

大电网暂态稳定紧急控制下切机量快速估计算法

任伟¹, 房大中¹, 陈家荣², 陈兴华³, 李传栋⁴

- (1. 电力系统仿真控制教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072; 2. 香港理工大学电机工程系, 中国香港特别行政区; 3. 广东省电力调度中心, 广东省 广州市 510600; 4. 福建省电力试验研究院, 福建省 福州市 350007)

A Fast Algorithm to Estimate Generation Capacity Tripped by Emergency Control for Transient Stability of Large Power System

REN Wei¹, FANG Da-zhong¹, CHEN Jia-rong², CHEN Xing-hua³, LI Chuan-dong⁴

- (1. Key Laboratory of Power System Simulation of Control (Tianjin University), Ministry of Education, Nankai District, Tianjin 300072, China; 2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, The Hong Kong SAR, China; 3. Guangdong Power Dispatch Center, Guangzhou 510600, Guangdong Province, China; 4. Fujian Electric Power Test & Research Institute, Fuzhou 350007, Fujian Province, China)

ABSTRACT: A hybrid method based fast algorithm to estimate generation capacity to be tripped that is suitable to emergency control is proposed. According to the conservation of corrected transient energy function (CTEF) the transient stability margins under different generation capacity to be tripped are defined. The definition process of stability margin under the stable case of the first swing is researched. Such a stability margin still possesses regularity while a certain variation of critical machines (CM) takes place. This method only need two simulation calculations the initial value of critical tripped generation capacity can be obtained. For different $N-2$ faults and tie-line fault occurred in Meizhou regional power network in Guangdong province, using the proposed algorithm the correct combination of generators to be tripped can be achieved, so the dispatcher's workload of solving generator combination to be tripped by traditional trial-and-error method can be reduced.

KEY WORDS: transient stability margin; hybrid method; emergency control; generator tripping control; security and stability control system (SSCS)

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目); (2004CB217904); 国家自然科学基金资助项目(50777046); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(06D0006)。

The National Basic Research Program(973 Program) (2004CB217904); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50777046); Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Higher Learning(06D0006).

摘要: 基于混合法提出了适合紧急控制的切机量快速估计算法。根据修正能量函数的守恒性定义了不同切除量下的暂态稳定裕度, 研究了在首摆稳定情况下稳定裕度的求取过程, 该稳定裕度在临界机群发生一定变化时仍具有规律性。该方法仅需 2 次仿真运算即可获得临界切除量初值。对广东梅州地区电网不同的 $N-2$ 故障断面故障进行了仿真, 结果表明, 该方法可以求得正确的切机组合, 减少了运行人员采用传统试探法求取切机组合的工作量。

关键词: 暂态稳定裕度; 混合法; 紧急控制; 切机控制; 安全稳定控制系统(SSCS)

0 引言

合理的安全稳定控制措施是电力系统第二、三道防线的核心内容^[1-2]。为保证各大电网的安全性与稳定性, 电力系统内安装了大量安全稳定控制装置^[3-4]。所有的控制策略均需离线制定并写入策略表以备在线使用。由于系统运行方式多变, 制定安全稳定控制策略表常常耗费极大的精力, 制定暂态稳定问题的控制措施更是如此。切发电机控制(简称切机控制)是安全稳定控制系统中最常采用的措施之一^[3-5]。本文研究的切机措施是指全局的暂态稳定控制策略, 区别于以往的单纯为保护本地发电机而设置的切机控制^[6]。在某些特殊网络结构或运行方式下, 切机控制是维护电力系统暂态稳定最有效的方法^[4-6]。紧急控制切机方案的研究主要包括以下几个方面。

1) 根据相关不稳定平衡点的拓扑特性, 确定控制方向(灵敏度)并把切除量的求解表示为优化问题^[7]。然而在大扰动下线性近似法的效果值得商榷, 大系统的相关不稳定平衡点也很难求得。

2) 系统的仿真计算方法包括扩展等面积法^[8-10]和混合法^[11]。这 2 种方法建立在对系统进行完全仿真之上, 没有限制系统的规模, 对不稳定轨迹的稳定裕度定义效果较好, 但是对稳定轨迹的裕度定义较困难^[12], 这是由电力系统本身的特点决定的。仿真计算方法还包括正向或逆向的轨迹灵敏度法^[13]。发电机功角运动轨迹仅是表象, 系统暂态失稳的本质是能量的吸引和分离^[14]。轨迹方法不能反映系统能量变化规律, 其效果有限。在此基础上定义的切除量求取优化问题必然受到收敛性和计算时间过长的制约。

