

# 基于 PEBS法的暂态能量裕度灵敏度快速计算

王宗义<sup>1</sup>, 郭志忠<sup>1, 2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 许继电力研究院, 北京 100085)

**摘要:** 提出了一种基于 PEBS法暂态稳定分析的能量裕度灵敏度计算方法。该方法以系统故障前稳定平衡点作为暂态势能参考点,沿持续故障轨迹采用数值方法计算暂态势能。在系统持续故障仿真和灵敏度动态方程计算过程中,引入高阶 Taylor级数展开技术,可以在保持计算精度的前提下提高计算步长,显著提高计算速度。将到达临界势能点的判据展开以时间为自变量的多项式形式,通过解方程求得到达临界势能点的时间,从而快速确定临界势能点的位置。提出的能量裕度灵敏度分析方法包括两方面:计算故障前机组机械注入功率变化对能量裕度的灵敏度,用于指导预防控制;计算故障切除后的控制措施对稳定裕度的影响,用于指导紧急控制。New England 10机系统算例验证了该方法的有效性。

**关键词:** 暂态稳定; 能量裕度灵敏度; 势能界面法; Taylor级数扩展

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)02-0024-05

## 0 引言

暂态稳定灵敏度分析揭示系统在某一运行状态的特定故障模式下,控制变量变化与稳定指标变化之间的定量关系。灵敏度的求取是制定稳定控制措施及计算稳定运行极限的基础。灵敏度计算的方法随着暂稳分析方法的不同而有所不同。文献 [1~5] 基于暂态能量函数法计算能量裕度的灵敏度,分别针对经典模型<sup>[1,2,5]</sup>和结构保留模型<sup>[3,4]</sup>,此类方法有一个共同的前提假设即控制变量变化时系统的失稳模式保持不变。计算不稳定平衡点处功角对控制量的灵敏度,需要求解灵敏度方程组,存在收敛性问题。轨迹灵敏度方法<sup>[6~8]</sup>来自于控制理论中微分代数方程的灵敏度计算,此方法的特点是将系统沿着动态运动轨迹进行线性化,而不是在一个平衡点附近线性化。理论上该方法适用于任何系统模型和任意的控制措施,可以计算对任何变量(包括系统初始状态、系统参数以及其它控制变量)的灵敏度,计算量大是其无法逾越的障碍。将时域仿真法和暂态能量函数法相结合而产生的混合法<sup>[9,10]</sup>,能够计算稳定裕度指标,其灵敏度分析需要进行两次暂态稳定计算,得到稳定指标与控制量之间的近似线性关系,进而通过内插或外推的方法来得到需要的稳定极限,这种方法的结果准确性有保证,缺点也是计算量大。

灵敏度分析作为一种近似线性化手段,为稳定控制提供一个准确的指导方向,在线安全分析对灵

敏度计算速度和计算方法的鲁棒性提出了更高的要求。基于以上观点,本文依托暂态稳定分析的 PEBS法,采用相对简化的系统模型,并利用高阶 Taylor级数展开技术,提出了一种能量裕度灵敏度快速计算方法。

本文首先分析了将 Taylor级数扩展技术<sup>[11]</sup>应用于采用经典模型的系统轨迹仿真和灵敏度动态方程解算的数学模型,随后提出了基于 PEBS法的分别针对机组机械注入功率变化和故障切除后的新的网络操作对能量裕度的灵敏度分析方法,并提出了临界势能点快速求取方法。最后 New England 10机系统算例证明了提出方法的有效性。

## 1 数学模型及 Taylor级数展开技术

发电机采用暂态电抗  $X_d'$  后的暂态电势  $E$  保持不变的经典模型,负荷采用恒阻抗形式,网络收缩于发电机内节点。对于  $n$  台发电机系统,在惯性中心坐标下,第  $i$  台发电机转子运动方程为:

$$\dot{\delta}_i = \tilde{\omega}_i \quad (1a)$$

$$\tilde{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} \sum_{j=1}^n (P_j - P_{ej})) \quad (1b)$$

其中:  $\delta_i$  和  $\tilde{\omega}_i$  分别为第  $i$  台发电机在惯性中心坐标下的功角和转速,  $P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii}$ ,  $P_{mi}$  和  $P_{ei}$  分别为发电机机械输入功率和电气输出功率。

$$P_{ei} = \sum_{j=1, j \neq i}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

