

基于连续潮流的交直流混合输电系统 电压稳定性分析

邓博文

(辽宁省送变电工程有限公司 土建分公司, 辽宁 沈阳 110024)

摘要: 随着电力行业的快速发展, 电力系统采用交直流输电已被广泛使用。采用了将直流系统约束方程和交流系统约束方程相结合的改进连续潮流法, 并且同时具备了交替求解法的处理直流控制方式的优势, 在最后的算例中, 通过对不同控制方式下的电压稳定裕度和各节点的电压进行求解、分析研究, 验证算法的有效性。

关键词: 连续潮流; 交直流输电; 电压稳定分析

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1673-1603(2018)04-0334-05

1 直流输电系统模型

直流输电系统的准稳态模型可用图1来表述。其中, V_d 、 I_d 代表直流线路电压、电流; T 代表变压器变比; P_d 、 Q_d 是注入交流系统的有功功率、无功功率。包含直流输电系统的功率方程可以表述为公式(1)~(9):

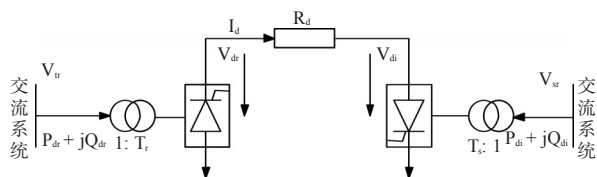


图1 直流系统

$$V_{dr} = 3\sqrt{2}T_r V_r \cos \alpha / \pi - 3X_{T_r} I_d / \pi \quad (1)$$

$$V_{di} = 3\sqrt{2}T_s V_{si} \cos \gamma / \pi - 3X_{T_s} I_d / \pi \quad (2)$$

$$V_{dr} = V_{ds} + R_d I_d \quad (3)$$

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \quad (4)$$

$$P_{di} = -V_{di} I_d \quad (5)$$

$$Q_{dr} = P_{dr} \tan \phi_r \quad (6)$$

$$Q_{di} = -P_{di} \tan \phi_s \quad (7)$$

$$\phi_r = \cos^{-1}(V_{dr} \pi / 3 \sqrt{2} T_r V_r) \quad (8)$$

$$\phi_s = \cos^{-1}(V_{di} \pi / 3 \sqrt{2} T_s V_{si}) \quad (9)$$

式中, X_T 为换流变压器漏抗; V_r 为交流侧母线电压; α 为整流器触发角; γ 为逆变器熄弧角; R_d 为直流线路的电阻; ϕ 为功率因数角; r 为整流侧; i 为逆变侧。

2 连续性潮流的基本原理

连续潮流法的基本方程简单描述如下:

$$f(x, \lambda) = g(x) + \lambda b = 0 \quad (10)$$

其中, λ 即负荷因子; x 为系统状态变量; b 为负荷增长方向, 是 n 维常数; $g(x)$ 为系统功率平衡方程。连续潮流的计算过程包括解的参数化、预估和

收稿日期: 2018-09-04

作者简介: 邓博文(1991-), 男, 辽宁沈阳人, 助理工程师。

校正等主要环节,其计算流程如图2所示。具体计算过程如下:

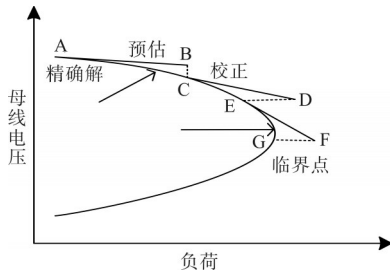


图2 连续潮流法计算过程

1) 参数化

在连续潮流计算中,参数化是贯彻始终的一个重要环节,在预测和校正环节中需要对方程进行参数化。此过程需要确立一个补充方程从而确定曲线上的解,局部参数化可以实现自动调整变换参数,选择解向量中变化最迅速的分量进行策略分析。在预测、校正的步骤中,每一次计算出的解向量将是决定下一步参数的参考。上一步的计算结果可以预测下一步的校正计算。

2) 预测

预测出解的近似值,提供校正的牛顿迭代计算的初值,其值直接关系到连续潮流的计算。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

潮流方程可以转化成另一种形式为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, e_k 为第 k 个元素为1。在计算时,连续参数初始选定为 λ ,即负荷参数,且该相应分量设置为+1。

预估计算求解方程式为

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_{n+1} \\ \tilde{\lambda}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ \lambda_n \end{bmatrix} + h \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, x_n, λ_n 为连续潮流方程的当前解; $\tilde{x}_{n+1}, \tilde{\lambda}_{n+1}$ 为下一个可能解的预测值; h 为预测步长因子;

