

电力系统安全稳定预防控制在线计算方法的评述

方勇杰^{1,2}, 鲍颜红^{1,2}, 徐伟², 杨君军², 阮晶晶², 耿天翔³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106;

3. 国网宁夏电力公司, 宁夏回族自治区银川市 750001)

摘要: 预防控制辅助决策是大电网在线安全稳定分析控制系统的重要功能。针对实际工程中经常面对的暂态稳定、静态安全、静态电压稳定以及多种安全稳定问题的综合辅助决策问题, 评述了各类预防控制计算方法对实际大电网在线分析与控制要求的适应性。在评述各种方法的基础上指出, 基于安全稳定量化分析理论和方法, 构建合适的控制性能指标, 用于指导控制措施的启发式搜索和计算任务的并行分配, 可以改进算法的鲁棒性, 提高计算速度, 并获得尽可能优化的控制决策。

关键词: 在线分析控制; 预防控制; 暂态稳定; 静态安全; 静态电压稳定; 综合辅助决策

0 引言

随着大区电网的互联、直流输电工程的大量建设以及新能源发电在电网中的规模不断扩大, 电网运行复杂程度不断增加, 运行方式变化较大, 通常的离线分析与控制已经难以满足需要, 在线安全稳定分析与控制系统成为电网调度中心必备的工具^[1-2]。

电力系统安全稳定控制包括预防控制、紧急控制、校正控制、恢复控制等多种控制。预防控制在潜在故障发生前, 在不损失电源和负荷的前提下, 将工作点从稳定域外移至域内, 属于安全稳定规程^[3]中的第一道防线, 对应预想故障为规程规定的第一级标准不严重故障。预防控制增加了正常运行的费用, 且控制代价与维持控制的时间成正比, 因此工况调节的力度不能很大。预防控制措施在扰动发生前实施, 措施必须同时顾及所有感兴趣的潜在故障及各类安全稳定问题, 很可能遇到相互冲突的控制要求。如果预防控制使系统运行经济性太差或不同的故障提出相互矛盾的要求时, 依靠第一道防线来保证系统的稳定性并不可行, 此时只能采取紧急控制手段^[4]。

预防控制在线自适应优化是指不断跟踪电网拓扑和工况的变化, 及时更新最优决策, 可以采用开环或闭环控制方式。开环控制方式下由计算机进行决

策分析后, 向调度员提供建议, 由后者进行博弈决策^[4]。控制措施包括发电机功率调整、并联电容器和电抗器投切、直流功率调整、负荷调整等。预防控制辅助决策针对的安全稳定问题包括静态安全、暂态稳定、动态稳定、静态电压稳定、频率稳定等, 系统的安全运行点在上述各种安全域的交集中。

针对上述预防控制计算问题, 国内外学者进行了大量的研究工作, 提出了多种计算方法。本文针对实际工程中经常面对的暂态稳定、静态安全、静态电压稳定, 以及多种安全稳定问题的综合辅助决策问题, 评述了各类预防控制计算方法对复杂大电网和在线分析控制的适应性。

1 预防控制计算的特点

电力系统安全稳定预防控制计算问题, 可用如下统一的数学模型表示^[5]:

$$\min C(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{y} \in \mathbf{A}_{\text{CSR}} \quad (3)$$

式中: \mathbf{x} 为动态元件的状态变量向量; \mathbf{y} 为静态潮流变量向量(即静态运行点); \mathbf{u} 为控制变量向量; $C(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 为目标函数(根据具体的控制目的而定, 通常可为控制代价最小); \mathbf{g} 表示潮流方程; \mathbf{A}_{CSR} 为系统的安全域。系统能够保证正常运行的前提是各类安全稳定问题均满足要求, 因此 \mathbf{A}_{CSR} 为各类安全稳定问题对应的多种安全域的交集。

对于实际大电网而言, 各种安全稳定问题具有高维、强时变、强非线性的本质, 因此, 考虑多种安全

收稿日期: 2014-08-12; 修回日期: 2015-01-12。

国家电网公司科技项目“基于广域信息的大电网安全稳定在线应用关键技术研究及应用”及“特高压交直流、多直流协调控制系统研发及示范”。

稳定约束的预防控制计算是一个非常复杂的高维非线性规划问题,难以直接采用普通数学规划的方法进行求解。系统的安全稳定要求反映在约束条件中,仅仅当其极限值可以表达为常数或显函数时,才能用代数不等式约束来反映安全稳定要求。由于灵敏度系数是运行点的局部信息,故非线性优化需要迭代搜索,可以按性能代价比选择优化方向,但需要尽量避免陷入局部最优点。预防控制措施针对的是未来可能发生的各种故障,它们可能对预防控制提出冲突的要求。为此,需要以主导模式为特征,将预想事故集划分为若干子集,将问题降阶为各子集的优化。在迭代过程中跟踪主导模式可能发生的变化,克服控制负效应问题,指导优化搜索。最后通过协调各故障子集的最优解,求取全局最优解。不同子集的解耦优化及其相互协调构成了“解耦后的局部优化-聚合中的全局协调”的优化策略^[6-7]。

