

# 持续故障轨线位能边界曲面出口识别方法研究

赵庆生, 刘 笙, 陈 陈

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 在电力系统动态安全分析中, 基于能量函数的 PEBS/BCU 方法应用时, 识别穿越 PEBS 界面的出口点方法包括射线法和梯度法。鉴于这两种方法应用的局限性, 论述了新的动态梯度法, 以提高识别出口点的准确性。并以电科院 6 机 22 节点系统为例进行了主导不稳定平衡点的计算。

关键词: 能量函数; 暂态稳定; PEBS/BCU 方法; 动态梯度法

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)04-0006-03

## 0 引言

电力系统在线动态安全分析与控制的方法包括数值仿真方法、基于暂态能量函数的直接法与混合法、模式识别与人工智能方法以及并行计算方法等。数值仿真方法仍然是最可靠的方法, 在线应用时存在计算负担。暂态能量函数方法基于现代动力系统稳定理论, 具有估价稳定程度的定量性与计算快速性的优点, 因而成为在线动态安全分析的主要方法。

位能边界曲面 (PEBS) 法<sup>[1]</sup>和基于稳定域边界的主导不稳定平衡点 (BCU) 法<sup>[2]</sup>是目前直接法中暂态稳定性在线估计的主要方法。PEBS 方法是以持续故障轨线在角度空间的投影上寻找达到事故后系统的 PEBS 的出口点 (EP)。而 BCU 方法则在此基础上, 以出口点为初值, 积分事故后梯度系统方程, 直至一最小梯度点 (MGP), 以此最小梯度点为初值, 解事故后功率偏差量方程, 得到梯度系统的主导不稳定平衡点 (CUEP), 以确定临界能量。

由此看出, 出口点的识别问题在 PEBS/BCU 方法的应用中起到非常关键的作用。目前常用的出口点判别方法有两种, 即射线法和梯度法<sup>[3]</sup>。鉴于这两种方法识别出口点精度不高, 本文论述了新的动态梯度法<sup>[4]</sup>, 它是由 Scruggs 在 2001 年提出的, 是一种新的出口点判别方法, 能够提高识别出口点 (EP) 及其计算主导不稳定平衡点 (CUEP) 的精度和效率。本文利用此动态梯度法进行了多机系统的仿真, 验证了此方法的可行性。

## 1 系统模型

当电力系统用经典模型表示, 在角度中心参考坐标 (COA) 下,  $n$  机系统方程为:

$$\begin{aligned} M_i \ddot{\delta}_i &= P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} = f_i(\delta) \\ \dot{\delta}_i &= \tilde{\omega}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

这里:

$$\begin{aligned} P_i &= P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \\ P_{ei} &= \sum_{j=1}^n C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij} \\ M_T &= \sum_{i=1}^n M_i \\ P_{COA} &= \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ei}) = \sum_{i=1}^n P_i - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{ij} \\ C_{ij} &= E_i E_j B_{ij}, \quad D_{ij} = E_i E_j G_{ij}, \quad ij = i - j \end{aligned}$$

式中:  $E_i$  表示第  $i$  机暂态电抗后的电势;  $P_{mi}$  表示第  $i$  机的机械功率输入;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  表示收缩到发电机内节点的支路电抗和电纳;  $M_i$  表示第  $i$  机的惯性常数;  $\delta_i$ 、 $\tilde{\omega}_i$  分别为 COA 坐标下的发电机  $i$  的角度和角速度。

对于原始系统 (1) 的梯度系统可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} = f_i(\delta) \\ \dot{\omega}_i &= - \sum_{i=1}^{n-1} M_i \omega_i / M_n \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (2)$$

## 2 点积公式<sup>[3]</sup>

在应用 PEBS/BCU 方法时, 以持续故障轨线在角度空间的投影上寻找达到事故后系统的 PEBS 的出口点 (EP) 判别方法通常有两种, 即射线法和梯度法。下面的式 (3) 是系统的位能函数。式中  $\delta_i^s$  表示事故后系统的稳定平衡点。

$$V_{PE}(\delta) = - \sum_{i=1}^n \int_{\delta_i}^{\delta_i^s} f_i(\delta) d \delta_i \quad (3)$$