$dx, d\lambda$ 为当前解的梯度。

3) 校正

预估得到的近似解 $\tilde{x}_{n+1}, \tilde{\lambda}_{n+1}$ 设定为校正环节的初值,得到方程如下:

$$F(x, \lambda) = \begin{bmatrix} f(x, \lambda) \\ x_k - \tilde{x}_k \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

式中, x_k 为当前点的连续参数。

第 i 次迭代系统的修正方程如下:

$$\begin{bmatrix} f_1(x^{(i)}) \\ f_2(x^{(i)}) \\ \vdots \\ f_n(x^{(i)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}|_i & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{k-1}}|_i & \frac{\partial f_1}{\partial \lambda}|_i & \frac{\partial f_1}{\partial x_{k+1}}|_i & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}|_i \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}|_i & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_{k-1}}|_i & \frac{\partial f_2}{\partial \lambda}|_i & \frac{\partial f_2}{\partial x_{k+1}}|_i & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}|_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}|_i & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_{k-1}}|_i & \frac{\partial f_n}{\partial \lambda}|_i & \frac{\partial f_n}{\partial x_{k+1}}|_i & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}|_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x^{(i)} \\ \Delta x_{k-1}^{(i)} \\ \Delta \lambda \\ \Delta x_{k+1}^{(i)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(i)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3 考虑直流输电系统的连续型潮流法

3.1 改进连续潮流法的原理

改进连续潮流法主要针对预测和校正这两个环节,换流站交流母线电流与换流站交流母线电压的关系式反映了直流系统对于交流系统的作用,以下简称为直流系统约束方程;换流站交流母线电压与直流状态变量的关系式反映了交流系统对直流系统的作用,以下简称为交流系统约束方程。

得到预测计算的全微分方程:

$$dD = \begin{bmatrix} \frac{\partial D}{\partial X_d} & \frac{\partial D}{\partial I_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_d \\ dI_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial D}{\partial U_t} \end{bmatrix} dU_t = 0 \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} dX_d \\ dI_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_x' \\ A_t' \end{bmatrix} dU_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, A_x', A_t' 代表系数子矩阵。

拆分成直流系统约束方程式(18)和交流系统约束方程式(19)分别如下:

$$dI_t = -A_t' dU_t \quad (18)$$

$$dX_d = -A_x' dU_t \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial D}{\partial X_d} & \frac{\partial D}{\partial I_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_d \\ \Delta I_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial D}{\partial U_t} \end{bmatrix} \Delta U_t = -\Delta D \quad (20)$$

同理,对式(20)进行线性变换可以得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_d \\ \Delta I_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_x \\ A_t \end{bmatrix} \Delta U_t = \begin{bmatrix} C_x \\ C_t \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中, A_x 和 A_t 为子矩阵; C_x 和 C_t 为线性变换后向量。

拆解为直流系统约束方程式(22)和交流系统约束方程式(23)分别如下:

$$\Delta I_t = -A_t \Delta U_t - C_t \quad (22)$$

$$\Delta X_d = -A_x \Delta U_t - C_d \quad (23)$$

3.2 交直流系统的预测计算

在对交直流系统预测之前,首先需要对交流子系统进行方程式参数化,再将传统的预测方程式(12)扩展到交直流混合输电系统。预测方程中的切向量增加了交流母线电压分量,同时还引入了交流母线电流的分量,故方程式为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial U_a} & \frac{\partial f}{\partial U_t} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dU_a \\ dU_t \\ d\lambda \end{bmatrix} + \frac{\partial f}{\partial I_t} dI_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

消去微增量 dI_t 得到:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial U_a} & \frac{\partial f}{\partial U_t} - A_t' \frac{\partial f}{\partial I_t} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dU_a \\ dU_t \\ d\lambda \end{bmatrix} + \frac{\partial f}{\partial I_t} dI_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

3.3 交直流系统的校正计算

增广方程式的初值为预测解。增广潮流方程式修正方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial U_a} & \frac{\partial F}{\partial U_t} & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_t \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} + \frac{\partial F}{\partial I_t} \Delta I_t = -\Delta F \quad (26)$$

列向量 ΔF 为当前迭代的不平衡量。将校正的直流系统约束方程式(22)代入到式(26)中,得到的简化增量方程如下:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial U_a} & \frac{\partial F}{\partial U_t} - A_t \times \frac{\partial F}{\partial I_t} & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_t \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = -\Delta F + C_t \times \frac{\partial F}{\partial I_t} \quad (27)$$

采用LU分解算法求交流系统的变量增量 ΔU_d 、 ΔU_t 和 $\Delta \lambda$ 。将交直流混合输电系统的所有变量和修正量全部求出,得出当前运行点处的变量,如下式:

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ \lambda_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ \lambda_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (28)$$

