

一种基于随机-鲁棒混合整数规划的电网离线稳控策略定值规范化整定方法

李诗旻¹, 张建新², 付超¹, 杨欢欢², 朱泽翔¹, 邱建², 刘宇明¹, 谢宇翔¹

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 中国南方电力调度控制中心, 广州 510663)

摘要: 高比例新能源发电带来的运行环境不确定性将显著增加离线稳控策略及其整定值的失配风险或运行成本。目前, 快速自适应的在线策略制定尚无法在实际运行中完全替代离线策略制定流程, 依靠规范化、自动化方法缩短离线稳控策略可靠更新周期势在必行。为此提出了一种基于随机-鲁棒混合整数规划的电网离线稳控策略定值规范化整定方法。不确定性参数按是否精准可信掌握概率分布被分为两类, 分别采用随机规划和鲁棒规划方法予以应对; 定值整定问题被规范为一个两分支的双层随机-鲁棒优化模型。所提方法在南方电网某实际稳控系统算例中得到验证, 可支撑日前时间尺度的策略定值规范更新。该方法对不确定运行环境下系统安全敏感且难以完全解析的离线决策, 提供了一个通用的规范化、自动化改进技术框架。

关键词: 离线稳控策略; 整定值; 不确定性运行环境; 自动化控制策略制定

A Normative Setting Approach of Power System Off-Line Stability Control Strategy Based on Stochastic-Robust Mixed Integer Programming

LI Shiyang¹, ZHANG Jianxin², FU Chao¹, YANG Huanhuan², ZHU Zexiang¹, QIU Jian², LIU Yuming¹, XIE Yuxiang¹

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The mismatch risk and operational cost of off-line stability control strategy and setting values will increase dramatically with high proportion new energy generation which impose uncertainty on power system operation. Given that the fast adaptive online configuration of control strategy cannot replace the off-line strategy formulation procedure in practice for the moment, reforming the off-line stability control strategy configuration by a normative and automatic procedure is inevitable. A normative setting approach of power system off-line stability control strategy based on stochastic-robust mixed integer programming is proposed. The uncertain parameters are divided into two categories according to whether their probability distribution can be credibly provided, and incorporated by stochastic and robust programming respectively; the setting problem is normalized as a dual-branch bi-level stochastic-robust optimization. The proposed approach is demonstrated on a real stability control strategy of China Southern Power Grid, and its efficiency to support daily update is verified. This proposed approach provides a general normalization and automation technical framework for the security-sensitive and simulation-based off-line decision problems in an uncertain operational environment.

Key words: off-line stability control strategy; setting value; uncertain operational environment; automation of control strategy configuration

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904205); 中国南方电网有限责任公司重点科技项目(ZDKJXM20190031)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFB0904205); the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (ZDKJXM20190031).

0 引言

为应对全球气候变暖,解决人类永续发展中的资源环境约束,2020年中国提出了“力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的“双碳”目标。为实现“双碳”目标、构建新型能源体系,必须大力发展风能、太阳能等新能源,预计到2060年,我国风电、太阳能等新能源发电量占比将超过50%^[1-2]。新能源发电具有随机性、波动性、间歇性,其装机和电量占比迅速增大,必然给电网运行环境带来更大的不确定性,这已成为建设新型电力系统的主要技术挑战之一^[3-4]。在电网安全稳定控制领域(第二道防线),不确定性显著增大的后果就是控制无解、失效或代价过大等稳控策略失配风险大幅上升,威胁系统安全。因此,必须提升稳控策略制定的不确定性适应能力,保障不确定运行环境下新型电力系统安全稳定运行。

事实上,为应对负荷不确定性,人们已经研究、实践了许多稳控策略制定方法。例如,在离线稳控策略设计时,根据特定稳定问题构建用于分析校核的极端运行场景集,这实际上就是一种鲁棒方法。此外,大量研究致力于将稳定控制从“离线决策、在线实时匹配”模式升级为“在线预决策、实时匹配”模式直至“实时决策”模式^[5-10]。然而,经过数十年研究实践,尽管国内外许多运行中的调度控制系统均已包含有支持在线决策甚至实时决策的功能^[11],但自动生成策略长期持续投入闭环运行的实例是罕见的。本文认为,通过规范化、自动化方法改造传统离线策略制定流程,用快速可靠的离线策略填补当前离线策略(通常更新时间周期为数月至一年)和在线策略(通常设定更新周期为数分钟至一小时)在更新周期上的断层,寻求从离线策略到在线策略的渐变而非颠覆式跳跃,是未来运行环境不确定性显著增大背景下稳控策略制定技术的一个重要发展方向。

本文在上述方向上具体研究常见稳控策略关键定值的离线规范化整定问题。目前国内调度部门进行离线稳控策略定值整定时大多缺乏规范化流程,依赖专家经验,一方面难以在预想场景强随机、高可变条件下实现定值整定快速可靠,另一方面所给出的定值缺乏最优性、规范性,难以适应安全防御在线化和电力市场的要求。一些文献对离线稳控策

略及定值的规范求解方法进行了研究。文献[12-15]提出了稳定控制方案或控制措施量的生成方法,但并未直接给出公式化控制策略的整定值。文献[16]提出了仿射型的控制量公式并利用需切量函数凸性,以其首尾样本连线确定整定值,然而,对于实际大系统考虑各类稳定性及运行方式隐变量影响后,这一凸性无法保证。文献给出了基于约束潮流的离线仿真场景生成方法,然后利用最大功角差对控制量的解析灵敏度快速计算控制策略。现有的在线预决策方法也为离线规范化自动化定值整定提供了参考。如文献[8]提出了可供借鉴的以最小化控制代价风险为目标,安全稳定裕度为约束的在线预防控制、紧急控制优化模型框架。上述文献都没有讨论不确定性环境下离线公式化稳控策略的定值整定。文献[17]给出了基于规则的切负荷控制量分段线性计算公式定值整定方法,但没有涉及不确定性应对。本文将用到随机-鲁棒优化方法。在电力系统问题中单独应用随机规划^[18]或鲁棒优化^[19]方法是常见的,文献[20-21]联合运用两种方法,在数学建模方法上可供参考,但显然无法直接套用于解决本文研究的问题。

为此,本文提出了基于随机-鲁棒混合整数规划的电网离线稳控策略定值规范化整定方法,其主要贡献在于以下几点。

1)流程规范化、自动化:将包含切机/切负荷基值、系数和优先顺序在内典型主要稳控策略定值的整定问题建模为规范的、求解过程自动化的数学优化问题,用混合整数优化模型描述策略执行逻辑。

2)不确定性应对:将掌握可信概率分布(以新能源出力为代表)和不掌握概率分布(以给定关键断面功率下待切机组/负荷功率分布为代表)的两类随机性分别用随机规划和鲁棒规划框架予以应对,并提出分层、两分支混合描述。

3)模型简化:将“最小过切”原则对应的优化问题转写为一组混合整数约束,从而将优化问题结构从三层简化为两层,有利于问题可靠快速求解;同时对模型进行了其他有利于求解的优化。

本文首先对所研究的定值整定问题做规范描述,然后介绍所提出的随机-鲁棒优化模型及模型的转写简化,最后,以南方电网主网某实际稳控系统策略的定值整定为例,验证方法的有效性。

1 离线切机/切负荷稳控策略的定值整定

1.1 问题描述

1.1.1 稳控定值整定的一般概念

当发生电力系统安全稳定第二道防线设防范围的故障扰动后,电力系统安全稳定控制系统或装置(后文简称稳控系统)根据其观测状态量变化识别出故障后触发对应稳控策略,形成稳定控制措施。每一个稳控策略通常包括设防故障、运行方式、触发条件、控制量计算、防误条件、控制对象等要素,并以表格形式呈现(见表1)。