对于射线法,若考虑转移电导,式中曲线积分与路径有关。在空间用线性路径来近似,可以得到点积公式:

$$\mu_{\text{ray}} = - \sum_{i=1}^n f_i(\cdot) \cdot (i - i^s) \quad (4)$$

对于梯度法,需要找到一点位能对时间的偏导数  $\frac{dV_{PE}}{dt} = 0$ 。此时忽略转移电导,曲线积分与路径无关,PEBS上的点满足判据:

$$\mu_{\text{grad}} = \frac{dV_{PE}}{dt} = - \sum_{i=1}^n f_i(\cdot) \cdot \tilde{i} \quad (5)$$

所以,如果  $\mu_{\text{ray}} > 0$  或  $\mu_{\text{grad}} > 0$ ,则故障轨线在 PEBS 内;如果  $\mu_{\text{ray}} < 0$  或  $\mu_{\text{grad}} < 0$ ,则故障轨线已穿过 PEBS 界面。

### 3 动态梯度法<sup>[4]</sup>

上述两个点积公式射线法和梯度法应用时,持续故障轨线  $(t)$  和 PEBS 正交的假设难以证明,因而影响了出口点判别的准确性。虽然该假设对于故障后轨线是正确的,但是对于持续故障轨线却不尽合理。原因有下面两点<sup>[4]</sup>: 众所周知,暂态能量在故障发生时注入系统,但是最大暂态位能在故障轨线穿过 PEBS 时出现的观点没有合理的物理解释; 在持续故障过程中,暂态位能不断增加直到 PEBS,这一假定也不正确。

一般情况下,利用点积公式能够找到位能的局部最大值,得到出口点。但是,在没有找到位能的局部最大值时,点积公式也可能变号。这时就要用到新的出口点判别方法——动态梯度(DG)法。沿着持续故障轨线不断计算新的状态  $s^1$  和事故后稳定平衡点  $s^2$  之间的角度空间距离,见式(6)。如果角度空间距离增加,则判断持续故障轨线已经穿过 PEBS。图1给出了动态梯度法应用示意图。图中  $s_i^1$  表示事故前系统的稳定平衡点。

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (i - i^s)^2} \quad (6)$$

动态梯度法判断轨迹状态  $^0$  位于 PEBS 内外的步骤如下:

- 1) 计算从事后稳定平衡点  $s^2$  到当前轨迹状态  $^0$  的角度空间距离  $d_1$ ,并且给定轨迹状态初始值  $= ^0$ 。
- 2) 在轨迹状态  $^0$  下,沿位能梯度系统计算标准化向量  $u$ 。

$$u = \frac{\cdot}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (i - i^s)^2}} \quad (7)$$

- 3) 利用式(7)在角度空间计算出新的角度值,见式(8)

$$_{\text{new}} = + u \cdot d_1 / h, \quad h > 0 \quad (8)$$

- 4) 重新给定轨迹状态  $=_{\text{new}}$ ,返回步骤2),迭代  $h$  次(一般取  $h = 3$ )。

- 5) 迭代完成后,重新计算  $s^2$  到新轨迹状态  $_{\text{new}}$  的角度空间距离  $d_2$ ,并计算式(9)。

$$\mu_{DG}(^0) = d_1 - d_2 \quad (9)$$

从而得出结论:如果  $\mu_{DG} > 0$ ,则  $^0$  在 PEBS 之内;相反,如果  $\mu_{DG} < 0$ ,则  $^0$  在 PEBS 之外。也可以判断出持续故障轨线是否已经穿过 PEBS 界面。

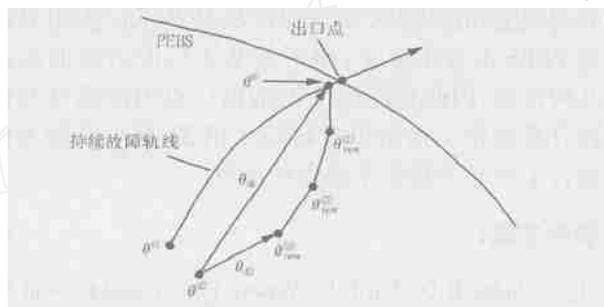


图1 动态梯度法

Fig. 1 Dynamic gradient method

可以看出,动态梯度法的应用包含以下几个特点: DG法是基于位能边界曲面 PEBS 本身来定义,而不是基于位能边界曲面的几何性质; DG法定义时和故障情况无关,所以能够得出任意故障持续轨线的精确出口点; 比较射线法和梯度法而言,DG法在保证准确性的同时也提高了计算效率。