3) 切机方案的在线研究与应用, 包括暂态能量函数法^[15-16]、在线实时扩展等面积法^[8-10]等。由于电力系统高度非自治, 稳定裕度可信性或轨迹的预测性有限。目前这 2 种方法可用于在线的粗略计算。单纯轨迹预测法仅适合于就地预测、就地控制。随着数据采集技术的突破, 状态估计和在线等值技术的发展, 以及控制变量参数稳定裕度的获得, 在线规模不再停留于小网, 在线分析也不再停留于研究阶段^[8,15,17], 安全稳定控制策略表也会实现实时更新。

本文将根据发电厂的实际特点和切机策略的要求, 采用基于仿真和修正暂态能量函数(corrected transient energy function, CTEF)的混合法^[18], 研究系统首摆不稳定和稳定情况下的稳定裕度, 并详细研究稳定轨迹和稳定裕度的计算过程。

1 紧急控制下的暂态稳定能量裕度

1.1 混合法

电力系统 n 台发电机的转子运动方程在惯性中心坐标系下可以表示^[18]为:

$$\begin{cases} M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) \equiv \tilde{P}_{acc,i} \\ \dot{\theta}_i = \tilde{\omega}_i \quad i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (1)$$

式中: M_i 为发电机 i 的惯性时间常数, $M_T = \sum_{i=1}^n M_i$;

$\tilde{P}_{acc,i}$ 为发电机 i 在惯性中心坐标系下的加速功率; θ_i 和 $\tilde{\omega}_i$ 分别为发电机 i 对系统惯性中心的角度和角速度。系统暂态动能表示^[19]为:

$$E_k = \frac{1}{2} M_{eq} \tilde{\omega}_{AB}^2 \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} M_{eq} = M_A M_B / (M_A + M_B) \\ \tilde{\omega}_{AB} = \tilde{\omega}_A - \tilde{\omega}_B \\ \tilde{\omega}_A = \sum_{i=1}^{A_n} M_i \tilde{\omega}_i / M_A & M_A = \sum_{i=1}^{A_n} M_i, \\ \tilde{\omega}_B = \sum_{i=1}^{B_n} M_i \tilde{\omega}_i / M_B & M_B = \sum_{i=1}^{B_n} M_i \end{cases} \quad (3)$$

式中 A_n 和 B_n 分别代表领先机群和剩余机群。系统的等值机方程为:

$$\begin{cases} M_{eq} \dot{\tilde{\omega}}_{AB} = \frac{M_{eq}}{M_A} P_A^{COI} - \frac{M_{eq}}{M_B} P_B^{COI} \equiv P_{ACC}^{AB} \\ P_A^{COI} = \sum_{i=1}^{A_n} (P_{mA} - P_{eA}), \quad P_B^{COI} = \sum_{i=1}^{B_n} P_{mB} - P_{eB} \end{cases} \quad (4)$$

系统暂态势能为^[18]:

$$E_p = \int_{\alpha_{sep}}^{\alpha} -P_{ACC}^{AB} d\alpha \quad (5)$$

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_A - \alpha_B \\ \alpha_A = \sum_{i=1}^{A_n} \delta_i M_i / M_A \\ \alpha_B = \sum_{i=1}^{B_n} \delta_i M_i / M_B \end{cases} \quad (6)$$

由式(2)~(5)的定义可知, 如果没有新的扰动, 系统修正暂态能量函数(CTEF)是守恒的^[18], 即:

$$T_{EF} = E_k + E_p = \text{常数} (\Delta E_k = -\Delta E_p) \quad (7)$$

1.2 大电网紧急控制量的能量裕度算法

由式(2)~(5)定义的暂态能量在稳定控制措施发生之后是守恒的, 但在切机前后, 系统发电机的维数会发生突变, 而且必然影响到临界机群的变化。在实际系统中, 每个电厂往往由多台发电机组成, 同一电厂相同容量的发电机运动行为相似。考虑到厂用电, 一般不把一个电厂的发电机全部切除。因此, 如果切除发电机台数很少, 那么可以认为临界机群和剩余机群变化有限, 在不同的临界机群上定义的稳定裕度在一定程度上可以互相比较。如果临界机群变化很大, 本算法将失效。

本文用 $F = \{f_1, f_2 \dots f_k\}$ 代表系统预想严重故障集合, 该集合中的任何故障都可能导致系统的暂态失稳。定义集合 $E_j = \{e_1^j, e_2^j \dots e_m^j\}$ 为预想故障 f_j 对应的 m 个候选切机措施。假设候选切机措施的灵敏度信息、故障清除时间和稳定措施动作时间已经确