表1 稳控策略表的一种典型形式

Tab. 1 A typical form of stability control strategy table

策略功能名称	系统运行方式	启动条件	故障元件	控制量计算	防误条件	控制对象
某直流联网方式双极闭锁保护	正常方式	某线路,某主变突变量启动	某时间内某直流两极相继闭锁	1)送端切机策略启动门槛条件: $P_{DC} > P_{mk}$ 需切量计算: $D_p = K_n \times (P_{DC} - P_{set})$	$D_p < P_{fw}$	向某发切机命令交替切某机组 向某机组发切负荷命令
	某方式 特殊方式一			2)受端切负荷		

注: K_n 、 P_{set} 、 P_{fw} 、 P_{dc} 为整定值; D_p 为需切量。

为了保证策略对特定扰动、特定场景准确性、针对性的同时,提高策略形式的规范性、通用性、适应性,通常稳控策略是参数化的,而且其中一部分参数开放给用户自定义,称为整定值(如表1中 K_n 、 P_{set} 、 P_{fw} 为整定值),调度部门可根据实际需要的变化做出调整,这一过程简称为定值整定。

复杂的稳控策略可能包含数十个整定值,本文综合考虑代表性、实效性和可行性,主要关注与定值整定规范化、自动化以及应对不确定性高度相关的控制需求量计算公式定值和控制对象优先级定值。为简化表述且失一般性,下文针对切机稳控策略进行描述。

1.1.2 需切量计算公式及其整定值

稳控策略需根据系统运行状态决定合适的动作量,也就是说,稳控策略将系统运行状态映射到需求控制量。对于稳控切机策略,这一映射的一类常见形式为:

$$P_{pd}(P; K, P_b, P_t) = \begin{cases} K \cdot \max\{P - P_b, 0\}, & P > P_t \\ 0, & P \leq P_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{pd} 为策略给出的计算需切量, MW, 一般也称为要切量; P 为当前系统运行状态的某个功率值, 通常是某个与所设防故障高度关联的断面功率。稳控策略根据这个关键断面功率确定需求切机量。例如, 对于电厂送出通道故障引起的电厂对系统暂态功角失稳, 通常以送出断面功率作为切机策略的输入状态量。 K 、 P_b 、 P_t 为3个整定值, 分别称为切机系数、切机基值和切机门槛值。通常, 可通过选择 P 的正方向, 使得 P_{pd} 与 P 大体上正相关, 因此规定 $K \geq 0$ 。为了消除决策变量之间的非线性关系, 可定义整定值 $B = KP_b$ 。因此当 $K \geq 0$ 时可将式(1)改写为:

$$P_{pd}(P; K, B, P_t) = \begin{cases} \max\{KP - B, 0\}, & P > P_t \\ 0, & P \leq P_t \end{cases} \quad (2)$$

目前国内涉及切机、切负荷的主网稳控策略很多采用式(2)或其变形、简化版本作为控制量计算公式。其数学本质是将系统运行方式压缩到一维表示, 并且函数形式简化为带门槛的一阶多项式。

1.1.3 实际需切量

为维持系统稳定所需要的实际需切量用 P_{ad} 表示, 它是 P 的函数。在离线策略制定中, 通常假设 P_{ad} 可以利用足量的时域仿真结果来估计, 一种常用的流程是: 给定 P , 构建关键断面功率等于 P 的多个场景, 包含 P 所对应的各种极端运行情况, 然后通过时域仿真, 试探所设防故障后各场景下能保持系统稳定(包括所有稳定类型)的最小切机功率值; 对所有场景下的最小切机量取大, 加上适当的裕度, 作为对 $P_{ad}(P)$ 的估计。如果通过对 $P_{ad}(P)$ 的解析分析给出了近似闭合形式, 可用闭合式加速或替代上述时域仿真计算过程。

为保证后文表述严谨, 对于函数 $P_{ad}(P)$ 作如下符合经验的假设。

$$\exists P_0: P_0 = \sup\{P' \mid \forall P \leq P', P_{ad}(P) = 0\} \quad (3)$$

式中 P' 为一个辅助变量。式(3)含义为: 存在一个稳定边界状态 P_0 , 当 $P < P_0$ 时, 不需要切机, 且在 P_0 的任意右邻域 $[P_0, \delta)$ 中一定存在 P 使得 $P_{ad}(P) > 0$ 。 P_0 可以通过时域仿真获得。通常 P_t 可取 P_0 减去一个裕度, 本文不再讨论其整定方法。

1.1.4 切机优先顺序及其定值

在许多切机稳控策略中, 待切机组之间存在可整定的优先级, 不失一般性地, 假设优先级定值的具体形式为每台待切机组的优先序号。令 I_G 表示所关心策略待切机组的序号集合, 待切机组优先级定值实际上是对 I_G 中序号的重排结果, 因此可以用一个置换矩阵 $Q \in \{0, 1\}^{|I_G| \times |I_G|}$ 来表示切机优先顺序定值。

1.1.5 最小过切原则

在大多数切机稳控策略中, 一次策略出口命令需切除的发电机, 由 P_{pd} 、各待切机组在装置启动锁定初始断面的功率及其优先级, 按最小过切原则匹配确定。所谓最小过切, 即按优先级累加发电机功率, 直到大于 P_{pd} , 或已穷尽所有待切发电机后停止, 进入累加的发电机即本次策略出口命令最终需要切除的发电机。

1.1.6 定值安全性约束与过切量

稳控策略必须保证控制量是充分的, 也即满足下列定值安全性约束。

定值安全性约束 1: 在给定的整定值下, 按照稳控策略(包含上述最小过切原则)确定的实际切除机组功率之和 P_{ac} , 须不小于 P_{ad} 。

实践中, 在进行离线稳控策略定值整定时, 由于待切机组功率可变, 为简化分析保证不欠切, 经常使用更强的安全性约束, 即:

定值安全性约束 2: 在给定的整定值下, 按式(2)得到的 P_{pd} 不小于 P_{ad} 。

显然, 根据定值安全性约束 2 是定值安全性约束 1 的充分条件。在定值安全性约束之下, 可定义过切量 P_{oc} 如式(4)所示。

$$P_{oc} = P_{ac} - P_{ad} \quad (4)$$

实践中有时为简化问题, 也可能将过切量定义为 $P_{ac} - P_{pd}$, 本文为还原过切量的本质含义, 采用式(4)的定义。

当 $P_{ad}(P)$ 难以解析时, 定值安全性约束使用其样本化形式予以近似, 即

$$\forall i \in I_T: P_{oc}(P_i) \geq 0 \quad (5)$$

式中: I_T 为离线仿真扫描的场景样本序号集; P_i 为样本 i 的过切量。为保证安全性, 采样必须足够充分, 并在 P_{ad} 中考虑裕度。

在一些问题中, 切除量过大也会引入新的安全

问题, 本文不显式处理这类安全约束, 而在后文中通过把减小过切量视为优化目标予以间接考虑。

1.1.7 本文研究的定值整定问题

在上述设定下, 本文研究的定值整定问题为: 在可以通过批量时域仿真获得充足的 $P_{ad}(P)$ 样本的基础上, 按某种合理的整定目标和策略, 对式(2)表示的切机稳控策略, 寻找满足定值安全性约束的整定值 K 、 B 、 Q 。这一问题在许多国内实际稳控策略的定值任务中存在, 代表了其中计算密集度较高、可规范性条件较好、与不确定性适应密切相关的重要环节。

