

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200936

基于有效约束识别的电网热稳边界辨识方法

徐渊¹, 谌艳红¹, 王凯¹, 段志远¹, 鲍威², 胡靖雯³, 胡通华³

(1. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330000; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310000;
3. 杭州沃瑞电力科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对安全约束最优潮流(SCOPF)求解时规模太大、求解难度高的问题, 提出了一种基于电网安全运行域的故障态约束过滤方法。首先利用电网故障态约束条件之间的实际物理意义与故障态约束的数学关系, 通过预想故障分析选定有效监视支路。进而生成不等式约束组成的安全运行域, 并利用电网潮流转移特性对故障不等式约束进行剩余系数过滤、转移系数过滤与数学深度过滤的多层筛选, 大幅减少不等式约束条件数量。对 IEEE118 节点系统与实际电网的仿真, 验证了该方法在解决工程问题上的实用性, 体现了该算法的实用性和鲁棒性。

关键词: 安全约束; SCOPF; 安全可行域; 约束过滤

Identification method of a power grid thermal stability boundary based on effective constraint identification

XU Yuan¹, CHEN Yanhong¹, WANG Kai¹, DUAN Zhiyuan¹, BAO Wei², HU Jingwen³, HU Tonghua³

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330000, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China; 3. Hangzhou Worui Power Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Security-Constrained Optimal Power Flow (SCOPF) for a large-scale power system is a complex and difficult problem with high computational requirements. To solve the problem, this paper proposes a constraints reduction method based on the security operation domain of a power system. The proposed method includes two technologies. First, the monitored branches are determined according to the actual physical meaning and the mathematical relations between different post-contingency constraints, so that the security operation domain can be formed by a group of inequality constraints. Secondly, multi-layer screening, including residual coefficient, transfer coefficient, and mathematical depth filtering are performed on the post-contingency constraints according to the transfer characteristics of the power system, so that the number of inequality constraints can be greatly reduced. Simulation on the IEEE-118 system and an actual power system verifies the practicability, effectiveness, and robustness of the proposed method in solving these engineering problems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800) and the Science and Technology Project of State Grid Jiangxi Electric Power Company Ltd. (No. 521810190001).

Key words: security constraint; SCOPF; security feasible region; constraint filtering

0 引言

随着电力系统规模的不断扩大, 经济发展对电力发展的依赖程度逐渐提高, 同时对电能质量的好坏和供电安全性、可靠性也有了更高的要求, 由此就需要通过电力系统安全约束来加以限制。在电力

系统运行过程中, 安全约束最优潮流(SCOPF)是电力系统稳态安全性研究中的重要问题, 研究重点应该放在事故预防方面。当系统在安全状态下出现故障或者扰动后, 可以通过安全约束最优潮流(SCOPF)的手段来进行校正, 使系统回归安全状态。但是在进行安全约束求解时计算量大, 难度高, 由此可以通过各种方法对多种约束条件进行过滤, 最后得到有限的关键约束, 实现约束条件优化。

为辨识出交直流混联电网中的关键线路, 文献

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902800);
国网江西省电力有限公司科技项目资助(521810190001)