定。已知严重故障 f_j 及故障清除时间 t_{cl} , 求在确定的切机动作触发时刻 t_{ec} 合适的切除量 P , 使系统恢复稳定。为计算合适的切除量, 需要求取不同切除量的对应稳定裕度。在稳定裕度下, 可以确定合适的切除容量。设切机灵敏度最大机组的切除量为 P_1 。不同切除量的暂态稳定裕度求取过程如下:

1) 从 F 中取出预想严重故障 f_j , 以实际的故障切除时间 t_{cl} 和稳控动作时间 t_{ec} , 以切除量 P_1 调用仿真软件对系统进行仿真, 直到以式(2)定义的动能达到最小值 $E_{k,min}^1$ 。如果首摆期间 E_k 达不到最小值, 转步骤 2); 否则保存 $E_{k,min}^1$ 和系统在 t_{ec}^+ 时刻的动能 E_k^1 , 保存被切除发电机在 t_{ec}^- 时刻的动能 ΔE_k^1 , 转步骤 3)。

2) 在某些特殊情况下, 无法得到首摆的最小动能, 这是因为故障非常严重, 以至于系统等值机无法减速。在这种情况下, 可以增加初始切除量 P_1 , 直到能够获得轨迹的动能最小值为止。如果仍不能得到 $E_{k,min}$, 就需要考虑采取其它紧急控制措施, 如切负荷等^[5]。

3) 在切除量为 P_1 的情况下, 如果首摆稳定^[18], 那么该切除方案就是最优结果, P_1 就是最佳切除量, 转步骤 7); 否则转步骤 4)。

4) 在切除量为 P_1 的情况下, 如果首摆不稳定, 稳定裕度表示为

$$\eta_1 = -E_{k,min}^1 \quad (8)$$

增加切除量并达到具有最大灵敏度切机子站的切除容量的 $1/3$ ^[3], 子站内部的机组选择按灵敏度顺序。这个切除方案对应的切除量作为 P_2 , 再次进行故障和稳定措施的仿真, t_{cl} 和 t_{ec} 保持不变, 保存 t_{ec}^+ 时刻的系统动能 E_k^2 和轨迹的最小动能 $E_{k,min}^2$, 计算并保存被切除发电机在 t_{ec}^- 时刻的动能 ΔE_k^2 , 转步骤 5)。

5) 在切除量为 P_2 的情况下, 如果首摆不稳定, 则稳定裕度按式(8)定义为 $-E_{k,min}^2$, 然后转步骤 7); 如果首摆稳定, 转步骤 6)。

6) 在切除量为 P_2 的情况下, 如果首摆稳定, 稳定裕度表示为

$$\eta_2 = (E_k^1 - E_{k,min}^1) - (E_k^2 - E_{k,min}^2) + \Delta E_k^2 - \Delta E_k^1 \quad (9)$$

7) 结束。

值得注意的是, 对于首摆稳定的情况, $E_{k,min} = 0$ 。

1.3 暂态能量裕度理论

对于不稳定的情形, 以轨迹穿越修正势能边界

曲面(corrected potential energy boundary surface, CPEBS)出口点处动能的负值作为稳定裕度^[5,18]。

对于稳定的情形, 使用系统在角度空间中的轨迹来说明稳定裕度 η_2 的求取过程, 如图 1 所示。

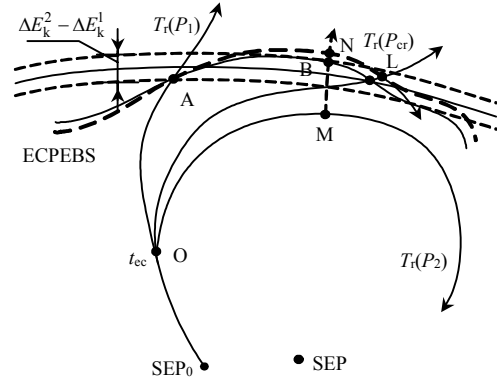


图 1 转子角度空间中的等值机轨迹

Fig. 1 Trajectories of equivalence generator in angle space

图中: $T_r(P_1)$ 为施加切除量不足 P_1 对应的系统不稳定轨迹; $T_r(P_2)$ 为加大切除量后稳定的系统轨迹; $T_r(P_{cr})$ 为系统临界切除量对应的临界轨迹; t_{ec} 为稳控动作时刻; SEP_0 为系统故障前稳定平衡点; SEP 为稳控后系统暂态稳定平衡点; M 为稳定轨迹的回摆点, 即等值机首摆动能过零点; O 为稳控动作之前时刻的轨迹状态。