1.2 方法现状与改进必要性

1.2.1 当前工程实践中的整定方法

在离线策略定值整定的工程实践中, 通常并未将上述定值整定问题规范建模为数学问题求解, 而通过一个基于工程经验的“启发式试探-仿真校核”迭代过程实现^[17]。通常取 $K = 1$ 或数值仿真得到的局部斜率 $\Delta P_{ad}/\Delta P$ 的平均值, $P_b = P_l$ 作为试探迭代初值; 在充分大范围内校核不同 P 下, 按试探的整定值 K 、 P_b 是否能满足定值安全性约束 2, 如果不能, 则考虑适当增大 K , 减小 B , 并使其尽量不超出经验的合理范围。对 Q 的整定则更无定法, 系统侧通常不对 Q 作优选, 而由电厂根据其内部约束自行决定; 或者在单机容量差异较大时, 按某种经验规则(如先切小机组)少量试探比较不同 Q 下的结果, 对显著较劣的排序建议排除。

1.2.2 改进的必要

上述工程实践中的整定方法存在两方面局限难以适应电网发展需求。第一, 人工依赖, 效率低下。工程实践流程中, 不少工作量消耗在可自动化替代的人工机械操作上, 存在显著的效率瓶颈, 对一组前述切机策略定值的整定, 有时可占用熟练技术人员数天甚至更长时间, 无法适应离线策略快速迭代的发展需求。第二, 经验依赖, 严格性、规范性、最优性缺乏。受制于人工操作的效率瓶颈, 上述工程实践流程通常难以对大量运行场景和定值组合进行充分试探校核, 场景和定值选择经验性、任意性强, 结果缺乏最优性。此外应注意的是, 市场化必然对稳控策略及定值的规范性、最优性、公允性提出更高的要求, 当前工程实践方法难以适应。

2 基于随机-鲁棒混合整数规划的切机稳控

策略定值整定模型

2.1 不确定性建模与定值整定模型结构

2.1.1 定值整定的目标函数

稳控定值整定本质上是一种稳定控制决策。对于稳定控制,优化目标通常为在保证稳定的约束下最小化控制成本。在不确定性控制决策问题中,控制成本的量化,则取决于对不确定性的建模。

2.1.2 不确定性建模

不确定性建模服从于总体的不确定性决策方法。随机规划和鲁棒规划是不确定性决策的两种重要方法,在主要数学手段和思想方法上存在显著区别^[22]。选择不确定性决策方法的技术路线通常涉及对两种方法的取舍应用。本文建模方法的一个重要基础,是对随机、鲁棒两类方法相容性的观察。

首先在数学形式上,应注意到,通过调节风险指标的效用函数或不确定性预算^[21],实际上随机规划可以平滑过渡、趋近或达到鲁棒规划的效果,两者没有不可逾越的鸿沟。

其次在思想方法上,传统稳控策略制定的主导思想是鲁棒的。究其原因,一方面,安全控制决策在本性上就是高度风险厌恶的,强调底线思维;另一方面,策略制定面临的不确定性是广泛而复杂的,难以获得全面而精确的联合概率分布信息,不得不放弃对不确定性结果的精确管控,聚焦于极端情况。但这并不意味着随机规划的思想在这一问题上不可行、不正确。事实上,随着新能源引入的系统运行不确定性上升,随着电力市场引入的系统运行对稳控动作量成本的敏感性上升,若稳控策略仅由概率极低的边界场景确定可能引入不可接受、不必要的成本;此外,对所面临的不确定性,通常人们或多或少具备一些概率先验知识。因此,随机规划的思想同样反映了一部分客观现实。

因此,在离线定值整定这样的不确定性决策问题中,采用随机规划或是鲁棒规划方法,主要取决于对于不确定性的掌握程度:当对不确定参数的概率分布具备精准把握时,采用随机规划的方法,并在目标函数中采用可正确反映风险厌恶的风险指标,能提供最精细的概率化控制成本优化效果;当对不确定参数不(确信)掌握精准概率分布,或不确定参数本身不具备稳定的分布,同时又能对不确定参数的可变区域给出充分可信范围时,使用鲁棒规

划方法,可以有效限制控制成本的上限。

然而,实践中最常见的情况是,决策者对部分不确定参数掌握概率分布(或生成模型),而对另一部分参数则只能给出其可变范围。例如,近年来,新能源发电预测技术取得长足发展,在涉及新能源发电功率的定值整定问题中,新能源发电功率 P^r 就是具备概率模型的不确定性参数,假设已知其联合概率密度函数 $\mathcal{P}$ 。而对于策略动作时,给定关键断面功率 P 后待切机群的开机和功率分布 P^G (停机用零功率表示),在一定程度上受调度运行者或市场主体的自由意志掌控,可能并不存在稳定的概率分布,稳妥起见,只能以开机或停机、最大最小技术出力给出其可变范围,即 $P^G \in \{0\} \cup [P_{\min}^G, P_{\max}^G]$ 。为简化问题,不妨假设 P^r 和 P^G 是相互独立的。对这样的情况,需提出随机规划和鲁棒规划的融合方法,对 P^r 采用随机规划方法处理,对 P^G 采用鲁棒规划方法处理。在随机规划目标函数的风险指标选择上,为简化问题,本文采用控制成本的数学期望作为目标函数。

2.1.3 随机与鲁棒的结合顺序

由于控制成本 $C(K, B, Q; P^r, P^G)$ 同时受 P^r 和 P^G 两个(组)参数影响且对两者目标冲突,因此在优化问题的结构上, P^r 和 P^G 的变化不可能处于同一层次,也就是说概念上不存在某个控制成本,同时满足 P^r 按 $\mathcal{P}$ 取期望,且 P^G 使控制成本最大。因此,对 P^r 的随机和对 P^G 的鲁棒必然存在顺序。分别用 $\mathbb{E}_{P^r} \max_{P^G}$ 和 $\max_{P^G} \mathbb{E}_{P^r}$ 两个复合算符表示两种可能的顺序。对任意控制成本函数 C ,不难证明:

$$\mathbb{E}_{P^r} \max_{P^G} C(K, B, Q; P^r, P^G) \geq \max_{P^G} \mathbb{E}_{P^r} C(K, B, Q; P^r, P^G) \quad (6)$$

因此可以认为 $\mathbb{E}_{P^r} \max_{P^G}$ 结构更能体现对 P^G 的鲁棒性,在稳控定值整定问题中更合适。

2.1.4 定值整定随机-鲁棒优化模型的结构

完成前文讨论后可以给出本文提出的稳控切机策略定值整定问题的随机-鲁棒优化模型结构。如图1所示。模型包含三层优化,第二层L2以下有两个平行分支;两个分支问题几乎完全相同,除了一个在L2最大化目标函数,另一个最小化目标函数;第三层L3两个分支上的问题完全相同。图中虚线

和箭头指示出变量的信息传递路径, 上层问题的决策变量作为参数传递给下层(深红色箭头), 下层的最优解或最优函数值反馈到上层的目标函数或约束中(蓝色箭头)。

图 1 中左方第一分支对应最小化随机-鲁棒控制成本 $\mathbb{E}_{P^r} \max_{P^G} C(K, B, Q; P^r, P^G)$ 这一目标, 另需有约束保证优化模型给出的最优整定值必须在所有可能的 P^r 和 P^G 组合下满足定值安全性约束。借助第一分支在 L1 对期望的场景化表达(用场景的概率加权平均代替期望), 以及在 L2、L3 的数学形式, 第二分支实现了样本化的定值安全约束: 对给定的每一个 P^r 样本, 要求变化 P^G 使切机量最小时, 该最小的切机量对于保障切机后系统安全稳定也必须是充足的。

