

一种基于连续线性规划的静态稳定预防控制方法

赵晋泉¹, 江晓东², 李 华², 张伯明¹

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. 康奈尔大学, 美国纽约州伊萨卡市 14850)

摘要: 针对故障后不存在静态稳定平衡点的严重失稳故障, 提出了一种静态稳定预防控制算法。该方法基于连续线性规划技术, 将预防控制问题分解为故障参数空间上虚拟稳定临界点及其控制灵敏度的计算子问题和基于灵敏度的线性规划控制子问题。在前一个子问题中, 运用故障连续潮流工具分别计算得到每个失稳故障的虚拟稳定临界点; 在后一个子问题中, 采用了筛选参与控制集和限制可控区间等策略来提高线性规划问题计算的有效性。对国外一个 3 000 节点的实际系统的应用表明了所提出的算法是有效、实用的。

关键词: 电力系统; 静态稳定性; 灵敏度; 预防控制; 连续线性规划

中图分类号: TM712

0 引言

电力系统发生严重故障时, 系统可能失去稳定, 本文暂称这些故障为失稳故障。失稳故障可分为 2 类: 一类是故障后的系统不存在新的静态稳定平衡点; 另一类是故障后的系统存在静态稳定平衡点, 但是系统无法过渡到这个新的稳定平衡点, 例如故障实际的切除时间大于极限切除时间。通常防止系统失稳的方式有两种: 紧急校正控制方式和提前预防控制方式^[1]。

电力系统稳定评估与控制通常可以分为暂态稳定和静态稳定 2 个方面来研究。我国在暂态稳定优化控制的研究方面处于领先水平。文献[1, 2]首次提出了预防控制和紧急控制协调优化的思想和数学模型, 将一直以来泾渭分明的两个研究方向联系在一起。文献[3, 4]提出了一种完整的混合优化算法, 将预想故障集按照失稳模式分为不同子集, 将发电机群分为领前群和余下群, 采用“解耦迭代-聚合协调”的策略来处理故障冲突问题。文献[5]给出了暂态稳定预防控制优化问题的完整数学表达, 研究了解的可行域性质, 提出了考虑暂态稳定约束的优化潮流模型和方法。文献[6]提出探测并分离出故障集中将导致优化问题不可行的故障约束由紧急控制来处理、其余故障在预防控制中考虑的思想。文献[7]研究了暂态安全约束下低频低压紧急控制的全局优化算法。

上述第 1 类失稳故障可以采用静态方法来研究, 而第 2 类失稳故障只能采用暂态稳定方法来研究, 本文仅讨论对于前者的静态稳定预防控制问题。

预防控制算法要同时考虑多个这类失稳故障, 而紧急控制算法只需考虑一个失稳故障。不论哪种方式都存在如下困难: 没有一个对应的故障后潮流解, 从而无法形成雅可比矩阵, 无法直接计算控制的灵敏度。现有的处理方法主要有两类。一类是间接方法, 即将问题分解为一个恢复潮流可解性的子问题和一个根据灵敏度矢量搜索最小减载方向的子问题来迭代求解。其中, 在恢复潮流可解性和求解负荷空间稳定临界点的环节上又有基于最优乘子的阻尼牛顿潮流算法^[8~10]和基于局部参数化的连续潮流算法^[11]两种算法, 后者要求已知一个可行的初始卸负荷策略。文献[12]利用负荷对电压的强依赖特性来自动得到故障后的可行解, 而后再沿系统暂态轨迹得到稳定临界点, 其计算最小卸负荷控制的方法与文献[9~11]相同。另一类是直接方法, 即直接求解 KKT 条件的最优潮流算法^[13, 14]。该方法的机理是在潮流可行域边界上系统二阶海森矩阵非奇异、可解, 可通过最小卸负荷的目标函数来实现。因该方法要形成和因子化二阶海森矩阵, 计算量大, 无法预估最佳减载地点而使得控制变量数目巨大, 造成在线实用化很困难。

考虑到工程上要求多种控制方式的协调和同时处理多个失稳故障, 本文采用了新的方法。它的独特之处在于: 根据潮流不可解通常由于故障而引发, 从而利用一种故障型连续潮流工具^[15]得到一种新的潮流不可解程度度量指标, 以及失稳故障对应的一个虚拟的稳定临界点(I 型分岔点), 并利用该点处可用于预防控制的灵敏度信息^[16], 构造了基于连续线性规划(SLP)的预防控制算法, 将稳定控制问题纳入到电力市场环境辅助服务的获取上, 可同

