

计及直流控制方式转换和换流变变比调整的 交直流潮流算法研究

谭涛亮, 张尧

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 在分析统一迭代法及交替迭代法优缺点的基础上, 提出了改进的交替迭代法以计算交直流系统潮流。该算法计及了直流变量的边界约束, 对交流及直流系统潮流方程均采用牛顿拉夫逊法求解, 确保了直流子系统雅可比矩阵可逆。分析了交流系统修正雅可比矩阵在计算过程中可能出现虚部的原因, 给出了换流变分接头调整的策略。以修改后的 IEEE39 系统为例, 验证了所提算法的正确性。重点讨论了当节点负荷缓慢增加时, 潮流计算中换流变调整分接头, 无功补偿设备的投切和直流控制方式发生改变的过程及以上因素对电压稳定极限的影响。

关键词: 交替迭代; 交直流系统; 控制方式; 换流变变比; 电压稳定

Study on AC/DC power flow algorithm considering the switching of DC control mode and converter transformer ratio

TAN Tao-liang, ZHANG Yao

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on analyzing the merits and drawbacks of the uniform and alternating iteration method, an advanced AC/DC power flow algorithm is presented, which considers the boundary constraint of the DC variables. The power flow equations of the AC and DC system are all solved by Newton-Laphson method. It makes the Jacobi matrix of DC system reversible. This paper analyzes the reason why the element of correctional Jacobi matrix of AC system emerges imaginary part during the course of calculation, and gives the way to adjust the tap of converter transformer. The validity of the method presented is verified by the modified IEEE-39 bus system. It especially discusses the detailed course of adjusting converter transformer tap, switching the reactive power compensation devices and changing the control mode of DC system when the node load increases slowly, and analyzes the effect on the voltage stability limits by the above factors.

Key words: alternating iteration; AC/DC power system; control mode; converter transformer ratio; voltage stability

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0040-06

0 引言

随着电网建设的发展, 直流输电将在我国西电东送和全国联网工程中起着重要的作用。因此, 对交直流混合电网运行的研究也更为迫切。作为暂态计算及稳态计算的基础, 可靠的交直流潮流计算方法对交直流电网的分析尤为重要。

目前, 交直流潮流计算方法主要有统一迭代法^[1-3]和交替迭代法^[4-9]。统一迭代法完整地考虑了交、直流变量之间的耦合关系, 对各种网络及运行条件的计算, 均呈现良好的收敛特性。但其雅可比矩阵的阶数比纯交流系统的要大, 文献[1]提出的算

法每增加一条 N 端直流系统, 雅可比矩阵需增加 $5N$ 阶, 文献[2]所提算法则需增加 $7N-1$ 阶, 因而对程序编制的要求高, 占用内存较多, 同时计算时间长。交替迭代法的交、直流系统潮流方程分开求解, 直流部分与交流部分可选用不同的潮流算法, 编程比较方便, 且可利用现有纯交流系统潮流算法成果。另外, 交替迭代法也更容易在计算中考虑直流变量的约束条件及运行方式的合理调整。早期的交替迭代法忽略了交直流系统之间的耦合, 收敛性较差, 尤其当交流系统较弱时。文献[4]提出了改进的交替迭代法, 将直流系统的有功和无功功率用换流站的交流母线电压表示, 在考虑交直流系统耦合的同时,

消去了潮流方程中的直流变量。但对多种控制方式的实现略显复杂。

本文在计及交直流相互耦合的基础上, 对交替迭代法作了进一步的改进, 对交流及直流系统潮流方程均采用牛顿法求解。分析了交流系统修正雅可比矩阵在计算过程中可能出现虚部的原因。重点讨论了当节点负荷缓慢增加时, 换流变调整分接头及直流控制方式发生改变的过程。并以修改后的 IEEE39 系统为例, 分析了不同初始控制方式下, 控制方式的转换过程和变比的调整及其对电压稳定极限的影响。