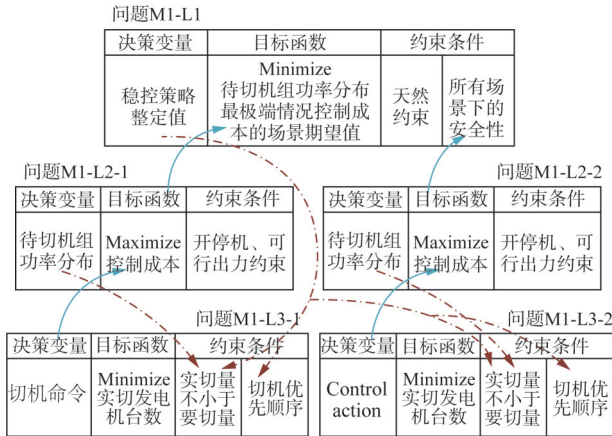


图 1 随机-鲁棒优化问题 M1 模型结构

Fig. 1 Structure of stochastic-robust optimization model M1

2.2 定值整定随机-鲁棒优化数学模型

令 Ω_s 表示一个能充分刻画新能源发电 P^r 随机分布 $\mathcal{P}$ 的随机样本集, Ω_T 表示稳控策略相关关键断面功率 P 的校核场景集合, Ω_G 表示待切机组集合, 令 $I_s = \{1, 2, \dots, |\Omega_s|\}$ 、 $I_T = \{1, 2, \dots, |\Omega_T|\}$ 、 $I_G = \{1, 2, \dots, |\Omega_G|\}$ 表示相应的元素序号集, 并规定 $P_i \in \Omega_T$ 按从小到大排列, 大体均匀并具有合适的步长, 且 $P_1 = P_0$, 其中 P_0 在式(3)处定义。假设 $(s, i) \in \Omega_s \times \Omega_T$ 给定了一组校核方式条件, 在这一条件下, 通过数值仿真(dynamic simulation program, DSP)等主流电力系统安全定计算软件已可自动化实现), 得到对应的实际需切量 $P_{ad, i, s}$ 。图 1 所示第一层问题 M1-L1 由以式(10)给出。

$$\min_{K, B, Q} \sum_{s \in I_s} \sum_{i \in I_T} \omega_i [R_{\max, i, s}(K, B, Q) - P_{ad, i, s}]^2 \quad (7)$$

满足:

$$K \geq 0 \quad (8)$$

$$\begin{cases} \forall n \in I_G: \sum_{m \in I_G} q_{m, n} = 1 \\ \forall m \in I_G: \sum_{n \in I_G} q_{m, n} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$\forall s \in I_s, i \in I_T$:

$$R_{\min, i, s}(K, B, Q) - P_{ad, i, s} \geq 0 \quad (10)$$

式中: $K, B \in \mathbb{R}$, $Q \in \mathbb{R}^{|I_G| \times |I_G|}$ 为待优化的稳控策略整定值, 含义见 1.1 节; 令 $q_{m, n} \in \{0, 1\}$ 表示 Q 的第 m 行第 n 列元素; $s \in I_s$ 为新能源场景序号; $i \in I_T$ 为关键断面功率水平序号; $\omega_i \in [0, 1] \subset \mathbb{R}$ 为第 i 个关键断面功率水平对应的归一化权重, 可用历史数据统计分布确定, 或根据需要赋值。 $R_{\max, i, s}, R_{\min, i, s}: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^{|I_G| \times |I_G|} \rightarrow \mathbb{R}$ 将一组整定值分别映射到第 i 个关键断面功率水平和第 s 个新能源场景下的最大、最小实切量。因此目标函数正是所有场景 (s, i) 下的最大过切量加权平方和。式(10)表示样本化的定值安全性约束 1。

$R_{\max, i, s}(K, B, Q)$ 是问题 M1-L2-1 的最优目标函数值。问题 M1-L2-1 由式(13)给出。

$$\sup_{\{P_{k, i, s}^G, y_{k, i, s}, x_{k, i, s}^* | k \in I_G\}} \sum_{k \in I_G} P_{k, i, s}^G x_{k, i, s}^* \quad (11)$$

满足:

$$\sum_{k \in I_G} P_{k, i, s}^G = P_i \quad (12)$$

$\forall k \in I_G$:

$$y_{k, i, s} \sum_{n \in I_G} q_{k, n} P_{\min, n}^G \leq P_{k, i, s}^G \leq y_{k, i, s} \sum_{n \in I_G} q_{k, n} P_{\max, n}^G \quad (13)$$

式中: $k \in I_G$ 为待切机组待切序号; $P_{k, i, s}^G \in \mathbb{R}$ 为场景 (s, i) 下第 k 台待切机组功率; $y_{k, i, s} \in \{0, 1\}$ 为该场景下第 k 台待切机组是否开机的标志, 取 1 表示开机; $x_{k, i, s}^* \in \{0, 1\}$ 为该场景下第 k 台待切机组在极端待切机组功率分布下(第三层 L3 子问题的最优解)是否被切除的标志, 取 1 表示切除; $P_{\min, n}^G, P_{\max, n}^G \in \mathbb{R}$ 分别为第 n 台机组(固定顺序)的最小、最大技术出力。为简化问题, 基于电源送出系统的一个特例, 它假设待切机组功率之和等于关键断面功率(忽略厂用电)。更一般的情况下, 断面功率可用待切机组功率的仿射来近似, 本文所提出的方法框架仍适用。式(13)实现了按上层决策变量 Q

(切机顺序)对机组最大最小出力参数对 k 重新排序。

目标函数中使用 $\sup$ 算符而非 $\max$ 是因为,目标函数值对连续决策变量 $P_{k,i,s}^G$ 存在不连续点,且目标函数在不连续点某些方向上的极限值正是邻域内的上确界,例如考虑最小过切两台机的情况,第一台机的功率无限逼近要切量的过程中实切量持续增大,但如果达到要切量,则只能切一台。

$x_{k,i,s}^*$ 来自问题M1-L3-1的最优解,该问题由式(17)给出。

$$\min_{\{x_{k,i,s} \mid k \in I_G\}, z_{i,s}} \sum_{k \in I_G} x_{k,i,s} \quad (14)$$

满足:

$$\sum_{k \in I_G} P_{k,i,s}^G x_{k,i,s} \geq KP_i - B - z_{i,s} M_1 \quad (15)$$

$$\sum_{k \in I_G} P_{k,i,s}^G x_{k,i,s} \geq P_i - (1 - z_{i,s}) M_1 \quad (16)$$

$$\forall k_1, k_2 \in I_G, k_1 < k_2:$$

$$x_{k_1,i,s} \geq x_{k_2,i,s} \quad (17)$$

式中: $x_{k,i,s} \in \{0, 1\}$ 为场景 (s, i) 下第 k 台待切机组是否被切除的标志,取1表示切除。问题M1-L3-1是对稳控策略的实现。互补的式(15)——(16)分别代表实际切除机组的两种情况,其中 M_1 为一个充分大正数,当辅助变量 $z_{i,s} \in \{0, 1\}$ 满足 $z_{i,s} = 0$ 时, $\sum_{k \in I_G} P_{k,i,s}^G x_{k,i,s} \geq KP_i - B$ 成立,表示在可切量充分时实切功率必须不小于要切量;当 $z_{i,s} = 1$ 时, $\sum_{k \in I_G} P_{k,i,s}^G x_{k,i,s} \geq P_i$ 成立,配合式(12),表示在可切量不足时实切功率必须等于所有机组功率之和(全切)。注意,由式(12)、(14)可知,在目标函数牵引下, $z_{i,s}$ 将优先取0,只有在取0不可行时才会取1,这正是需要的策略逻辑。式(17)规定了切机优先顺序。目标函数反映了“最小过切”。