时处理多个失稳故障。大型实际系统的实践表明,本文方法是有效的。

1 问题的列式

1.1 静态稳定预防控制问题的演化

电力系统静态稳定预防控制问题的完整数学列式为^[17]:

$$\min C(\mathbf{u}) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \lambda_0) = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_\Delta, \mathbf{u}, \lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}, \lambda_0) = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_i(\mathbf{x}_{i,\Delta}, \mathbf{u}, \lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}) = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}, \lambda_0) \leq \mathbf{0} \quad (6)$$

$$\mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}, \lambda_0) \leq \mathbf{0} \quad (7)$$

式中: $C(\mathbf{u})$ 表示预防控制的优化目标函数; λ_0 表示当前系统在一个预定的方向上的负荷水平; $\Delta\lambda_{\text{req}}$ 表示在该预定方向上要求的最小负荷裕度指标; $\mathbf{x}$ 是基态系统预防控制后的状态向量; $\mathbf{u}$ 是要求解的系统控制向量; $\mathbf{x}_\Delta$ 是基态系统在 $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}$ 负荷下的状态向量; $\mathbf{x}_i$ 是预防控制后第 i 个故障下的系统状态向量; $\mathbf{f}$ 表示基态系统节点潮流方程; $\mathbf{f}_i$ 表示第 i 个故障后系统节点潮流方程; $\mathbf{x}_{i,\Delta}$ 是系统在第 i 个故障后且在 $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}$ 负荷下的状态向量; $\mathbf{h}$ 表示基态系统运行约束, 如节点电压和支路电流约束; $\mathbf{h}_i$ 表示第 i 个故障后系统运行约束(比基态下宽松); $i=1, 2, \dots, n_c$; n_c 是预想故障集中的故障总数。

式(1)的意义是: 通过计算得到一组控制成本最小的控制 $\mathbf{u}$, 使得系统当前有解且满足基态运行约束, 每个故障后都存在静态平衡点且满足故障下的运行约束, 当前及其故障后系统在更高的负荷水平 $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}$ 下也有解。这是惟一可以封闭表达的静态稳定控制问题列式。如果不采用基于一个预定方向的负荷裕度指标, 如采用最小奇异值指标等, 则无法写出上述封闭的解析表达式。

这是一个非常复杂的非线性规划问题, 文献[17]采用 Benders 分解法将它化为若干个普通最优潮流问题来分层迭代求解。即使如此, 这也是一个挑战。本文仅研究它的一个子问题, 采用了如下两个假设: 首先, 令 $\Delta\lambda_{\text{req}}$ 为 0, 从而忽略了式(3)和式(5)。这是因为它可以通过一个独立的静态稳定增强控制来解决, 由于可以应用灵敏度方法, 此问题相对容易处理^[18~20]; 其次, 假设式(6)和式(7)可以通过静态安全校正来实现。这样, 本文研究的静态稳定预防控制问题的列式简化为:

$$\begin{cases} \min C(\mathbf{u}) \\ \text{s. t. } \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \lambda_0) = \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}, \lambda_0) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (8)$$

本文在文献[15, 16]的基础上, 将此问题转化为如下等价问题:

$$\begin{cases} \min C(\mathbf{u}) \\ \text{s. t. } \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0} \\ \lambda_{i,\max}(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}) > 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\lambda_{i,\max}$ 为失稳故障 i 的故障裕度指标^[16], 它是运行点 $(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 的函数。

由于无法写出 $\lambda_{i,\max}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 的显式解析表达式, 因而无法直接计算。基于它对于控制的灵敏度并略去高阶项, 可写出如下等价的线性不等式约束:

$$\lambda_{i,\max}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) + \mathbf{S}_i \Delta \mathbf{u} \geq 1, 0 \quad i=1, 2, \dots, n_c \quad (10)$$

