

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240504

# 考虑系统可观测性的电力系统连锁故障阻断控制

刘雨濛, 刘欢, 顾雪平

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北保定 071003)

**摘要:** 当前连锁故障阻断控制研究忽略了系统可观测性的影响。连锁故障会使电力系统可观测性下降, 从而影响实际控制策略的制定。因此有必要研究系统可观测性与连锁故障阻断控制的交互影响以及相关建模方法。首先, 给出系统可观测性的描述与连锁故障发生的过程, 结合连锁故障对系统可观测性的破坏以及系统可观测性对阻断控制策略的影响, 分析了系统可观测性与连锁故障阻断控制之间的关联性。其次, 建立了考虑系统可观测性的连锁故障阻断控制模型。最后, 以 IEEE 39 与 IEEE 118 节点系统为例对不同模型进行对比分析。结果表明, 所提模型能有效降低连锁故障风险, 对电力系统运行具有更好的实用性。对比考虑系统可观测性与否的控制过程与结果可知, 通过提高 PMU 的配置冗余度能在一定程度上消除不可观测性对阻断控制策略的影响。

**关键词:** 电力系统; 连锁故障; 可观测性; 传播路径; 阻断控制

## Power system cascading failure blocking control considering system observability

LIU Yumeng, LIU Huan, GU Xueping

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Current research on cascading failure blocking control often neglects the impact of system observability. Cascading failures can degrade the observability of a power system, thereby affecting the formulation of effective control strategies. Therefore, it is necessary to investigate the interactions between system observability and cascading failure blocking control, as well as relevant modeling methodologies. First, the concept of system observability and the process of cascading failures are introduced. Combined with the facts that cascading failures reduce system observability and blocking control strategy is affected by system observability, the correlation between system observability and cascading failure blocking control is analyzed. Then, a cascading failure blocking control model considering the observability of the system is established. Finally, comparative analyses are conducted using the IEEE 39-bus and IEEE 118-bus systems. The results show that the proposed model can effectively reduce the risk of cascading failures and improves the practicability of power system operation. A comparison of the control processes and results, with and without considering system observability, indicates that the influence of unobservability on the blocking control strategy can be partially eliminated by increasing PMU redundancy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52307099).

**Key words:** power system; cascading failure; observability; propagation path; blocking control

## 0 引言

近年来, 世界上发生了多起由连锁故障导致的大停电事故<sup>[1-3]</sup>, 造成了严重的经济损失和社会危害。随着电力系统复杂度的不断提高, 连锁故障的防控难度也在同步提升, 给电力系统安全稳定运行

带来了严峻挑战<sup>[4-6]</sup>。研究连锁故障阻断控制对于电力系统安全防御有着重要意义。

目前, 国内外学者对连锁故障演化机理进行了较为深入的研究。基于复杂系统的研究通过刻画系统自组织临界特性, 分析小扰动造成系统连锁故障大停电的可能性<sup>[7]</sup>; 基于复杂网络理论的研究主要从网络拓扑结构特性切入, 通过度、介数等反映结构特性的参数判定故障过程; 基于还原论的研究从潮流分布、负荷转移角度研究连锁故障演化过程<sup>[8]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52307099); 中央高校基本科研业务费专项基金项目资助(2023MS103)