$R_{\min,i,s}(K, B, Q)$ 是问题M1-L2-2的最优目标函数值。由于问题M1-L2-2仅目标函数最优化方向与问题M1-L2-1不同,问题M1-L3-2与问题M1-L3-1形式完全相同,对模型的第二分支不再赘述。两个分支采用两套独立的决策变量。

总的来看,问题M1有5个主要输入参数 $\{P_i\}_{i \in I_T}$ 、 $\{P_{ad,i,s}\}_{s \in I_S, i \in I_T}$ 、 $\{P_{\min,k}^G\}_{k \in I_G}$ 、 $\{P_{\max,k}^G\}_{k \in I_G}$ 和 $\{\omega_i\}_{i \in I_T}$,前两者在批量时域仿真阶段确定,第三、第四个由机组模型和运行约束决定, $\{\omega_i\}_{i \in I_T}$ 可由

$\{P_i\}_{i \in I_T}$ 在实际运行中出现的概率或技术人员根据分析需要赋予的先验概率决定($\{\omega_i\}_{i \in I_T}$ 的设定是可选的,对模型结构无影响,不关心权重差异时可取所有 ω_i 相同)。

3 模型的转写、简化与求解

对于每一层都包含整数变量的三层优化问题,目前尚未见一般的严格高效算法。为了充分利用现有优化算法并提升求解效率,对上文提出的优化问题M1进行转写、结构简化和细节优化。

首先指出,在式(12)给出的特例下,第二、三层问题与 s 无关,后文将撤销第二、三层问题中变量的 s 下标。

3.1 对第一层优化问题的改进

因下层决策变量是离散的, K, B 在小范围的摄动可能不会改变式(12)的最优值,为了避免梯度消失对求解过程造成不利影响,在L1目标函数中增加一个对 K, B 的小罚项。改进定值整定优化模型,即问题M2的第一层优化问题M2-L1由式(18)——(21)给出:

$$\min_{K, B, Q} \sum_{s \in I_S} \sum_{i \in I_T} \omega_i [R_{\max,i}(K, B, Q) - P_{ad,i,s}]^2 + f_1(K, B) \quad (18)$$

满足:

$$\begin{cases} f_1(K, B) = \epsilon_1 \sum_{i \in I_T} \omega_i (KP_i - B) \\ K \geq 0 \\ \forall n \in I_G: \sum_{m \in I_G} q_{m,n} = 1 \\ \forall m \in I_G: \sum_{n \in I_G} q_{m,n} = 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$\forall s \in I_S, i \in I_T:$$

$$R_{\min,i}(K, B, Q) - P_{ad,i,s} \geq 0 \quad (20)$$

$$R_{\max,i}(K, B, Q) = r_{\max,i}(K, B, Q) + M_2 z_i^*(K, B, Q) \quad (21)$$

式中: f_1 为惩罚直线 $y = Kx - B$ 在 P_i 样本取值范围内对横坐标轴的偏离(在问题设定下恒有 $KP_i - B \geq 0$),并考虑权重 ω_i 的影响; $\epsilon_1 > 0$ 为罚系数。这一罚项使整定值在最小化最大过切量期望的同时,尽可能让线性要切量计算公式对应的直线靠近横坐标轴,符合问题需求。新增的式(21)是连接第二层优化问题M2-L2-1的约束: $r_{\max,i}(K, B, Q)$ 是后文给出

的问题 M2-L2-1 或 M2-L2-1a 的最优目标函数值。 $z_i^*(K, B, Q)$ 是问题 M2-L2-1 或 M2-L2-1a 给出的 z_i 的最优解。

3.2 对最小过切子问题的转写

最小过切子问题(L3)可以概括为: 最小化有序切除机组的台数, 尽可能使得切机量满足要切量, 若不能满足要切量, 应切除所有机组。这可以等效地转写为: 寻找一个正整数 l , 尽可能使得前 l 台待切机组的功率和大于等于要切量, 且前 $l-1$ 台待切机组的功率和严格小于要切量; 若不能满足, 应使前 l 台待切机组的功率和等于所有待切机组的功率和, 且前 $l-1$ 台待切机组的功率和严格小于所有待切机组的功率和。这样, 就将 L3 的优化问题等效表述为 L2 中的一组约束。转写后的问题 M2-L2-1 由式(22)给出。

$$\sup_{\{P_{k,i}^G, y_{k,i}, x_{k,i} | k \in I_G\}, z_i} \sum_{k \in I_G} P_{k,i}^G x_{k,i} - M_2 z_i \quad (22)$$

满足:

$$\sum_{k \in I_G} P_{k,i}^G = P_i \quad (23)$$

$\forall k \in I_G$:

$$y_{k,i} \sum_{n \in I_G} q_{k,n} P_{\min,n}^G \leq P_{k,i}^G \leq y_{k,i} \sum_{n \in I_G} q_{k,n} P_{\min,n}^G \quad (24)$$

$$\sum_{k \in I_G} P_{k,i}^G x_{k,i} \geq KP_i - B - z_i M_1 \quad (25)$$

$$\sum_{k \in I_G} P_{k,i}^G x_{k,i} \geq P_i - (1 - z_i) M_1 \quad (26)$$

$\forall k_1, k_2 \in I_G, k_1 < k_2$:

$$x_{k_1,i} \geq x_{k_2,i} \quad (27)$$

$$\sum_{k \in \{1, 2, \dots, |I_G| - 1\}} P_{k,i}^G x_{k+1,i} < KP_i - B + z_i M_1 \quad (28)$$

$$\sum_{k \in \{1, 2, \dots, |I_G| - 1\}} P_{k,i}^G x_{k+1,i} < P_i + (1 - z_i) M_1 \quad (29)$$

上述模型, 将 L3 中的式(15)~(17)做必要符号调整后写入约束, 即式(25)~(27)。增加式(28)~(29), 即转写中的两个“严格小于”。注意这里利用了约束式(27), 对于切机标志序列 $\{x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{|I_G|,i}\}$, 在式(27)作用下, 左移一位形成的序列, 相当于少切最后一台机。在式(22)的目标函数中, 增加一项 $-M_2 z_i$, 其必要性在于: 若无此项, 在目标函数牵引下, z_i 将倾向于取 1, 即全切机组, 而正确的策略逻辑是, 只有当实切量大于等于要切量不可实现时, 才能选择全切机组。令

M_2 表示一个充分大的正数, 可取 $M_2 = 2 \sum_{k \in I_G} P_{\max,k}^G$,

这使得当 z_i 取 1 时, 目标函数一定比 z_i 取 0 时小, 这就实现了前述正确逻辑。

3.3 对第二层优化问题的进一步简化

3.3.1 消去严格不等式

出于理论和数值实现的考虑, 许多优化算法数值求解器约定优化模型不包含严格不等式约束。式(28)~(29)可以通过引入一个小的容差 $\tau > 0$ (如取 10^{-6}) 取消严格不等号。这可能对问题 M2-L2-1 以及问题 M2-L1 解的最优性产生微小影响, 但对本文要解决的问题完全是可接受的。问题 M2-L2-2, 也即 $r_{\max,i}(K, B, Q)$ 的最优性是至关重要的, 失去最优性意味着所给出整定值可能在某种待切机组功率组合会导致欠切。然而在目标函数牵引下, 对应式(28)~(29)的约束在问题 M2-L2-2 中可以删去(若约束不满足, 意味着至少可以少切一台出力不为 0 的机组满足要切量)。消去严格不等式后的约束见式(35)~(36)。