式中: $\mathbf{S}_i$ 为故障 i 对应的灵敏度矢量。

因此, 静态稳定预防控制问题可以分解为一个静态稳定临界点及其控制灵敏度的求解问题和一个基于此灵敏度的优化控制子问题的交替迭代求解问题。

1.2 实用静态稳定预防控制问题

以美国东部一个大型电网的实际应用为基础做了一个尝试, 取得了很好的效果。将所求控制变量的调节量分解为如下形式: $\Delta u_j = \Delta u_j^+ - \Delta u_j^-$, 其中, $\Delta u_j^+ \geq 0, \Delta u_j^- \geq 0$ 。借鉴文献[18], 构造了如下优化控制子问题的数学模型为:

$$C(\mathbf{u}) = \sum_{k=1}^{n_t} \omega_k \sum_{j=1}^{n_k} (c_j^+ \Delta u_j^+ + c_j^- \Delta u_j^-) \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^{n_{ct}} S_{ij} \Delta u_j \geq 1, 0 \quad \alpha - \lambda_{i,\max}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \quad (12)$$

$$0 \leq \Delta u_j^+ \leq u_j^{\max} - u_{j,0} \quad (13)$$

$$0 \leq \Delta u_j^- \leq u_{j,0} - u_j^{\min} \quad (14)$$

$$\Phi(\Delta u_j^+, \Delta u_j^-) = 0 \quad (15)$$

式中: n_t 为控制类型的数目; n_k 为第 k 种控制类型的控制数目; ω_k 为对应于控制类型的权因子; c_j^+ , c_j^- 是控制变量 j 的控制成本系数; n_{ct} 为参与预防控制的控制数目; $u_j^{\max}$ 和 $u_j^{\min}$ 分别为变量 u_j 的上下限值; $u_{j,0}$ 为控制前变量 u_j 的大小; S_{ij} 表示在失稳故障 i 时故障失稳裕度对于控制变量 j 的灵敏度; α 是补偿因子, 一般取为 1.001~1.010; $i=1, 2, \dots, n_c$ 。

权因子的选取是为了反映不同控制类型的优先级别。级别越低, 权因子越大。控制可分为 3 个等级: 第 1 级包括变压器分接头的调整、移相器的相角调节和并联电容电抗器的投切等; 第 2 级包括发电机有功功率再安排和发电机机端电压的调节; 第 3 级为卸负荷控制。这 3 类控制的成本逐级上升, 预防稳定控制中各类控制的参与情况, 不仅反映了系统稳定问题的严重程度, 而且会给电力市场的各参与方带来十分敏感的经济信号和切身的利益得失。同类型控制中的不同控制变量可能具有不同的

控制成本。权因子和成本系数由系统运行人员根据系统情况初定,并通过大量离线计算调试最后确定,它们使得优化控制解最好地满足工程实际。各种控制对于故障失稳裕度的灵敏度的定义和计算方法见文献[16]。式(13)与式(14)为控制变量的简单不等式约束,式(15)是一组附加的线性化等式约束,例如系统有功输出平衡约束。在忽略网损变化的情况下,可用下式来表示:

$$\sum_{j=1}^{n_g} (\Delta p_{g,j}^+ - \Delta p_{g,j}^-) = 0 \quad (16)$$

式中: n_g 为参与有功调节的发电机数目; $\Delta p_{g,j}^+$ 和 $\Delta p_{g,j}^-$ 分别为发电机有功控制 $p_{g,j}$ 的两个分量。

1.3 SLP 及其模型有解性分析

这一控制方法是基于线性灵敏度的控制算法。线性灵敏度用于稳定控制中的有效性已经被许多学者所接受^[11,18~20]。本文采用了基于故障失稳裕度的灵敏度方法,它用于静态稳定预防控制的有效性在文献[16]中已验证。稳定问题本质上是一个非线性问题,线性灵敏度存在局限性是必然的。因此,文献[11,18,19]都采用了 SLP 或连续二次规划的控制模型来提高控制问题的有效性和可解性,充分利用了线性灵敏度可以快速计算和在一定区间内有效的特点。

本文模型没有考虑控制后系统的运行约束,即对当前系统进行预防控制后,可能违反了电压限值约束或支路电流约束。如果要考虑,同样可以在迭代中增加计算违限约束关于各控制量的灵敏度,在式(13)与式(14)中增加相应的简单线性不等式约束即可。当然,考虑这些约束后,即考虑了故障稳定约束和运行约束之间的协调,优化问题可能局部无最优解。本文从工程实用出发,在模型上将电力系统稳定预防控制问题和静态安全校正问题割裂开来,两者之中取其重,首先突出了满足系统稳定的需要。