1 交直流系统数学模型

1.1 直流系统换流器方程

图 1 为交直流电力系统及换流器示意图。

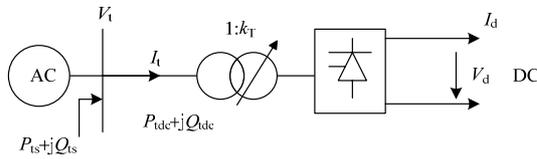


图 1 交直流电力系统及换流器示意图

Fig.1 Schematic diagram of AC/DC power system and converter

取直流电压基准值 $V_{db} = 3\sqrt{2}n_l k_{TB} V_B / \pi$, 可得标幺值下的换流器基本方程^[1]:

$$\begin{cases} V_d = k_T V_t \cos \theta_d - \frac{\pi X_c}{6n_l k_{TB}^2} I_d \\ \cos \varphi = \frac{V_d}{k_\gamma k_T V_t} \\ P_d = V_d I_d \\ Q_d = P_d \tan \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_t 为交流系统换流变压器一次侧线电压; k_T 为换流变变比; k_{TB} 为换流变变比基准值; n_l 为换流器的桥数; φ 为功率因数角; P_d 为换流器节点直流侧有功功率; Q_d 为换流器节点交流侧吸收的无功功率; X_c 为单桥换流电抗; V_d 为直流电压; I_d 为直流电流; θ_d 为整流器触发角或逆变器熄弧角; k_γ 可取为 0.995, 若忽略换相重叠角引起的误差, 可取 $k_\gamma = 1$ 。

1.2 直流系统控制方程及网络方程

控制方程因换流器控制方式的不同而异。直流系统常用的控制方式有定电流控制 (CC), 定电压控制 (CV), 定功率控制 (CP) 及定控制角控制 (CA)。

对应的控制方程为:

$$\begin{cases} \text{CC方式: } I_d = I_{ds} \\ \text{CV方式: } V_d = V_{ds} \\ \text{CP方式: } V_d I_d = P_{ds} \\ \text{CA方式: } \cos \theta_d = \cos \theta_{ds} \end{cases} \quad (2)$$

文献[1,10]将定换流变变比也作为一种控制方式, 限制了变比的调节作用。本文将变比看作已知量, 当直流变量越界时, 调整换流变变比使直流变量回到约束范围之内。

直流网络方程描述直流电流与直流电压之间的关系。通过选取参考正方向, 使得整流器直流电压和电流均为正; 逆变侧直流电压为正, 直流电流为负。消去直流网络中的联络节点, 可得直流网络方程表达式为:

$$\pm I_{dk} = \sum_{j=1}^N g_{dkj} V_{dj} \quad (k=1,2,\dots,N) \quad (3)$$

式中: g_{dkj} 是消去联络节点后的直流网络的节点导纳矩阵 G_d 的元素; N 为换流器个数; 式中正负号分别对应整流器及逆变器。

1.3 交直流系统潮流方程计算

交直流系统的潮流方程与纯交流系统潮流方程不同之处仅在于换流站交流母线的功率平衡方程中多了一项直流注入功率。

$$\begin{cases} \Delta P = P_s - P_{ac} \pm P_d \\ \Delta Q = Q_s - Q_{ac} - Q_d \end{cases} \quad (4)$$

交流子系统的潮流平衡方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N + \Delta N \\ J & L + \Delta L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: H 、 N 、 J 、 L 是纯交流系统雅可比矩阵的元素; ΔN 和 ΔL 为交直流系统之间的耦合项。耦合项计算公式为:

$$\begin{cases} \Delta N = \pm \partial P_d / \partial V_t \\ \Delta L = -\partial Q_d / \partial V_t \end{cases} \quad (6)$$

式 (4) 和 (6) 中正负号分别对应逆变站和整流站。 ΔN 和 ΔL 是非常稀疏的矩阵, 以一个两端口直流系统为例, ΔN 和 ΔL 都至多包含 4 个非零元素。当控制方式不同时, ΔN 和 ΔL 的值将发生变化。因此, 当处理控制方式发生变化的情况时, 略显复杂。本文采取先罗列整流站和逆变站所有可能的控制方式下的 ΔN 和 ΔL 计算公式。在潮流计算子程序中以换流器的控制方式作为输入变量, 当直流控制方式发生变化时, 只需改变程序的输入变量即可在不同控制方式下计算修正雅可比矩阵的