[1]提出一种基于静态安全域的交流直流混联电网关键线路辨识方法。基于 $N-1$ 安全约束, 文献[2-3]提出采用深度网络拟合 $N-1$ 约束嵌入到优化控制模型中, 提高求解效率。配电系统安全域是指导配电网安全运行的新理论; 文献[4]针对传统 SCOPF 计算方法占用内存大、计算时间长的问题, 提出了一种多核并行 SCOPF 算法; 在 SCOPF 多种算法中, Benders 分解算法可以有效地减小 SCOPF 计算规模, 并实现加速迭代运算速度的提升, 但是 Benders 算法自身的局限性要求其可行域为凸集, 因此文献[5]中通过一种嵌入的 Benders 分解方法, 来更有效地处理预想故障, 但是该方法采用直流潮流模型计算的准确度不够; 网络压缩法通过设定的评判标准, 大大缩减了故障后的变量数目, 但是有可能会出轻微越界的情况, 造成不必要的风险^[6-7]; 文献[8]提出了一种基于约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流计算方法, 建立了仿射可调鲁棒优化模型, 考虑了预想事故的预防安全约束; 为了缩减优化模型规模, 文献[9-10]采用了故障筛选方法, 以找到对系统稳定运行冲击较大、风险后果较严重的有效故障集合, 文献[11]则提出了一种基于约束集混合筛选的方法; 文献[12-13]介绍了电网断面热稳定限额的计算方法和步骤, 提出了针对故障后存在直流功率或负荷丢失状况下断面限额计算方法; 文献[14]基于对松弛解的分析获得可用于指导安全约束经济调度模型改进的有用信息, 以约束剔除和约束增加的方式提出了基于启发式线性规划的大规模安全约束经济调度快速求解方法; 文献[15-16]根据安全约束提出了构建发电可行域的基态潮流确定方法, 构建了系统在不同负荷水平下的主导发电机群的发电可行域并对发电可行域进行了修正; 文献[17]构建了考虑安全约束的分布式电力交易的机制与模型, 通过算例分析表明所提出的分布式电力交易方法可实现潮流的越限修正; 对于电力市场而言, 文献[18]提出电力市场环境计及风险的可用传输容量计算方法, 建立基于最优潮流的区域可用传输能力模型, 提出了可用传输容量风险的计算方法; 文献[19-20]对电网调度问题运用了安全裕度与安全约束方法加以解决。

以上研究基于安全约束问题, 从电力系统多个研究方向提出了一系列优化方法和可行域修正方法, 但是对于 SCOPF 故障态大量的约束条件求解还是有很大的困难, 计算规模仍旧非常庞大。因此本文提出了一种基于有效约束识别的电网热稳边界辨识方法, 可以有效缩减计算规模, 提高计算效率。本文首先通过预想故障分析, 选定有效监视支路,

实现支路数量缩减; 然后生成由不等式约束组成的安全运行域; 再利用电网潮流转换特性对故障约束不等式进行“粗过滤”和“严格过滤”; 最后利用子优化问题进行“深度过滤”, 有效辨识出安全运行域的边界, 最终达到约束条件数量优化的目的。

1 SCOPF 的基本介绍

随着电力系统规模的扩大, 对于电力系统安全稳定运行的需求越来越高, 电力系统运行安全域能够提供工作点在安全域中的相对位置, 反映出重要的运行信息, 从而大大减少安全性评估所需的计算量, 使调度人员可以更直观地判断系统的安全状态, 确保系统的稳定性。SCOPF 作为一类重要的安全运行约束问题, 为电网风险的预防提供了理论基础。本文以 SCOPF 优化问题中设备组热稳定限额为例来说明安全运行域的划分。

以文献[21]的研究为基础, 将设备组热稳定限额定义为设备组初始有功潮流的允许控制上限, 只要将各运行设备组的初始有功潮流控制在该限额之内, 就能够保证电网的安全运行。可以得到下列约束。

$$\bar{P}_j \leq \bar{L}_j \quad j \in S_T \quad (1)$$

$$R_{ij}^k \bar{P}_j \leq \bar{E}_j^k \quad j \in S_T, k \in S_k \quad (2)$$

$$\sum_{i \in S_T} R_{ij}^k \bar{P}_i \leq \bar{E}_j^k \quad j \in S_T, k \in S_k \quad (3)$$

式中: \bar{P}_j 为设备组 j 的热稳定限额; \bar{L}_j 为设备组 j 的长期允许载流量, 可通过设备组内设备间的潮流比例及关键设备的长期允许载流量获得; \mathbf{R} 表示综合剩余系数或综合转移系数, 上标 k 表示预想故障 k 开断后的电网状态; R_{ij}^k 表示预想故障 k 开断时设备 j 的剩余系数; R_{ij}^k 表示预想故障 k 开断时设备组 i 向设备组 j 的转移系数; \bar{E}_j^k 为预想故障 k 开断发生后设备组 j 剩余设备的短时允许载流量, 可通过预想故障开断后设备组内剩余设备间的潮流比例及关键设备的短时载流量获得; S_T 表示设备组集合; S_k 表示所考虑的预想故障集。