其它说明依照惯例或见文献 [12]。令

$$S(ij(t)) = \begin{bmatrix} \cos ij(t) \\ \sin ij(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

容易证明

$$S^{(m)}(ij(t)) = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \sum_{k=0}^{m-1} C_{m-1}^k \cdot S^{(m-k)}(ij(t)) \cdot S^{(k)}(ij(t)) \quad (4)$$

由于  $P_{ei} = \sum_{j=1, j \neq i}^n [D_{ij} C_{ij} \begin{bmatrix} \cos ij \\ \sin ij \end{bmatrix}]$ , 利用上式有:

$$P_{ei}^{(m)}(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^n \{ [C_{ij} - D_{ij}] \sum_{k=0}^{m-1} [C_{m-1}^k \cdot S^{(m-k)}(ij(t)) \cdot S^{(k)}(ij(t))] \} \quad (5)$$

对式(1b)两边对时间  $t$  求导,得

$$\frac{\partial P_{ei}^{(m)}}{\partial t} = \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^n P_{ej}^{(m-2)}(t) - \frac{1}{M_i} P_{ei}^{(m-2)}(t) \quad (6)$$

在故障初始时刻,  $i, \tilde{i}$  由故障前系统状态决定,由式(1)得  $i$  的一阶和二阶导数,利用低阶导数由式(2)~(6)可递推求得  $i$  的高阶导数。已知  $t$  时刻  $i$  的各阶导数,根据 Taylor公式,  $t + \Delta t$  时刻  $i, \tilde{i}$  的值可求。由此类推,系统运动轨迹上任何时刻  $i, \tilde{i}$  的值及其各阶导数可求。

在 PEBS法暂态稳定分析中,系统沿持续故障轨迹到达临界势能点的判据为:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n f_i^{PF}(t) \cdot \tilde{i} = 0 \quad (7)$$

其中:  $f_i^{PF}(t) = P_{ei}^{PF} - P_{ei}^{PF} - \frac{M_i}{M_T} \sum_{j=1}^n (P_j^{PF} - P_{ej}^{PF})$ , 上标  $PF$  表示对应故障后网络参数。利用沿持续故障轨迹仿真过程中求得的某一时刻  $i, \tilde{i}$  对时间的各阶导数值,将  $F(t)$  展开成关于时间的多项式。

$$F^{(m)}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^m [C_m^k f_i^{PF(k)}(t) \cdot S^{(m-k)}(ij(t))] \quad (8)$$

$$f_i^{PF(k)}(t) = \frac{M_i}{M_T} \sum_{j=1}^n P_{ej}^{PF(k)}(t) - P_{ei}^{PF(k)}(t) \quad (9)$$

其中:  $P_{ei}^{PF(k)}(t) (i=1, \dots, n)$  计算同式(5),采用故障后的网络参数。求解多项式方程  $F(t) = 0$ , 可以快速求得系统到达临界势能点的时间  $t_0$ , 计算  $t_0$  时刻的功角值,可得到临界势能点。

进行灵敏度分析时,需要计算系统轨迹上状态量对控制量的偏导数随时间的变化情况。对式(1)两边对控制变量  $\delta$  求偏导,得

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta \\ \delta \end{bmatrix} = \frac{\partial \tilde{\delta}}{\partial \delta} \quad (10a)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta \\ \delta \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \left[ \frac{\partial P_{mi}}{\partial \delta} - \frac{\partial P_{ei}}{\partial \delta} - \frac{M_i}{M_T} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial P_{mj}}{\partial \delta} - \frac{\partial P_{ej}}{\partial \delta} \right) \right] \quad (10b)$$

式(10)即为灵敏度动态方程。

其中:  $\partial \delta / \partial \delta$  由故障前系统潮流方程求得,而  $\partial \tilde{\delta} / \partial \delta = 0$ 。式(10)两边分别对时间求导,得

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} \right)^{(m)} = - \frac{1}{M} \left( \frac{\partial P_{ei}}{\partial \delta} \right)^{(m-2)} + \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial P_{ej}}{\partial \delta} \right)^{(m-2)} \quad (11)$$