ΔN 和 ΔL 值。

当逆变侧为定电压控制方式时，如果换流变变比设置不当，则可能导致交流子系统修正雅可比矩阵出现虚数。以整流侧定电流，逆变侧定电压为例，令 $V_{d0} = k_T V_t$ ，据式 (6) 计算 ΔL 值， ΔL 中的非零元素计算项为： $-\partial P_{dr} V_{tr} / \partial V_{tr}$ ， $-\partial P_{dr} V_{ti} / \partial V_{ti}$ ， $-\partial Q_{di} V_{tr} / \partial V_{tr}$ ， $-\partial Q_{di} V_{ti} / \partial V_{ti}$ 。

$$Q_{di} = P_{di} \tan \varphi_1 = P_{di} \sqrt{\left(\frac{V_{d0i}}{V_{di}}\right)^2 - 1} = I_{ds} \sqrt{V_{d0i}^2 - V_{ds}^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_{di}}{\partial V_{ti}} V_{ti} = \frac{\partial Q_{di}}{\partial V_{d0i}} V_{ti} / k_{Ti} = \frac{I_{ds} V_{d0i} V_{ti}}{k_{Ti} \sqrt{V_{d0i}^2 - V_{ds}^2}} \quad (8)$$

式中： V_{ds} 为直流电压控制值；下标 r 及 i 分别代表整流侧和逆变侧，下文同。由式 (8) 可知：

1) 当 $V_{d0i} = V_{ds}$ 时，修正雅可比矩阵将出现无穷大项，交流计算将发散。

2) 当 $V_{d0i} < V_{ds}$ 时，将对负数开根号，修正雅可比矩阵出现虚部，导致潮流计算无法继续。

因此，对逆变侧采用定电压控制方式，在设置换流变变比初始值和调整变比的时候，必须满足式 (9)。

$$k_T > V_t / V_{ds} \quad (9)$$

对于每个直流子系统单元，直流电压、直流电流及控制角是最基本的变量，只要这些变量可解，功率，功率因数等变量即可根据式 (1) 求得。以两端口直流系统为例，只要给定两个控制方程（假定整流侧定功率，逆变侧定熄弧角），则可由式 (10) 解得各直流变量。

$$\begin{cases} V_{dr} = k_{Tr} V_{tr} \cos \theta_{dr} - \frac{\pi X_{cr}}{6n_t k_{TBr}^2} I_d \\ V_{di} = k_{Ti} V_{ti} \cos \theta_{di} - \frac{\pi X_{ci}}{6n_t k_{TBi}^2} I_d \\ V_{dr} = V_{di} + R_d I_d \\ V_{dr} I_d = P_{ds} \\ \cos \theta_{di} = \cos \theta_{ds} \end{cases} \quad (10)$$

式中， R_d 为直流线路电阻。式 (10) 中 5 个变量可由 5 个方程求解。为减小非线性，以控制角的余弦量作为变量并以 W 表示。其雅可比矩阵如式 (11) 所示。当控制方式改变时，只需改变 J_d 矩阵的最后

两行。对各种控制方式，计算 J_d 的行列式，可知当整流侧定功率逆变侧定熄弧角时，只要确保 $V_{dr} + (R_d - \pi X_{ci} / 6n_t k_{TBr}^2) I_d \neq 0$ ，则 J_d 可逆，当整流侧定触发角逆变侧定熄弧角时，则需确保 $\pi X_{ci} / 6n_t k_{TBi}^2 - \pi X_{cr} / 6n_t k_{TBr}^2 - R_d \neq 0$ ，方可使 J_d 可逆。而对其余的控制组合方式， J_d 均可逆。式 (10)、(11) 都可通过调节换流变变比确保不为零。对多端直流系统，可以采用类似的方法进行分析，本文不再赘述。

$$J_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\pi X_{cr}}{6n_t k_{TBr}^2} & -k_{Tr} V_{tr} & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\pi X_{ci}}{6n_t k_{TBi}^2} & 0 & -k_{Ti} V_{ti} \\ 1 & -1 & -R_d & 0 & 0 \\ I_d & 0 & V_{dr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2 换流变分接头控制及换流站无功功率控制