2 安全运行域规模缩减方法

2.1 监视支路选择及故障态冗余约束粗过滤

参考文献[21]的研究, 首先选定监视支路。通过对预想故障的分析, 对于基态支路潮流约束, 可根据式(4)选择需监视的支路。

$$\max_{j \in D_s^0} \left\{ \frac{K_{Bj}}{P_{Bj}} \right\} \quad \forall g \in S_G \quad (4)$$

式中: K_{Bj} 表示支路 j 在其相应设备组中的分支系数; \bar{P}_{Bj} 表示支路 j 的有功潮流; g 表示设备组编号; S_G 表示设备组的集合; D_g^0 表示设备组 g 基态下的运行支路集。

将基态支路有功潮流描述为监视支路有功潮流的函数, 则有

$$P_{Bj}^0 = \frac{K_{Bj}}{K_{BM_j}} P_{BM_j}^0 \quad \forall j \in S_B \quad (5)$$

式中: 上标 0 表示预想故障开断前的电网状态; P_{Bj}^0 分别表示支路 j 的基态有功潮流; M_j 表示支路 j 所属设备组的基态监视支路编号; S_B 表示支路集合。

对于故障态支路潮流约束, 可根据式(6)选择需监视的支路。

$$\max_{j \in D_g^k} \left\{ \left| \frac{K_{Bj}}{\bar{E}_{Bj}} \right| \right\} \quad \forall g \in S_G \quad (6)$$

式中: D_g^k 表示设备组 g 在故障态 k 下的运行支路集; \bar{E}_{Bj} 表示支路 j 的短时允许载流量。

由式(4)、式(6)可确定设备组中潮流越限的边界条件。由支路潮流约束式(7)一式(9)可以得到可行域空间。

$$-\bar{P}_{Bj} \leq P_{Bj}^0 \leq \bar{P}_{Bj} \quad \forall j \in \bar{S}_B \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{Bj}^k = \frac{K_{Bj}}{K_{BM_j}} P_{BM_j}^0 + \sum_{i \in S_F^k} \frac{R_{ij}^k K_{Bi}}{K_{BM_i}} P_{BM_i}^0, \\ \forall k \in C, \forall j \in \bar{S}_B^k \end{cases} \quad (8)$$

$$-\bar{E}_{Bj} \leq P_{Bj}^k \leq \bar{E}_{Bj} \quad \forall k \in C, \forall j \in \bar{S}_B^k \quad (9)$$

式中: C 为预想故障集; \bar{S}_B 为基态下各设备组的监视支路构成的集合; S_F^k 表示预想故障 k 中因故障导致开断的支路集; \bar{S}_B^k 为各设备组故障态 k 下的监视支路构成的集合。对于故障态冗余约束粗过滤问题, 由于构成的 SCOPF 模型的计算规模非常大导致求解复杂, 需要通过缩减约束条件来缩小计算量, 提高求解效率与准确度。

根据潮流转移关系, 故障态潮流可被表示为基态潮流的线性函数, 如式(8)所示。

当基态潮流的安全约束满足时有式(10)。

$$\begin{aligned} \left| P_{Bj}^k \right| &= \left| \frac{K_{Bj}}{K_{BM_j}} P_{BM_j}^0 + \sum_{i \in S_F^k} \frac{R_{ij}^k K_{Bi}}{K_{BM_i}} P_{BM_i}^0 \right| \leq \\ &\left| \frac{K_{Bj}}{K_{BM_j}} \right| \left| P_{BM_j}^0 \right| + \sum_{i \in S_F^k} \left| \frac{R_{ij}^k K_{Bi}}{K_{BM_i}} \right| \left| P_{BM_i}^0 \right| \leq \\ &\left| \frac{K_{Bj}}{K_{BM_j}} \right| P_{BM_j}^{\max} + \sum_{i \in S_F^k} \left| \frac{R_{ij}^k K_{Bi}}{K_{BM_i}} \right| P_{BM_i}^{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, 上标 max 表示取最大值。

