

基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法

王秀婕, 李华强, 李波, 曾勇波

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 基于连续潮流法和原始对偶内点法, 提出了一种新的分段求解交直流系统负荷裕度方法。首先根据直流系统的调节特性, 运用连续潮流法计算初始运行点到直流控制方式调整点系统的负荷增量。然后基于交直流网络间的耦合关系, 推导得到交直流系统的 Jacobi Hessian 矩阵, 进而运用原始对偶内点法求解直流控制方式改变后交直流系统的负荷裕度。该方法具有较好的收敛性, 且能方便考虑直流量的约束和控制方式调整的问题, 并经算例仿真验证该方法的准确性和快速收敛性。

关键词: 交直流系统; 电压稳定性; 连续潮流法; 内点法; 负荷裕度

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)22-0022-05

0 引言

为防止电力系统的电压失稳和崩溃事故, 了解电压的稳定程度必不可少^[1], 而负荷裕度是其中的一种准确评估指标。目前交流系统负荷裕度求解方法主要有连续潮流法^[2~4]、崩溃点法^[5,6]和静态非线性规划法^[7~9]。随着直流输电的广泛应用, 交直流系统稳定问题也引起了人们的关注, 连续潮流法和崩溃点法已应用于求解交直流的负荷裕度^[10~13]。连续潮流法计算精度高^[11], 在崩溃点计算可能发散^[3]; 改进后的崩溃点法对初值要求不高, 计算简单, 但不能考虑运行过程中的各种离散因素^[11]。

连续潮流法已经推广应用于交直流系统的电压稳定性分析, 该算法的优点在于能综合考虑换流变压器变比的离散调节、直流系统运行量限制约束条件和运行方式合理调整^[13], 但连续潮流法计算速度与步长选择密切相关, 计算可能发散^[3]。原始对偶内点法在求解大规模的规划问题时具有二次收敛性, 并可应用于交流系统的电压稳定分析。为了充分利用两种算法的优点, 本文将内点法推广应用到交直流系统, 并结合了连续潮流法提出分段求解交直流系统负荷裕度的方法。首先用连续潮流法精确计算直流控制方式发生调整时系统的最大负荷增量及调整点的状态, 充分考虑了直流约束条件; 再运用原始对偶内点法计算控制方式调整后系统的负荷增量, 以获得较好的收敛性。最后, 将两部分负荷增量相加即得到系统的负荷裕度。经 IEEE 样本系统

算例仿真验证了本方法的准确性和快速收敛性。

1 连续潮流法模型概述

连续潮流法是 20 世纪 90 年代首次提出的问题, 该方法已成为在电力系统静态稳定性分析中的一个基本工具。预测校正连续方法是其中的一种实用算法, 由预测、校正、参数化策略和步长控制方法 4 部分组成^[3]。预测环节根据当前点给出轨迹上下一个点的估计值, 其目的是为了提提高计算收敛速度。变量和参数的预测值可写为:

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ p_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ p_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ p \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_0 、 p_0 为当前点, \bar{x} 、 \bar{p} 为下一点的估计值, x 和 p 为当前点的梯度, Δ 为步长; 校正环节以 \bar{x} 、 \bar{p} 为初始点计算得到实际满足潮流方程的运行点 x_1 、 p_1 ; 参数化策略是构造一个方程, 与参数化的潮流方程构成 $n+1$ 维方程组, 使得增广后雅可比矩阵在鞍结型分岔点非奇异; 步长控制策略的选取决定连续潮流有效性的一个问题。后两者是该方法计算的瓶颈。

文 [13] 已将连续潮流法推广应用于双端直流交直流联合系统来分析其静态电压稳定性, 本文运用该方法求解直流控制方式调整前交直流系统的状态及负荷增量, 限于篇幅本文不再详述其求解原理。

2 直流系统调节特性及算法的提出

2.1 直流系统调节特性

直流系统主要通过调节换流器触发相位和换流变压器变比, 使整流器的控制角 运行于 $10^\circ \sim 20^\circ$

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金

范围,逆变器的直流电压 V_{di} 保持在额定电压的 0.98 ~ 1.02 倍之间。当上述调节不能满足要求时,需调整直流系统运行方式。对于双端直流系统,其中一种典型的运行方式调整如下^[13]:

整流器定电流、逆变器定电压控制的运行方式下,当整流侧交流电压下降较多时,整流器转为定 α_{min} (最小触发角),逆变器转为定电流控制。

逆变侧直流电压 V_{di} 满足下面的方程:

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

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; α 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。

2.2 算法的提出

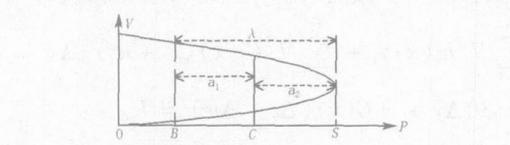


图 1 交直流系统功率曲线图

Fig 1 Load curve of AC/DC power system

如图 1 所示 B 表示初始运行点、 C 表示直流系统控制方式改变点、 S 表示电压崩溃点; a_1 、 a_2 分别表示控制方式改变前、后系统的最大负荷增量,为系统的负荷裕度。运用连续潮流法求解随着负荷增加不断变化的系统运行点,将对应的整流侧交流母线电压代入式 (2),检查 V_{di} 值是否符合规定,否则调节 α 、 T 使系统满足直流约束条件;当 $\alpha = \alpha_{min}$, $T = T_{max}$ 时,判断控制方式发生改变^[13],求出负荷增量 a_1 ;再利用原始对偶内点法计算 a_2 ,从而求出 a 。

3 原始对偶内点法求交直流系统负荷裕度

3.1 交直流系统间的关系概述

交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:

$$\begin{cases} P_G + P_L = P_S + P_d \\ Q_G + Q_L = Q_S + Q_d + Q_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_L 、 Q_L 为换流站交流端负荷有功功率、无功功率; P_G 、 Q_G 为换流站发电机有功功率、无功功率; P_d 、 Q_d 为注入换流站有功功率、无功功率; P_S 、 Q_S 为换流站交流母线流入交流系统的有功功率、无功功率; Q_c 为无功补偿提供的无功功率。

纯交流系统中无换流站, P_d 、 $Q_d = 0$; 而交直流系统有换流站, P_d 、 $Q_d \neq 0$, 使得交直流系统 Jacobi Hessian 矩阵与纯交流系统有所不同。

3.2 交直流系统 Jacobi 及 Hessian 矩阵

由 3.1 的分析可知,交直流系统区别于交流系统的不同之处在于 P_d 、 Q_d 的存在,为得到交直流系统的 Jacobi 及 Hessian 矩阵,需要进一步计算 P_d 、 Q_d 。假设某系统含有四个换流站,分别采用定电流、定电压、定控制角、定功率控制方式。注入直流系统的功率 P_d 、 Q_d 与四个换流站交流母线电压幅值 V 的函数关系^[10],简写成如下表达式:

$$P_{di} = p(V), \quad Q_{di} = q(V) \quad (4)$$

式中:下标 i 表示换流站交流母线节点号。需要指出的是不同的控制方式上述表达式将有所不同。

极坐标系下内点法迭代存在舍入误差,会带来的收敛问题,本文在直角坐标系计算。直角坐标系交直流系统 Jacobi 矩阵用 J 表示:

$$J = \begin{bmatrix} H + HH & N + NN \\ J + JJ & L + LL \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: HH 、 NN 和 JJ 、 LL 表示直角坐标系交直流系统耦合项的稀疏矩阵:

$$\begin{cases} HH = -\frac{\partial P_d}{\partial e} & NN = -\frac{\partial P_d}{\partial f} \\ JJ = -\frac{\partial Q_d}{\partial e} & LL = -\frac{\partial Q_d}{\partial f} \end{cases} \quad (6)$$

式中: e 、 f 分别表示四个换流站交流母线电压实部和电压虚部。

式 (6) 可通过分步求导方式计算,即先得到 P_d 、 Q_d 与各换流站母线电压幅值 V 之间的导数关系^[13]:

$$NN = -\frac{\partial P_d}{\partial V}, \quad LL = -\frac{\partial Q_d}{\partial V} \quad (7)$$

然后根据电压幅值 V 与 e 、 f 的函数关系,计算得到式 (6),进而求得交直流系统的 Jacobi 矩阵。

直角坐标系 Hessian 矩阵与极坐标系 Hessian 矩阵类似,其求解的关键是求下面矩阵值^[14]:

$$H_i = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 P_i}{\partial e_i \partial e_j} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial e_i \partial f_j} \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial f_i \partial e_j} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial f_i \partial f_j} \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial e_i \partial e_j} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial e_i \partial f_j} \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial f_i \partial e_j} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial f_i \partial f_j} \end{bmatrix}$$