2.1 换流变分接头控制

换流变分接头控制是为了维持整流器的触发角（或逆变器的熄弧角）在指定的范围内或维持直流电压或换流变阀侧绕组空载电压在指定的范围内。通常可分为角度控制和电压控制^[11]。

2.1.1 电压控制方式

当换流器为定角度控制时，换流变采用电压控制。本文采用的电压控制为：维持直流电压在指定的范围内。根据式 (1)，当直流电压越限时，需调整换流变分接头，使直流电压 V_d 产生一个增量 ΔV_d 以回到指定范围内。假定其余变量在分接头调整过程中保持恒定，则有：

$$V_d^{sp} = V_d + \Delta V_d = (k_T + \Delta k_T) V_t \cos \theta_d - \pi X_c / 6n_t k_{TB}^2 I_d \quad (12)$$

式中： V_d^{sp} 为调整分接头后希望得到的值； Δk_T 为需调整的变比量。由式 (12) 和式 (1) 可计算出变比调整量：

$$\Delta k_T = \Delta V_d / V_t \cos \theta_d \quad (13)$$

当设定 V_d^{sp} 为边界值时， ΔV_d 较小，则 Δk_T 也较小，换流变分接头调整次数较多，将造成计算时间较长，计算效率不高。若 Δk_T 太大，则可能引起分接头的往复变动，造成潮流计算不收敛^[11]。为了保证潮流计算的收敛性且提高计算效率，本文采用如下策略：设定 V_d^{sp} 为额定电压值 1.0，并且以变量

kct 记录换流变变比的调整次数, 当某次计算中 kct 的值超过上次 kct 的值 2 倍以上时, 则减小变比调整量 Δk_T 的值, 令 $\Delta k_T = \Delta k_T / 2$ 。由于变比是离散变量, 在得到 Δk_T 后, 还需按偏差最小的原则选择实际的变压器分接头值并进行校正计算。

对多端直流系统, 可能出现多个换流站直流电压均越界的情况。由于直流系统各换流站之间有直接的电气联系, 换流变分接头的调整不仅对其所在节点的电压有影响, 对其他节点的电压也有影响。若同时调整电压越限节点的换流变变比, 可能导致计算振荡。本文按以下步骤处理这种情况:

- 1) 选取直流电压越限量最大的节点调整换流变分接头。
- 2) 按式 (9) 计算 Δk_T , 并选择实际的变压器分接头值。
- 3) 调整分接头后, 若所有节点的电压值均不越界, 则退出; 否则转 1) 继续调整分接头。

2.1.2 角度控制方式

当换流器采用定电流或定电压控制时, 通过调整换流变分接头位置, 将换流器触发角或熄弧角维持在指定的范围内。根据换流器基本方程, 同样可列出:

$$W^{sp} = W + \Delta W = (V_d + pX_c I_d / 6n_t k_{TB}^2) / (V_l (k_T + \Delta k)) \quad (14)$$

式中: W^{sp} 为调整分接头后希望得到的值; Δk_T 为变比调整量。由式 (14) 和式 (1) 可计算出变比调整量:

$$\Delta k_T = -k_T \Delta W / (W + \Delta W) \quad (15)$$

设定 W^{sp} 为 18° 左右, 按式 (12) 算出 Δk_T 后, 依据上节所提方法选择实际的变压器分接头值。

2.2 换流站无功功率控制

换流站无功功率控制是直流输电控制系统中对换流站无功功率进行控制的环节, 可分为无功功率控制方式和交流电压控制方式。无功功率控制方式将换流站与交流系统交换的无功功率限制在规定的范围内。交流电压控制方式将换流站交流母线电压控制在规定的范围内^[11]。

从式 (1) 可知, 换流器消耗的无功功率除了与直流系统传输的有功功率 P_d 有关, 还与换流站交流母线电压幅值, 换流变变比及直流系统控制方式有关。随着交流系统负荷的增长, 换流站交流母线电压将降低, 直流换流变压器分接头位置可能调整, 换流器消耗的无功功率亦随之发生变化。当换流变变比和控制角均达到极值时, 直流控制方式将发生