将故障态潮流表示为基态潮流的线性函数, 代入基态潮流的安全约束, 可以得到故障态潮流的上界, 则 \bar{P}_{Bj}^k 为电网基态潮流满足安全约束时 $|P_{Bj}^k|$ 的上界。

$$\bar{P}_{Bj}^k = \left| \frac{K_{Bj}}{K_{BM_j}} \right| P_{BM_j}^{\max} + \sum_{i \in S_F^k} \left| \frac{R_{ij}^k K_{Bi}}{K_{BM_i}} \right| P_{BM_i}^{\max} \quad (11)$$

当 $\bar{P}_{Bj}^k \leq E_{Bj}^{\max}$ 时, 说明故障态潮流永远不可能越限, 相应的约束为冗余约束。

如图 1 所示, 基态约束所构成的可行域为一个矩形。故障态约束为直线的形式。本文方法实质上是计算该矩形的顶点是否满足直线所表示的约束, 若满足, 说明基态约束所构成的可行域被包含在故障态约束构成的可行域中, 即故障态约束是冗余的, 可以被过滤。而图 2 中基态约束所构成的可行域不被包含在故障态约束构成的可行域中, 则此故障态约束不可被过滤。

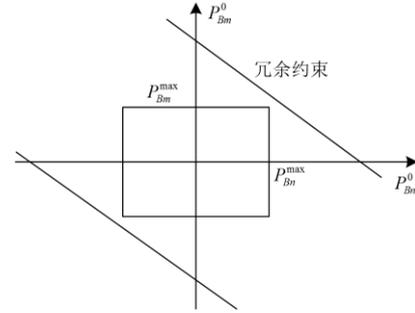


图 1 可以被过滤的约束

Fig. 1 Constraints that can be filtered

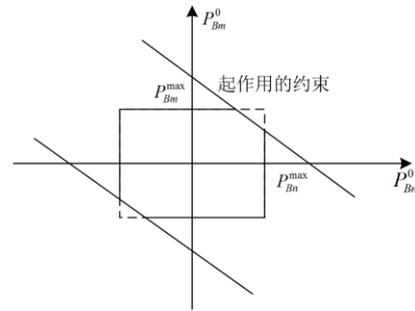


图 2 不能被过滤的约束

Fig. 2 Constraints that cannot be filtered

2.2 故障态冗余约束严格过滤

在以上基础上, 本文提出一种更严格过滤安全约束的方法。首先仅考虑一组断面之间的潮流转移关系, 如图 3 所示, 与它们相关的约束共有四条, 构成可行域。由于它们均为凸集, 因此仅考虑它们顶点之间的关系即可。

对比于式(8), 可以得到一组断面的潮流转移关系如式(12)、式(13)所示。

$$P_{Bm}^k = \frac{K_{Bm}}{K_{BM_m}} P_{BM_m}^0 + \frac{R_{nm}^k K_{Bn}}{K_{BM_n}} P_{BM_n}^0 \quad (12)$$

$$P_{Bn}^k = \frac{K_{Bn}}{K_{BM_n}} P_{BM_n}^0 + \frac{R_{nm}^k K_{Bm}}{K_{BM_m}} P_{BM_m}^0 \quad (13)$$

式(12)、式(13)构成图 4 中基态约束所构成的矩形可行域。相关约束条件如式(14)一式(17)所示。

$$-P_{BM_m}^{\max} \leq P_{BM_m}^0 \leq P_{BM_m}^{\max} \quad (14)$$

$$-P_{BM_n}^{\max} \leq P_{BM_n}^0 \leq P_{BM_n}^{\max} \quad (15)$$

$$-E_{Bm}^{\max} \leq \frac{K_{Bm}}{K_{BM_m}} P_{BM_m}^0 + \frac{R_{nm}^k K_{Bn}}{K_{BM_n}} P_{BM_n}^0 \leq E_{Bm}^{\max} \quad (16)$$

$$-E_{Bn}^{\max} \leq \frac{K_{Bn}}{K_{BM_n}} P_{BM_n}^0 + \frac{R_{nm}^k K_{Bm}}{K_{BM_m}} P_{BM_m}^0 \leq E_{Bn}^{\max} \quad (17)$$