此外,对于在线安全稳定预防控制而言,计算速度是一个必须要考虑的问题,在电网出现安全稳定隐患时需要尽快给出调整措施。在当前的在线安全稳定分析与控制系统中,通常采用同构的计算节点组成计算集群,利用分布式并行计算技术以满足对计算速度的要求,因此,要求预防控制计算方法能与并行计算的要求相适应,以便充分利用计算资源^[8]。

2 保持静态安全性的预防控制计算

静态安全性的预防控制计算对应于学术上的安全约束最优潮流(OPF)问题,其发展历史较早,工程应用也较早。除了预防控制外,安全约束 OPF 也用于解决电网实际发生的设备过载和电压越限的校正控制。为了满足控制时间的要求,防止过载多采用直流潮流线性模型,而电压越限则需要采用交流潮流。

2.1 防止设备过载的预防控制

将静态安全预防控制问题处理成最优潮流问题,可以采用牛顿法^[9]和内点法^[10]等非线性优化技术直接求解,有较好的安全性和经济性,但下述问题的存在限制了它在实际工程中的应用:①需要形成和因子化二阶海森矩阵,随着系统规模的增大,计算量增大,计算时间长,也因此很难同时考虑针对多个故障扰动下的控制;②可能存在计算收敛性问题,无法得到控制解;③调整的设备可能过多,实际调度运行中难以操作;④难以识别不可行约束并放松约束条件,在预防控制问题没有最优解时无法给出次优解;⑤控制目标不能灵活设置,难以满足兼顾控制数目最少及其控制成本最低等实际工程的需求。

基于过载设备对控制变量的灵敏度信息,可以

将优化控制问题与潮流计算问题分开迭代求解,采用连续线性规划法^[11]或内点法^[12]等得到控制量。相对而言,该方法计算量较小,求解更为灵活,可以方便地使用一些缩小问题规模、提高计算效率的策略,然而并没有从根本上改善优化规划类方法的局限性。

不采用数学规划的方法,基于灵敏度的启发式算法没有收敛性问题,计算速度快,便于考虑多种实际工程问题和编程实现,如果预防控制问题没有最优解,该类方法可以方便地给出一个次优解,在目前的实际工程中获得了更广泛的应用^[13-14]。但基于灵敏度的启发式算法给出的控制方案不能保证数学意义上的最优,控制节点的选择仅以过载最严重的支路为依据,没有考虑对其他支路的影响,调整时如果控制节点对过载线路的作用与对接近极限的线路作用相反,对于整个系统来说,过载可能变得更加严重,需要进行多次潮流校验,甚至会因此得不到控制方案。

广义而言,上述问题实际上是多个预想故障下对多条过载支路、接近过载支路以及相同输电断面支路的协调控制问题。对于基于灵敏度的启发式算法可以考虑按照下式计算控制节点的综合加权灵敏度^[15]:

$$\omega_{i_M} = \sum_{j=1}^N [\lambda_{i_M,j} (1 - \eta_j)] + \sum_{k=1}^W \sum_{j_1=1}^{N_k} [\lambda_{i_M,j_1,k} (1 - \eta_{j_1,k})] \quad (4)$$

式中: ω_{i_M} 为第 i_M 个有功调整措施的综合性能指标; $i_M = 1, 2, \dots, M$, M 为有功调整措施的总数; N 为当前状态下过载设备的总数; η_j 为第 j 个设备的过载安全裕度; $\lambda_{i_M,j}$ 为第 i_M 个有功调整措施对第 j 个设备的有功灵敏度; W 为过载安全考核故障的总数; N_k 为第 k 个故障下过载设备的总数; $\eta_{j_1,k}$ 为第 k 个故障下第 j_1 个设备的过载安全裕度; $\lambda_{i_M,j_1,k}$ 为第 i_M 个有功调整措施对第 k 个故障下第 j_1 个设备的有功灵敏度。

按照综合加权灵敏度决定节点的控制方向。如果综合加权灵敏度为正,则节点减出力;如果为负则增出力;如果接近0或者存在控制方向冲突的情况,则不再调整该节点。之后,各节点按照灵敏度大小首尾配对依次参与控制直至消除全部支路过载。

还需要注意的两个问题是:①对于存在多条支路过载的情况,虽然全部支路过载均已解决,但有可能存在过控的情况,即针对某些支路的控制过量,此时需要校核这些支路的控制灵敏度较大的节点,撤

销一部分控制量;②由于灵敏度存在误差的原因,对于计算得到的控制措施进行交流潮流校核,会出现欠控或过控的情况,此时需要根据欠控或过控的控制量大小,修正相应的灵敏度系数,之后重新进行预防控制计算和交流潮流校核。

除了通常的调整发电出力和负荷的控制措施外,控制直流功率也可以解决直流整流站和逆变站附近的过载问题。需要注意的是,计算控制灵敏度时需要叠加直流整流侧和逆变侧的灵敏度。负荷转供也是实际工程中可以采取的控制措施,将过载支路供电区域中的一部分负荷转由其他支路供电,可以消除或减少支路过载量。在热备用的停运线路中寻找可以转供过载支路供电区域负荷的线路,校核线路投运后的过载情况,选择控制效果好且开关刀闸操作较少的热备线路作为转供负荷的线路^[15]。