3.3.2 消去双线性项

式(25)~(26)、(28)~(29)中包含同一层决策变量的乘积项, 破坏了约束的线性结构。利用 $x_{k,i}$ 是 0-1 变量, 可以用大 M 法将双线性项消去, 使得 L2 成为混合整数线性规划。为此, 用新增决策变量 $P_{k,i}^G$ 替换 $P_{k,i}^G x_{k,i}$, 新增决策变量 $P_{k,i}^G$ 替换 $P_{k,i}^G x_{k+1,i}$, 并新增一组约束规定它们和 $x_{k,i}, x_{k+1,i}$ 取值的关系, 见式(37)~(40)。

3.3.3 改进后第二层问题 M2-L2-1a 的最终形式

经上述转写、简化、修饰后, 问题 M2-L2-1a 由式(23)、(30)~(40)给出。

$$\sup_{\{P_{k,i}^G, P_{k,i}^G, y_{k,i}, x_{k,i} | k \in I_G\}, \{P_{k,i}^G | k \in \{1, 2, \dots, |I_G| - 1\}\}, z_i} \sum_{k \in I_G} P_{k,i}^G - M_2 z_i \quad (30)$$

满足:

$$\sum_{k \in I_G} P_{k,i}^G = P_i \quad (23)$$

$\forall k \in I_G$:

$$y_{k,i} \sum_{n \in I_G} q_{k,n} P_{\min,n}^G \leq P_{k,i}^G \leq y_{k,i} \sum_{n \in I_G} q_{k,n} P_{\min,n}^G \quad (31)$$

$$\sum_{k \in I_G} P_{k,i}^G \geq KP_i - B - z_i M_1 \quad (32)$$

$$P_{k,i}^G \geq P_i - (1 - z_i) M_1 \quad (33)$$

$\forall k_1, k_2 \in I_G, k_1 < k_2$:

$$x_{k1,i} \geq x_{k2,i} \quad (34)$$

$$\sum_{k \in \{1,2,\dots,|I_G|-1\}} P''_{k,i} \leq KP_i - B + z_i M_1 - \tau \quad (35)$$

$$\sum_{k \in \{1,2,\dots,|I_G|-1\}} P''_{k,i} \leq P_i + (1 - z_i) M_1 - \tau \quad (36)$$

$$\forall k \in I_G:$$

$$-(1 - x_{k,i}) M_3 \leq P'_{k,i} - P''_{k,i} \leq (1 - x_{k,i}) M_3 \quad (37)$$

$$\forall k \in I_G:$$

$$-x_{k,i} M_3 \leq P'_{k,i} \leq x_{k,i} M_3 \quad (38)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, |I_G| - 1\}:$$

$$-(1 - x_{k+1,i}) M_3 \leq P''_{k,i} - P''_{k+1,i} \leq (1 - x_{k+1,i}) M_3 \quad (39)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, |I_G| - 1\}:$$

$$-x_{k+1,i} M_3 \leq P''_{k,i} \leq x_{k+1,i} M_3 \quad (40)$$

式中: M_1 、 M_2 、 M_3 为充分大正数; τ 为小正数。

模型第二分支的问题 M2-L2-2a, 只用将式 (30) 中 sup 换成 inf, 删去 $-M_2 z_i$ 部分, 并另外使用一整套与 M2-L2-1a 相独立的决策变量即可。

式 (8) — (9)、(18) — (21) 给出的第一层问题 M2-L1, 加式 (23)、(30) — (40) 给出的第二层问题 M2-L2-1a 和对应的 M2-L2-2a, 共同给出了本文提出的切机稳控策略规范化定值整定优化模型。

3.3.4 总体定值整定流程

运用本文提出方法的定值整定全流程如图 2 所示。

3.4 模型求解

第二层问题为规范的混合整数线性规划问题且对实际系统规模不大, 可直接使用常见的商业或开源求解器。另外, Gurobi 等主流商业求解器在求解 MILP 问题时, 还能给出对偶间隙 MIPGap, 当 MIPGap=0 时意味着达到了严格的全局最优。通过 MIPGap 确认问题 M2-L2-2a 解的最优性, 就可以保证在给定 $\{P_{ad,i,s}\}_{s \in I_S, i \in I_T}$ 下, 所给出整定值不会造成错误的欠切。

以大 O 表示法, 第一层问题的决策变量规模大致为 $O(|I_S| \times |I_T| \times |I_G|!)$, 约束条件的规模大致为 $O(|I_S| \times |I_T| \times |I_G|)$ 。求解最优切机优先顺序的复杂度对待切发电机台数较为敏感, 需要有效率可行的算法。近年来, 无梯度优化算法、混合整数双层优化算法都取得了长足的进步, 有许多公开的算法或成熟求解器可以用于求解本文提出的两层优化问题, 如 NOMAD^[25-27]。另外, 通过对待切优先级分

层和采用合理初值, 也可降低复杂度。对于实用中可遇到的定值整定问题规模, 使用本文提出的方法应对日前时间尺度的整定值更新是可行的。由于求解效率不是主要瓶颈, 问题本身对解的最优性要求也不高, 本文对求解算法不作深入研究。

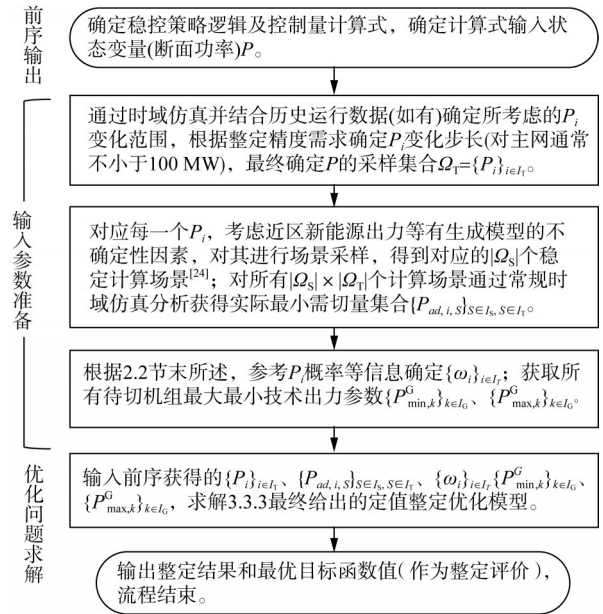


图 2 定值整定流程图

Fig. 2 Flowchart of the setting process

4 算例验证

4.1 场景描述

我国南方某海上风电、火电送出区域系统结构如图 3 所示(拓扑和相关参数有调整)。500 kV 交流断面 EH-WL 发生故障, 火电厂 YX 和 BH 机组可能暂态功角失稳, 为此需要配置如式 (2) 的切机稳控策略, 以 EH-WL 断面送出方向功率作为稳控策略的关键断面功率 P 。该断面存在 220 kV 电磁环网, 附近多个海风场通过电磁环网上的 220 kV 区域电网送出。于是, 关键断面上故障后的实际需求 P_{ad} , 不仅与 P 有关, 还受到海风出力影响。为简化问题, 忽略正常运行时少量厂用电和 EH 下行功率, 式 (23) 近似满足。

根据与稳控策略更新周期相匹配的海风功率预测模型得到了 10 个出力场景样本。在 10 个风电出力场景下, 变化 P 和不同的区域运行方式, 得到 $\{P_i\}_{i \in I_T}$, 取对应的 $\{\omega_i\}_{i \in I_T}$ 如图 4 所示。通过批量时