式(14)、式(15)为图 3 中矩形可行域边界, 式(16)、式(17)分别为约束 1、2。分别考虑由约束 1、两条基态约束构成的可行域以及由约束 2、两条基态约束构成的可行域, 将它们分别称为可行域 1 和可行域 2。当可行域 2 的顶点均属于可行域 1 时, 可行域 2 属于可行域 1, 如图 3 中左图所示, 因此可行域 1 的相关约束是不起作用的, 即约束 1 是冗余的。反之亦然。

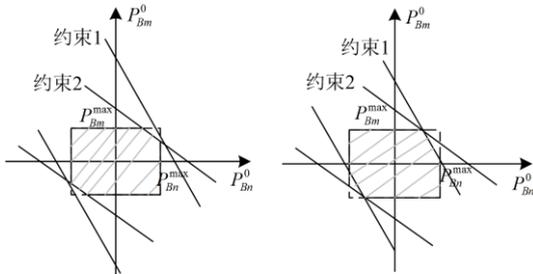


图 3 故障态冗余约束深度过滤示意图

Fig. 3 Schematic diagram of depth filtering of fault state redundancy constraints

2.3 故障态冗余约束深度过滤

对于一组变量不等式约束及一组函数不等式约束, 任意构造目标函数(如零函数), 则构成线性规划问题, 采用单纯形法求得最优基础可行解。对任一函数不等式约束取等号, 若可行域为空, 即对偶单纯形法没有变量可以入基, 则说明该约束为冗余约束。

$$\max \sum_{j \in S_T} \bar{P}_j \quad (18)$$

$$\begin{cases} \bar{P}_j \leq \bar{L}_j & j \in S_T \\ \sum_{i \in S_T} R_{ij}^k \bar{P}_i \leq \bar{E}_j^k & j \in S_T, k \in S_k \end{cases} \quad (19)$$

式中, S_T 表示输电断面集。

3 算例分析

本文的算例仿真分析平台为一台主频为 2.6 GHz 的 6 核心 MSI 计算机, 内存为 16 GB。首先对 IEEE118 节点系统进行安全运行域关键边界辨识, 验证本文算法的有效性和正确性。然后对实际电网进行了优化, 体现了本文算法的实用性和鲁棒性。

3.1 算例使用模型介绍

测试算例使用 IEEE118 节点系统, 该系统包含 53 台发电机、9 台变压器、177 条普通支路。取所有线路长期载流值为 790 A, 短时载流值为长期载流值的 1.4 倍。

实际算例使用某实际电网运行方式下的电网安全运行边界的识别方法。算例数据由 psasp7.2.41 版本输出。算例数据包括 62 952 个节点、67 023 条支路和 5 452 个电源。根据线路的实际载流能力, 线路的短时载流值取长期载流值的 1.3 倍。

3.2 粗过滤算例分析

对 118 节点系统进行支路 $N-1$ 故障扫描, 再经本文模型求解, 粗过滤求解时间为 0.015 s。不过滤时有 715 条约束。通过粗过滤法, 过滤之后, 剩下 609 条约束。此处的不过滤实际上在转移系数上已经设置了过滤, 设定的转移系数阈值是 0.01, 转移系数小于 0.01 的约束不输出, 约束筛选效果如图 4 所示。

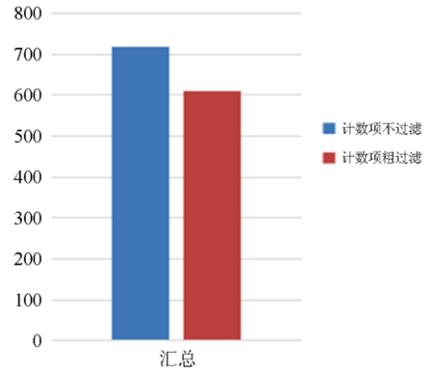


图 4 118 节点系统粗过滤效果

Fig. 4 Coarse filtration effect of 118-node system

对实际电网模型系统进行支路 $N-1$ 、 $N-2$ 故障扫描, 再经本文模型求解, 粗过滤求解时间为 23 s, 不过滤时, 约束条件有 1 742 条; 粗过滤后, 约束条件有 1 150 条; 此处转移系数上已经设置了过