其中:  $\partial P_{ei} / \partial \delta$  可写为如下形式,

$$\frac{\partial P_{ei}}{\partial \delta} = \sum_{j=1, j \neq i}^n \left[ \frac{\partial D_{ij}}{\partial \delta} \frac{\partial C_{ij}}{\partial \delta} \begin{bmatrix} \cos ij \\ \sin ij \end{bmatrix} + \sum_{j=1, j \neq i}^n [C_{ij} - D_{ij}] \begin{bmatrix} \cos ij \\ \sin ij \end{bmatrix} \frac{\partial ij}{\partial \delta} \right] \quad (12)$$

$\partial P_{ei} / \partial \delta$  对时间  $t$  的各阶导数可由与式(5)相同的推导方法得到。通过式(10)~(12),可递推求得  $\partial \delta / \partial \delta$ 、 $\partial \tilde{\delta} / \partial \delta$  对时间  $t$  的各阶导数,利用 Taylor公式可求得在下一时段的价值,反复应用可求得系统运动轨迹上任一时刻的值。

## 2 暂态能量裕度灵敏度分析

### 2.1 能量裕度对机组机械注入功率变化的灵敏度

本文采用故障前系统的稳定平衡点作为势能参考点,文献[13]指出选择故障前稳定平衡点比选择故障后稳定平衡点在物理意义上更鲜明,这样选取可以避免故障后稳定平衡点的计算,而对暂态能量裕度的计算结果没有影响。

系统暂态势能通过梯形积分公式求取,在求得每一积分步长上的功角后,势能由式(13)求得。

$$V_p(t_{k+1}) = V_p(t_k) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [f_i^{PF}(t_{k+1}) + f_i^{PF}(t_k)] [i(t_{k+1}) - i(t_k)] \quad (13)$$

其中:  $k$  为积分步长编号,  $t_0$  为系统故障初始时刻。

$$V_p(t_0) = - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [f_i^{PF}(t_0) + f_i^{PF}(t_0)] [i(t_0) - i(t_0)]$$

求得临界势能点后,系统的稳定裕度见式(14),上标  $u$  和  $cl$  分别表示临界势能点和故障切除点。

$$V = V_{PE}^u - V_{KE}^{c1} - V_{PE}^{c1} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{c}_i^2 - \sum_{i=1}^n \int_{c_i^1}^y f_i^{PF}(\cdot) d_i \quad (14)$$

当控制量为机组机械注入有功功率时,假设系统网损不变,机组机械注入功率变化引起的不平衡功率由平衡机承担,有:

$$\frac{\partial P_{mi}}{\partial j} = \begin{cases} 1 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j, i = \text{slack node}) \\ -1 & (i \neq j, i = \text{slack node}) \end{cases} \quad (15)$$

算例表明,当机组有功出力调整引起系统运行点变化不大时,此种近似假设带来的误差可以接受。

在故障初始时刻,  $\partial \tilde{c}_i / \partial t = 0$ , 即  $(\partial \tilde{c}_i / \partial t)^{(1)} = 0$ ,  $\partial \tilde{c}_i / \partial t$  由系统初始状态求得, 这样  $(\partial \tilde{c}_i / \partial t)^{(2)}$  可求。利用第 1 节的方法, 可递推求得  $\partial \tilde{c}_i / \partial t$  对  $t$  的高阶导数。反复应用可求得各个积分步长上  $\partial \tilde{c}_i / \partial t$ 、 $\partial \tilde{c}_i / \partial t$  的值。式 (14) 右手项第一部分对  $\tilde{c}_i$  的偏导数可由求导的链式法则求得, 第二部分可表示为如下形式:

$$V_p = - \sum_{i=1}^n \int_{c_i^1}^y f_i^{PF}(\cdot) d_i + \sum_{j=1}^{m-1} \int_{c_j^1}^{j+1} f_j^{PF}(\cdot) d_j + \sum_{m}^y f_m^{PF}(\cdot) d_m \quad (16)$$

其中:  $m$  为故障切除点和临界势能点之间积分步长数。由莱布尼兹积分求导法则, 对式 (16) 两侧关于  $\tilde{c}_i$  求偏导, 整理得

$$\frac{\partial V_p}{\partial \tilde{c}_i} = - \sum_{i=1}^n \int_{c_i^1}^y f_i^{PF}(\cdot) \frac{\partial c_i^1}{\partial \tilde{c}_i} + \frac{\partial f_i^{PF}(\cdot)}{\partial \tilde{c}_i} d_i + \sum_{j=1}^{m-1} \int_j^{j+1} \frac{\partial f_j^{PF}(\cdot)}{\partial \tilde{c}_i} d_j + \frac{\partial f_m^{PF}(\cdot)}{\partial \tilde{c}_i} d_m + f_m^{PF}(\cdot) \frac{\partial c_m^{cr}}{\partial \tilde{c}_i} \quad (17)$$