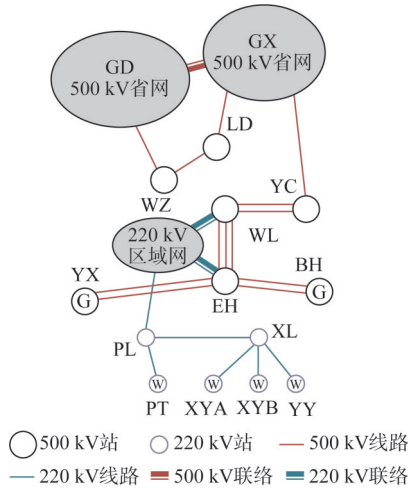


图3 算例系统结构示意图

Fig. 3 Structure illustration of the example system

域仿真计算, 得到 $\{P_{ad,i,s}\}_{s \in I_s, i \in I_T}$, 其中 $|I_T| = 19$, $|I_s| = 10$, $P_1 = P_0 = 1\,928\text{ MW}$, $P_{19} = P_{ub} = 3\,500\text{ MW}$ 是该时段关键断面的运行极限。该运行时段电厂 YX 和 BH 分别有两台机组可以投运, 都参与稳控策略待切, 4 台机组最大最小技术出力输入参数 $\{P_{\min,k}^G\}_{k \in I_G}, \{P_{\max,k}^G\}_{k \in I_G}$ 见表 2, 其中 $|I_G| = 4$ 。

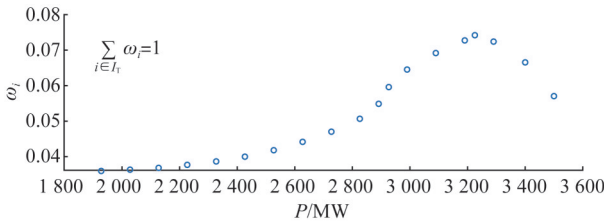


图4 不同关键断面功率水平场景的权重

Fig. 4 Weights of scenarios under different critical interface powers

表2 待切机组出力范围

Tab. 2 Output ranges of controlled generators

出力范围参数	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
最小出力/MW	300	350	500	550
最大出力/MW	600	660	1 000	1 240

4.2 计算结果

4.2.1 对照整定方法

1.2.1 节描述了当前离线定值整定工程实践的大致流程。由于该流程具有经验性, 没有规范的唯一结果, 为了引为参考, 这里考虑一种规范方法作为对传统流程最理想情况的代表。该方法也通过数学优化得到 K, B 的整定值, 所求解问题由式(41)

给出:

$$\min_{K,B} \sum_{s \in I_s} \sum_{i \in I_T} [KP_i - B - P_{ad,i,s}]^2 \quad (41)$$

满足:

$$\forall i \in I_T, s \in I_s: KP_i - B - P_{ad,i,s} \geq 0 \quad (42)$$

即在 P - P_{ad} 坐标系中, 所有 $\{P_i\}_{i \in I_T}$ 、

$\{P_{ad,i,s}\}_{s \in I_s, i \in I_T}$ 样本点上方, 寻找一条在最小二乘意

义上最接近样本的直线。如 1.2.1 节所述, 实践中系统侧通常不对 Q 作优选, 机组单体容量差异大等特殊情况可能给出一些经验性的排序。作为对照, 这里使用按容量升序(“先切小机组”)、最不利顺序两种设置。

4.2.2 优化结果及讨论

计算结果见表 3, 以及图 5—8 所示。

表3 定值整定结果汇总

Tab. 3 Summary of the setting values

整定方法	K^*	B^*	Q^*	最优值
对照方法(按容量升序切)	1.114 2	1 871.5	1-2-3-4	13 273 727
对照方法(最不利顺序切)	1.114 2	1 871.5	2-3-4-1	23 541 003
本文提出方法	1.047 7	1 721.1	3-2-1-4	8 457 780

注: “最优值”指上层优化目标函数最优值的第一项, 即过切量加权平方和部分。

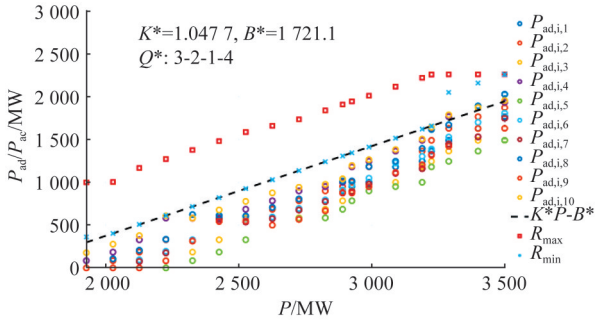


图5 本文提出方法给出的最优整定值

Fig. 5 Optimal setting values given by the proposed approach

从图 5—8 中可见, 考虑各种可能的待切机组开机和出力方式, 考虑海风的随机出力场景, 本文所提出的方法有效降低了加权平方过切量在最不利开机出力方式下对海风场景的期望值(上层目标函数第一项), 针对对照方法给出的结果, 在对照方法使用按容量升序切机顺序时, 降低了约 36%, 使用最不利顺序 2-3-4-1 时, 降低了 64%, 显著降低了不确定运行环境下的控制成本, 同时也降低了稳控误动的影响幅度。

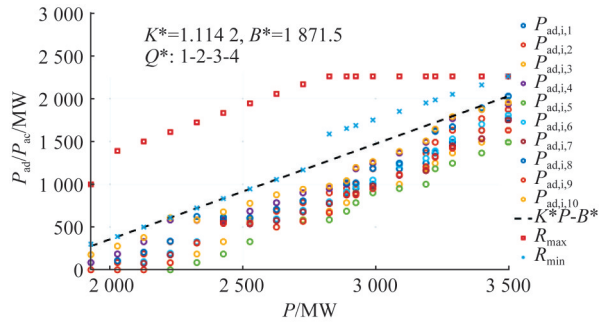


图6 对照方法给出的整定值(按容量升序切机)

Fig. 6 Setting values given by the reference approach (ascending tripping order)

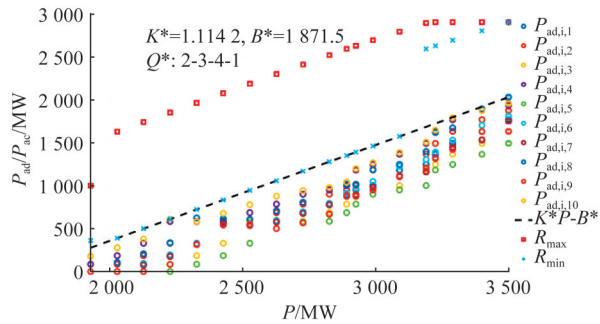
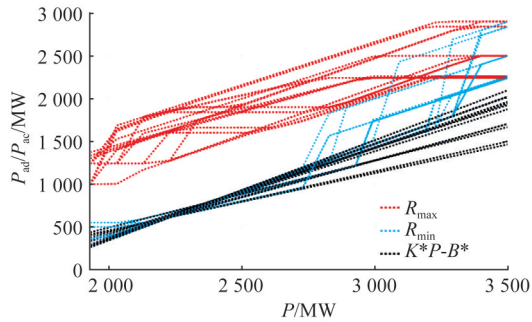


图7 对照方法给出的整定值(最不利切机顺序)

Fig. 7 Setting values given by the reference approach (the worst tripping order)

图8 给定24种切机顺序下最大最小实切量及最优要切量
Fig. 8 The maximum and minimum tripped generation and the optimal predicted tripping demand under 24 tripping orders