本质上, 在切机控制发生后, 系统的暂态动能发生突变; 由于网络结构的变化, 系统的暂态临界势能同样也会发生变化。对于不同的切除量, 系统临界势能出点并不相同。随着切除量的变化, 临界势能出点的连线构成了系统随控制变量变化的稳定边界, 如图 1 中粗虚线所示。定义该曲面为系统扩展修正势能界面(extended corrected potential energy boundary surface, ECPEBS), 其满足:

$$\begin{cases} \frac{dE_p}{dt} = 0 \\ E_p'' < 0 \end{cases} \quad (10)$$

然而对于不同的切除措施, 在 ECPEBS 上的出点临界势能并不相同, 即 ECPEBS 上的势能是变化的。图中 N 表示采用二次冲击法系统轨迹在 ECPEBS 上的出点, L 表示临界稳定轨迹的临界势能点。对于稳定的情形, 稳定裕度 η 可由二次冲击法 (fault reinsert method) 获得^[20]。假设图 1 中 N 与 L 点的暂态势能相等。即:

$$E_{p,N} = E_{p,L} \quad (11)$$

稳定裕度可以由 M 、 N 两点的势能变化来表示。如果忽略网络结构变化而导致的临界势能的变化,

那么稳定裕度可以由BM间的势能差来表示。考虑到被切除发电机的动能和CPEBS的平坦性^[18]，稳定裕度可以表示为系统有效势能的增量

$$\eta = \Delta E_{p,BM} = [E_{p,A} + (\Delta E_k^2 - \Delta E_k^1)] - E_{p,M} = \Delta E_{p,OA} - \Delta E_{p,OM} + (\Delta E_k^2 - \Delta E_k^1) \quad (12)$$

考虑到修正暂态能量函数CTEF的守恒性，系统稳定情况下的稳定裕度可以表示为

$$\eta = -\Delta E_{k,OA} + \Delta E_{k,OM} + (\Delta E_k^2 - \Delta E_k^1) = (E_k^1 - E_{k,min}^1) - (E_k^2 - E_{k,min}^2) + \Delta E_k^2 - \Delta E_k^1 \quad (13)$$

1.4 稳定裕度的特点

稳定裕度对不同控制策略随切除量的变化曲线如图 2 所示。该算例是广东梅州地区某断面发生 N-2 线路故障后不同切机方案对应的稳定裕度。

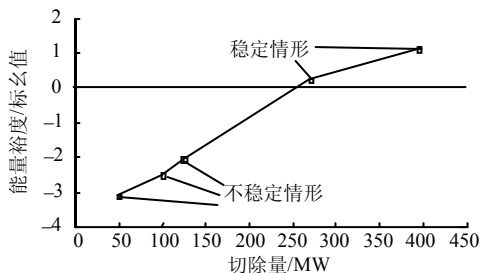


图 2 梅州电网切机稳定裕度
Fig. 2 Stability margin of generator tripping measures in Meizhou

由图 2 可知，在不同的切除方案下，系统稳定裕度曲线有以下特点：稳定区域裕度拟合曲线线性度较好；临界切除量对应的稳定裕度近似为 0；在稳定区域，稳定裕度略偏保守。

考虑到临界机群随不同切机方案变化，算例中得到的不同稳定裕度并不在同一条“连续的”理想稳定裕度曲线之上。然而电厂常常拥有多台发电机和切机选择，一般临界机群变化不大，因此计算出的稳定裕度仍满足一定的规律性。由于忽略了切机操作产生的系统临界势能变化，本方法计算出的稳定裕度 η 在稳定区域略偏保守。

1.5 快速确定初始切机容量

根据能量裕度随切机容量变化曲线的特性，先通过混合法计算 2 种不同切机策略 P_1 和 P_2 情况下的稳定裕度 $\eta(P_1)$ 和 $\eta(P_2)$ 。然后采用能量裕度一次插值法快速求取满足系统暂态稳定的初始切机容量。切除量初值由下式计算，图 3 说明了求解的过程。

$$P_{ini} = P_1 + \frac{-\eta(P_1)(P_2 - P_1)}{\eta(P_2) - \eta(P_1)} \quad (14)$$