矩阵中各项表示分块矩阵, $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ (n 为系统的节点个数),其中: i, j 为节点号; P_i 、 Q_i 为节点 i 的有功功率,无功功率潮流方程; e_i 、 e_j 、 f_i 、 f_j

为节点 i 的电压实部、电压虚部。

对于交直流系统 Hessian 矩阵用 H 表示, 对应的 H_i 矩阵求解如下:

1) 当 i, j 表示换流站交流母线节点时, i, j 节点间的功率 P_{ij}, Q_{ij} 等于 P_{di}, Q_{di} , 由式 (2) 求得 P_{ij}, Q_{ij} 对 v_i 和 v_j 电压幅值的偏导数, 通过分步求导得到 P_{ij}, Q_{ij} 与 e_i, f_i, e_j, f_j 二次偏导数, 间接求出 H_i , 从而根据交流系统 Hessian 矩阵的解法^[14]求解 H 。

2) 除上述情况外, Hessian 矩阵求解与交流系统的求解相同, 限于篇幅, 本文不作详述。

换流站节点少, 所对应的 1) 计算量不大, 因此 H 计算量较交流系统 Hessian 矩阵增加不多。

3.3 原始对偶内点法求单一直流控制方式下交直流系统的负荷裕度

当且仅当交直流系统在单一直流控制方式下, 其 J 和 H 矩阵计算公式保持不变, 类似于纯交流系统。可把单一直流控制方式交直流系统电压静态稳定性作为一个静态非线性优化问题来求解, 其目标是在满足系统各种约束的情况下, 如何确定电力系统负荷增量的最大值即负荷裕度, 其数学模型为

$$\begin{cases} \min (-) \\ \text{st } f(x, y) = y_d + h(x) = 0 \\ G_{\min} \leq G(x) \leq G_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f(x, y) \in R^m$ 是扩展潮流方程组, $h(x)$ 为常规潮流方程组, $G(x) \in R^r$ 为系统的约束条件, y_d 为反映负荷水平的参数, $y_d \in R^m$ 为负荷变化方向。

求解具体过程:

第 1 步引入松弛变量, 不等式约束转化为等式约束, 将式 (8) 转化为式 (9):

$$\begin{cases} \min (-) \\ \text{st } f(x, y) = y_d + h(x) = 0 \\ G(x) + u - G_{\max} = 0 \\ G(x) - l - G_{\min} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

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

第 2 步求解式 (9) 对应的拉格朗日函数:

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

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

第 3 步由于 $\frac{\partial L}{\partial l} = \bar{z} - \bar{z} = 0, \frac{\partial L}{\partial u} = -w - \bar{w} = 0$

把 KKT 条件具体化, 得到非线性方程组:

$$\begin{cases} L - 1 - y_d^T y = 0 \\ L_x - \nabla h(x) y - \nabla G(x) (z + w) = 0 \\ L_y - y_d + h(x) = 0 \\ L_z - G(x) - l - G_{\min} = 0 \\ L_w - G(x) + u - G_{\max} = 0 \\ L_l - LZ e = 0 (\text{互补条件}) \\ L_u - UW e = 0 (\text{互补条件}) \\ (l, u, z) > 0, w < 0, y = 0 \end{cases} \quad (10)$$

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

$$L_l^\mu = LZ e - \mu e = 0, L_u^\mu = UW e + \mu e = 0$$

式中: $\mu = \text{Gap} / r$ ($\text{Gap} = \sum_{i=1}^r (l_i z_i - u_i w_i)$) 为互补间隙, r 为设定的参数)。

