端时, 其等效计算电路如图 1 所示。

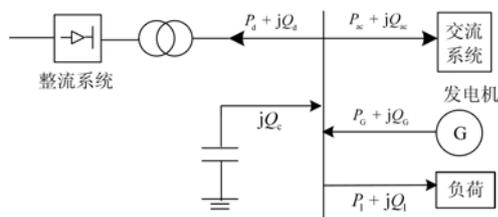


图 1 直流输电换流器等效计算电路

Fig.1 Equivalent circuit of converter in DC system

其中: P_1 、 Q_1 表示负荷注入的功率; P_G 、 Q_G 表示发电机注入的功率; Q_c 表示无功补偿注入的无功功率; P_{ac} 、 Q_{ac} 表示注入交流系统的功率; P_d 、 Q_d 表示注入直流系统的功率, 当直流系统中某个节点关联直流端时, 其交流端的节点功率方程式为:

$$\begin{cases} P_G - P_1 = P_{ac} + P_d \\ Q_G - Q_1 + Q_c = Q_{ac} + Q_d \end{cases} \quad (3)$$

纯交流系统中无换流站, P_d 、 $Q_d=0$; 然而交直流系统有换流站, P_d 、 $Q_d \neq 0$, 并且 P_d 、 Q_d 只与该换流站的交流母线电压幅值和该换流站所处的直流系统中的其他换流站交流母线电压幅值有关。由此可见, 换流站节点功率与电压的关系与纯交流系统有很大区别。因此, 交直流系统的 Jacobi 及 Hessian 矩阵中换流站节点相关项与交流系统求解有差异, 而其余项则完全一致。

1.1.2 交直流系统等式约束的 Jacobi 矩阵

本文采用极坐标系计算, 通过修改纯交流电力系统的潮流 Jacobi 矩阵, 可以得到交直流系统的潮流 Jacobi 矩阵, 则交直流系统 Jacobi 矩阵为:

$$J' = \begin{bmatrix} H' & N' + NN \\ J' & L' + LL \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: NN 、 LL 称为交直流联合系统的潮流雅可比矩阵的耦合项, 反映了交流和直流子系统间的耦合关系。

$$\begin{cases} NN = -\frac{\partial P_d}{\partial V} \\ LL = -\frac{\partial Q_d}{\partial V} \end{cases} \quad (5)$$

直流系统的控制方式决定了子矩阵 NN 、 LL 的非零元素的位置, 耦合项的非零元素如表 1 所示, 其中 X 表示在此位置矩阵的元素为非零值。文献[16]详细推导了 NN 、 LL 的公式, 本文不再赘述。

表 1 NN 和 LL 非零元素的排布

Tab.1 Distribution of nonzero elements in NN and LL

	P_{dI}	P_{dP}	P_{dV}	$P_{d\theta}$	Q_{dI}	Q_{dP}	Q_{dV}	$Q_{d\theta}$
V_{dI}	0	0	0	0	X	0	0	0
V_{dP}	0	0	0	0	0	X	0	0
V_{dV}	0	0	0	0	0	0	X	0
$V_{d\theta}$	X	0	X	X	X	X	X	X

1.1.3 交直流系统等式约束的 Hessian 矩阵

在评估交直流系统 ATC 时, 需要进一步求解等式约束的 Hessian 矩阵。由于当交流端有直流线路关联时, 潮流方程将增加直流项 P_d 和 Q_d , 因此 Hessian 矩阵中含直流项将多增加对状态变量电压的二次偏导数。由于直流线路功率与交流电压幅角无关, 故 Hessian 矩阵中涉及到直流线路功率对交