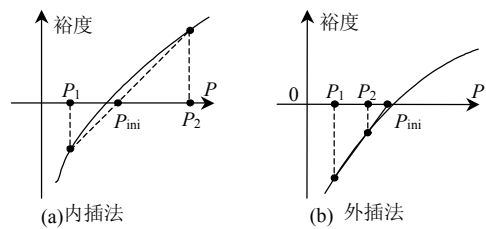


图 3 初始切除量计算原理
Fig. 3 Principle of calculation on initial drop power

值得注意的是，这 2 种切机策略至少包括一次不稳定情况。整个算法只需 2 次仿真计算。此外，根据本算法得到的切除容量必须通过稳定性校验，以确保方案的可靠性。

1.6 切机灵敏度

为简化运算并结合实际工程，切机灵敏度采用角度指标，即通过仿真把所有的可切发电机在 t_{ec} 时刻按转子相对角排序，最领先的可切发电机优先切除。由于切机操作是一个较大的控制措施，必须充分考虑其对网络的影响。考虑到厂用电以及转动惯量损失等因素^[8]，确定最终的切机措施需要谨慎考虑。

2 在线预决策切机控制措施

如果能在 5 min 内以当前的运行方式确定所有预想严重扰动下的可靠控制策略，那么该算法就可能作为在线预决策的暂态稳定安全分析模块。在线切机控制预决策框架如图 4 所示。除切机控制决策模块外，运行方式信息和频率安全信息对确定切机措施也有很大影响。

当系统运行方式发生变化后，所有的预想故障都需要重新校核，只有可能会导致系统暂态失稳的故障才会导入到切机控制模块之中。在实际处理

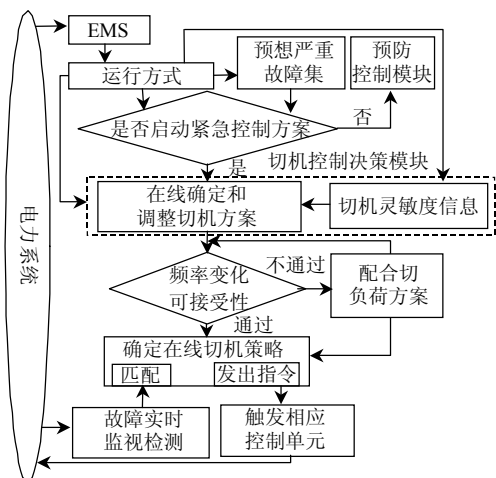


图 4 在线预决策切机方案
Fig. 4 Strategy of online pre-decision generator tripping

中，为避免过多的积分和全面信息采集的困难，常常提取反映运行方式的少数关键参数信息来替代全部的运行方式信息，例如主要开关的状态信息、关键线路的潮流等。假设已知某输电断面有功潮流从 P_1 变化到 P_2 ，有功功率 P_1 对应的切除量为 P_d ，那么有功功率 P_2 对应的切除量 P'_d 可以表示为

$$P'_d = P_d \frac{P_2 + b}{P_1 + a} \quad (15)$$

这里 a 与 b 可跟据实际情况由工程人员确定。

如果切机量与切负荷量不同，系统的频率就会发生变化。但是在实际的大系统中，系统有足够的旋转备用容量，它们可以在一定的时间内使系统频率得到恢复。因此，在很短的时间内频率下降不超过 1% 是允许的。根据系统的频率特性，计算出当前可切机量的最大值作为切机控制手段的上限。如果超过上限，那么就需要采取切负荷措施。

3 算例分析

梅州位于广东省的东部，该地区火力、水力资源丰富。为减轻西电东送通道的压力，近些年该地区兴建了数个火力发电厂和水力发电厂。然而，由于该地区还没有建设 500 kV 变电站，现有的 220 kV 网络安全稳定性不高。为提高该地区的安全性，2006 年在该地区建设了安全稳定控制系统^[4]。梅州电网结构如图 5 所示。

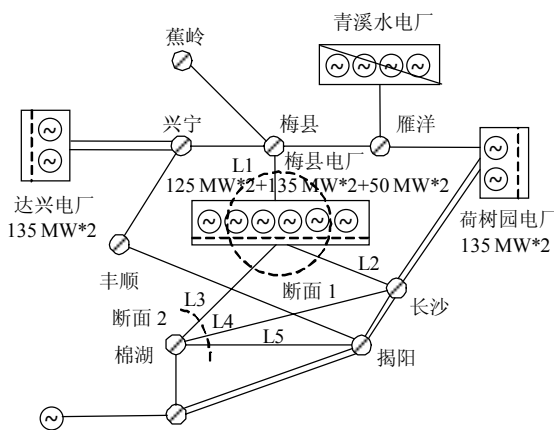


图 5 梅州 220 kV 电网结构

Fig. 5 The structure of 220kV power grid in Meizhou

该地区建有 3 个火电厂和 1 个水电站，共计 14 台机组。使用 M、Q、H、D 分别代表梅县电厂、青溪电厂、荷树园电厂和达兴电厂。字母后面用数字表明机组编号，如 Q1 代表青溪电厂 1 号机组。主要输电断面有 2 个：一是梅县电厂断面，由 L1，L2，L3 3 条线路组成；另一是棉湖断面，由 L3，