改变, 也将影响换流器吸收的无功功率。因此换流变分接头的调整、直流控制方式的改变和无功补偿装置的动作需协调控制。考虑到换流器功率因数是换流变变比及直流控制方式的应变量, 优先考虑直流控制方式的改变及换流变分接头的调整。即同时出现直流变量越限和无功控制不满足要求时, 首先改变直流控制方式或调整变比分接头使得各直流变量回到约束范围内, 然后调整无功补偿量以满足无功控制要求。由于无功的调整将影响换流站交流母线电压幅值, 从而又对直流变量产生影响。必要时, 需进一步调整换流变分接头。

为有利于交直流系统的电压稳定性, 本文采用交流电压控制方式。将无功补偿设备并联电容器和交流滤波器分成若干组, 当换流站交流母线电压越过了规定的边界值时, 投入或退出电容器组, 直到电容器组全部投入或退出为止。

3 直流控制方式的选择

直流输电控制系统通常分为三个层次, 第一层次称为主控制级(或双极控制级), 第二层次称为极控制级, 第三层次称为阀组控制级^[12]。

在直流输电的极控制级中, 整流侧通常配备有带 a_{min} 限制的定电流控制器, 逆变侧通常配备有定电压控制器、定电流控制器和定熄弧角控制器。整流侧和逆变侧的基本控制功能框图如图 2、图 3 所示。

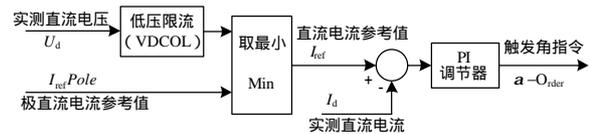


图 2 整流侧基本控制功能框图

Fig.2 Basic control functions diagram of rectifier

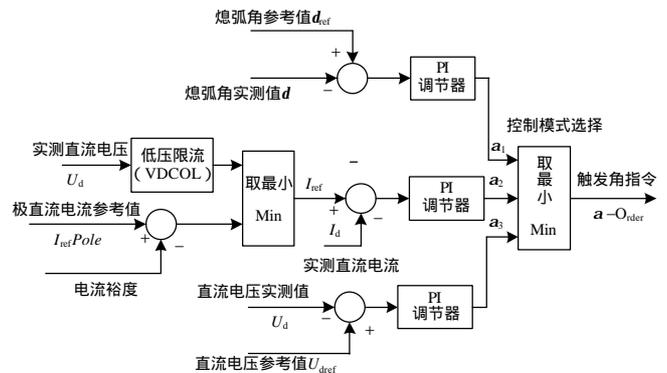


图 3 逆变侧基本控制功能框图

Fig.3 Basic control functions diagram of inverter

图中 PI 调节器的输出通常就直接作为触发延

迟角的指令值。其控制框图如图 4 所示。

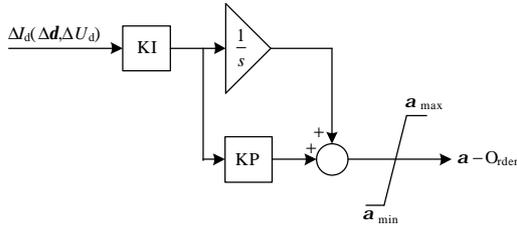


图 4 PI 调节器控制框图

Fig.4 Control block diagram of PI regulator

图 4 中的 KI 及 KP 值随直流控制方式及直流系统的不同而变化。当系统运行状态发生变化时,各直流变量值也相应受到影响,此时,整流侧和逆变侧分别按图 2 及图 3 选择对应控制方式。

在静态稳定分析中,必须将换流变分接头控制,换流站无功控制和换流器控制统一起来考虑。正常情况下,系统将先调整换流变分接头位置及无功补偿设备的投切来满足运行条件。以逆变侧定电压控制方式为例,当交流系统负荷增长到一定程度时,换流变分接头已经调整到极限,无功补偿设备也全部投入,此时若熄弧角亦达到最小值,逆变侧不能再维持在定电压控制方式,而将改为定最小熄弧角方式。当整流侧为定电流控制方式时,如果换流变分接头及无功补偿值均达到极限值,触发角也降到最低时,将改为定最小触发角控制,逆变侧将相应改为定电流控制方式。在实际直流工程中,由于整流侧都靠近电源点,即使交流系统负荷已经很重,其交流母线电压下降值也不会很大,在系统发生电压崩溃前,整流侧换流变分接头一般不会达到极限值。因此,本文主要讨论逆变侧直流控制方式的转化。