流电压幅角的偏导均为零。由于换流站有多种控制方式，而直流功率方程取决于换流站的控制方式，因此 Hessian 矩阵必须根据不同的控制方式进行求解。

当整流器或逆变器采用不同的控制方式时，对交直流系统 Hessian 矩阵元素修改^[17-18]：

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \nabla P'_k(x)}{\partial V_k \partial V_l} &= \frac{\partial^2 \nabla P_k(x)}{\partial V_k \partial V_l} + \frac{\partial^2 \nabla P_d(x)}{\partial V_k \partial V_l} \\ \frac{\partial^2 \nabla P'_k(x)}{\partial V_l \partial V_l} &= \frac{\partial^2 \nabla P'_k(x)}{\partial V_l \partial V_l} = \frac{\partial^2 \nabla P_k(x)}{\partial V_l \partial V_l} + \frac{\partial^2 \nabla P_d(x)}{\partial V_l \partial V_l} \quad (6) \\ \frac{\partial^2 \nabla Q'_k(x)}{\partial V_k \partial V_l} &= \frac{\partial^2 \nabla Q_k(x)}{\partial V_k \partial V_l} + \frac{\partial^2 \nabla Q_d(x)}{\partial V_k \partial V_l} \\ \frac{\partial^2 \nabla Q'_k(x)}{\partial V_l \partial V_k} &= \frac{\partial^2 \nabla Q'_k(x)}{\partial V_l \partial V_l} = \frac{\partial^2 \nabla Q_k(x)}{\partial V_l \partial V_k} + \frac{\partial^2 \nabla Q_d(x)}{\partial V_l \partial V_k} \end{aligned}$$

式中： $i=1, \dots, n$ ， n 为节点数； k, l 表示换流站交流母线节点数(其中 k 表示整流侧， l 表示逆变侧)； P_d, Q_d 可以是当整流器或者逆变器采用某种控制方式(定电流控制，定电压控制，定功率控制，定控制角控制)时的注入有功功率 $P_{dl}, P_{dl}, P_{dl}, P_{dl}$ 和注入无功功率 $Q_{dl}, Q_{dl}, Q_{dl}, Q_{dl}$ 。

综上所述可知，当控制方式发生改变时，交直流系统 Jacobi 和 Hessian 矩阵中的元素也需要作相应变化。然而当控制方式不变时，即系统处于单一控制方式下，交直流系统 Jacobi 和 Hessian 矩阵计算公式将保持不变。因此，在采用内点法对典型运行方式进行交直流 ATC 计算时，只是需要在原交流系统的基础上，对有直流关联的 Jacobi 和 Hessian 矩阵项进行修改，而且在计算过程中 Jacobi 和 Hessian 矩阵计算公式保持不变。

1.2 不等式约束

根据北美电力可靠性委员会 NERC (North American Electric Reliability Council) 建议的计算框架，ATC 的计算需要考虑三种物理约束：电压幅值约束、热稳定约束、包括静态、动态和暂态等在内的各种稳定极限约束，并且安全约束还应满足“N-1”准则。

本文计算 ATC 时，考虑热稳定约束、电压幅值约束和静态电压稳定约束。一般来说，如果违反了线路热稳定约束或者母线电压约束，系统仍然能运行一段时间；然而违反稳定性约束将直接导致系统的崩溃，因此相对于前两种约束，电压稳定约束显得更加重要。

另外，在直流系统运行中通过调节换流器触发角和换流变压器变比使整流器的控制角 α 运行于 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间，逆变器的直流电压保持在额定电压的

0.98~1.02倍之间。但是它们的约束不包含在不等式约束中，而是在迭代过程中，根据直流约束条件，检查上述两参数值是否需要改变。

1.3 交直流系统 ATC 的数学模型

由于考虑静态电压稳定约束时不能同时考虑其它安全极限，如：热稳定极限和电压幅值约束。因为如果考虑了这些约束，电压稳定极限就无法被检测到。同时，由于考虑电压稳定约束时，交直流系统存在直流系统运行方式发生改变的情况。因此，需要针对不同的安全约束的限制建立不同的交直流系统 ATC 的数学模型。