L4，L5 3 条线路组成。

研究表明，在某些运行方式下，断面 1 和断面 2 在 $N-2$ 故障或一回线路检修、一回线路故障的情况下均存在暂态稳定问题，必须采用切除机组措施才能保证系统安全。断面 1 发生典型的 $N-2$ 故障后，该区域发电机功角摇摆曲线如图 6 所示。

在采用本文算法计算初始切除量之前，首先把外部系统进行等值，如图 5 所示。该算例的参数为：故障于 0 s 发生， $t_{cl,L1} = 0.12$ s， $t_{cl,L2} = 0.128$ s， $t_{ec} = 0.14$ s。通过本文的切机算法，该算例在 2 种不同策略下的动能轨迹如图 7 所示。

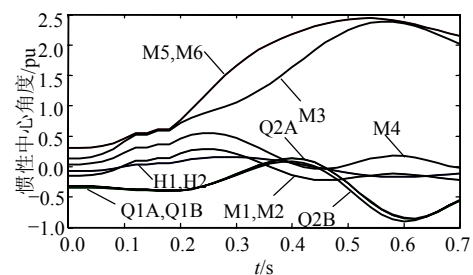


图 6 故障后梅州地区发电机功角曲线

Fig. 6 The curves of generators angles in Meizhou after the faults

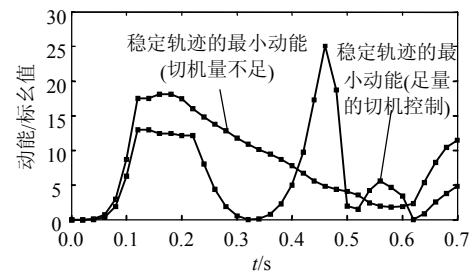


图 7 不同切机策略下系统修正动能轨迹

Fig. 7 The curves of kinetic energy for different generator tripping control measures

其中不稳定轨迹对应切除机组 M5，稳定轨迹对应切除机组 M5、M6。使用本文算法得到的临界切除量初值和切机组合如表 1 所示，表中同时列出了通过反复试探法得到的最优切机组合。

表 1 中的第一列是断面的有功潮流参数，分为不同的等级。每等级中使用本文方法计算取得的是该等级内有功潮流平均值对应的运行方式。值得注意的是，切机是离散操作，临界切除量经离散组合插值计算出来后还需转换成离散的切机组合。表 2 列出了断面 2 的计算结果。经过校验，各个方案的切除量都不会使系统频率发生较大变化，方案是可以接受的。

表 1 断面 1 在 N-2 故障下的切机组合计算结果

Tab. 1 The results of optimal combination of generators to be dropped under N-2 faults for section 1

断面 1 潮流/MW	切机组合	临界切除量 初值	最优切机 组合(试探法)	最优切 除量/MW
>530	M5, M6, M3	235	M5, M6, M3	220
480~530	M5, M6	89	M5, M6	100
450~480	M5 或 M6	50	M5 或 M6	50
<450	无	—	—	0

表 2 断面 2 在 N-2 故障下的切机组合计算结果

Tab. 2 The results of optimal combination of generators to be dropped under N-2 faults for section 2

断面 2 潮流/MW	切机组合	临界切除量 初值/MW	最优切机 组合(试探法)	最优切 除量/MW
>850	Q1~Q3, H1~H2, M1~M4	890	Q1~Q3, H1~H2, M1~M3	763
600~850	Q1~Q3, M1, H1, M5, M6	590*	Q1~Q3, H1, M1~M3	628
350~600	H1, M1, M2	300*	H1, M1	260
<350	无	—	—	0