滤, 设定的转移系数阈值是 0.01, 转移系数小于 0.01 的约束不输出。以上约束中, 有 156 条约束条件为固定断面约束, 所以除去这些固定断面约束后, 不过滤时, 约束条件有 1586 条; 粗过滤后, 约束条件有 994 条; 约束筛选效果如图 5 所示。

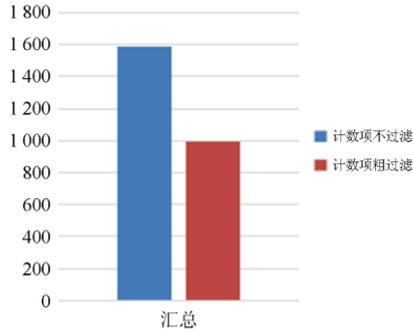


图 5 实际电网粗过滤效果

Fig. 5 Coarse filtering effect of actual power grid

选取 118 节点系统中一条支路的约束条件筛选效果为例。

关于支路 11-12 的约束条件筛选效果如表 1。

表 1 支路 11-12 的约束条件筛选效果

Table 1 Constraint screening effect of branch 11-12

预想开断	不过滤约束数量	粗过滤约束数量	深度过滤约束数量
11-12	6	1	1

对 118 节点系统进行支路 $N-1$ 故障扫描, 再经本文模型求解, 深度过滤求解时间为 0.21 s, 不过滤时有 715 条约束。通过深度过滤方法过滤之后, 剩下 421 条约束。此处的不过滤实际上在转移系数上已经设置了过滤, 设定的转移系数阈值是 0.01, 转移系数小于 0.01 的约束不输出, 约束筛选效果如图 6 所示。

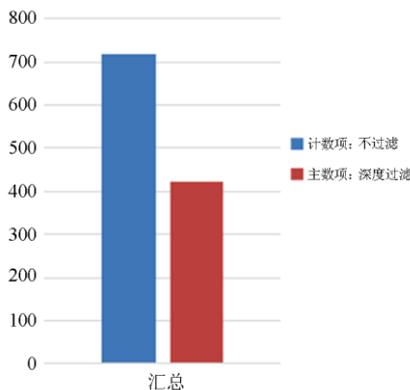


图 6 118 节点系统深度过滤效果

Fig. 6 118-node system depth filtering effect

对实际电网模型系统进行支路 $N-1$ 、 $N-2$ 故障扫描, 再经本文模型求解, 深度过滤求解时间 41 s, 不过滤时, 约束条件有 1586 条; 深度过滤后, 约束条件有 745 条; 此处的不过滤实际上在转移系数上已经设置了过滤, 设定的转移系数阈值是 0.01, 转移系数小于 0.01 的约束不输出, 约束筛选效果如图 7 所示。

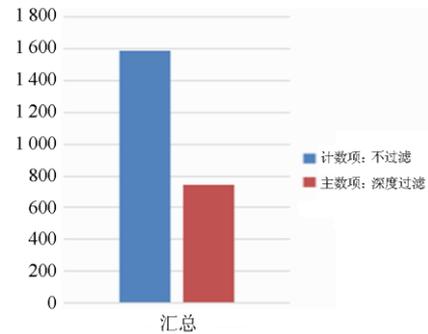


图 7 实际电网深度过滤效果

Fig. 7 Actual grid depth filtering effect

选取实际电网模型系统中单个支路故障的约束条件筛选分析:

关于支路 20284-20281 故障的约束条件筛选效果如表 2。

表 2 考虑支路 20284-20281 故障的约束条件筛选

Table 2 Selection of constraint conditions considering branch

预想开断	20284-20281 fault		
	不过滤约束数量	粗过滤约束数量	深度过滤约束数量
20284-20281	61	42	13

针对支路 20284-20281 预想故障, 从原本的 61 条约束粗过滤到 42 条, 然后经深度过滤到 13 条, 说明本文模型对单回线故障的约束优化效果明显。

选取实际电网模型系统中两个支路故障的约束条件筛选分析:

关于支路 20036-20041 和 20037-20439 的约束条件筛选效果如表 3。

关于支路 21145-20374 加 21144-20373 的约束条件筛选效果如表 4。

针对支路 20036-20041 和 20037-20439 预想故障的约束, 不过滤约束 39 条, 粗过滤约束 39 条到深度过滤约束 31 条, 粗过滤没有效果, 深度过滤有效。