计及电压幅值约束和热稳定约束时，交直流系统 ATC 计算数学模型可表示为：

$$\begin{aligned} &\text{Min}(-\lambda_{\text{ther-vol}}) \\ &\text{s.t.} \left\{ \begin{aligned} f(x, \lambda_{\text{ther-vol}}) &= \lambda_{\text{ther-vol}} y_d + h(x) = 0 \\ \underline{P}_{Gi} &\leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \\ \underline{Q}_{Ri} &\leq Q_{Ri} \leq \overline{Q}_{Ri} \\ \underline{V}_i &\leq V_i \leq \overline{V}_i \\ \underline{P}_{ij} &\leq P_{ij} \leq \overline{P}_{ij} \end{aligned} \right. \quad (7) \end{aligned}$$

式中： $\lambda_{\text{ther-vol}}$ 表示考虑热稳定和电压幅值约束下的 λ ， P_{Gi} ， Q_{Ri} 为母线 i 的有功和无功； V_i 为母线的电压幅值； P_{ij} 为传输线路 ij 的有功功率。

计及静态电压稳定约束时，计算模型可表示为：

$$\begin{aligned} &\text{min}(-\lambda_{\text{stab}}) \\ &\text{s.t.} \left\{ \begin{aligned} f(x, \lambda_{\text{stab}}) &= (\lambda_s + \lambda_{\text{stab}}) y_d + h(x) = 0 \\ \underline{P}_{Gi} &\leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \\ \underline{Q}_{Ri} &\leq Q_{Ri} \leq \overline{Q}_{Ri} \\ V_i &\leq \overline{V}_i \end{aligned} \right. \quad (8) \end{aligned}$$

式中： λ_{stab} 表示考虑电压稳定约束下的 λ ； λ_s 表示预留的稳定性裕度，以保证任何时刻运行点距崩溃点必须保持一定的距离。在本文中， λ_s 选取系统在基态运行时负荷的 10%。

综上，计及事故前后的运行状态和各种安全约束后，ATC 可表示为式 (9)：

$$ATC = \min\{\lambda_{\text{ther-vol}}, \lambda_{\text{stab}}\} \quad (9)$$

2 基于内点法的交直流系统 ATC 的求解

内点法^[19]是解决优化问题领域的有力工具，其特点是在保持原始可行性和对偶可行性的同时，沿

着一条原始-对偶路径寻找最优解。

2.1 利用原始-对偶内点法求解直流控制方式不变的交直流系统 ATC

由前面的分析可知, 该算法可以推广到直流控制方式不变的交直流系统ATC评估中, 包括求解计及电压幅值和热稳定约束的交直流系统ATC以及直流控制方式不变时的计及静态电压稳定约束的交直流系统ATC。

原-对偶内点法的主要步骤如下:

(1) 引入松弛变量, 将不等式约束转化为等式约束;

(2) 用拉格朗日法将带约束的优化问题转化为无约束的优化问题;

(3) 利用KKT条件得到一系列的非线性方程;

(4) 用牛顿法来求解上述的非线性方程。

针对非线性规划问题式(1), 其具体求解过程为:

第I步 引入松弛变量, 式(1)中的不等式约束将转化为式(10), 即:

$$\begin{cases} G(x) + u - G_{\max} = 0 \\ G(x) - l - G_{\min} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $(l, u) \in \mathbb{R}^r$ 为松弛变量, $(l, u) \geq 0$ 。

第II步 求解式(10)转化后的拉格朗日函数:

$$L = (-\lambda) - y^T (\lambda_{y_d} + h(x)) - w^T [G(x) + u - G_{\max}] - z^T [G(x) - l - G_{\min}] - \bar{z}^T l - \bar{w}^T u \quad (11)$$

式中: $(z, \bar{z}, w, \bar{w}) \in \mathbb{R}^r$, $y \in \mathbb{R}^m$ 为拉格朗日乘数。

第III步 由于 $\frac{\partial L}{\partial l} = z - \bar{z} = 0$, $\frac{\partial L}{\partial u} = -w - \bar{w} = 0$,