则能量裕度对机组机械注入功率的灵敏度可求。

### 2.2 故障切除后控制措施对能量裕度的影响

切除故障后, 为保证系统稳定, 有时需要采取其它控制措施, 如投切线路或变压器、切除部分负荷以及基于 FACTS 元件 (TCSC, SVC 等) 的控制。采取控制措施会引起系统导纳矩阵的变化, 在暂态稳定分析时则表现为收缩节点导纳矩阵的元素发生变化。此类分析的目的, 是为了选择最有效的控制手段。

对于发电机数目为  $g$  母线数目为  $l$  的系统, 增广导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gl} \\ Y_{lg} & Y_{ll} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中:  $Y_{ll} = Y_{bus} + Y_{gen} + Y_{load}$ ,  $Y_{bus}$  为潮流计算时的导纳矩阵;  $Y_{gen}$  为对角阵, 与发电机相联的母线为发电机支路导纳, 其余母线为 0;  $Y_{load}$  为对角阵, 与负荷相联的母线为负荷导纳, 其余母线为 0;  $Y_{gg}$ 、 $Y_{gl}$ 、 $Y_{lg}$  分别为发电机导纳矩阵、发电机母线导纳矩阵和母线发电机导纳矩阵。收缩导纳矩阵为  $Y = Y_{gg} - Y_{gl} Y_{ll}^{-1} Y_{lg}$ 。采取稳定控制措施引起  $Y_{ll}$  变化,  $Y_{ll}^{-1}$  的变化量  $\Delta Y_{ll}^{-1}$  可以采用矩阵求逆的补偿法求解, 具体参照文献 [14]。收缩矩阵的变化量记为  $\Delta Y$ , 则有

$$\Delta Y = Y_{new} - Y_{old} = - Y_{gl} (Y_{ll, new}^{-1} - Y_{ll, old}^{-1}) Y_{lg} = - Y_{gl} Y_{ll}^{-1} \Delta Y_{ll} Y_{lg} = \{ G_{kl} + j B_{kl} \}_{g \times g} \quad (19)$$

对于此类问题, 最有效的方法是时域仿真法, 由于时域仿真法分析比较费时, 对于需要比较多种控制方案的场合, 没有优势。基于不稳定平衡点 (UEP) 的暂态能量函数灵敏度分析方法, UEP 计算存在收敛难问题。另外网络变化可能引起失稳模式 (MOD) 变化, 文献 [15] 对网络变化引起的 UEP 处的功角变化进行了分析, 改善了计算精度。总的来说此类方法依赖于 MOD 不变的假设, 会带来一定的误差。

系统在故障切除后是否稳定, 取决于系统在故障持续阶段积累的动能能否被系统消化。系统吸收动能的能力取决于系统从当前位置沿一定轨迹到达 PEB 的势能大小。不同的控制措施对应着不同的 PEB 位置, 本文沿持续故障轨迹计算各种控制措施下系统的临界势能。临界势能越大, 对系统稳定越有利。

不同的控制措施对持续故障轨迹没有影响, 只影响系统沿持续故障轨迹到达临界势能点的时间。假设不采取任何控制措施 ( $\Delta Y = 0$ ) 时系统沿持续故障轨迹到达临界势能点的时间已经求出, 由于收缩矩阵变化量  $\Delta Y$  引起的系统到达临界势能点的时间变化量  $\Delta t$  的近似值可通过对式 (7) 求全微分得到, 即

$$\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \left[ \frac{\partial F(\cdot)}{\partial G_{kl}} G_{kl} + \frac{\partial F(\cdot)}{\partial B_{kl}} B_{kl} \right] + \frac{\partial F(\cdot)}{\partial t} \Delta t = 0 \quad (20)$$