针对支路 21145-20374 和 21144-20373 预想故障的约束, 不过滤约束 3 条, 粗过滤约束 1 条到深度过滤约束 1 条, 粗过滤有效果, 深度过滤没有效果。说明本文模型对双回线支路故障约束优化有效但不明显。

本文所建模型针对电网安全约束条件的过滤方法,除了不过滤的方法,还提供了粗过滤和深度过滤两种方法。对安全约束的粗过滤方法是基于电网设备物理属性的一种安全过滤方法,属于工程上的应用。对安全约束的深度过滤方法,是基于数学上

的一种电网安全极限的过滤方法,一般用于求解出电网安全运行的极限条件。这两种方法在求解时间和求解效果上都有较强的优势。实际电网算例说明所建的电网安全运行约束优化模型能够适应大规模电网的应用需求。

表 3 支路 20036-20041 和 20037-20439 的约束条件筛选效果

Table 3 Screening effect of the constraint conditions of the branch 20036-20041 and 20037-20439

预想开断	不过滤约束数量	粗过滤约束数量	深度过滤约束数量
20036-20041 和 20037-20439	39	39	31

表 4 支路 21145-20374 和 21144-20373 的约束条件筛选效果

Table 4 Screening effect of the constraint conditions of the branch 21145-20374 and 21144-20373

预想开断	不过滤约束数量	粗过滤约束数量	深度过滤约束数量
21145-20374 和 21144-20373	3	1	1

4 结语

本文提出了一种基于电网安全运行域的故障态约束过滤方法,利用电网故障态约束条件之间的实际物理意义与故障态约束的数学关系,采用 IEEE118 节点系统运用于实际电网进行仿真验证,严格过滤与深度过滤有效缩减了计算规模,说明了本文方法在解决工程问题上的实用性,使安全约束问题的求解难度有效降低,对于电力系统的安全稳定运行有着重要启发。

本文方法通过冗余约束辨识给出了严格的安全运行域边界描述,但在某些工程应用场景下,仍然存在可行域边界不平滑、约束过多难以求解等问题。在后续研究工作中,拟在本文方法基础上,通过添加辅助约束,牺牲一定的可行域空间,使得可行域边界更为平滑,进一步大幅减少不等式约束,以满足更多的应用场景。

参考文献

- [1] 辛建波, 杨程祥, 舒展, 等. 基于静态安全域的交流混联大电网关键线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 165-172.
XIN Jianbo, YANG Chengxiang, SHU Zhan, et al. Identification of key lines of AC/DC hybrid power grid based on static security domain[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 165-172.
- [2] 唐伦, 田立峰, 张曦, 等. 计及 N-1 安全约束的输电网阻塞管控数据驱动模型[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 11-17.
TANG Lun, TIAN Lifeng, ZHANG Xi, et al. Transmission grid congestion control data-driven model with N-1 safety constraints[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 11-17.
- [3] 黄丽平, 王逸飞, 郭俊韬, 等. 考虑电网载荷均衡度及安全约束的防灾经济调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 56-69.
HUANG Liping, WANG Yifei, GUO Juntao, et al. Disaster prevention economic dispatch considering grid load balance and-safety constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 56-69.
- [4] 傅志生, 白晓清, 李佩杰, 等. 一种快速求解大规模安全约束最优潮流的多核并行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 29-37.
FU Zhisheng, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. A multi-core parallel method for fast solving large-scale security-constrained optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 29-37.
- [5] WANG Q, MCCALLEY J D, ZHENG T, et al. A computational strategy to solve preventive risk-based security-constrained OPF[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1666-1675.
- [6] KAROUI K, CRISCI H, SZEKUT A, et al. Large scale security constrained optimal powerflow[C] // The 16th Power Systems Computation Conference (PSCC), July 14-18, 2008, Glasgow, Scotland.
- [7] PLATBROOD L, CAPITANESCU F, MERCKX C, et al. A generic approach for solving nonlinear-discrete security-constrained power flow problems in large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1194-1203.
- [8] 许超, 陈昊, 屠秉慧. 考虑约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 73-81.
XU Chao, CHEN Hao, TU Binghui. Preventive safety constraints robust optimal power flow considering mixed selection of constraint sets[J]. Power System Protection