根据 KKT 条件可得以下非线性方程:

$$\begin{cases} L_x \equiv -\nabla h(x)y - \nabla G(x)(z + w) = 0 \\ L_\lambda \equiv -1 - y_d^T y = 0 \\ L_y \equiv \lambda y_d + h(x) = 0 \\ L_z \equiv G(x) - l - G_{\min} = 0 \\ L_w \equiv G(x) + u - G_{\max} = 0 \\ L_l \equiv LZe = 0 (\text{互补条件}) \\ L_u \equiv UWe = 0 (\text{互补条件}) \\ (l, u, z) \geq 0, w \leq 0, y \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $(L, U, Z, W) \in \mathbb{R}^{r \times r}$, 为对角元素为 (l, u, z, w) 的对角阵; $e = [1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^r$ 。为避免在可行域边界出现粘滞现象, 引入扰动因子 μ , 得到:

$$\begin{cases} L_l^\mu = LZe - \mu e = 0 \\ L_u^\mu = UWe + \mu e = 0 \end{cases} \quad (13)$$

第四步 用牛顿法求解方程组(12), 得到:

$$\begin{cases} [\sum_{i=1}^m \nabla^2 h_i(x) y_i + \sum_{i=1}^r \nabla^2 G_i(x) (z_i + w_i)] \Delta x + \nabla h(x) \Delta y + \nabla G(x) (\Delta z + \Delta w) = L_{x_0} \\ y_d^T \Delta y = L_{\lambda_0} \\ y_d \Delta \lambda + \nabla h(x)^T \Delta x = -L_{y_0} \\ \nabla G(x)^T \Delta x - \Delta l = -L_{z_0} \\ \nabla G(x)^T \Delta x + \Delta u = -L_{w_0} \\ Z \Delta l + L \Delta z = -L_{l_0}^\mu \\ W \Delta u + U \Delta w = -L_{u_0}^\mu \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\nabla^2 h_i(x)$ 、 $\nabla^2 G_i(x)$ 分别为 $h_i(x)$ 、 $G_i(x)$ 的 Hessian 矩阵; y_i 、 z_i 和 w_i 为 y 、 z 和 w 的第 i 个元素;

$(L_{x_0}, L_{\lambda_0}, L_{y_0}, L_{z_0}, L_{w_0}, L_{l_0}^\mu, L_{u_0}^\mu)$ 为 KKT 条件

方程的残差。其中 $\nabla^2 h_i(x)$ 、 $\nabla h_i(x)$ 即为前面提到交直流系统等式约束的 Hessian、Jacobi 矩阵。

2.2 交直流系统 ATC 的分段求解法

2.2.1 计及静态电压稳定约束时的直流系统运行方式调节特性

计及静态电压稳定约束时, 由于假定负荷持续增加, 系统的电压水平会逐渐降低。交流系统侧电压的持续下降, 将导致整流器电压下降。当该电压下降至直流控制方式调整点对应的电压时, 逆变器转而进行电流控制而整流器建立电压。在这种运行方式下, 整流器和逆变器的作用互换, 从一种方式变化到另一种方式称为“方式切换”^[20]。

对于双端直流系统, 典型的运行方式调整如下: 整流器定电流、逆变器定熄弧角控制的运行方式下, 当整流侧交流电压下降较多时, 整流器转入定 α_{\min} (最小触发角)、逆变器转入定电流控制。

逆变侧直流电压 V_{di} 满足下面的方程:

$$\begin{cases} V_{di} = V_{dr} - I_d \cdot R \\ V_{dr} = 3\sqrt{2}B \cdot T \cdot V_{ac} \cdot \cos \gamma / \pi - 3X_c \cdot I_d \cdot B / \pi \end{cases} \quad (15)$$