第 4 步用牛顿法求解方程组 (10), 得式 (11):

$$\begin{cases} [\sum_{i=1}^m \nabla^2 h_i(x) y_i + \sum_{i=1}^r \nabla^2 G_i(x) (z_i + w_i)] x + \nabla h(x) y + \nabla G(x) (z + w) = L_{x0} \\ y_d^T y = L_{y0} \\ y_d + \nabla h(x)^T x = -L_{y0} \\ \nabla G(x)^T x + u = -L_{w0} \\ \nabla G(x)^T x - l = -L_{z0} \\ Z l + L z = -L_{l0}^\mu \\ W u + U w = -L_{u0}^\mu \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\nabla^2 h_i(x), \nabla^2 G_i(x)$ 分别为交直流系统 $h_i(x), G_i(x)$ 的 Hessian 矩阵; $\nabla h(x), \nabla G(x)$ 为交直流系统的梯度向量; y_i, z_i 和 w_i 为 y, z 和 w 的第 i 个元素; $(L_{x0}, L_{y0}, L_{z0}, L_{w0}, L_{l0}^\mu, L_{u0}^\mu)$ 为 KKT 条件方程的残差。其中 $\nabla^2 h_i(x), \nabla h(x)$ 可由交直流系统的 Hessian, Jacobi 矩阵计算得到, $\nabla^2 G_i(x), \nabla G(x)$ 与交流系统一致。求解式 (11) 得到修正量, 然后迭代计算得到负荷裕度, 本文作者在文 [9] 作了详细介绍。

需要指出的是, 交直流系统 J 和 H 矩阵由式

(4) 推导得到, 式 (4) 函数关系中含有变压器变比和触发电角^[10], 是直流系统运行中需要调节的两个参数, 因此在第 4 步迭代过程中, 根据 2.1 直流约束条件, 检查上述两参数值是否需要改变, 若是, 则将变化后的参数代入公式 (4), 求出相应的 J 和 H 矩阵。

4 简要的程序流程及算法测试

4.1 程序流程图

交直流系统负荷裕度新算法流程图如图 2 所示。

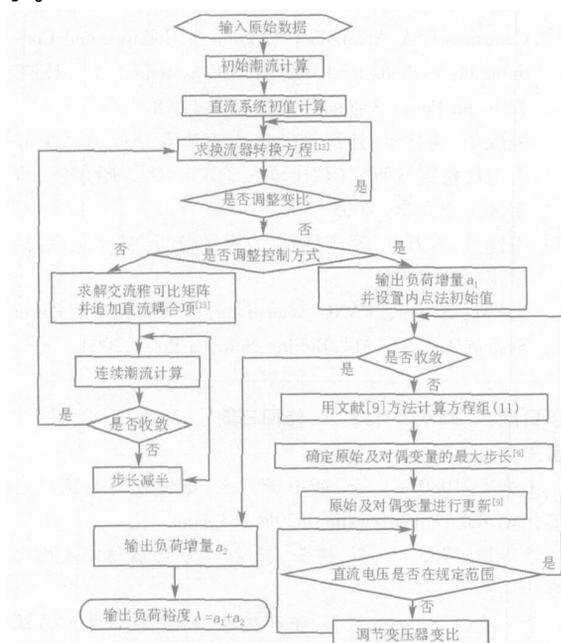


图 2 交直流系统负荷裕度新算法流程图

Fig 2 New algorithm flowchart of AC/DC power system load margin

4.2 算例仿真

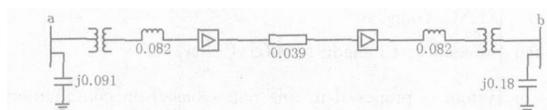


图 3 直流线路

Fig 3 DC transmission line

用本文的方法对 IEEE57 系统 (4-5 支路改成图 3 的 a-b 支路) 典型运行方式, 整流端定电流 (标幺值为 4)、逆变端定电压控制 (标幺值为 1), 进行负荷裕度的求解。设变压器变比范围为 $\pm 15\%$, 每档调节量 1.5%, 系统部分直流参数表示在表 1。

表 1 系统部分直流参数

换流器	min	I_0
整流器	5°	4
逆变器	15°	3.6

分别用本文方法和连续潮流法^[13]进行计算, 其测试结果如表 2 所示。从表中看出, 本文方法计算交直流系统的稳定裕度是可靠的, 且收敛性好。

表 2 IEEE57 测试结果表

Tab 2 Results of calculation for IEEE57 system

	初始控制	控制方式调整之后	计算时间 /s	负荷裕度
	方式的负	负荷裕度计算的迭		
	荷增量	代次数 / 次		
本文的方法	0.425 6	13	1.77	0.661
连续潮流法	0.425 6	45	2.17	0.640

