

交直流系统的快速复故障过滤算法

叶晓峻, 李华强, 赵周芳

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 高压直流输电的出现给电压稳定研究带来了新的挑战, 其中在线电压稳定分析是一项具有挑战性而又不可避免的工作。提出了系统发生鞍结分岔情况下, 以负荷裕度为排序依据的快速复故障过滤算法。在典型的直流控制方式下, 通过线性灵敏度法获得复故障时负荷裕度和电压的线性评估值。然后通过考虑潮流方程的非线性提出了非线性灵敏度算法, 并利用快速线搜索技术, 对线性评估值加以改进。通过对 IEEE 57 节点系统的仿真分析, 验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 交直流系统; 复故障; 鞍结分岔; 负荷裕度; 非线性灵敏度

Abstract: The emergence of high-voltage DC (HVDC) transmission brings new developing prospects for the study of voltage stability and the online voltage stability assessment is one of the most important research fields. Based on the conditions of saddle node bifurcations, a fast simultaneous fault filter algorithm is presented so as to calculate the load margin. Upon the condition of a typical DC control mode, the linear estimation values of the load margin and the voltage at the time of simultaneous fault is obtained by linear sensitivity method. Then, a nonlinear sensitivity method is proposed considering the nonlinearity of the power flow equations. By making use of the fast linear search technology, the linear estimation values are improved significantly. The accuracy and validity of the proposed method is verified by testing the IEEE 57-bus systems.

Key words: AC/DC power system; simultaneous fault; saddle node bifurcation; load margin; nonlinear sensitivity

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0016-04

0 引言

在交直流系统中, 直流输电改变了以往电力系统的结构, 从而使得系统的运行特性更加复杂。为了快速有效地进行复故障下的交直流系统在线电压稳定分析, 需要快速而精确的算法。

负荷裕度是最常用的电压稳定裕度指标。目前, 交直流系统负荷裕度求解方法主要有连续潮流法^[1]、崩溃点法^[2,3]和非线性规划法^[4]。文献[5]对不同控制方式下的交直流系统负荷裕度进行计算, 更符合实际的运行情况。由于负荷裕度的精确算法计算时间长, 很难达到在线应用的要求, 从而出现了针对事故过滤和排序的负荷裕度快速算法^[6-13], 包括迭代过滤法、曲线拟合法、特征值、线性和非线性灵敏度法。

然而, 以上算法都是针对交流系统故障分析, 而交直流系统复故障还未被充分研究。文献[9, 11]中线性灵敏度法具有计算原理简单、速度快的优

点。但是, 对于非线性较强的系统或严重故障时会产生较大的误差, 甚至使算法失效, 而文献[14]中应用非线性灵敏度法很好地解决了这个问题。

因此在文献[14]的基础上, 提出了交直流系统在典型直流控制方式(整流端定电流、逆变端定熄弧角)下, “N-2”复故障下基于负荷裕度评估的非线性灵敏度快速算法。算法的有效性通过 IEEE 57 母线系统模型的仿真得到了验证。

1 数学模型的建立

1.1 直流系统模型

交直流系统中某个节点含有换流站即关联直流端时, 如图 1 所示。

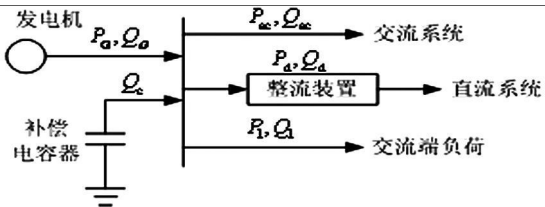


图 1 含有换流站节点的接线示意图

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。其交流端的节点功率方程式为

$$\begin{cases} P_G + P_1 = P_{ac} + P_d \\ Q_G + Q_1 = Q_{ac} + Q_d + Q_c \end{cases} \quad (1)$$

与交流系统相比, 该节点增加了换流器转换方程, 文献 [15] 作了详细介绍, 这里不再详述。

直流系统中, 一旦控制方式确定, 则注入任意一个换流站的功率只与该换流站的交流节点电压幅值和该换流站所处的直流系统中其他的换流站交流节点电压幅值有关^[16]。因此, 从交流侧注入任意换流站的功率可看作是某些交流节点电压幅值的函数, 而与交流系统的任何一个变量无关, 即直流系统已被等值掉了。这就把交直流系统的潮流计算问题简化为具有同样交流节点个数的一个纯交流系统的潮流计算问题。

结合文献 [4] 分析可知, 在采用内点法对交直流系统故障前负荷裕度求解时, 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, 而且计算过程中 Jacobi 及 Hessian 矩阵计算公式保持不变。