式中: V_{dr} 为整流侧直流电压; I_d 为每极直流电流; R 为直流线路的电阻; V_{ac} 为整流侧高压母线电压有效值; γ 表示整流侧控制角; T 为整流侧变压器变比; B 为整流侧串联桥数; X_c 为每桥的换相电抗。

当 V_{ac} 降低时, 系统通过减小 γ , 增大 T , 使 V_{di} 保持在额定电压的 0.98~1.02 倍之间; 当 $\gamma = \gamma_{\min}$,

$T=T_{max}$, V_{di} 达到额定电压的 0.98 倍时, 若 V_{ac} 继续降低, 控制方式将发生改变。因此, 直流系统控制方式调整点对应的 V_{ac} 值可通过控制方式改变点的控制量 γ , T 及 V_{di} 的值和公式(15)求得。

2.2.2 基于分段求解法求解交直流系统 ATC

根据以上分析, 计及静态电压稳定约束时的交直流系统 PV 曲线如图 2 所示, 其中: B、C、S 分别表示基态潮流、直流系统控制方式改变点、电压崩溃点; λ_1 、 λ_2 分别表示初始控制方式下系统的 ATC、控制方式改变后系统的 ATC; λ 为整个系统的 ATC 值。

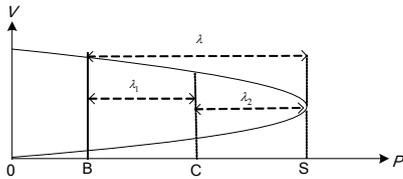


图 2 交直流系统的功率曲线图

Fig. 2 Load curve of AC/DC power system

本文采用分段求解法进行计算计及静态电压稳定约束的交直流系统 ATC, 首先运用原始-对偶内点法求解单一控制方式下的交直流系统 ATC。由于交直流系统控制方式会使潮流发生改变, 需要首先求解控制方式下发生调整时(如图 2 所示的 C 点)的断面潮流情况, 作为控制方式变化后采用内点法计算第二种控制方式下的 ATC 的初始点。最后求和得到整个系统的 ATC 值, 即

$$\lambda_{stab} = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (16)$$

3 计算步骤

(1) 初始化。计算交直流系统的基态潮流, 并确定功率传输方向以及负荷增长方式。

(2) 由式(7)计算交直流系统事故前在电压幅值和热稳定约束下的可利用传输能力 $\lambda_{ther-vol-pre}$, 并由式(8)计算电压稳定约束下的传输能力 $\lambda_{stab-pre}$, 两者中较小的即为事故前交直流系统传输能力 λ_{pre} 。

(3) 用内点法详细分析 N-1 预想事故下的交直流系统 ATC。用内点法计算计及电压幅值和热稳定约束的 $\lambda_{ther-vol-post}$, 并用分段求解法计及静态电压稳定约束的 $\lambda_{stab-post}$; 取当中最小值即为故障后的 λ_{post} 。

(4) 比较故障前后的 λ_{pre} 、 λ_{post} , 较小者即为

在此功率传输方向下系统的可利用传输能力。

(5) 对于其他的功率传输方向及负荷增长方式重复步骤(2)~(5)。

4 算例仿真

本文采用 A、B 两个系统作为求解交直流系统 ATC 的算例, 在不同的系统中设置不同的功率传输区域仿真来验证本方法的性能, 其中 A 系统是由 IEEE30 节点系统和如图 3 的直流系统组成, 去掉原交流系统的 6-7 支路, 并在节点 6、7 间连接直流支路 ab; B 系统是由 IEEE57 节点系统和如图 3 的直流系统组成, 去掉原交流系统的 4-5 支路, 并在节点 4、5 间连接直流支路 ab。这两个系统都在同一种典型运行方式下进行, 即整流侧定电流(1 p.u)、逆变侧定熄弧角(15°)的控制方式。计及静态电压稳定约束时直流控制方式切换后, 整流侧转入定熄弧角控制(5°)、逆变侧转入定电流控制(0.9 p.u)。设换流站变压器变比范围为 ±15%, 每档调节量 1.5%。