在此基础上, 根据演化机理不同开展了连锁故障控制方法的研究。基于复杂系统的控制方法, 文献[9]通过改善系统潮流分布降低连锁故障发生的可能性; 基于复杂网络理论的控制方法, 文献[10]通过改善网络拓扑结构以提高电力系统连锁故障发展演化的防控能力。然而上述宏观模型控制方法欠缺对实际电力系统运行状态的考虑, 对阻断控制的应用性验证不足。文献[11]指出线路过载是引发电力系统连锁故障的多种因素之一。因此, 目前研究大多基于风险理论<sup>[12-13]</sup>刻画线路过载, 并以线路过载作为主要推动因素, 对连锁故障过程进行预测分析<sup>[14-15]</sup>。文献[8,16]对由过载级联效应导致的易故障线路进行辨识, 并采用故障传播路径及停运概率构成事故链以描述连锁故障过程。研究表明, 通过采取控制措施消除线路过载可有效阻断连锁故障的传播。文献[17]针对系统中所有潜在故障建立了连锁故障的预防控制模型, 但预防性控制<sup>[18]</sup>代价往往高于阻断控制; 文献[19]结合预防控制与阻断控制的特征, 提出了一种连锁故障预防、阻断协调的控制方法。上述研究在阻断控制中采取了单阶段控制方法, 实际连锁故障是多阶段级联过程, 采取多阶段的阻断控制可以更有效地降低调控风险与成本; 文献[20]以系统调控成本为目标并考虑了线路停运概率, 但其忽略了控制过程中非故障线路故障概率以及控制过程中可能引起的预测传播路径偏差的影响; 文献[21]在文献[20]的基础上考虑了控制措施与传播路径的交互影响, 构建出阻断控制模型, 避免了控制过程中非预测故障线路故障概率反超预测故障线路故障概率; 文献[22-23]利用灵敏度方法分析连锁故障过程, 确定受控制措施影响的易故障线路; 文献[24]将连锁故障表示为基于目标风险的多步决策问题, 通过优化调控成本的概率期望和连锁故障过载风险, 建立了更灵活的多阶段阻断控制模型。

连锁故障阻断控制研究已初步建立了理论基础, 但由故障引起的不可观测性会严重影响系统运行, 而2015年乌克兰大停电未能得到有效及时控制的重要原因是观测系统节点失效引起控制中心失去对电网运行状态的监控能力, 电网处于不可测、不可控的状态, 并且不同节点间失去通信联系, 最终使得小扰动扩散为连锁故障大停电事故<sup>[25-26]</sup>。

当系统可观测性受故障因素影响而下降时, 基于系统部分可观与基于系统完全可观状态下制定的调控方案会有所差异。当前大多研究都欠缺对该因素的考虑。

相量测量单元(phasor measuring unit, PMU)能够实时测量系统各节点的电压和电流等相量。基于

PMU的广域测量系统可以精确观测节点信息并通过高速通信网络将相量数据传回至调度方, 辅助调度人员对系统调控, 便于故障发生时及时采取控制措施保证系统稳定性<sup>[27]</sup>。限于PMU的成本问题, 目前不可能全网覆盖PMU, 而系统可观测性受制于连锁故障的传播。文献[28]分析了观测节点失效对连锁故障的影响, 并对系统进行了风险评估; 文献[26]基于多阶段的改进渗透理论, 建立了在电力系统和观测系统中交互传递的连锁故障模型; 文献[29]利用可靠性评估的方法通过PMU度量系统运行状态, 辅助调度人员分析潜在风险, 以便当故障发生时及时调整机组与负荷运行方式, 以提高系统安全性; 此外, 文献[30]还从PMU配置角度研究了预防连锁故障对PMU量测的影响, 以保证系统的完全可观测性。然而, 该方法与文献[17]均为特定场景下的预防措施研究, 未考虑系统发生连锁故障后的应对策略。当前研究在控制过程中默认系统是完全可观测的, 并在系统状态完全已知的条件下进行控制。而实际电力系统运行过程中往往需要根据PMU采集的节点数据进行相应的控制, PMU的回传观测信息是系统调控的重要参考依据<sup>[31]</sup>。如果由于可观测性下降而导致调度失误等问题, 可能带来严重损失<sup>[32]</sup>。当某些节点受连锁故障影响而不可被观测时, 调度人员便无法对该类节点有效控制。节点不可控可能使连锁故障继续发展演化, 造成系统的观测性进一步下降, 从而增大了连锁故障发展为大停电事故的可能性。因此在研究电力系统的连锁故障控制时, 有必要考虑系统的可观测性。

为了在制定阻断控制策略时计及系统可观测性的影响, 本文首先分析了控制过程中系统可观测性与控制策略的关联性。其次, 对连锁故障过程进行预测, 并建立了相应的阻断控制模型。通过遗传算法和数学规划方法在IEEE 39和IEEE 118节点系统上对建立的模型进行求解, 结果验证了模型在考虑可观测性后可以有效降低连锁故障风险。最后, 通过与不考虑系统可观测性模型下的控制过程与结果进行对比, 进一步分析了系统可观测性对阻断控制策略的影响。