- and Control, 2019, 47(6): 73-81.
- [9] CAPITANESCU F, GLAVIC M, ERNST D, et al. Contingency filtering techniques for preventive security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1690-1697.
- [10] CAPITANESCU F, WEHENKEL L. A new iterative approach to the corrective security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1533-1541.
- [11] 祖国强, 肖峻, 穆云飞, 等. 计及分布式电源与需求响应的智能配电系统安全域[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 100-108.
ZU Guoqiang, XIAO Jun, MU Yunfei, et al. Security domain of intelligent power distribution system considering distributed power generation and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 100-108.
- [12] 叶剑, 王伟红. 电网断面热稳定限额的计算[J]. 电力与能源, 2014, 35(3): 302-304.
YE Jian, WANG Weihong. Calculation of the thermal stability limit of power grid section[J]. Electric Power and Energy, 2014, 35(3): 302-304.
- [13] 许丹, 赵鸿图, 丁强, 等. 基于实用化安全约束经济调度扩展建模策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 76-81.
XU Dan, ZHAO Hongtu, DING Qiang, et al. Expanded modeling strategy for economic dispatch based on practical safety constraints[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 76-81.
- [14] 周星宇, 潘学萍, 王正风, 等. 断面安全约束下发电可行域实用分析方法[J/OL]. 中国电力: 1-7[2020-07-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200713.1454.016.html>.
ZHOU Xingyu, PAN Xueping, WANG Zhengfeng, et al. Practical analysis method of power generation feasible region under cross-section safety constraints[J/OL]. Electric Power: 1-7[2020-07-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200713.1454.016.html>.
- [15] SONG Pengcheng, XU Zheng, DONG Huanfeng, et al. Security-constrained line loss minimization in distribution systems with high penetration of renewable energy using UPFC[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(6): 876-886.
- [16] 杨选忠, 张浙波, 赵申轶, 等. 基于区块链的含安全约束分布式电力交易方法[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 31-39.
YANG Xuanzhong, ZHANG Zhebo, ZHAO Shenyi, et al. Blockchain-based distributed power transaction method with security constraints[J]. Electric Power, 2019, 52(10): 31-39.
- [17] 刘文娟, 王磊, 万秋兰. 静态安全约束下考虑风险的可用传输容量计算[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 44-48.
LIU Wenjuan, WANG Lei, WAN Qiulan. Calculation of available transmission capacity considering risk under static security constraints[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 44-48.
- [18] 石辉, 袁林山. 基于实时安全约束经济调度的自动发电控制模型[J]. 广东电力, 2015, 28(5): 76-80.
SHI Hui, YUAN Linshan. Automatic power generation control model based on real-time safety constraint economic dispatch[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(5): 76-80.
- [19] 陈刚, 区允杰, 孙景涛. 一种基于 VSC-MTDC 互联系统的多目标潮流优化方法[J]. 广东电力, 2019, 32(4): 69-78.
CHEN Gang, OU Yunjie, SUN Jingtao. A multi-objective power flow optimization method based on VSC-MTDC interconnected system[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(4): 69-78.
- [20] YANG Yude, SONG Anjun, LIU Hui, et al. Parallel computing of multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 204-213. DOI: 10.1186/s41601-018-0095-z.
- [21] 郭瑞鹏, 边麟龙, 宋少群, 等. 安全约束最优潮流的实用模型及故障态约束缩减方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 161-168.
GUO Ruipeng, BIAN Linlong, SONG Shaoqun, et al. Practical model of safety-constrained optimal power flow and method of fault-state constraint reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 161-168.

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-10-16

作者简介:

徐渊(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统调控运行; E-mail: nc_xuyuan@jx.sgcc.com.cn

谌艳红(1973—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调控运行; E-mail: 1157853330@qq.com

鲍威(1986—), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 主要从事电力系统优化算法、电力系统深度机器学习算法研究。E-mail: baowei@zju.edu.cn

(编辑 魏小丽)