2.2 防止电压越限的预防控制

电压限值包括上限和下限,故障后节点电压可能越下限,也有可能越上限。一般情况下电压问题具有局部性和区域性的特征,将主导或中枢节点电压控制到满足要求,即可解决主导节点所在区域内的节点电压越限问题。电压越限预防控制与设备过载预防控制类似,也可采用数学规划的方法或基于灵敏度的启发式算法进行求解,在电压越限节点中识别主导节点,仅仅对主导节点进行控制可以缩小计算规模和提高计算速度。但主导节点并不需要精确辨识,所有不正确的辨识可以在多次求解迭代中予以校正^[11]。

对于低负荷时段电网电压偏高的问题,机组进相是有效的控制手段。机组进相会造成系统暂态稳定水平下降,因此,需要对电压预防控制给出的控制措施进行暂态稳定的校核,一旦发现有预想故障失去暂态稳定,则需要降低相关失稳进相机组的进相深度^[16]。

3 保持暂态稳定性的预防控制计算

相对于其他安全稳定问题的预防控制方法而言,暂态稳定的预防控制是具有挑战性的问题。暂态稳定问题主要包括暂态功角稳定和暂态电压安全稳定^[17],预防控制数学模型中的暂态安全稳定约束可表示成如下形式:

$$\begin{cases} \eta_a^{(i)}(\mathbf{u}, \mathbf{x}^{(i)}) \geq \epsilon > 0 \\ \eta_v^{(i)}(\mathbf{u}, \mathbf{x}^{(i)}) \geq \epsilon > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i \in n_c$, n_c 为预想故障集; \mathbf{u} 和 \mathbf{x} 分别为系统的控制变量向量和系统状态变量向量; $\eta_a^{(i)}$ 和 $\eta_v^{(i)}$ 分别为预想故障集下第 i 个故障的暂态功角稳定裕度和暂态电压安全裕度,它们是关于系统状态变量和

控制变量的复杂非线性函数; ϵ 为暂态功角稳定裕度和暂态电压安全裕度最小值,其值大于 0 可保证系统留有一定的稳定裕度。

暂态稳定仿真模型中除了通常的微分-代数方程外,在实际的工程应用中,还需要增加描述相继事件的差分方程和描述各种逻辑关系的逻辑方程,用以描述支路过负荷相继开断及低频低压自动切负荷等事件。因此,该数学模型是逻辑-差分-微分-代数方程,含有强非线性和非自治性,其求解不可能脱离数值积分^[18]。

3.1 保持暂态功角稳定性的预防控制

目前暂态功角稳定预防控制算法大致分为以下几类:①结合时域仿真与数学规划的方法^[19-24];②基于能量函数直接法^[25-27];③人工智能方法^[28];④基于扩展等面积准则(EEAC)^[8,29]的方法。

结合时域仿真与数学规划的方法,以有限仿真时间内发电机转子角度或基于转子角的函数值是否超过门限值作为稳定判据。在具体的预防控制算法实现上通常采用以下两种方法。

1)应用梯形积分原理^[19-20],将仿真模型中的微分方程离散化成差分方程,同时将暂态功角稳定约束转化为观察时间 T 内每个时间点上发电机相对转子角度不超过门限值,由此可将暂态功角稳定预防控制问题转化为一般的非线性规划问题。

2)采用轨迹灵敏度方法^[21-24],即通过对仿真模型微分-代数方程的左右两边同时对 \mathbf{u} 求偏导数,得到 \mathbf{x} 对 \mathbf{u} 的轨迹灵敏度。先定义某种控制指标,例如转子角差^[21-22]、运动轨迹与稳定平衡点的偏离程度^[23]、发电机相对惯性中心功角的欧几里得范数^[24]等,然后基于求解得到的轨迹灵敏度计算控制变量对控制目标的灵敏度,将暂态功角稳定预防控制转化成普通的数学规划问题进行求解。

上述方法应用于实际电网的在线暂态稳定预防控制,主要存在如下问题:①理论上无法确定角度门限值与系统稳定性的严格对应关系,基于角度判据的稳定准则不可靠,不具有对实际系统的普遍适应性,这体现在实际应用中如何选取最大允许相对摇摆角,如允许的相对摇摆角太小会导致过量控制,而太大则无法确保系统稳定;②基于微分-代数方程的算法引入了光滑性假设,无法适应极不光滑的逻辑-差分-微分-代数方程型暂态稳定仿真模型;③将微分方程转化为差分方程的方法,对于每一个时步都会形成一组差分方程,约束的规模将会非常庞大,无法满足在线应用对计算速度的要求;④轨迹灵敏度方法中基于邻域的线性化方法只在一定范围内有效,虽然可以通过递归迭代、逐次逼近的方法加

以改善,但更为重要的问题是控制变量对所定义的控制指标的轨迹灵敏度仅仅是可观性指标,并不是可控性指标,其能否真正代表对稳定性的控制灵敏度无法在理论上得到解释和证明。实际工程中经常发现:根据这种方法,即使通过机组出力调节使得与最大转子相对摇摆角差对应的机组的转子角差满足要求,也并不能保证系统稳定,且无法保证控制变量优化目标的要求。