由式(28)可知,校正计算后需要判断是否满足收敛,如果不满足收敛条件则重新校正计算迭代;如果满足条件收敛则继续预测计算。

4 实现步骤

提出的改进交直流混合输电系统连续潮流法,计算流程如图3所示。

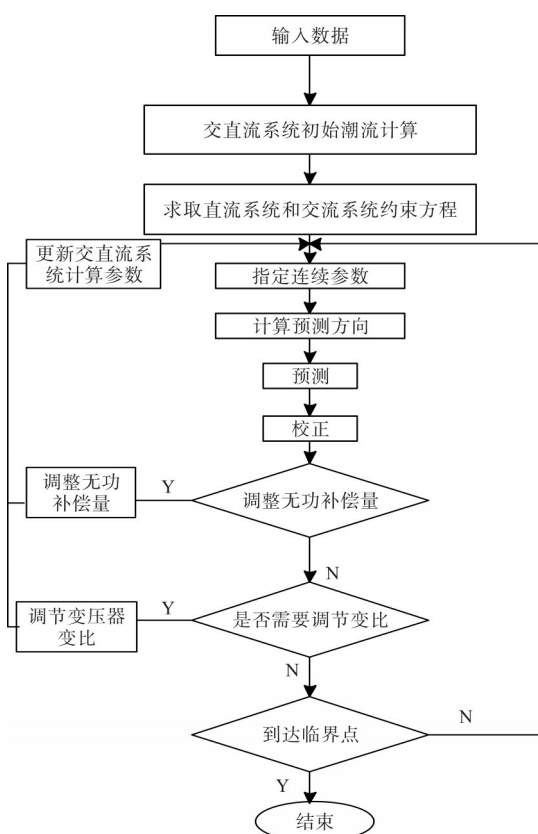


图3 交直流系统连续潮流法流程

交直流混合输电系统连续潮流法包括以下6个计算步骤:

- 1) 初始化计算: 确定初值, 进行初始潮流计算;
- 2) 求得直流系统约束和交流系统约束方程;
- 3) 预测: 预测计算的直流系统约束方程, 并预

测其方向,计算变量 X 和 $\Delta\lambda$,预估下一个工作点;

4)校正:结合校正计算的直流系统约束方程求解,得到精确解(X_{i+1},λ_{i+1});

5)根据无功功率控制策略对电容器组进行投切,并且通过考虑调整变流器的变比来保证直流电压不越界;

6)判断系统是否到达临界点,若未达到临界点则需要重新返回进行计算;若是达到临界点要求则输出计算结果。

5 算例分析

采用算例对4机9节点交直流系统(如图4所示)进行仿真计算。基准电压为220 kV。

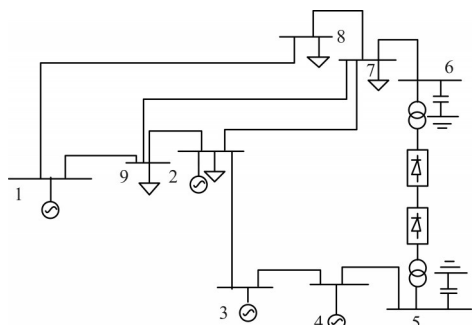
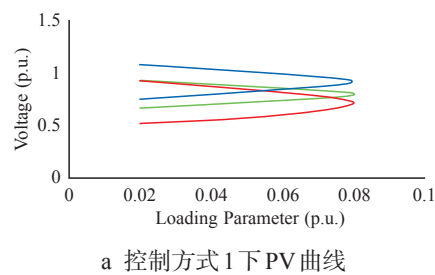
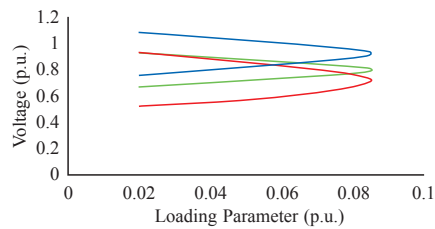


图4 4机9节点交直流系统

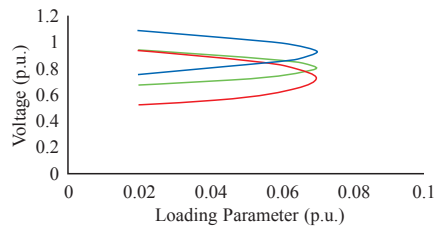
系统可工作在4种控制方式下,控制方式1:整流侧定电流-逆变侧定熄弧角;控制方式2:整流侧定电流控制-逆变侧定电压控制;控制方式3:整流侧定功率-逆变侧定熄弧角;控制方式4:整流侧定功率-逆变侧定电压。运用改进连续潮流法得到不同运行方式下的负荷裕度并得出PV曲线,如图5、表1所示。