2 提高 SLP 控制有效性的策略

2.1 筛选参与控制集策略

实际电力系统的控制变量的数目是巨大的,但它们中的大多数对于控制目标而言是无关紧要的。系统调度人员必须考虑的一个问题是全部控制数目的最小化,这是控制方案能否工程实用化的一个关键。对于线性规划问题而言,如果参与的控制变量数目越小,则计算效率可以显著地下降。因此,本文采用了筛选参与控制集的策略,使得优化问题的规模大为下降,同时也有效控制了最优解中的控制量的数目。

对每个失稳故障,在计算了灵敏度向量之后,可以根据灵敏度大小及其类型对所有控制进行排序。

对于控制类型 j ,选择灵敏度最大的 N_j 个控制进入参与控制集。对于发电机有功控制,为满足约束式(16),要一正一反成对选择,即选中一个正灵敏度最大的发电机控制,同时要选中一个负灵敏度最大(或排序表中最后的一个)的发电机控制;对于变压器分接头和并联电容器控制,如果它们对应的局部控制节点的电压(故障连续潮流计算的第1个运行点,即故障前的系统)已经越限或已接近越限,则不选择进入参与控制集。

需要指出的是在应用这个策略后,由于每次线性规划中参与控制的变量数目有限,线性规划求解时可能无法找到可行解。此时,增大计算参数,使更多的控制变量进入下一个线性规划中来满足有解性。

2.2 限制线性灵敏度的有效区间

因为本文方法采用线性灵敏度模型,要考虑线性灵敏度的有效区间。在每次迭代中,对部分控制变量施加控制范围的限制,以保证求解维持在线性化模型的有效域内。根据数值经验,并联电容电抗器、发电机和卸负荷等注入型控制比诸如变压器变比和移相器相角等支路型控制有更大的有效域。对于变压器变比和移相器相角,需满足下式:

$$\Delta t_j^+ \leq \min \{k_t t_{j,\text{step}}, t_{j,\text{max}} - t_{j,0}\} \quad (17)$$

$$\Delta t_j^- \leq \min \{k_t t_{j,\text{step}}, t_{j,0} - t_{j,\text{min}}\} \quad (18)$$

式中: Δt_j^+ 和 Δt_j^- 分别为变压器变比或移相器相角 t_j 的正、负向调整量; $t_{j,\text{step}}$ 为 t_j 的调整步长; k_t 为单次调整容许的最大控制步数,取3或4。

同理,对于发电机端电压的调整,需满足:

$$\Delta V_{gj}^+ \leq \min \{\Delta V_{\text{ad}}, V_{gj,\text{max}} - V_{gj,0}\} \quad (19)$$

$$\Delta V_{gj}^- \leq \min \{\Delta V_{\text{ad}}, V_{gj,0} - V_{gj,\text{min}}\} \quad (20)$$

式中: ΔV_{gj}^+ 和 ΔV_{gj}^- 分别为第 j 台发电机机端电压 V_{gj} 的正、负向调整量; $V_{gj,0}$ 为 V_{gj} 的初值; $V_{gj,\text{max}}$ 和 $V_{gj,\text{min}}$ 分别为 V_{gj} 的可调上、下限值; ΔV_{ad} 是设定的最大控制量,本文取0.03。

这些约束的加入从一定程度上也保证了节点电压上下限等运行约束的满足。

2.3 临近失稳故障的校验和参与

在静态稳定控制问题中,不同故障之间的控制协调是一个很重要的问题。简言之,就是计算得到的预防控制方案在将失稳故障变成稳定故障的同时,是否会将原先稳定的故障变成失稳故障的问题。文献[3,4,18]中都描述了对冲突故障的处理方法。因此在故障失稳裕度及其灵敏度计算子问题中,仅仅考虑和计算原先失稳故障集中的故障是不够的,必须同时校验部分原先负荷稳定裕度较小的所谓临近失稳故障。校验的方法就是计算该故障下的静态潮流解。如果有解,则表明仍为稳定故障;如果无

解,即出现临近失稳故障变成失稳故障的情况,就要计算它对应的故障失稳裕度及其灵敏度,在下一个线性规划优化控制问题中,加入这一故障。

原先失稳故障集中的两个故障也可能是冲突故障,采用 2.1 节中对参与控制集的动态增加策略可以解决这一问题。所幸的是,在实际系统中不同故障之间的普遍联系要远远大于它们之间的矛盾。通常的情形是,许多失稳故障实际上都可以由同一组控制来解决,例如可能属于同一个静态电压支持的薄弱区域。本文模型中卸负荷控制的参与,也是问题有解的一个保证。