大部分时候, 最小实切量 $R_{\min,i}(K, B, Q)$ 可以取到 $KP_i - B$, 但也有一些 P_i 和定值组合下, $R_{\min,i}(K, B, Q)$ 大于 $KP_i - B$ 。本文提出的方法能准确考虑这些情况, 并在定值优化时予以利用(在保证 1.1.6 节所述定值安全性约束 1 成立时, 不要求满足定值安全性约束 2)。计算过程中, Gurobi 给出所有 M2-L2-2a 问题最优解 MIPGap=0, 严格保证了即便按策略计算出的要切量可能小于实际需切量, 定值安全性约束 1 对所有可能的待切机组开机

出力情况都是满足的。

$R_{\max,i}(K, B, Q)$ 的分布(见图 8)比较复杂, 通常人们按相对于要切量过切一台最大机组考虑, 当单机容量较大时是过于保守的。

$R_{\max,i}(K, B, Q)$ 和 $R_{\min,i}(K, B, Q)$ 之间的差异可以作为对稳控策略及定值的一个通用评价指标, 用以评估稳控实际动作量在受控对象运行方式变化之下的不确定度。

4.2.3 计算工具及耗时

使用 Gurobi 求解问题 M2-L2-1a 和 M2-L2-2a, 改进 SciPy 中基于下山单纯型算法的 optimize.fmin 函数用于 M2-L1 求解, 计算机 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i9-9900K CPU 3.60 GHz。问题求解共耗时约 1 h, 其中, 单个第二层问题求解时间平均约 0.15~0.3 s。考虑应用中可能遇到的定值整定问题规模, 本文提出的定值整定方法在绝大多数情况下, 可适应日前及更长时间尺度定值更新对整定算法效率的需求。

5 结论

当前电网离线稳控定值整定常见工程方法对人工、经验依赖强, 效率低下, 严格性、规范性、最优性缺乏, 难以满足“双碳”及市场化发展目标对离线稳控策略快速、精准、可靠自适应更新的要求。针对这一问题, 本文聚焦切机稳控策略, 对不确定运行环境下的电网稳控策略定值整定问题建立了规范描述和可用成熟求解器高效求解的随机-鲁棒混合整数规划模型, 实现了稳控定值整定过程的规范化、自动化。以南方电网某海上风电、火电送出通道稳控策略为例, 验证了方法的有效性。对实际定值整定问题规模, 所提出方法的效率足以支撑日前时间尺度的策略更新。

本文提出的定值整定优化模型对传统方法进行抽象和完善, 实际上为不确定运行环境下系统安全敏感且难以完全解析的离线决策提供了一个通用的规范化、自动化改进技术框架, 这一通用框架和所建立的数学模型的形式具有一定普适性, 本文讨论的问题仅是一个特例。此外, 在市场化条件下, 部分系统安全稳定控制服务的经济性逐渐受到重视, 甚至成为辅助服务品种。本文提出的定值整定问题框架显式考虑了控制代价, 具有对市场化运行环境一定的扩展适应性。

为进一步提升求解效率,可研究第二分支问题中最小实切量可取到要切量的充分条件,以及更高效的定制化双层混合整数优化算法。

参考文献

- [1] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1663-1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [2] 周孝信,赵强,张玉琼.“双碳”目标下我国能源电力系统发展前景[J].科学通报,2024,69(8):983-989.
ZHOU Xiaoxin, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. Prospect of China's energy and power system under dual carbon goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(8): 983-989.
- [3] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [4] 辛保安,单葆国,李琼慧,等.“双碳”目标下“能源三要素”再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3126.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “Three Elements of Energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [5] 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.
- [6] 许剑冰.大型互联电网在线预决策系统中的若干问题的研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [7] 肖谭南.电力系统超实时暂态稳定仿真与实时决策紧急控制系统研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [8] 周晓宁,李碧君,刘强.遵循安全稳定导则的电网运行安全风险在线控制决策探讨[J].电力系统自动化,2013,37(21):45-51.
ZHOU Xiaoning, LI Bijun, LIU Qiang. Discussion on on-line control decision-making based on operation risk analysis complying with guide on security and stability for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 45-51.
- [9] 徐泰山,丁茂生,彭慧敏,等.交直流电力系统暂态安全稳定在线紧急控制策略并行算法[J].电力系统自动化,2015,39(10):174-180.
XU Taishan, DING Maosheng, PENG Huimin, et al. A parallel algorithm for determining an online emergency control strategy of transient security and stability for AC-DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 174-180.
- [10] 李崇涛,张建新,何劲捷,等.基于受扰后平衡点延拓的在线暂态稳定控制策略——稳控措施求解[J].西安交通大学学报,2025,59(9):22-32.
LI Chongtao, ZHANG Jianxin, HE Jinjie, et al. An online transient stability control strategy based on post-disturbance equilibrium point continuation: calculation of post-disturbance equilibrium points[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(9): 22-32.
- [11] 毕兆东,黄河,王新宝,等.南方电网在线预决策系统[J].电力系统保护与控制,2011,39(8):112-118.
BI Zhaodong, HUANG He, WANG Xinbao, et al. On-line pre-decision system of China Southern Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 112-118.
- [12] 付超,邱建,李诗旸,等.昆柳龙多端直流稳定控制策略设计及系统构建[J].南方电网技术,2022,16(1):33-40.
FU Chao, QIU Jian, LI Shiyang, et al. Stability control strategy and system design for kunliulong multi-terminal HVDC transmission[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 33-40.
- [13] 黄润,张璟沛,吴晓刚,等.多直流送端送出枢纽区域稳控系统[J].南方电网技术,2020,14(11):14-20.
HUANG Run, ZHANG Jingpei, WU Xiaogang, et al. Security and stability control system design for junction area of multiple HVDC sending systems[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(11): 14-20.
- [14] 王怀远,张保会,杨松浩,等.电力系统暂态稳定切机控制策略表的快速整定方法[J].电力系统自动化,2016,40(11):68-72,79.
WANG Huaiyuan, ZHANG Baohui, YANG Songhao, et al. Fast setting method of generator tripping strategy tables in transient stability control of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 68-72, 79.
- [15] 毕兆东.电力系统暂态稳定控制决策算法[D].杭州:浙江大学,2003.
- [16] 赵燕.电力系统通用安控策略整定方法的研究[D].保定:华北电力大学,2016.
- [17] 叶萌,谢宇翔,李晶,等.直流受端大型城市电网电压稳定控制策略及定值优化研究[J].南方电网技术,2021,15(6):20-26.
YE Meng, XIE Yuxiang, LI Jing, et al. Research on voltage stability control strategy and optimization of setting value for DC receiving-end large urban power grid[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(6): 20-26.
- [18] 高崇,罗强,翁兴航,等.基于近似动态规划的新型配电网风险随机优化调度方法[J/OL].南方电网技术,1-10[2025-06-06].<https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20250226005>
GAO Chong, LUO Qiang, WENG Xinghang, et al. Risk stochastic optimal dispatch method of new distribution network based on approximate dynamic programming[J/OL]. Southern Power System Technology, 1-10[2025-06-06]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20250226005>
- [19] 檀勤良,贺嘉明,王一,等.计及灵活性资源协同的调峰储能两阶段分布鲁棒配置优化[J/OL].南方电网技术,1-11[2025-03-27].<https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/en/debutDetail.html?serialNum=20241128003>
TAN Qinliang, HE Jiaming, WANG Yi, et al. Research on two-stage distributionally robust configuration optimization of peak shaving energy storage considering the coordination of flexible resources[J/OL]. Southern Power System Technology, 1-11[2025-03-27]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/en/debutDetail.html?serialNum=20241128003>

(下转第 111 页 Continued on Page 111)