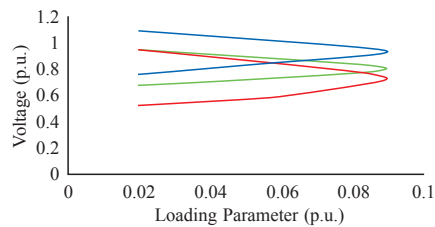
a 控制方式1下PV曲线



b 控制方式2下PV曲线



c 控制方式3下PV曲线



d 控制方式4下PV曲线

图5 4种常见运行方式下PV曲线

在这4种控制方式下,对交直流算例进行改进潮流计算,分析系统电压稳定性。

表1 不同控制方式电压稳定裕度比较

控制方式	电压稳定裕度 λ
1	0.085 4
2	0.820 3
3	0.829 6
4	0.815 5

从计算结果可以看出,当直流系统整流器采用定电流控制时的系统电压稳定水平比整流器采用定功率控制时的系统电压稳定水平高;直流系统逆变侧采用定直流电压控制与定熄弧角控制相比,更有利于受端交流系统的电压稳定。采用该文所述的改进连续型潮流方法,可以有效的对交直流混合输电系统的电压静态稳定性进行分析和计算。

6 结 语

采用改进的连续型潮流算法,对交直流混合输电系统进行分析和计算,给出了系统计算模型和具体的计算步骤,并通过算例验证了所述方法的有效性。

参考文献

- [1] 胡林献,顾成华.连续潮流交直流联合电力系统静态电压稳定性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
- [2] 马坤,叶鹏,郭帅,等.特高压交流电网运行与控制研究综述[J].沈阳工程学院学报:自然科学版,2017,13(1):37-42.
- [3] 宗秀红,王克文,张建芬,等.电压稳定分析的二阶概率连续潮流法[J].继电器,2003,31(8):1-4.
- [4] 王新宝,韩祯祥.计及感应电动机静态特性的PV曲线分析[J].电力系统自动化,2004,28(2):32-36.
- [5] 胡彩娥.应用基于连续潮流算法的遗传算法进行静态电压稳定分析[J].电网技术,2004,28(15):57-61.
- [6] 韦化,丁晓莺.基于现代内点理论的电压稳定临界点算法[J].中国电机工程学报,2002,22(3):27-31.
- [7] AM Stankovic, S Sanders, T Aydin. Dynamic Phasors in Modeling and Analysis of Unbalanced Polyphase Ac Machines[J]. IEEE Power Engineering Review, 2007, 22(2):58.
- [8] 薛振宇,房大中.大型交直流互联电力系统双向迭代连续潮流算法[J].电网技术,2012,36(10):142-146.
- [9] 姚玉斌.实际大型电力系统静态电压稳定分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000.
- [10] TADA Y, OKAMOTO H, TANABE R, et al. Two novel screening methods to decide network configurations to maintain voltage stability using sensitivity analysis [C]// Proceedings of IEEE International Conference on PICA. [S.l.]: IEEE, 1999:79-85.
- [11] CRAIG A A, TAPAN S K. Determination of power system coherent bus groups by novel sensitivity-based method for voltage stability assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3):1157-1164.
- [12] P Ye, Y Sui, Y Yuan, et al. Dynamic Behavior Analysis of Hu-Liao HVDC and AC Parallel Transmission System[C]// 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE, 2010 (2):1-5.
- [13] 张尧,谭涛亮.基于改进连续潮流法及分岔理论的交直流系统电压稳定研究[D].广州:华南理工大学,2003.
- [14] 张梅,刘天琪.交直流混合系统电压稳定问题综述[J].现代电力,2005,22(3):15-19.
- [15] 孙华东,周孝信.计及感应电动机负荷的电力系统在线电压稳定指标[J].中国电机工程学报,2006,26(6):1-7.
- [16] 庄慧敏.基于分岔理论的交直流电力系统电压稳定性分析方法研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [17] 何柳.交直流混合输电系统的静态电压稳定性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.

Voltage Stability Analysis of AC/DC Hybrid Transmission System Based on Continuous Power Flow

DENG Bo-wen

(Civil Engineering Branch Company, Liaoning Transmission and Transformation Facilities Engineering Co., Ltd.,
Shenyang 110024, Liaoning Province)

Abstract: With the rapid development of the power industry, the AC and DC transmission of power system has become an inevitable trend. In this paper, the improved continuous flow method was used to analyze the static voltage stability of AC/DC hybrid transmission system. The AC system and the DC system were cut open, so that the prediction and correction of the continuous flow calculation were simplified. At the same time, the control of converter transformer ratio and the switching of reactive power compensation device were considered in the calculation process, which improved the convergence speed. In the final example, the voltage stability margin under different control modes and the voltage of each node were solved and analyzed to verify the effectiveness of the algorithm.

Key words: continuous power flow; AC/DC transmission; voltage stability analysis

(责任编辑 魏静敏 校对 张 凯)