基于能量函数直接法的预防控制方法仅当考虑经典模型时精度尚可接受,但当考虑复杂模型和各种负荷模型特性时,计算精度则难以保证。而基于人工智能的方法,不但训练集的规模和代表性难以确定,而且其启发性的本质使得出现错误结论的可能性难以消除,同时,用于在线机器学习的计算时间也是在线暂态稳定预防控制无法承受的。

求解暂态功角稳定预防控制优化问题的主要困难是式(5)表示的安全域约束难以解析表达。扩展等面积准则通过识别受扰轨迹的主导模式,将多维轨迹的动态特征通过互补群惯量中心相对运动变换,保留到主导映象上的时变单机系统的轨迹中,可以给出复杂多机系统的轨迹稳定裕度,但如果各个控制变量对稳定裕度的灵敏度的计算仍然采用摄动、仿真和裕度计算的完整过程来获得,则难以满足在线计算对计算速度的要求。

目前的在线动态安全分析与控制系统中,投入实际应用的计算程序采用了扩展等面积准则来计算机组的参与因子^[30](参与因子体现了元件对安全稳定性的贡献程度),按多个预想故障下系统稳定裕度加权并计及控制代价得到控制性能指标,排序后首尾配对依次参与控制,逐步调整直至所有故障下暂态功角稳定裕度均满足要求^[8,29]。上述方法属于启发式算法,虽然从理论上无法保证获得全局最优解,但绝大多数情况下可以得到可行和优化的调整方案;上述方法的另一个特点就是无需修改目前成熟的数值仿真程序,仅仅需要对仿真结果进行数据挖掘,软件结构简单,具有很好的鲁棒性。

基于扩展等面积准则的方法在实际应用中还需要解决以下问题:①对多个失稳模式的控制要求可能相互冲突,如一个模式要求降低某台机组的出力,但对于另一个模式则可能使稳定程度恶化;②可能存在潜在的失稳模式,在初始工况的故障扰动尚未显现,但随着调整措施的增加,失稳模式被激发或者发生转换;③需要满足多类控制措施的要求,在目前实际系统运行中,升降直流系统功率以及必要时的压负荷操作也是可以采用的控制措施;④计算速度满足在线应用的要求。

在采用分布式并行计算技术的集群计算系统中,可以改进基于扩展等面积准则的启发式算法,采用枚举并行的方式,将参与因子首尾配对后得到的可能调整方案同时下发至计算节点并行计算,最终在计算结果中选择满足要求的方案作为辅助决策措施,极大地提高了计算速度^[8]。

3.2 保持暂态电压安全性的预防控制

在暂态电压安全预防控制优化模型中,暂态电压安全约束包括防止故障后系统发生暂态电压失稳和暂态电压延时恢复两个方面,文献^[17]提出了暂态电压安全的量化分析方法。实际上,除了系统无功支撑不足导致的电压不安全外,还存在发电机群功角振荡导致的振荡中心电压低的问题,而解决此类问题的有效手段是相对振荡发电机群的有功出力调整,可以采用与暂态功角稳定类似的方法。

故障后电压曲线变化类似的母线可以定义为同调母线,无功注入功率改变时,同调母线的变化特性相似。考虑无功控制的区域性和母线的同调性,可找到对系统暂态电压不安全点起主导作用的无功电源和无功功率负荷点,将暂态电压安全优化问题近似地解耦^[31]。将多个故障扰动下的电压分区与安全模式进行合并,可以减少计算量。

基于轨迹灵敏度的方法,可以得到暂态电压安全约束函数与控制变量之间的近似线性增量关系,从而将优化模型转化为非线性规划模型进行求解^[32]。在实际的工程应用中,通过计算节点无功注入对主导电压薄弱母线(该区域内电压安全裕度最低)的静态灵敏度,选择灵敏度大的节点采用启发式方法进行控制,也可以得到良好的效果。

4 保持静态电压稳定性的预防控制计算

静态电压稳定是系统运行中需要经常面对的一个安全稳定问题,由于电压崩溃可能极快发生,需要在线控制。与暂态和静态安全稳定问题的不同之处在于:系统对静态电压稳定的要求不仅仅是预想故障后保持稳定,还要求留有一定的稳定裕度。但在一些恶劣工况和严重故障下,也有可能故障后不能过渡到一个稳定平衡点而失去稳定,通常表现为故障后潮流计算不收敛。

如将系统对静态电压稳定裕度的要求在预防控制优化模型中作为目标函数处理^[33],则计算得到的稳定裕度过于乐观,不能满足实际运行的需要。将其作为约束条件处理,从采用的求解方法上,可以分为两类:一是针对所建立的特殊最优潮流问题的数学模型,采用牛顿法或内点法等非线性规划技术直接求解,得到控制解和系统运行点^[34],这通常要形

成和因子化潮流方程的二阶海森矩阵,计算量大,控制变量和约束数目巨大造成实用化困难,也因此很难同时考虑针对多个故障扰动的控制;二是采用将优化控制问题与稳定裕度计算问题分开迭代求解^[35],相对而言计算量较小,求解更为灵活,以下主要针对该类方法进行讨论。

优化控制问题需要满足的约束方程为:

$$\sum_{j=1}^{n_{\text{cont}}} S_{ij} (\Delta u_j^+ - \Delta u_j^-) \geq \alpha M_{\text{req}} - M_i \quad (6)$$