其中:

$$\frac{\partial F(\cdot)}{\partial G_{kl}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i^{PF}(\cdot(t))}{\partial G_{kl}} \tilde{c}_i(t) \quad (21)$$

$$\frac{\partial F(\cdot)}{\partial B_{kl}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i^{PF}(\cdot(t))}{\partial B_{kl}} \tilde{d}_i(t) \quad (22)$$

$$\frac{\partial F(\cdot)}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i^{PF}(\cdot(t))}{\partial j} \frac{d_j}{dt} \tilde{d}_i(t) + f_i^{PF}(\cdot(t)) \frac{d \tilde{d}_i(t)}{dt} \right\} \quad (23)$$

$$t = - \frac{\frac{\partial F(\cdot)}{\partial t}}{\frac{\partial F(\cdot)}{\partial G_{kl}} G_{kl} + \frac{\partial F(\cdot)}{\partial B_{kl}} B_{kl}} \quad (24)$$

利用计算持续故障轨迹时得到的功角的各阶导数,通过 Taylor公式可获得新的临界势能点的功角<sup>11</sup>,则采取控制措施后的能量裕度可由式(14)求得。一般情况下,能量裕度与控制量满足近似的线性关系,因此能量裕度的变化量与控制量的变化量相比,可求得能量裕度对此种控制措施的灵敏度。

在实际应用中,故障切除和采取其它控制措施之间往往有一定的时间间隔,间隔的大小直接影响系统是否稳定。本文的能量裕度虽然是在认为故障切除和采取新的控制措施同时发生的条件下求得的,但结果可以反映不同控制措施对系统稳定的影响程度,用于选择合适的控制方案,最终系统的稳定结果还需由时域仿真进行验证。

### 3 算例分析

本文提出的算法由 MATLAB 5.3 编程实现,选用 New England 10机系统<sup>[12]</sup>作为测试系统。

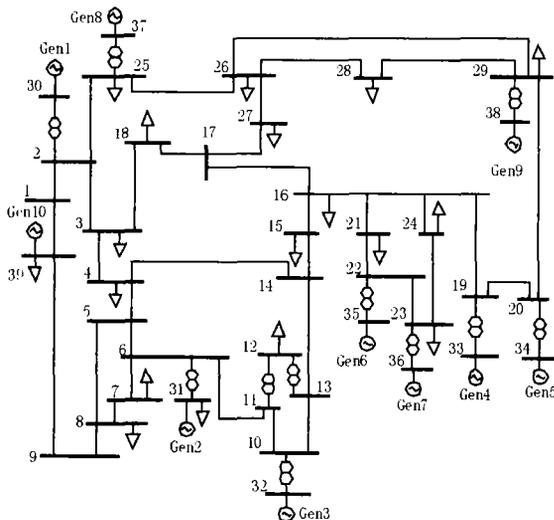


图 1 新英格兰 10机系统接线图

Fig 1 The 10-generator New England system connection

针对本测试系统,对不同的展开阶数和计算步

长组合进行分析, Taylor级数的展开阶数取 5,计算步长取 0.2 s,可以在保证计算结果准确度的前提下,保持较快的计算速度。针对文献[12]83页列出的 9种故障进行分析,计算临界切除时间。在计算结果完全相同的前提下,常规的 PEBS算法的积分步长取 0.01 s,平均每种故障的计算时间为 1.393 s,而本文方法的计算时间为 0.831 s,计算速度提高 40%。

为验证灵敏度结果的准确性,假设 14号母线发生三相短路,随后切除 14 - 15线路,临界切除时间为 0.247 s,故障切除时间取 0.34 s,能量裕度为 - 0.21,能量裕度对各机组机械注入功率的灵敏度结果见表 1,其中 1号机组为平衡机。

表 1 能量裕度对各机组机械注入功率的灵敏度

Tab 1 Sensitivity of energy margin with respect to mechanical input power of each generator

机组编号	灵敏度	机组编号	灵敏度
1	0.660 7	6	- 1.639 0
2	- 3.615 0	7	- 1.688 4
3	- 4.766 1	8	- 0.875 3
4	- 1.654 2	9	- 1.173 7
5	- 1.498 2	10	- 0.569 0

由表 1 可以看出, 2, 3号机组灵敏度绝对值较大,且为负值,表示减小出力有利于系统稳定。为简单起见,假设 2, 3号机组有功出力调整量相同,由 1号机组进行功率平衡。通过计算得到系统能量裕度为 0时的功率总调整量为 110 MW,而经过多次暂稳计算得到的功率总调整量为 117 MW,误差为 - 5.9%。