注 1: *号表示临界切除量由第一次计算出的 890MW 经式(15)算得。

4 结论

1) 区域级的电力系统尤其是发电厂较多的区域采用本文方法能够较好地反映系统稳定状况,较准确地求出合适的切机组合。

2) 由试探法得出的最优切机组合和由本文方法得出的切机量基本一致,顺序略有不同,这是因为以角度作为灵敏度并不总是有效,这方面的深入研究还在进行之中。

3) 采用本文方法仅需 2 次仿真计算即可求得切机量,并且 2 次计算的初始条件十分明确,易于操作,减轻了运行方式人员确定策略表的计算负担,为在线应用提供了参考。

4) 本文提出的稳定裕度求取方法特别适合于紧急控制方案的确定。除了切机切负荷方案外,本文方法对其它的紧急控制方案^[21]也有借鉴意义,相关研究在深入展开。

致 谢

本研究得到了香港理工大学陈家荣助理教授的项目基金资助(A-PA9K),在此表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] DL755—2001, 电力系统安全稳定导则[S].
- [2] 袁季修. 电力系统安全稳定控制的规划和应用[J]. 中国电力, 1999, 32(5): 29-32.
Yuan Jixiu. Planning and application of power system security and stability control[J]. Electric Power, 1999, 32(5): 29-32(in Chinese).
- [3] 吴国丙, 吴烈鑫, 张荫群, 等. 广东电网安全稳定控制系统的功

能配置和控制原则[J]. 广东电力, 2006, 19(2): 1-4.

- Wu Guobing, Wu Liexin, Zhang Yinqun, et al. Function disposition and control principle of security and stability control system for Guangdong power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(2): 1-4(in Chinese).
- [4] 张敏, 黄翠莲, 杨毅斌. FWK-C 安全稳定控制系统在梅州电网的应用[J]. 广东输电与变电技术, 2007(3): 63-65.
Zhang Min, Huang Cuilian, Yang Yibin. Application of FWK-C type safety-stability control device in Meizhou Power Grid[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2007(3): 63-65(in Chinese).
- [5] Daniel R V, Pavella M. A comprehensive approach to transient stability control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1446-1460.
- [6] 李刚, 王家华. 天生桥一级水电站的远方切机就地判别处理[J]. 红水河, 2004, 23(2): 67-68.
Li Gang, Wang Jiahua. A strategy based local signal for remote generator tripping control in Tianshengqiao-1 hydropower station[J]. Red River, 2004, 23(2): 67-68(in Chinese).
- [7] 张瑞琪, 闵勇, 侯凯元. 电力系统切机切负荷紧急控制方案的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 6-12.
Zhang Ruiqi, Min Yong, Hou Kaiyuan. A new method for generation shedding and load shedding in power system emergency control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 6-12(in Chinese).
- [8] 李威, 徐泰山, 郑亮. 电网多区域安全稳定紧急控制在线预决策系统[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 234-237.
Li Wei, Xu Taishan, Zheng Liang. On-line pre-decision system for multi-area emergency control[J]. Power System Technology, 2006, 30 (supplement): 234-237(in Chinese).
- [9] 曾令雄. 在线预决策安全稳定控制系统在韶关发电厂的应用[J]. 广东电力, 2004, 17(4): 43-48.
Zeng Lingxiong. Application of on-line pre-decision safety and stability control system in Shaoguan Power Plant[J]. Guangdong Electric Power, 2004, 17(4): 43-48(in Chinese).
- [10] 滕林, 刘万顺, 真志皓, 等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 64-69.
Teng Lin, Liu Wanshun, Yuan Zhihao, et al. Study of real-time power system transient stability emergency control[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(1): 64-69(in Chinese).
- [11] 任伟, 房大中, 吴烈鑫, 等. 基于修正能量函数的广东电网最佳稳控控制算法[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 184-189.
Ren Wei, Fang Dazhong, Wu Liexin, et al. Optimal emergency generation tripping and load shedding evaluation using CTEF approach on power system in Guangdong[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 184-189(in Chinese).
- [12] 房大中, 周保荣, 宋文南. 修正的暂态能量裕度评估策略[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 94-98.
Fang Dazhong, Zhou Baorong, Song Wennan. Strategy for assessment of corrected transient energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 94-98 (in Chinese).
- [13] 毕兆东. 电力系统暂态稳定控制决策算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [14] 张雪敏, 梅生伟, 卢强. 基于功率切换的紧急控制算法研究[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 26-31.
Zhang Xuemin, Mei Shengwei, Lu Qiang. Study on emergency control algorithm based on power switching[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 26-31(in Chinese).