式中: $i \in n_c$; n_{cont} 为参与控制的控制变量数目; α 为补偿因子; M_i 为故障 i 情形下的稳定裕度; M_{req} 为系统运行要求的最小静态稳定裕度; S_{ij} 为在故障 i 时控制变量 j 对于稳定裕度参数的灵敏度; Δu_j^+ 和 Δu_j^- 分别为控制变量 u_j 的正、负向调整量。

求解上述问题的关键是计算灵敏度 S_{ij} ,文献^[36]给出了一种计算各种控制变量在稳定临界点的灵敏度信息的方法,公式如下:

$$S_{ij} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \lambda_j} \Big|_{(x_*, u_*)} = \frac{-\mathbf{w}' \mathbf{F}_u \Big|_{(x_*, u_*)}}{\mathbf{w}' \mathbf{F}_\lambda \Big|_{(x_*, u_*)}} \quad (7)$$

式中: λ_i 稳定裕度参数; (x_*, u_*) 为在分岔点处的取值; \mathbf{F}_λ 为扩展潮流方程 \mathbf{F} 对参数 λ 的导数; \mathbf{F}_u 为 \mathbf{F} 对于控制变量 \mathbf{u} 的导数; \mathbf{w}' 为 $n+1$ 维非零行向量,随分岔点类型不同而取值不同。

上述方法应用于在线静态电压稳定控制的主要问题在于计算速度。在采用连续潮流法计算静态电压稳定裕度和静态电压稳定临界点时,虽然可以对预测方法和步长控制策略等进行改进,但并不能完全解决连续潮流法计算量大的问题,尤其在临界点附近的步长不能太大。对上述灵敏度公式而言,其推导基础是临界点处潮流方程的雅可比矩阵奇异(鞍结型分岔)或正好发生了导致约束诱导型分岔的转换,如果由于步长过大导致连续潮流法计算的临界点距离真正的分岔点过远,必然导致按照上述公式计算的灵敏度不准确。

事实上,大型电力系统的 PV 曲线非常复杂,由于有载调压变压器分接头和并联电容电抗器的调节等离散事件以及发电机无功输出限值的约束等原因, PV 曲线仅是分段连续且不平滑的,需要考虑线性灵敏度的有效区间,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,因此需要经过多次迭代才能得到控制解,这也导致需要进行多次连续潮流计算。对于在线动态安全分析与控制系统的计算集群,通常的连续潮流法难以并行计算,只能按照各个预想故障自然解耦的特性,将各个故障下的系统 PV 曲线计算并行进行,计算效率较低,无法充分利用计算集群。

鉴于在线控制对计算速度的要求,预防控制计算需要在计算精度和速度之间进行很好的平衡,尽快给出可行和尽量优化的调整方案。文献^[37]中提出了基于准静态(QSS)假设,在指定的功率调整方式下采用二分法逐步逼近获得功率极限点的方法。如果基于并行计算平台进行计算,可以进一步扩展为将可能的功率调整方案同时下发并行计算,之后将功率调整上下限更新为临界稳定方案和临界不稳定方案,继续计算直至计算精度满足要求,如此可以进一步提高计算速度。采用普通的潮流计算方法替代准静态方法可将该方法应用于在线预防控制计算,但面临的问题是计算准确性无法满足要求。因为分岔点处潮流雅可比矩阵奇异,造成临近分岔点处潮流收敛困难,所以采用普通的潮流计算并不能保证到达分岔点。考虑在线静态电压稳定预防控制计算对计算速度的要求,可以适当降低计算精度。一般情况下普通的潮流计算方法不收敛时,虽然没有到达真正的分岔点,但也已经比较接近,可以在不收敛的前一个点开始连续潮流计算,适当采用较大步长,之后采用曲线拟合的方法近似估算出电压崩溃点和稳定极限^[38],如此可以较大地提高计算速度。但由于计算精度的原因,此时静态电压稳定灵敏度的计算公式已不再适用。

$Q-V$ 模态分析通过计算降阶雅可比矩阵的特征值和特征向量,可以得到系统的电压薄弱区域和节点的参与因子。在接近电压崩溃点时进行 $Q-V$ 模态分析,节点参与因子能够提供改善静态电压稳定性的相对量度。可以采用启发式方法,按照临近电压崩溃点时参与因子大小的先后顺序依次采取措施,直至系统稳定。如果基于并行计算平台进行计算,可以将可能的控制方案下发至并行计算平台同时计算,提高计算速度。

静态电压稳定预防控制中需要注意的一个问题是采取控制措施后造成电压过高。在控制策略搜索过程中一旦发现节点电压越限,则停止在该节点相关区域增加控制量。另一个问题是针对多个故障的预防控制可能存在的控制冲突问题。一般情况下,考虑到电压稳定问题的局部性和区域性,仅仅采用无功控制手段时不存在控制冲突问题,但如果将未来时刻发电机功率分配因子作为电压稳定裕度的控制变量^[39],则需要考虑不应减少电压薄弱区域的发电机功率分配因子。