3 算法

下面给出静态稳定预防控制方法的步骤。
步骤 1: 对于失稳故障集中的每个故障,计算故障失稳裕度对于控制变量的灵敏度。对部分临近失稳的故障,进行校验。如果失稳,则进入参与故障集,计算裕度和灵敏度。

1)对每个失稳故障,用故障连续潮流求取虚拟的静态稳定临界点 (x^*, u^*) 和故障失稳裕度指标 $\lambda_{i, \max}$ 。如果所有的 $\lambda_{i, \max}$ 都大于 1,则转入步骤 4。

2)对每个故障,计算临界点处故障失稳裕度指标 $\lambda_{i, \max}$ 对于各种控制变量的灵敏度。对于 $\lambda_{i, \max} > 1$ 的故障,即经控制后变为安全的故障,采用上次迭代计算的灵敏度。

步骤 2: 构造和求解线性规划控制子问题。
1)根据灵敏度信息来选择参与控制集,构造线性规划控制子问题。对于 $\lambda_{i, \max} > 1$ 的故障,式(12)的右端为 0。

2)求解线性规划控制子问题,得到一组优化控制解 Δu 。

3)控制解 Δu 的协调化处理,如离散控制变量的离散处理。并联的多台变压器应该一起参与控制且控制量相同,如果并联中的 1 台被调整了,则另外几台也应相应调整。

步骤 3: 对系统施加控制后转到步骤 1。
步骤 4: 计算控制后系统在基态及其原失稳故障下的稳定裕度。

4 算例分析

运用上述基于灵敏度和线性规划技术的预防控制方法,对美国东部一个 3 000 节点实际系统进行了数值试验。系统中共有 312 个变压器分接头(LTC)、19 个移相器、361 台发电机的有功(G_P)、361 个机端电压(G_V)和 1 550 个负荷可以参与预防控制。

表 1~表 3 分别给出了该系统在 3 个时间断面

的多重失稳故障及其预防控制过程。表中,“3L1G”表示有 3 条线路和 1 台发电机退出运行。当发电机退出时系统由补偿机组来补偿有功的缺失。表中小于 1 的数值表示故障的失稳裕度指标 $\lambda_{\max}$,大于 1 的数值表示已恢复为安全故障的负荷稳定裕度,单位是 MW。对一个故障,分别取灵敏度最大的 10 个变压器分接头、5 个移相器、10 台发电机有功、10 个发电机机端电压和 5 个卸负荷进入参与控制集。参与控制集可以随着迭代而更新变化,也可以不更新或者只增加不减少等。为尽量减少最后解的控制数目,这里采用了只增加不减少的策略。本文算例中补偿因子取 1.003,3 个优先级的控制权因子的比值为 1.5 : 2 : 5,所有控制变量的成本系数都取 1.0。

表 1 失稳故障及其预防控制过程(情形 1)
Table 1 Instable contingencies and its preventive control process (case 1)

故障 ID	故障 条目	$\lambda_{\max}$			
		初值	迭代 1	迭代 2	迭代 3
C1061	3L3G	0.841	0.916	0.950	29.01
C1039	3L10G	0.874	143.42	312.69	427.54
C1063	2L	0.903	0.993	188.25	274.29
C1978	2L	0.962	0.989	35.89	98.79
C1830	3L	0.978	0.998	201.50	259.59
C1979	2L	0.992	366.72	598.00	718.73

注: 迭代 1~迭代 3 的计算时间分别为 11 s, 10 s, 8 s。

表 2 失稳故障及其预防控制过程(情形 2)
Table 2 Instable contingencies and its preventive control process (case 2)

故障 ID	故障条目	$\lambda_{\max}$		
		初值	迭代 1	迭代 2
C2104	1L	0.885	0.994	879.14
C1973	1L	0.919	349.57	548.22
C2019	3L	0.978	521.26	1 012.21
C2038	3L	0.978	683.74	1 098.84
C2252	2L	0.981	880.89	1 081.38
C1810	3L	0.982	22.43	22.47

注: 迭代 1 和迭代 2 的计算时间分别为 11 s, 8 s。

表 3 失稳故障及其预防控制过程(情形 3)
Table 3 Instable contingencies and its preventive control process (case 3)