1.2 复故障的数学模型

引入负荷裕度参数 λ 和故障参数 p , 当 $\lambda=0$ 对应初始运行点时, 则 λ 的临界值即代表系统的负荷裕度。当 λ 为正时, 故障后系统保持稳定; 当 λ 为负时, 故障后将发生电压崩溃。 $p^{(k)}=0$ 代表故障 k 前的条件; $p^{(k)}=1$ 代表故障 k 后的条件; 上标 k 意味着该系数与故障相关。

支路故障: 为了表示支路故障, 引入故障参数 $p^{(k)}$ 来表达每条支路导纳 $(1-p^{(k)})y_{ij}$, 其中 y_{ij} 代表故障线路的导纳。

发电机故障: 通常情况下故障发电机被视为输出为 0 的 PQ 发电机, 因此当一台 PV 发电机发生故障, 必须把条件由 PV 转换为 PQ。然而, 这将在采用灵敏度分析时出现问题, 因为故障前、后潮流方程本身将会变化从而影响计算的快速性。故此假定所有发生故障的发电机在故障前都为 PQ 发电机, 而且故障发电机的有功功率损耗都能够通过包括平衡节点发电机的其他非故障发电机平衡。

从而得到同时包含发电机和支路故障参数的扩展潮流方程如下。

$$f(x, \lambda, p) = y_0(p) + \lambda y_d(p) - g(x, p) = 0 \quad (2)$$

其中, $x \in R^n$ 为状态参数; $\lambda \in R^1$ 为反映负荷水平的参数; $y_d \in R^m$ 为负荷变化方向; $y_0(p) + \lambda y_d(p)$ 是发电机的节点注入, 它包含表示发电机故障的参数; $g(x, p)$ 是节点功率注入, 它包含了表示支路故障的参数。因此, 式 (2) 可以同时表示发电机和支路两种故障情况。这是所提出的潮流数学模型的关键之处。

2 交直流系统事故前预处理

2.1 原始一对偶内点法求临界点

对于鞍结分岔, 在临界点处, 存在下列方程组。

$$f(x, \lambda, p) = 0 \quad (3)$$

$$\omega^T f = 0 \quad \|\omega\| \neq 0 \quad (4)$$

或

$$f_v = 0 \quad \|v\| \neq 0 \quad (5)$$

式中, w 、 v 分别是函数 $f(x, \lambda, p)$ 的对应于变量 x 的雅可比矩阵的零特征值的左特征向量和右特征向量。

利用原始一对偶内点法精确求解交直流系统的故障前电压稳定临界点^[4]。求得故障前崩溃点处直流线路的注入功率, 将直流系统换流站处理成接在相应交流节点上的一个等效 P、Q 负荷, 然后进行复故障过滤和排序。

2.2 预处理具体步骤

综上所述, 特做预处理如下。

- 1) 用内点法计算交直流系统故障前的 λ_c 、 x_c
- 2) 计算崩溃点处的直流支路两端功率作为节点注入功率, 将系统转化为纯交流系统;
- 3) 计算临界点所有发电机的无功功率输出;
- 4) 把所有的发电机节点当作 PQ 节点进行处理, 基态情况下的无功功率输出通过下式计算得到: $Q_{gi} = Q_{gi} / (1 + \lambda)$ 。
- 5) 计算雅可比矩阵及其最小奇异值对应的左、右特征向量 w 、 v 。

以上的预处理过程只进行一次, 所得 λ_c 、 x_c 、 w 、 v 适用于所有故障后计算。

3 基于负荷裕度的故障评估

首先, 通过线性灵敏度法获得复故障时负荷裕度和电压的线性评估值。其次, 通过考虑潮流方程的非线性提出了非线性灵敏度算法, 并利用快速直线搜索

技术得到满意的结果。

3.1 线性灵敏度评估

方程 (3)~(5)在故障前分岔点 $\lambda=\underline{\lambda}$, $\underline{x}=\underline{x}$ $\underline{p}=0$ 附近线性化,并将 $\Delta \underline{p}=1$ 代入,获得如下方程。

$$H \begin{Bmatrix} \Delta \underline{x} \\ \Delta \underline{y} \end{Bmatrix} = \underline{r}^{(k)} \tag{6}$$

其中,

$$H = \begin{bmatrix} -\underline{f}_{\underline{x}} & -\underline{f}_{\underline{\lambda}} \\ \underline{\omega}_i^T \underline{f}_{\underline{x}} & 0 \end{bmatrix}; \underline{r}^{(k)} = \begin{bmatrix} \underline{f}_{\underline{p}} \\ \underline{\omega}_p^T \underline{f}_{\underline{p}} \end{bmatrix};$$