5 结论

本文提出连续潮流法和原始 - 对偶内点法解交直流系统负荷裕度的新方法。

1) 连续潮流法能准确地求解直流控制调节时系统的负荷增量以及系统的状态量。计算过程中考虑了直流量的约束和直流控制调节方式的调整, 切合实际运行情况。

2) 引入新颖数据结构后的原始 - 对偶内点算法本身具有二次收敛性及良好的鲁棒性, 特别适合于求解大型电力系统问题^[9]。本文将其应用到交直流系统稳定计算, 提高计算速度及收敛性。

因此, 本文的算法在目前交直流系统规模扩大、稳定性问题逐渐突出的情况下具有现实意义。

参考文献:

- [1] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评 [J]. 电网技术, 2001, 25 (1): 1-7.
ZHOU Shuang-xi, JIANG Yong, ZHU Ling-zhi Review on Steady State Voltage Stability Indices of Power Systems [J]. Power System Technology, 2001, 25 (1): 1-7.
- [2] Iba K, Suzuki H, Egawa M, et al Calculation of Critical Loading with Noise Curve Using Homotopy Continuation Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (2): 584-590.
- [3] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (11): 91-97.
ZHAO Jin-quan, ZHANG Bo-ming Summarization of Continuation Power Flow and Its Application in Static Stability Analysis of Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (11): 91-97.
- [4] 余一平, 刘俊勇. 基于最优乘子的 PV 曲线求取方法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (4): 14-17.
YU Yi-ping, LIU Jun-yong Tracing PV Curves of Power Systems in Optimal Multiple Factor [J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26 (4): 14-17.
- [5] Dobson L. Observations on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electrical Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 39 (3): 240-243.

- [6] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 63-66.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Zero Eigen Value Method for Point of Collapse [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 63-66
- [7] Irisarri G D, Wang X, Tong J, et al. Maximum Load Ability of Power Systems Using Interior Point Non-linear Optimization Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 1622-1629.
- [8] 郭瑞鹏, 韩祯祥, 王勤. 电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 14-17.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang, WANG Qin. Nonlinear Programming Model & Algorithm for Point of Collapse [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 14-17.
- [9] 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, LU 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.
- [10] 胡林献, 陈学允. 崩溃点法交直流联合系统电压稳定性分析 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 395-398.
HU Lin-xian, CHEN Xue-yun. Point of Collapse Method Applied to Voltage Stability Analysis of AC/DC Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 395-398
- [11] Canizares C A, A lvarado F L, DeMarco C L. Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 673-683.
- [12] Canizares C A, A lvarado F L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
- [13] 顾成华, 胡林献. 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, 2003.
- [14] 王锡凡, 方万良, 等. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, et al. Modern Power System Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2004.

收稿日期: 2006-06-13; 修回日期: 2006-07-13

作者简介:

王秀婕 (1980 -), 女, 硕士研究生, 研究方向电压稳定及其优化问题; E-mail: wxjie-0829@163.com

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

李波 (1981 -), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统安全监控及状态检修。

An algorithm for voltage stability assessment of AC/DC power system based on continuation method and interior point theory

WANG Xiu-jie, LI Hua-qiang, LI Bo, ZENG Yong-bo

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A new segment solution for solving load margin of AC/DC power system is proposed in this paper based on continuation method and interior point algorithm. The load increment between the original point and the point when the DC control mode alters, can be solved with continuation method. As the Jacobian and Hessian matrix of AC/DC system is extrapolated from the coupled relationship of AC/DC network, the load margin of AC/DC system after DC control mode is adjusted can be calculated with interior point method. The method characterizes by its theoretical square convergence, convenience of considering restrain of DC system variable and adjusting rationally operation mode. Simulation results show the veracity of the solution.

Key words: AC/DC power system; voltage stability; continuation method; interior method; load margin

(上接第 21 页 continued from page 21)

Abstract: Various harmonics exist in the electrical power system. The harmonics include both integer harmonics and non-integer harmonics. It is hard to analyze all the harmonics accurately. In order to improve the precision of harmonic analysis, this paper presents a new algorithm after binary scale time windows FFT based on traditional algorithm. This algorithm considers the calculative time and precision well. The results of the test indicate that this algorithm can guarantee the accuracy and raise the resolving power in the harmonic analysis without increasing the hardware level and the time of calculation obviously. It can reduce the increasingly serious harmonic pollution in power system effectively.

Key words: harmonic; FFT; binary scale time windows