为比较故障切除后各种控制措施对稳定的作用,选取常用的基于 FACTS元件的线路串联电容补偿和节点无功补偿手段。为了便于分析,串联电容补偿度均取 50%,节点无功补偿电纳为 2.0 pu。

假设 14号母线发生三相短路故障,切除 14 - 15线路,临界切除时间为 0.247 s,故障切除时间为 0.26 s,能量裕度为 - 1.082 8。选取不同的线路分别进行串联电容补偿,计算能量裕度的变化量,排序后列于表 2。可以看出,线路 1 - 2, 8 - 9, 1 - 39的串联补偿作用比较明显,而 4 - 14, 6 - 11影响很小, 23 - 24, 13 - 14则对稳定不利。

假设 26号母线发生三相短路故障,切除 26 - 28线路,临界切除时间为 0.132 s,故障切除时间为 0.15 s,能量裕度为 - 0.811 8。选取不同的母线分别进行无功补偿,计算能量裕度的变化量,排序后列于表 3。所有选择的母线处无功补偿后都对稳定

有利,母线 28、29、38 补偿后作用比较明显。

表 2 串联补偿后能量裕度的变化量

Tab 2 Changes of energy margin for series compensation

序号	线路 编号	裕度 变化量	序号	线路 编号	裕度 变化量
1	1 - 2	0.759 9	6	21 - 22	0.066 5
2	8 - 9	0.659 7	7	4 - 14	0.007 2
3	1 - 39	0.425 8	8	6 - 11	- 0.000 9
4	3 - 4	0.278 0	9	23 - 24	- 0.021 4
5	9 - 39	0.258 0	10	13 - 14	- 0.059 7

表 3 节点无功补偿后能量裕度的变化量

Tab 3 Changes of energy margin for shunt compensation

序号	线路 编号	裕度 变化量	序号	线路 编号	裕度 变化量
1	28	1.539 9	6	25	0.550 5
2	29	1.454 5	7	37	0.512 6
3	38	1.298 0	8	17	0.506 5
4	26	0.760 2	9	18	0.472 9
5	27	0.641 1	10	3	0.414 0

#### 4 结论及展望

本文基于 PEB S法计算能量裕度对机组注入机械功率和故障切除后稳控措施的灵敏度,采用 Taylor级数展开技术模拟系统运动轨迹和动态灵敏度轨迹,提出了快速求得临界势能点的方法。该方法的特点是快速性和有效性,能够为预防控制和紧急控制提供指导方向和用于比较各种控制措施的作用。PEB S法的固有缺点是在某些情形下求得的临界势能不是很准确,迭代 PEB S法有助于提高精度,但计算量增加很多。提高方法的模型适用性和拓展应用范围(如用于计算输电能力)是下一步的研究方向。

#### 参考文献:

- [1] Vittal V, Zhou E Z, Hwang C, et al Derivation of Stability Limit Using Analytical Sensitivity of the Transient Energy Margin [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(4): 1363-1372.
- [2] Vittal V, D'souza R, Fouad A A. Analytical Sensitivity of Transient Energy Margin Including Second Order [A]. Proceedings of the 10th PSCC Graz(Austria): 1990. 481-486.
- [3] Shubhanga K N, Kulkarni A M. Application of Structure Preserving Energy Margin Sensitivity to Determine the Effectiveness of Shunt and Series FACTS Devices [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 730-738.
- [4] Shubhanga K N, Kulkarni A M. Stability-Constrained Generation Rescheduling Using Energy Margin Sensitivities [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1402-1413.
- [5] Song H, Kezunovic M. Stability Control Using PEB S Method and Analytical Sensitivity of the Transient Energy Margin [A]. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition New York: 2004.
- [6] Laufenberg M J, Pai M A. A New Approach to Dynamic Security Assessment Using Trajectory Sensitivities [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 953-958.
- [7] Hiskens I A, Pai M A. Trajectory Sensitivity Analysis of Hybrid Systems [J]. IEEE Trans on Circuits Systems I, 2000, 47(1): 204-220.
- [8] Nguyen T B, Pai M A. Dynamic Security-constrained Rescheduling of Power Systems Using Trajectory Sensitivities [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 848-854.
- [9] Maria G A, Tang C, Kim J. Hybrid Transient Stability Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 384-393.
- [10] Mansour Y, Aahedi E, Chang A, et al Hydro sOn-line Transient Stability Assessment (TSA) Model Development, Analysis, and Postprocessing [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 241-253.
- [11] 郭志忠,柳焯. 快速高阶 Taylor级数法暂态稳定计算 [J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(3): 7-15.
- GUO Zhi-zhong, LU Zhuo. A Fast Higher Order Taylor Series Method for Transient Stability Simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(3): 7-15.
- [12] 傅书边,倪以信,薛禹胜. 直接法暂态稳定分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- FU Shu-ti, NI Yi-xin, XUE Yu-sheng. Transient Stability Analysis by the Direct Method [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [13] 郭志忠,于继来,柳焯. 暂态能量函数的动力学意义思考 [J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 54-59.
- GUO Zhi-zhong, YU Ji-lai, LU Zhuo. Pondering on Dynamical Meaning of Transient Energy Function [J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 54-59.
- [14] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
- ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Electric Power Network Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [15] Chadalavada V, Vittal V. Transient Stability Assessment for Network Topology Changes: Application of Energy Margin Analytical Sensitivity [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1658-1664.