故障 ID	故障 条目	$\lambda_{\max}$				
		初值	迭代 1	迭代 2	迭代 3	迭代 4
C496	3L1G	0.681	0.725	0.875	67.90	88.75
C1062	2L	0.768	0.925	43.59	192.02	261.97
C1038	7L	0.825	0.909	0.977	0.997	53.18
C354	2G	0.831	808.75	1 062.38	1 096.99	1 101.54
C871	4L	0.870	0.967	931.37	1 393.38	1 444.78

注: 迭代 1~迭代 4 的计算时间分别为: 10 s, 10 s, 8 s, 7 s。

表 4 和表 5 分别给出了情形 1 和情形 3 在迭代求解过程中各种控制类型的控制数目。参与集表示

首次迭代的参与控制数目,最后解的控制数目并不等于每次迭代的数目之和,因为许多控制是被重复选中的。由表可知,虽然全系统的控制数目很大,但进入线性规划的控制数目并不大。在计算过程中,对部分临近失稳的故障进行了校验,未出现原先稳定故障变成失稳故障的情形。在所有失稳故障被预防的同时,基态系统的稳定裕度也增加了。例如,情形2施加控制前系统的稳定裕度为3 812.98 MW,控制后为4 011.73 MW。但是,由于模型中没有考虑系统中的电压约束,3种情形下采用预防控制后都有一些节点的电压超过了系统运行要求的1.10。

表4 预防控制过程控制数目列表(情形1)
Table 4 Number lists of controlling variables in process of the preventive control (case 1)

控制类型	参与集	迭代1	迭代2	迭代3	最后解
LTC	35	20	14	7	22
移相器	10	0	1	0	1
G_P	28	5	4	0	9
G_V	27	16	10	3	21
卸负荷	16	0	0	0	0
总计	116	41	29	10	53

表5 预防控制过程控制数目列表(情形3)
Table 5 Number lists of controlling variables in process of the preventive control (case 3)

控制类型	参与集	迭代1	迭代2	迭代3	迭代4	最后解
LTC	37	25	18	5	2	32
移相器	9	3	3	0	1	3
G_P	31	5	3	0	0	8
G_V	28	14	17	3	0	22
卸负荷	13	0	2	1	0	2
总计	118	47	43	9	3	67

表1给出了每次迭代的大致计算时间,所用计算机硬件为Pentium4 2.8 GHz主频、512 MB内存。从计算时间上分析,主要是连续潮流的计算时间长(包括故障型和负荷型),灵敏度和线性规划计算很快。单个连续潮流计算时间与单个潮流计算时间的平均比值为5.5:1,负荷连续潮流采用快速计算,不精确计算鼻值点。本文方法基本可以满足在线应用的快速性和鲁棒性要求。

5 结语

本文提出了一种可在线应用的静态稳定预防控制方法。这一算法基于SLP技术,将预防控制问题分解为虚拟稳定临界点及其控制灵敏度的计算子问题和基于灵敏度的线性规划控制子问题。在前一个子问题中,运用故障连续潮流工具分别计算得到每个失稳故障的虚拟稳定临界点及其控制灵敏度信息;在后一个子问题中,根据灵敏度信息,构造一个

线性规划控制问题来计算控制量。算法中采用了一些提高线性规划控制有效性的策略。通过对一个3 000节点的国外实际系统的应用表明,本文所提出的算法是有效实用的。今后的努力方向是如何根据灵敏度等信息,识别冲突故障和处理它们之间的协调问题。

参 考 文 献

[1] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1—4, 9.
XUE Yu-sheng. Coordination of Preventive Control and Emergency Control for Transient Stability. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 1—4, 9.

[2] 薛禹胜, 李威. 关于暂态稳定控制决策优化方法的思考. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 15—21.
XUE Yu-sheng, LI Wei. A Review on the Optimization of Transient Stability Controls. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 15—21.

[3] 薛禹胜, 李威, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化: (一) 单一失稳模式的故障集. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 6—10.
XUE Yu-sheng, LI Wei, HILL D J. Optimal Hybrid Control of Transient Stability: Part One For Cases with a Unique Unstable Mode. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 6—10.

[4] 李威, HILL D J, 薛禹胜. 暂态稳定混合控制的优化: (二) 不同失稳模式的故障集. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 7—10, 29.
LI Wei, HILL D J, XUE Yu-sheng. Optimal Hybrid Control of Transient Stability: Part Two For Cases with a Different Unstable Mode. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 7—10, 29.