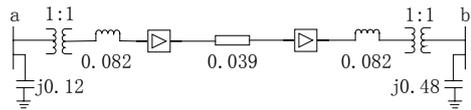


图 3 直流线路系统

Fig. 3 DC transmission line

在 A 系统(改进后的 IEEE30 母线系统)中, 设置功率传输方向为 1 节点→19 节点, 仿真结果如表 2 所示。

表 2 A 系统的计算结果

Tab.2 Results in A system

传输方向		{1}→{19}
故障前	$\lambda_{ther-vol-pre}$	0.593 8
	$\lambda_{stab-pre}$	0.479 9
N-1 故障后	$\lambda_{ther-vol-post}$	0.495 2
	$\lambda_{stab-post}$	0.391 0
交直流系统 ATC		0.391 0

表 3 列出了多种传输方向下的交直流系统 A、B 的 ATC 值, 以及与纯交流系统 ATC 的对比。这里的纯交流系统是指未作修改的 IEEE30、IEEE57 节点系统。

表3 交直流系统 ATC 与纯交流系统的比较
Tab.3 Contrast of ATC in AC/DC system and AC system

系统	传输方向	交流系统 ATC	交直流系统 ATC
A 系统	{2} → {21}	0.337 0	0.533 8
	{1,2} → {19,20,21}	0.230 0	0.273 6
	{1,2} → {19,21,26,30}	0.102 6	0.132 9
B 系统	{2} → {16}	1.730 6	2.075 3
	{1,2} → {16,17,18}	0.517 0	0.728 4

5 结论

本文提出一种基于内点法评估交直流系统 ATC 的方法, 其特点如下:

(1) 本文考虑了包括热稳定约束、电压幅值约束和静态电压稳定约束一系列安全约束条件, 并且满足“N-1”准则。同时, 还考虑了直流量的约束和变压器变比的调整, 切合实际情况。

(2) 针对静态电压约束条件下直流系统会发生控制方式切换的情况, 本文提出了分段求解法, 方便直流系统控制方式调整的仿真模拟, 更加贴切于实际运行情况。

(3) 应用原始-对偶内点法求解交直流系统 ATC, 算法简单, 且对初值要求不高, 收敛迅速。

综上所述, 本文算法在目前交直流输电系统的广泛应用下具有现实意义。

参考文献

- [1] Notice of Proposed Rulemaking(NOPR) (Docket RM95-8-000, Section III-E4f)[R]. Federal Energy Regulatory Commission, 1995.
- [2] FERC. Open Accesssame-time Information System (Formerly Real-time Information Networks) and Standards of Conduct[R]. Washington: Federal Energy Regulatory Commission, 1996.
- [3] Enns M K, Quada J J, Sackett B. Fast Linear Contingency Analysis[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1982, PAS-101(4): 783-791.
- [4] 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.
- [5] Ou Yan, Singh C. Assessment of Available Transfer Capability and Margins[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.
- [6] Gravener M H, Nwankpa C N. Available Transfer Capability and First Order Sensitivity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 512-518.
- [7] Chiang H D, Flueck A, Shah K S, et al. CPFLOW:

Apractical Tool for Tracing Power System Steady-state Stationary Behavior due to Load and Generation Variations [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634.