对于故障后潮流不收敛的预防控制问题,文献^[40]利用故障型连续潮流方法得到一个虚拟的稳定临界点,并利用该点处可用于预防控制的灵敏度信息。实际上在一个统一的在线安全稳定分析和预

防控制框架下,故障后潮流不收敛通常也对应着暂态失稳,将暂态稳定预防控制措施加到初始潮流场景中,一般情况下可以得到一个收敛的潮流解。

5 多种安全稳定问题的综合辅助决策

目前互联大电网的动态行为和失稳模式特性日益复杂,各类安全稳定问题相互交织,多种安全稳定隐患可能同时出现,需要在预防控制计算中考虑多种安全稳定问题之间的协调优化,而以往的预防控制计算甚少涉及。文献[5]提出了综合动态安全和静态电压稳定的协调预防控制方法,采用综合安全约束的最优潮流模型来描述协调预防控制问题,基于控制灵敏度将综合安全约束解耦转化为一个线性优化模型并采用连续线性规划方法来求解。该类方法如上文所述,在实际应用中还存在诸多困难。

对于上述考虑多种安全稳定约束的预防控制计算问题,可以考虑实用化的处理方法以满足实际工程的要求。将预想故障后存在的多种安全稳定问题按重要和复杂程度进行排序,获得各问题的计算队列,预防控制按计算队列的先后顺序分别进行串行计算。前一预防控制计算完成后,根据计算结果调整电网运行方式,后续预防控制计算在前面的计算基础上进行。为避免后续的计算影响已计算的结果,每一预防控制计算完成后均须输出安全稳定裕度指标对候选控制措施的灵敏度,若无法得到相关的灵敏度,则输出候选控制措施的参与因子,后续预防控制计算将其作为对控制方向的约束加以考虑,对灵敏度或参与因子大于门限值的候选控制措施,控制方向不能与之前预防控制计算的方向相反。

对于耦合关系不强的多个安全稳定问题的预防控制可以进一步考虑采用分解协调的方法提高计算速度。将考虑的多种安全稳定问题进行分类,关系密切、耦合程度较强的问题分为同一类别,而不同类别的预防控制可以考虑并行计算以提高计算速度。考虑到电力系统的特点,实际工程中通常可将与有功/相角相关的设备过载、暂态功角稳定、动态稳定等问题归为一类,与无功/电压密切相关的电压越限、静态电压稳定等问题归为一类。对于按并行流程计算各类预防控制的计算结果,需要根据灵敏度信息进行合并得到综合控制措施,合并原则如下。

1)若控制措施灵敏度方向相同,则取各措施中的最大值。

2)若控制措施灵敏度方向相反,则根据安全稳定问题的相对急迫性、重要性和各安全稳定性指标对该控制措施的灵敏度综合确定控制措施的调整方向和调整量。例如:可将安全稳定问题的重要性量

化,将量化的重要性指标与灵敏度相乘,选取乘积最大的控制措施调整方向和调整量。

根据最终得到的控制措施调整电网运行方式,重新进行预想故障下安全稳定评估,若仍然存在安全稳定问题,则接受已计算出的控制措施,同时输出候选控制措施的灵敏度信息作为后续计算的稳定约束,重新开始计算;否则,终止计算过程。考虑多种安全稳定约束的预防控制计算流程如图1所示。

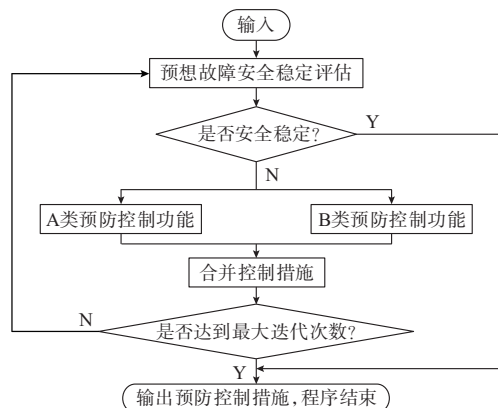


图1 考虑多种安全稳定约束的预防控制计算流程
Fig.1 Flow chart of preventive control calculation in a variety of security and stability constraints

上述考虑多种安全稳定约束的预防控制计算方法,采用分解协调和递归迭代的方法解决复杂的高维非线性规划问题,虽然不能严格满足最优控制的要求,但对于实际工程不失为一种可行和有效的计算方案。

但当不同预想故障场景、不同安全稳定问题、不同稳定模式对预防控制要求的冲突非常严重时,单纯依靠预防控制有可能在技术或经济上不可行。这种情况下,就需要配置紧急控制措施。

6 结语

预防控制辅助决策是在线安全稳定分析与控制系统非常重要的功能,但鉴于该问题的高维、强时变、强非线性的本质,以及在线计算对算法鲁棒性和计算速度的要求,不宜以能否获得全局最优解作为考核计算方法有效性的准则。然而,基于物理现象和控制机理,可以从搜索过程中每一次的潮流计算、模态分析或仿真轨迹中提取量化信息,计算控制性能指标,用于指导寻优计算过程中下一步的搜索方向以及各种计算任务在并行计算平台上的分配,从而尽快得到可行和尽可能优化的调整方案,满足实际大电网对预防控制在线计算的要求。