$\underline{f}_{\underline{x}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\underline{f}_{\underline{p}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\omega_i = \mathbb{R}^{1 \times 1}$ 为 ω 的第 i 个元素; n 为潮流方程 (3)的阶次。

由于有了 2.2 节的预处理,矩阵 H 成为了一个与故障无关的常系数矩阵,只是向量 $\underline{r}^{(k)}$ 与故障 k 有关。方程 (6)的阶次为 $n+1$,其解为故障后电压 $\hat{\underline{x}}$ 和负荷裕度 $\hat{\underline{\lambda}}$ 。

$$\hat{\underline{x}} = \underline{x} + \Delta \underline{x} \tag{7}$$

$$\hat{\underline{\lambda}} = \underline{\lambda} + \Delta \underline{\lambda} \tag{8}$$

本算法中,因为 H 是常数矩阵,所以对所有故障只需要做一次 LU 分解。只有回代才会用到不同的 $\underline{r}^{(k)}$ 。

3.2 引入非线性公式

首先定义以下函数。

$$\lambda = \frac{\omega^T (g(\underline{x}, 1) - \underline{y}_0(1))}{\omega^T \underline{y}_d(1)} = F(\underline{x}) \tag{9}$$

上式由方程 (2)乘以 ω^T 后变换得到。该方程中乘子的选择不是关键,这里选取常规向量 ω 作为乘子。

3.3 线搜索技术

为了进一步改进评估,采用了引入优化乘子的线搜索技术。在得到 $\Delta \underline{x}$ 之后,用式 (10)代替式 (7)来表示电压预测值。

$$\tilde{\underline{x}} = \underline{x} + \mu \Delta \underline{x} \tag{10}$$

其中, μ 是待确定的最优乘子。将式 (10)代入式 (9),预测值的最后形式为 μ 的函数。

$$\hat{\underline{\lambda}} = F(\underline{x} + \mu \Delta \underline{x}) \tag{11}$$

为了确定 μ 的优化值,考虑以下最小化问题。

$$\min_{\mu} \varepsilon(\mu) \tag{12}$$

其中,

$$\begin{aligned} \varepsilon(\mu) &= f(\tilde{\underline{x}}(\mu), \hat{\underline{\lambda}}, 1)^T W f(\tilde{\underline{x}}(\mu), \hat{\underline{\lambda}}, 1) \\ &= \mu^4 a_4 + \mu^3 a_3 + \mu^2 a_2 + \mu a_1 + a_0 \end{aligned} \tag{13}$$

3.4 计算步骤

- 1)确定初始运行点条件;
- 2)计算故障前系统的 $\underline{x}$, $\underline{\lambda}$, ω , $\underline{y}$ 和直流支路功率

进行 2.2 节的预处理;

3)计算矩阵 H 并进行 LU 分解;

4)对于每一个故障 k 重复以下步骤。

- ①计算 $\underline{r}^{(k)}$;
- ②由式 (6)计算 $\Delta \underline{x}$;
- ③用式 (13)解出式 (12)的 μ ;
- ④由式 (11)得到 $\hat{\underline{\lambda}}$ 。

4 数值仿真

测试系统是由 IEEE 57 节点系统去掉原交流系统的 4—5 支路,替换为图 2 所示的直流支路 a—b,并假设母线上有两台容量相同的发电机 s—I 和 s—II 以及支路 i—I 和 i—II 都是双回线,其中 i 表示节点号。

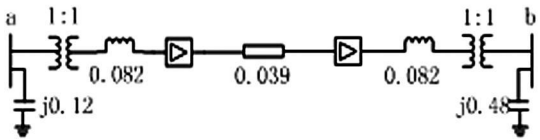


图 2 直流线路系统

直流系统运行于典型运行方式下,即整流侧定电流 (1 p.u.)、逆变侧定熄弧角 (15°)的控制方式。换流站变压器变比范围为 15% ,每挡调节量 1.5% 。系统部分直流参数见表 1。

表 1 系统部分直流参数

换流器	参数	
	θ_{min}	$I_b / p.u.$
整流器	5°	1
逆变器	15°	0.9

负荷裕度 ΔP 的标幺值可表示为

$$\Delta P = \lambda P_0 \tag{14}$$

其中, P_0 为 $\lambda=0$ 运行点的基态负荷。

下面列出 IEEE 57 母线系统 3 种复故障类型中最严重的情况,并且按照 ΔP 严重程度排序 (见表 2、3、4)。对误差进行如下定义。

$$Error\% = \frac{P_{estimate} - P_{exact}}{P_{exact}} \times 100 \tag{15}$$

其中, $P_{estimate} = P + \Delta P$ 是崩溃点处功率的估计值; P_{exact} 是它的精确值,通过内点法计算得到。

该方法编写的 Matlab 程序采用 Intel® Pentium® Dual E2160 @ 1.80 GHz 处理器进行计算。从表 2、3、4 看出,在采用新的算法之后,对于 IEEE 57 节点系统,最大误差为 -10.535% 。表 5 表明在单一故