4 算例分析

本文以 IEEE39 节点系统(23-24 线路改成图 5 所示直流线路)为例,详细讨论了在节点负荷逐步增加的情况下,换流变分接头位置的调整,无功补偿设备的投入以及直流控制方式的转换过程。计算中,设定换流变变比变化范围为[0.9,1.2],每档分接头调整量为 1%。在节点 23,24 分别加装 6 组及 8 组并联电容器。全部投入时,并联电容器组的导纳标幺值分别为 3 和 4。初始运行状态下的电容器组导纳标幺值分别为 1.5 和 2。当节点电压超出规定电压范围[0.97,1.17]时,将自动投切电容器组。设定触发角和熄弧角范围为 5°~30°,直流电压范围为 0.98~1.02 倍额定直流电压。直流线路过流能力为 10%。直流额定功率为 5.04,额定电压为 0.926,触

发角和熄弧角分别为 18°和 20°。基于 Matlab 仿真平台,通过连续潮流法可以求得该系统各种典型运行方式下的电压稳定裕度(负荷裕度),收敛精度为千分之一。计算结果见表 1 和表 2。为叙述简便,直流控制方式采用“整流侧控制方式—逆变侧控制方式”格式。

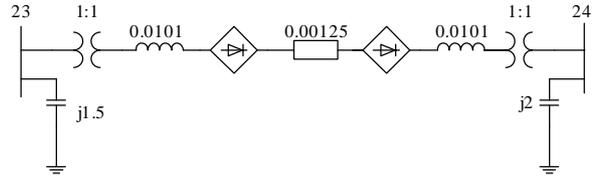


图 5 直流线路

Fig.5 DC line

表 1 各种典型运行方式下负荷率

Tab.1 Load rate of various typical operation modes

	I_{IQm}	I_{RQm}	I_{ITm}	I_{MT}	I_{max}
CC-CV	17.7	24.1	28.0	28.4	29.783
CC-CA	16.6	23.3	24.6	28.8	29.778
CP-CV	17.7	24.1	28.0	28.4 29.95	29.966
CP-CA	16.5	23.6	24.3	28.7 29.95	29.963

注:表中 I_{IQm} 为逆变侧无功补偿达到极限值时的负荷率; I_{RQm} 为整流侧无功补偿达到极限值时的负荷率; I_{ITm} 为逆变侧换流变变比达到极限值时的负荷率; I_{MT} 为控制方式转换时的负荷率; I_{max} 为最大负荷率。

表 2 最大负荷率时的直流潮流数据

Tab.2 Power flow data of DC while reaching maximum load

	K	q_d	V_d	P_d	Q_d
CC-CV	0.97	20.3°	0.835	4.547	2.034
	0.90	5°	0.830	4.519	1.145
CC-CA	0.97	20.59°	0.835	4.547	2.058
	0.90	5°	0.830	4.519	1.145
CP-CV	0.97	20.15°	0.833	4.992	2.257
	0.90	5°	0.827	4.954	1.312
CP-CA	0.97	20.13°	0.833	4.992	2.255
	0.90	5°	0.827	4.954	1.312

注:表中 K 为换流变高压侧变比值; q_d 为触发角(熄弧角); V_d 为直流电压值; P_d 为直流有功值; Q_d 为换流器消耗的无功值。双行中上行为整流侧数据,下行为逆变侧数据。

从表 1 可见,当整流侧采用定功率控制方式时,由于直流线路的过流能力,其负荷裕度有所增大。并且有 2 次控制方式的转化。各种运行方式下的换流器控制方式转换过程为:

- 1) CC-CV \Rightarrow CC- Cd_{\min}
- 2) CC-CA \Rightarrow CC- Cd_{\min}
- 3) CP-CV \Rightarrow CP- $Cd_{\min} \Rightarrow CC_{\max}$ - Cd_{\min}
- 4) CP-CA \Rightarrow CP- $Cd_{\min} \Rightarrow CC_{\max}$ - Cd_{\min}

其中: CC_{\max} 为定最大电流控制方式; Cd_{\min} 为定最小熄弧角控制方式。图 6 为各种典型运行方式下的 PV 曲线图。

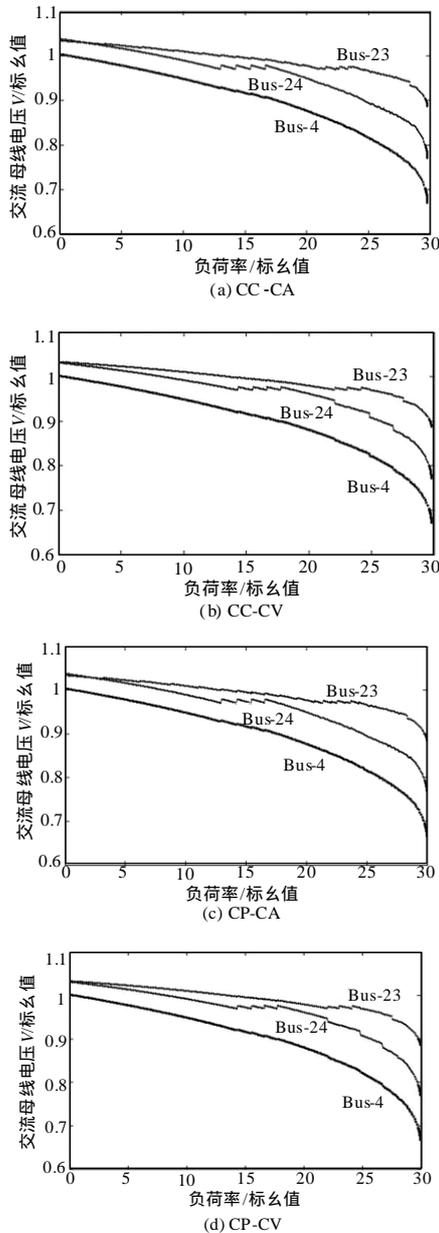


图 6 各种典型运行方式下 PV 曲线图

Fig.6 PV curve of various typical operation modes

由图 6 可知, 无功补偿装置的投入增大了稳定极限。当逆变侧定角度控制时, 逆变侧换流变分接

头调低导致负荷裕度增大, 整流侧换流变分接头调低导致负荷裕度减小。逆变侧定电压控制时, 逆变侧换流变分接头调低导致负荷裕度减小, 换流变分接头调低导致负荷裕度减小。直流控制方式发生转换时, 由于各变量是连续变化的(非突变), 故在转换处曲线较为平滑, 无明显跳变。

表 3 给出了采用本文方法与不考虑直流控制方式转化的负荷裕度比较及按传统调整换流变变比策略计算时间比较。表中 t_1 为本文方法所用时间。

表 3 计算结果比较

Tab.3 Comparison of results

	I_{\max}	t_1/s	t_2/s
CC-CV	28.950 3	59	71
CC-CA	28.946 6	63	75
CP-CV	29.165 1	58	69
CP-CA	29.162 8	73	91

5 结论

(1) 本文提出了改进的交替迭代法, 该法易于考虑直流变量的各种约束, 编程简单。能够处理当控制方式发生转换时, 交直流耦合项及直流方程需要修改的情况。分析了当逆变侧为定电压控制方式时, 交流修正雅可比矩阵出现无穷大或虚部的原因, 并提出了解决方法。

(2) 提出了交直流潮流计算中, 换流变分接头调整的策略, 在保证收敛的前提下, 提高了计算效率。给出了换流变分接头、直流控制方式和无功补偿装置三者协调控制的方案。

(3) 以修改后的 IEEE39 系统为例, 给出了换流变调整分接头, 无功补偿设备的投切和直流控制方式发生转换的过程及其对负荷裕度的影响。

参考文献

- [1] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 邱革非, 束洪春, 于继来. 一种交直流电力系统潮流计算实用新算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 53-57.
QIU Ge-fei, SHU Hong-chun, YU Ji-lai. New practicable algorithm dealing with AC/DC power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 53-57.
- [3] 曾超, 彭建春, 金灵满, 等. 基于改进布罗伊登法的交直流潮流计算[J]. 继电器, 2008, 36(11): 5-8.
ZENG Chao, PENG Jian-chun, JIN Ling-man, et al. Integrated AC/DC systems power flow solution using improved Broyden approach[J]. Relay, 2008, 36(11): 5-8.