进一步的研究方向包括:针对新能源发电的波动性和间歇性,在预防控制计算中引入风光功率预

测信息,以减少控制偏差和运行方式的频繁调整;融合现有设防标准与运行中的不确定因素,基于风险理念进行电网运行控制决策的实用算法;融合广域动态实时测量与在线稳定分析的预防控制辅助决策方法。

参考文献

- [1] 徐泰山,许剑冰,鲍颜红,等.互联网预防控制和紧急控制在在线预决策系统[J].电力系统自动化,2006,30(7):1-4.
XU Taishan, XU Jianbing, BAO Yanhong, et al. On-line pre-precision based preventive and emergency control system for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 1-4.
- [2] 李碧君,许剑冰,徐泰山,等.大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J].电力系统自动化,2008,32(6):25-30.
LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.
- [3] DL 755—2001 电力系统安全稳定导则[S].北京:中国电力出版社,2001.
- [4] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J].电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [5] 郭琦,张伯明,赵晋泉,等.综合动态安全与静态电压稳定的协调预防控制[J].电力系统自动化,2006,30(23):1-6.
GUO Qi, ZHANG Boming, ZHAO Jinquan, et al. Coordinated preventive control between dynamic security and static voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 1-6.
- [6] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
- [7] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J].电力系统自动化,2006,30(3):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part III optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10.
- [8] 鲍颜红,徐泰山,许立雄,等.暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J].电力系统自动化,2010,34(1):32-35.
BAO Yanhong, XU Taishan, XU Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive control implementation and total transfer capability calculation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 32-35.
- [9] SUN D I, ASHLEY B, BREWER B, et al. Optimal power flow by Newton approach[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(10): 2864-2880.
- [10] WU Y C, DEBS A S, MARSTEN R E. A direct nonlinear predictor-correct primal-dual interior point algorithm for optimal power flows [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 876-883.
- [11] 赵晋泉,江晓东,张伯明.一种基于连续线性规划技术的在线静态安全校正算法[J].电网技术,2005,29(5):25-30.
ZHAO Jinquan, CHIANG Hsiaodong, ZHANG Boming. A successive linear programming based on-line static security corrective control approach [J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 25-30.
- [12] 程临燕,郝治国,张保会,等.基于内点法消除输电断面过载的实时控制算法[J].电力系统自动化,2011,35(17):51-56.
CHENG Linyan, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Fast elimination of overload in transmission line section based on simplified primal-dual interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 51-56.
- [13] 邓佑满,黎辉,张伯明,等.电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J].电力系统自动化,1999,23(18):5-8.
DENG Youman, LI Hui, ZHANG Boming, et al. Adjustment of equal and opposite quantities in pairs for strategy of active power security correction of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 5-8.
- [14] 姚峰,张保会,周德才,等.输电断面有功安全性保护及其快速算法[J].中国电机工程学报,2006,26(13):31-36.
YAO Feng, ZHANG Baohui, ZHOU Decai, et al. Active power security protection of transmission section and its fast algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 31-36.
- [15] 周晓宁,徐伟,胥传普,等.计及负荷转供措施的电网设备过载辅助决策[J].电力系统保护与控制,2013,41(23):61-66.
ZHOU Xiaoning, XU Wei, XU Chuanpu, et al. The assistant decision-making for power grid equipment overloading considering load transfer actions [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 61-66.
- [16] 崔晓丹,鲍颜红,马明,等.大电网发电机联合进相运行在线辅助决策计算[J].电力系统自动化,2011,35(24):79-83.
CUI Xiaodan, BAO Yanhong, MA Ming, et al. On-line auxiliary decision-making calculation for united generators' leading-phase operation in a large-scale power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 79-83.
- [17] 薛禹胜.运动稳定性理论——非线性非自治多刚体系统的稳定性分析[M].南京:江苏科学技术出版社,1999.
- [18] 薛禹胜,李威.关于暂态稳定控制决策优化方法的思考[J].电力系统自动化,2003,27(10):15-21.
XUE Yusheng, LI Wei. A review on the optimization of transient stability controls [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 15-21.
- [19] GAN D, THOMAS R J, ZIMMERMAN R D. Stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 535-540.
- [20] de TUGLIE E, DICORATO M, LA SCALA M, et al. Dynamic security dispatch under practical constraints [C]// 14th Power System Computation Conference, June 24-28, 2002, Sevilla, Greece.
- [21] 郭琦,赵晋泉,张伯明.基于变参数追踪的暂态稳定分析与预防