[5] 甘德强, 辛焕海, 王建全, 等. 暂态稳定预防控制和优化新进展. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 1—7.
GAN De-qiang, XIN Huan-hai, WANG Jian-quan et al. Progress in Transient Stability Preventive Control and Optimization. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 1—7.

[6] 杨新林, 孙元章. 电力系统动态安全调度新算法. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 1—5.
YANG Xin-lin, SUN Yuan-zhang. A Novel Dynamic Security Dispatching Method for Power Systems. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 1—5.

[7] 徐泰山, 李碧君, 鲍颜红, 等. 考虑暂态安全性的低频低压减载量的全局优化. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 12—15.
XU Tai-shan, LI Bi-jun, Bao Yan-hong et al. Optimal Parameter Setting of Under-frequency and Under-voltage Load Shedding for Transient Security. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 12—15.

[8] DEHNEL M, DOMMEL H W. A Method for Identifying Weak Nodes in Nonconvergent Load Flows. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 801—807.

[9] OVERBYE T J. A Power Flow Measure for Unsolvable Cases. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1359—1365.

[10] 马平, 蔡兴国, 于继来, 等. 基于最小不匹配函数的低压减载算法研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 27—31.
MA Ping, CAI Xing-guo, YU Ji-lai et al. A Study on a

- Undervoltage Load Shedding Strategy Based Minimum Mismatch Function. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 27—31.
- [11] FENG Zhi-hong, AJJARAPU V, MARATUKULAM D J. A Comprehensive Approach for Preventive and Corrective Control to Mitigate Voltage Collapse. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 791—797.
- [12] CUTSEM T V. An Approach to Corrective Control of Voltage Instability Using Simulation and Sensitivity. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 616—622.
- [13] GRANVILLE S, MELLO J C O, MELO A C G. Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 1096—1103.
- [14] WANG X, EJEBE G C, TONG J et al. Preventive/Corrective Control for Voltage Stability Using Direct Interior Point Method. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 878—883.
- [15] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种用于静态稳定分析的故障参数化连续潮流模型. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 45—49.
ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A New Contingency Parameterization Continuation Power Flow Model for Steady Stability Analysis. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 45—49.
- [16] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 用于静态稳定预防控制的新灵敏度方法. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 27—33.
ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A New Sensitivity Method for Static Stability Preventive Control. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 27—33.
- [17] VAAHEDI E, MANSOUR Y, FCHS C et al. Dynamic Security Constrained Optimal Power Flow/Var Planning. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 38—43.
- [18] CAPITANESCU F, CUTSEM T V. Preventive Control of Voltage Security Margins: A Multicontingency Sensitivity-based Approach. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 358—364.
- [19] WU Q, POPOVIC D H, HILL D J et al. Voltage Security Enhancement via Coordinated Control. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 127—135.
- [20] 康忠健, 陈学允. 电网静态电压稳定控制数学模型的研究. 电力系统自动化, 1999, 23(21): 21—24, 36.
KANG Zhong-jian, CHEN Xue-yun. Study on the Mathematical Model of Static Voltage Stability Control. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(21): 21—24, 36.

赵晋泉(1972—), 男, 博士, 主要从事电力系统优化运行、静态稳定与控制 and 电力市场方面的研究工作。E-mail: jqzhao2@tom.com

江晓东(1956—), 男, 教授, IEEE Fellow, 主要从事电力系统分析、稳定与控制的研究工作。

李 华(1963—), 男, 博士, IEEE 会员, 主要从事电力系统暂态稳定、电压稳定和 VLSI 的研究工作。

A Static Stability Preventive Control Approach Based on Successive Linear Programming

ZHAO Jin-quan¹, CHIANG Hsiao-dong², LI Hua², ZHANG Bo-ming¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Cornell University, Ithaca 14850, U. S. A)

Abstract: In order to handle those severe instable contingencies for which there are no post-fault equilibrium points, a static stability preventive control approach is proposed. The preventive control problem is decomposed into two subproblems. One is to calculate the bifurcation point in contingency parameter space and the corresponding sensitivities. The other is to solve the sensitivity-based linear programming problem. In the previous one, a contingency-parameterized continuation power flow tool is used to obtain the bifurcation point of each instable contingency. In the latter one, several heuristic strategies are used to improve the computation efficiency of the optimization problem. Case studies on a practical 3 000-bus power system indicate that the proposed methods are effective and suitable for large scale systems.

Key words: power systems; static stability; sensitivity; preventive control; successive linear programming