(下转第 55 页 continued on page 55)

- frequency oscillations based on wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60(in Chinese).
- [10] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
Xu Shukai, Xie Xiaorong, Xin Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system [J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49(in Chinese).
- [11] 胡志祥, 谢小荣, 肖晋宇. 广域测量系统的延迟分析及其测试[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 39-43.
Hu Zhixiang, Xie Xiaorong, Xiao Jinyu. Analysis and test on delays in the wide area measuring system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 39-43(in Chinese).
- [12] 贾宏杰, 陈建华, 余晓丹. 时滞环节对电力系统小扰动稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 1-5.
Jia Hongjie, Chen Jianhua, Yu Xiaodan. Impact of time delay on power system small signal stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 1-5(in Chinese).
- [13] Snyder A F, Mohammed A E, Georges D, et al. A robust damping controller for power systems using linear matrix inequalities [C]. Power Engineering Society Winter Meeting, New York, 1999.
- [14] Kamwa I, Grondin R, Hebert Y. Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems—a decentralized/hierarchical approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 136-153.
- [15] Wu H X, Ni H, Heydt G T. The impact of time delay on robust control design in power systems[C]. Power Engineering Society Winter Meeting, New York, 2002.
- [16] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 2(28): 37-40.
Xie Xiaorong, Xiao Jinyu, Tong Luyuan, et al. Inter-area damping control of interconnected power systems using wide-area measurements [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 2(28): 37-40(in Chinese).
- [17] 胡志祥, 谢小荣, 童陆园. 广域阻尼控制延迟特性分析及多项式拟合补偿[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 29-34.
Hu Zhixiang, Xie Xiaorong, Tong Luyuan. Characteristic analysis and polynomial fitting based compensation of the time delays in wide- area damping control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 29-34(in Chinese).
- [18] 江全元, 张鹏翔, 曹一家. 计及反馈信号时滞影响的广域 FACTS 阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 82-88.
Jiang Quanyuan, Zhang Pengxiang, Cao Yijia. Wide-area FACTS damping control in consideration of feedback signals' time delays [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 82-88(in Chinese).
- [19] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 15-87.
- [20] Sanchez-Gasca J J, Chow J H. Power system reduction to simplify the design of damping controllers for interarea oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 3(11): 1342-1349.
- [21] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 22-105.



王伟岸

收稿日期: 2008-04-20。

作者简介:

王伟岸(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定与控制, E-mail: wangweian_hit@163.com;

马平(1973—), 女, 博士, 研究方向为电力系统分析与控制;

蔡兴国(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制。

(编辑 王晔)

(上接第15页 continued from page 15)

- [15] Ohura Y, Matsuzawa K, Ohtsuka H, et al. Development of a generator tripping system for transient stability augmentation based on the energy function method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(3): 68-77.
- [16] 赵庆生, 刘笙, 陈陈. 在线生成策略表与实时预测切机[J]. 中国电力, 2005, 38(2): 40-44.
Zhao Qingsheng, Liu Sheng, Chen Chen. On-line pre-decision look-up tables and local prediction for generator tripping[J]. Electric Power, 2005, 38(2): 40-44(in Chinese).
- [17] 赵良, 张文朝, 马世英, 等. 南方电网在线稳定分析中的动态等值方案[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 31-35.
Zhao Liang, Zhang Wenchao, Ma Shiyong, et al. Dynamic equivalence schemes of Southern China power grid for on-line stability analysis[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 31-35(in Chinese).
- [18] Fang D Z, Chung T S, Zhang Y. Transient stability limit conditions analysis using a corrected transient energy function[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 804-810.
- [19] Michel A N, Found A A, Vittal V. Power system transient stability using individual machine energy functions[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1983, 30(5): 266-276.
- [20] Mansour Y, Vaahedi E, Chang A Y, et al. BC Hydro's on-line transient stability assessment model development, analysis and post-processing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 241-253.
- [21] 荆勇, 洪潮, 杨晋柏, 等. 直流调制抑制南方电网区域功率振荡的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 53-56.
Jing Yong, Hong Chao, Yang Jinbai, et al. Suppression of inter-area power oscillation in southern china power grid by HVDC modulation [J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 53-56(in Chinese).



任伟

收稿日期: 2008-06-15。

作者简介:

任伟(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制, E-mail: discoverren@yahoo.com.cn;

房大中(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与安全控制;

陈家荣(1966—), 男, 助理教授, 研究方向为电力系统并行仿真, 智能安全分析;

陈兴华(1977—), 男, 工程师, 工学硕士, 从事电力系统运行分析和稳定控制方面工作;

李传栋(1979—), 男, 工程师, 从事电力系统规划、稳定分析、安全预警等工作。

(编辑 王晔)