- [8] 李国庆. 基于连续型方法的大型互联电力系统区域间输电能力的研究(博士学位论文)[D].天津: 天津大学, 1998.
LI Guo-qing. Study of Transmission Transfer Capability of Large Scale Interconnected Power Systems based on Continuation Method, Doctoral Dissertation[D].Tianjin: Tianjin University, 1998.
- [9] 丁晓莺, 王锡凡. 最优潮流在电力市场环境下的最新发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 1-7.
DING Xiao-ying, WANG Xi-fan. Recent Development of Optimal Power Flow in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(13): 1-7.
- [10] Luo X, Patton A D, Singh C. Real Power Transfer Capability Calculations Using Multi-layer Feed-forward Neural Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 903-908.
- [11] XIAO Y, SONG Y H. Available Transfer Capability(ATC) Evaluation by Stochastic Programming[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(9): 50-52.
- [12] Feng X, Meliopoulos A P S. A Methodology for Probabilistic Simultaneous Transfer Capability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1296-1278.
- [13] Mello J C O, Melo A C G, Granville S. Simultaneous Transfer Capability Assessment by Combining Interior Point Methods and Monte Casrlo Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 736-742.
- [14] LI Hua-qiang. A Study on Voltage Stability Assessment and Available Transfer Capability Calculation in Power Systems[D]. Japan: Hiroshima University, 2007.
- [15] 程超. 基于故障过滤技术的 ATC 的快速算法研究硕士学位论文[D]. 成都: 四川大学, 2008.
CHENG Chao. A Fast Computation Method for Available Transfer Capability by Means of Contingency Screening Techniques[D]. Chengdu: Sichuan University, 2008.
- [16] 顾成华. 连续潮流法交直流联合电力系统静态电压稳定性研究(硕士学位论文)[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学工学, 2003.
GU Cheng-hua. The Study of the Steady Voltage Stability of AC/DC Power System based on the Continuation Method, Thesis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.
- [17] 王秀婕, 李华强, 李波. 基于内点法的交直流系统电压稳定性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 72-77.

(下转第 39 页 continued on page 39)

- Systems, 1997, 12(2): 527-532.
- [3] Vaibhav Donde, Pai M A, Hiskens I A. Simulation and Optimization in an AGC System after Deregulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 481-488.
- [4] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
XIE Xiao-rong, JIANG Qi-rong. Flexible AC Transmission: Principles and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [5] Issarachai Ngamroo. Application of Static Synchronous Series Compensator (SSSC) to Stabilization of Frequency Oscillations in an Interconnected Power System[J]. Circuits and Systems, 2001, 2 (2): 113-116.
- [6] 韩肖清. 电力系统运行控制与调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
HAN Xiao-qing. Control and Dispatch of Operation for Power System[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydroelectricity Press, 1996.
- [7] CIGRE Task Force 38.01.08. Modeling of Power Electronics Equipment (FACTS) in Load Flow and Stability Programs[Z]. 1999, (145).
- [8] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [9] Fosha C, Elgerd O I. The Megawatt-frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory[J]. IEEE Trans Power Apparatus & Systems, 1970, 89(4): 563-577.

收稿日期: 2009-01-05; 修回日期: 2009-02-21

作者简介:

李飞 (1986-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与分析研究; E-mail: zhijianglifei@126.com

李咸善 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水电站仿真及电力系统运行与分析;

李洁 (1985-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与分析研究。

(上接第 17 页 continued from page 17)

- WANG Xiu-jie, LI Hua-qiang, LI Bo. Voltage Stability Assessment for AC/DC Power Systems based on Interior Point Method[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2007, 19(6): 72-77.
- [18] 邸骏. 基于奇异值分解和内点理论交直流系统无功优化研究硕士学位论文[D]. 成都: 四川大学, 2008.
DI Tao. Reactive Power Optimization of AC/DC Power System based on Singular Value Decomposition and Interior Point Theory, Thesis[D]. Chengdu: Sichuan University, 2008.
- [19] 李华强, 刘亚梅, Yorino N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.
LI Hua-qiang, LIU Ya-mei, Yorino N. Voltage Stability Assessment for Saddle Node Bifurcation and Limit Induced Bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 56-60.
- [20] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
LI Xing-yuan. The Operation and Control of HVDC System[M]. Beijing: Science Press, 1998.

收稿日期: 2009-02-16; 修回日期: 2009-04-02

作者简介:

唐国栋 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: tangjt5133@126.com

李华强 (1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究;

肖玲 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题。