- 控制方法[J].电力系统自动化,2005,29(24):21-26.
- GUO Qi, ZHAO Jinqun, ZHANG Boming. Transient stability analysis and preventive control based on parameter-switching tracing method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 21-26.
- [22] 孙景强,房大中,周保荣.基于轨迹灵敏度的电力系统动态安全预防控制算法研究[J].电网技术,2004,28(21):26-30.
- SUN Jingqiang, FANG Dazhong, ZHOU Baorong. Study on preventive control algorithm for dynamic security of power systems based on trajectory sensitivity method [J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 26-30.
- [23] 周鲲鹏,陈允平.运用轨迹灵敏度的电力系统动态安全控制[J].电网技术,2003,27(12):46-50.
- ZHOU Kunpeng, CHEN Yunping. Power system dynamic security control based on trajectory sensitivity [J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 46-50.
- [24] 孙闻,房大中,袁世强,等.基于轨迹灵敏度的暂态稳定预防控制方法[J].天津大学学报,2010,43(2):19-24.
- SUN Wen, FANG Dazhong, YUAN Shiqiang, et al. Power system preventive control for transient stability enhancement based on trajectory sensitivity technique[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(2): 19-24.
- [25] LA SCALA M, TROVATO M, ANTONELLI C. On-line dynamic preventive control: an algorithm for transient security dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 601-610.
- [26] FOUAD A A, TONG J. Stability constrained optimal rescheduling of generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 105-112.
- [27] 余志文,郭志忠.考虑暂态稳定指标的负荷经济分配新算法[J].电力系统自动化,2001,25(13):26-29.
- YU Zhiwen, GUO Zhizhong. Novel load dispatching method considering transient stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 26-29.
- [28] 褚晓东,刘玉田,邱夕兆.基于径向基函数网络的暂态稳定极限估计与预防控制[J].电力系统自动化,2004,28(10):45-48.
- CHU Xiaodong, LIU Yutian, QIU Xizhao. Transient stability limit estimation and preventive control based on radial basis function networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 45-48.
- [29] 兰强,方勇杰,鲍颜红,等.基于EEAC的考虑暂态安全稳定约束的最优潮流计算[J].电力系统自动化,2010,34(8):34-38.
- LAN Qiang, FANG Yongjie, BAO Yanhong, et al. Transient security constrained optimal power flow based on EEAC method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 34-38.
- [30] 徐泰山,薛禹胜,鲍颜红,等.电力系统暂态安全稳定模式中元件参与因子识别方法:中国,CN200910026801.4[P].2009-06-01.
- [31] 薛禹胜,王正风.暂态电压安全预防控制的优化[J].电力系统自动化,2006,30(9):1-4.
- XUE Yusheng, WANG Zhengfeng. Optimization of preventive control for transient voltage security [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 1-4.
- [32] 林舜江,刘明波.暂态电压安全预防控制优化的轨迹灵敏度法[J].电力系统自动化,2010,34(4):12-17.
- LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Using trajectory sensitivity method for transient voltage security preventive control optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 12-17.
- [33] CANIZARES C A, ROSEHART W, BERIZZI A, et al. Comparison of voltage security constrained optimal power flow techniques[C]// IEEE/PES Summer Meeting, July 15-19, 2001, Vancouver, BC, Canada: 1680-1685.
- [34] WANG X, EJEBE G C, TONG J, et al. Preventive/Corrective control for voltage stability using direct interior point method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 878-883.
- [35] 赵晋泉,江晓东,张伯明.一种在线电力系统静态稳定增强控制算法[J].中国电机工程学报,2005,25(8):7-12.
- ZHAO Jinqun, CHIANG H D, ZHANG Boming. An on-line enhancement control algorithm for static stability in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 7-12.
- [36] GREENE S, DOBSON I, ALVARADO F L. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 262-272.
- [37] CAPITANESCU F, VAN CUTSEM T. Preventive control of voltage security margins: a multi contingency sensitivity-based approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 358-364.
- [38] CHIANG H D, WANG C S, FLUECK A J. Look-ahead voltage and load margin contingency selection functions for large-scale power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 173-180.
- [39] 钟浩,吴政球,张小兵,等.基于发电机功率分配因子的静态电压稳定预防控制[J].中国电机工程学报,2011,31(34):150-155.
- ZHONG Hao, WU Zhengqiu, ZHANG Xiaobing, et al. Preventive control for static voltage stability based on generation power distribution factor [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 150-155.
- [40] 赵晋泉,江晓东,李华,等.一种基于连续线性规划的静态稳定预防控制方法[J].电力系统自动化,2005,29(14):17-22.
- ZHAO Jinqun, CHIANG H D, LI Hua, et al. A static stability preventive control approach based on successive linear programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 17-22.

方勇杰(1964—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: fangyongjie@sgepri.sgcc.com.cn

鲍颜红(1971—),男,通信作者,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析计算方法。E-mail: baoyanhong@sgepri.sgcc.com.cn

徐伟(1982—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 章黎)

A Review of On-line Calculation Methods of Preventive Control for Power System Security and Stability

FANG Yongjie^{1,2}, BAO Yanhong^{1,2}, XU Wei², YANG Junjun², RUAN Jingjing², GENG Tianxiang³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Auxiliary decision-making based preventive control is one of the most important modules in on-line analysis and control system of large power grid security and stability. According to the often faced problems in practical engineering, such as transient stability, static security, static voltage stability, and a variety of security and stability issues of comprehensive auxiliary decision-making, the adaptability of various calculating methods of preventive control for the requirements of on-line analysis and control in the actual large power grid is reviewed. On the basis of reviewing various methods, the control performance index based on the quantitative analysis theory and method of power system security and stability is proposed, which can be used to guide control measures for heuristic search and parallel allocation of computing tasks. The method is capable of improving the robustness of the algorithm and the computation speed, while yielding optimal control decision-making as much as possible.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: on-line analysis and control; preventive control; transient stability; static security; static voltage stability; comprehensive auxiliary decision-making