收稿日期: 2005-06-16; 修回日期: 2005-07-12

作者简介:

王宗义(1971-),男,博士研究生,研究方向为电力系统暂态稳定分析与控制;E-mail: zzwang0531@hotmail.com

郭志忠(1961-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统分析与控制、光学电流互感器等。

(下转第 74 页 continued on page 74)

- Network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996
- [6] 王克英, 穆钢, 陈学允. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方案研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 14-16
- WANG Ke-ying, MU Gang, CHEN Xue-yun. Precision Improvement and PMU Placement Studies on State Estimation of a Hybrid Measurement System with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 14-16
- [7] 吴际舜. 电力系统稳态分析的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992

WU Ji-shun. Power System Stability by Computer[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992

收稿日期: 2005-05-23; 修回日期: 2005-08-11

作者简介:

路轶(1977-),男,硕士,工程师,从事电网调度自动化工作。

E-mail: luyi\_1230@hotmail.com

### Combined dispatcher training simulator(DTS) system based on internet

LU Yi, XIAO Lan, WANG Min-kun

(Dispatching Center of Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** This paper presents a new method of connection among DTS in dispatching centers to accomplish the combined anti-accident exercises. That is, the DTS of dispatching centers is connected by the internet technology, and the equivalent exterior grid is simulated by exchanging the power flow of the neighboring boundary node and tie line. Some solutions to simulation mode, event flow and so on of combined exercise are provided. As a result, the practice of DTS is promoted.

**Key words:** DTS; combined anti-accident exercises; internet

(上接第 28 页 continued from page 28)

### A fast method for sensitivity analysis of transient energy margin based on PEBS method

WANG Zong-yi<sup>1</sup>, GUO Zhi-zhong<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. XJ Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

**Abstract:** A novel method for transient energy margin sensitivity analysis based on PEBS method is proposed. In this method, the system pre-fault stable equilibrium point is selected as reference point of potential energy, and potential energy is computed along with the system fault-on trajectory by numerical method. In the process of system dynamic trajectory simulation and integration of sensitivity dynamic equations, Taylor series expansion technique is used to calculate the high order derivatives of rotor angles, speed and sensitivity variables with respect to time. Therefore, bigger simulation time step can be employed, which can improve computation speed while keeping normal calculating precision. By solving the polynomial equation with respect to the variable of time, which describes the criterion of the trajectory reaching the critical potential energy point, the critical potential energy can be attained rapidly. The proposed method for energy margin sensitivity analysis includes: energy margin sensitivity with respect to mechanical input power of generators before disturbance occurrence which is used for preventive control, and with respect to control actions after disturbance clearing which is used for emergency control. Simulation results on New England 10-generator system show this method is of good accuracy and the prospect of on-line application is bright.

**Key words:** transient stability; energy margin sensitivity; PEBS method; Taylor series expansion

## 《继电器》入选中国科技期刊精品数据库

近日,从《中国知识资源总库》编辑委员会传来喜讯,在《中国知识资源总库》专家委员会审核的近 8000 种期刊 10 年的引文分析与综合评价中,《继电器》入选 500 种科技类中国科技期刊精品数据库。这是《继电器》杂志在其发展历史上的又一里程碑。