(下转第 52 页 continued on page 52)

enhancement[C]. //Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE. 2000 (4) : 23-27.

[15] ZHANG Xiao-ping. Multiterminal voltage-sourced converter-based HVDC models for power flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (4) : 1877-1884.

[16] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 基于等效仿真模型的 VSC-HVDC 次同步振荡阻尼特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (31) : 33-39.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shi-ying, et al. Subsynchronous oscillation damping characteristic analysis for VSC-HVDC based on its equivalent simulation model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (31) : 33-39.

[17] Asplund G, Eriksson K, Svensson K. DC transmission based on voltage source converter[C]. //CIGRE SC14 Colloquium. South Africa: 1997.

[18] 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 Xiao-min. OPF based transfer capability calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (11) : 35-40.

[19] Watson N R, Arrillaga J. Incorporation of VSC transmission in power flow simulation[C]. //The 8th International Power Engineering Conference. Meritus Mandarin(Singapore): 2007.

[20] Lu C N, Chen S S, Ong C M. The incorporation of HVDC equations in optimal power flow methods using sequential quadratic programming techniques[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 19 (4) : 1877-1884.

[21] 毕兆东, 王建全, 韩祯祥. 逐步二次规划法在约束潮流中的运用[J]. 电网技术, 2003, 27 (2) : 31-33.
BI Zhao-dong, WANG Jian-quan, HAN Zhen-xiang. Constrained load flow calculation by sequential quadratic programming method[J]. Power System Technology, 2003, 27 (2) : 31-33.

收稿日期: 2010-01-12; 修回日期: 2010-03-02

作者简介:

李国庆 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统的安全性和稳定性分析, 控制与决策, 配电系统自动化;

张健 (1985-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统的安全性和稳定性分析. E-mail: jianzi2008@163.com

(上接第 45 页 continued from page 45)

[4] Smed T, Andersson G, Sheble G B, et al. A new approach to AC/DC power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (3): 1238-1244.

[5] IWAMOTO S, TAMURA Y. A load flow calculation method for ill-conditioned power systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100 (4): 1736-1743.

[6] 刘崇茹, 张伯明. 交直流混合系统潮流算法改进及其鲁棒性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (19): 57-62.
LIU Chong-ru, ZHANG Bo-ming. Revised algorithm for AC/DC power flow and its robustness analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (19): 57-62.

[7] 徐政. 交流等值法交直流电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14 (3): 1-6.
XU Zheng. The AC equivalent algorithm for AC/DC power system power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14 (3): 1-6.

[8] 刘崇茹. 交直流混合系统状态估计算法研究与分析[J]. 继电器, 2008, 36 (6): 14-19.
LIU Chong-ru. Research and analysis on algorithm of state estimation of AC/DC systems[J]. Relay, 2008, 36 (6): 14-19.

[9] 王秀婕, 李华强, 李波, 等. 基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法[J]. 继电器, 2006, 34 (22): 22-26.
WANG Xiu-jie, LI Hua-qiang, LI Bo, et al. An algorithm for voltage stability assessment of AC/DC power system based on continuation method and interior point theory[J]. Relay, 2006, 34 (22): 22-26.

[10] 王宪荣, 柳焯, 张伯明. 交直流系统潮流新算法[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11: 99-106.
WANG Xian-rong, LIU Zhuo, ZHANG Bo-ming. A new AC/DC load flow approach[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11: 99-106.

[11] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[12] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

收稿日期: 2010-08-02; 修回日期: 2010-11-24

作者简介:

谭涛亮 (1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与稳定; E-mail: 30940480@qq.com

张尧 (1948-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划。