### 4 算例

为了验证上述方法,本文以电科院6机22节点系统为例计算出支路故障时系统的主导不稳定平衡点(CUEP)。故障形式取三相对称短路,保护装置在一定时刻后自动操作切除故障所在线路。表1为本文 PEBS/BCU 法计算得到的不同故障操作下 CUEP 的比较结果。该 PEBS/BCU 法以故障点是否发生于机端为标记,若是,则采用 PEBS 方法确定 CUEP;若否,则采用 BCU 方法确定 CUEP。特别注明,表格中符号 \* 表示故障点,G表示机端故障,N表示网络中故障。

表 1 不同故障操作下 CUEP 的比较

Tab. 1 Comparison of CUEP in different faults

(9)

发电机号	CUEP/ (°)						
	8 <sup>+</sup> - 9N	8 <sup>+</sup> - 22N	9 <sup>+</sup> - 7G	9 <sup>+</sup> - 22G	16 <sup>+</sup> - 19N	16 <sup>+</sup> - 20N	19 <sup>+</sup> - 16G
1	- 2.130	28.567	13.432	28.199	- 16.720	- 14.789	- 0.269
2	126.335	124.464	120.602	124.499	3.622	4.632	5.756
3	- 31.923	- 67.584	- 46.902	- 66.426	- 26.270	- 29.074	- 20.984
4	- 10.343	- 34.021	- 23.941	- 34.786	1.297	4.389	137.419
5	- 17.718	- 43.084	- 32.479	- 43.767	121.638	117.772	- 13.642
6	- 36.415	- 61.633	- 50.454	- 62.627	- 173.321	- 164.291	- 32.999

## 5 结论

本文研究了识别穿越 PEBS 界面的出口点的新方法,即动态梯度法。给出了能量函数 PEBS/BCU 方法应用时出口点识别算法的具体步骤。比较常用的射线法和梯度法,动态梯度法是基于位能边界曲面 PEBS 本身来定义,而不是基于位能边界曲面的几何性质,因此它能保证识别出口点的准确性和提高计算效率。最后以电科院 6 机 22 节点系统为例进行了主导不稳定平衡点的计算。

### 参考文献:

- [1] Chiang H D, Wu F F, Varaiya P P. Foundations of the Potential Energy Boundary Surface Method for Power System Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1988, 35(6):712-728.
- [2] Chiang H D, Wu F F, Varaiya P P. A BCU Method for Di-

rect Analysis of Power System Transient Stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3):1194-1208.

- [3] Pai M A. Power System Stability Analysis by the Direct Method of Lyapunov[M]. New York: North Holland Publishing Company, 1981.
- [4] Scruggs J T, Mili L. Dynamic Gradient Method for PEBS Detection in Power System Transient Stability Assessment[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(2):155-165.

收稿日期: 2004-06-08; 修回日期: 2004-08-10

### 作者简介:

赵庆生(1969-),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定及控制; E-mail: zhaogs1996@sohu.com

刘 笙(1933-),男,教授,IEEE 高级会员,研究方向为电力系统稳定及控制;

陈 陈(1938-),女,教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定及控制。

## Detecting method for PEBS in dynamic security assessment

ZHAO Qing-sheng, LIU Sheng, CHEN Chen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In power system dynamic security assessment, based on the PEBS/BCU method, the dominant methods for detecting the exit point across PEBS are the ray and gradient methods. For improving the reliability of PEBS detection, a novel dynamic gradient method is illustrated in this paper. The calculating results for identifying CUEP are given in the six generator twenty-two bus test system.

**Key words:** energy function; transient stability; PEBS/BCU method; dynamic gradient method

## 许继 WFB - 800 发变组保护进入 1 000 MW 机组市场

继 2004 年许继 WFB - 800 微机发变组保护进入 600 MW 机组保护市场后,2005 年初就首创新记录,在顺利中标洛阳首阳山 2 × 600 MW 机组保护后,广东大唐潮州三百门电厂 2 × 1 000 MW 机组确定采用许继 WFB - 800 发变组保护装置,这是目前国内单机容量最大的机组,许继在国内首先成为 1 000 MW 容量机组保护的供货厂家,许继公司在特大机组保护方面又上了一个新台阶。