障下,该算法所用的时间不到精确算法时间的 1/10。在保证严重事故集的负荷裕度精度的情况下有效降低误排序的可能。

表 2 IEEE 57 母线系统发电机复故障负荷裕度的估计值				
故障 (G-G)		精确值	文中方法	误差 /%
发电机 1	发电机 2			
8-I	8-II	-0.987	-0.424	5.132
12-I	12-II	2.343	1.742	-4.203
8-I	12-I	3.087	1.937	-7.644
3-I	8-I	4.951	4.001	-5.618
6-I	8-I	5.109	4.180	-5.443

表 3 IEEE 57 母线系统发电机和支路复故障负荷裕度的估计值				
故障 (G-B)		精确值	文中方法	误差 /%
发电机	支路			
8-I	1-15(I)	3.956	2.759	-7.522
8-I	8-9(I)	5.220	3.629	-9.262
12-I	1-15(I)	4.524	3.671	-5.175
8-I	1-16(I)	4.802	3.738	-6.384
8-I	2-3(I)	4.754	3.789	-5.774

表 4 IEEE 57 母线系统支路复故障时负荷裕度的估计值				
故障 (B-B)		精确值	非线性估计值	误差 /%
支路 1	支路 2			
35-36(I)	35-36(II)	-0.439	-1.240	-6.954
25-30(I)	25-30(II)	2.826	1.547	-8.651
37-38(I)	37-38(II)	4.243	2.855	-8.567
34-35(I)	34-35(II)	3.591	3.130	-2.965
36-37(I)	36-37(II)	5.061	3.268	-10.535

表 5 计算时间对比		
单一故障	精确算法 计算时间 /s	非线性灵敏度 算法计算时间 /s
IEEE 57 系统	0.345	0.025

5 结 论

在一种典型运行方式下,即整流侧定电流(1 p u)、逆变侧定熄弧角(15°)的控制方式,针对“N-2”发电机和支路复故障提出了一种快速过滤算法。通过 IEEE 57 节点系统对本算法进行了验证,最大误差不超过 11%,显而易见,该方法在大幅提高计算精度的同时满足了快速求解的要求,可用于在线计算。

参考文献

[1] Canizares C A, Alvarado F L. Point of Collapse and Continuation Method for Large AC/DC System [J]. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 1-8.
[2] 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.
[3] Canizares C A, Alvarado F L, DeMarco C L et al. Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems [J]. IEEE Trans on Power System, 1992, 7(2): 673-683.
[4] 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.
[5] 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, 22(34): 22-26.
[6] 邱晓燕, 李兴源, 林伟. 在线电压稳定评估中事故筛选和排序方法的研究. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 50-55.
[7] Z H, Jia B, Jeyasurya. Contingency Ranking for ON-line Voltage Stability Assessment. IEEE Trans on Power System, 2000, 15(3): 1093-1097.
[8] 冯治鸿, 刘取, 周双喜, 等. 多机电系统电压静态稳定性的特征结构分析法 [J]. 清华大学学报, 1991, 31(4): 19-27.
[9] I Dobson. Computing an Optimal Direction in Control Space to Avoid Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse [J]. IEEE Trans On Automatic Control 1992 (10): 1616-1620.
[10] N. Yorino, S. Harada, K. Hayashi, H. Sasaki. A Method of Voltage Stability Evaluation for Contingencies [C]. Bulk Power System Dynamics and Control IV, Santorini Greece August 1998.
[11] S. Greene, I. Dobson, F. L. Alvarado. Contingency Ranking for Voltage Collapse via Sensitivity from a Single Nose Curve [J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(1): 232-240.
[12] Scott Greene, Ian Dobson. Voltage Collapse Margin Sensitivity Methods Applied to the Power System of Southwest England [D]. Madison USA: Electrical & Computer Engineering Department University of Wisconsin-Madison, 1998.
[13] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种用于预防支路型失稳故障的灵敏度方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 69-73.
[14] Yorino N, Li H Q, Harada S et al. A Method of Voltage Stability Evaluation for Branch and Generator Outage Contingencies [J]. IEEE Trans on Power System, 2004, 19(1): 252-259.
[15] 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 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
[16] 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.

(收稿日期: 2009-10-22)