## 1 系统可观测性与阻断控制关联性分析

### 1.1 系统可观测性描述

电力系统的可观测性根据观测原则不同分为代数可观和拓扑可观<sup>[27,33]</sup>, 拓扑可观的原则是: 判断系统的测量网络是否可以观测到系统所有节点。PMU由于其成本较高, 在配置时不可能将全网覆盖, 并且系统可观测性受PMU安装位置影响。当

节点  $n$  安装有 PMU 时, 节点  $n$  为直接可观测点; 当节点  $n$  的相邻节点  $m$  安装有 PMU 时, 节点  $n$  为间接可观测点。

根据可观测性原则, 对系统节点可观测度  $C_n$  给出以下定义, 如式(1)和式(2)所示。

$$C_n = b_n + \sum_{m \in N, m \neq n} a_{n,m} b_m \quad (1)$$

$$a_{n,m} = a_{m,n} = \begin{cases} 1 & n = m \text{ 或 } n \text{ 与 } m \text{ 相连} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $n$ 、 $m$  为节点编号;  $N$  为系统所有节点集合;  $b_n$  表示节点  $n$  是否安装 PMU, 若节点  $n$  安装有 PMU,  $b_n = 1$ , 否则  $b_n = 0$ ;  $a_{n,m}$  为系统关联矩阵  $A$  中的元素, 节点  $n$ 、 $m$  之间存在直接相连支路时,  $a_{n,m} = 1$ , 否则  $a_{n,m} = 0$ ; 当节点  $n$  的可观测度  $C_n \geq 1$ , 表示该节点是可观测的; 当节点  $n$  或相邻节点未安装 PMU 时, 可观测度  $C_n = 0$ , 即该节点是不可观测的。

此外, 本文在判断节点的可观测性时, 考虑了节点零功率注入情况, 并给出以下判定条件:

1) 直接安装 PMU 以及相邻节点安装 PMU 的节点是可观测的。

2) 零功率注入节点及其相邻的节点中, 若只有一个节点可观测性未知, 其余节点均具有可观测性, 那么这些节点均为可观测节点<sup>[34]</sup>。

## 1.2 连锁故障过程

本文在不采取控制措施时对连锁故障过程进行预测, 具体步骤为: 首先, 随机选取初始故障线路; 然后, 对初始故障线路开断引起的后续过载线路进行搜索; 最后, 根据线路传输功率判断其故障概率, 并确定下一阶段的故障线路。其中, 线路故障概率与其传输功率的关系如图 1 所示。

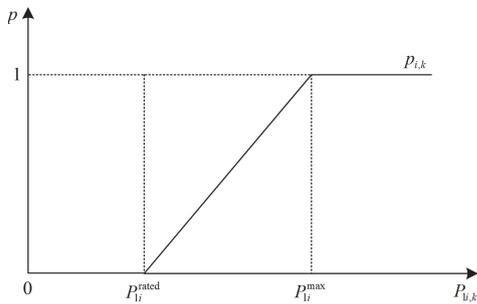


图 1 线路故障概率与传输功率的关系

Fig. 1 Correlation between line fault probability and transmission capacity

当线路传输功率超过额定传输功率时, 其故障概率随传输功率线性增加<sup>[30,35]</sup>; 线路传输功率大于

允许最大传输容量时, 线路故障概率为 1; 由于本文不考虑线路隐性故障, 因此, 当线路所载潮流没有过载时, 线路故障概率为 0。具体关系表达式如式(3)所示。

$$p_{i,k} = \begin{cases} 0 & 0 < P_{i,k} \leq P_{li}^{\text{rated}} \\ \frac{P_{i,k} - P_{li}^{\text{rated}}}{P_{li}^{\text{max}} - P_{li}^{\text{rated}}} & P_{li}^{\text{rated}} < P_{i,k} \leq P_{li}^{\text{max}} \\ 1 & P_{i,k} > P_{li}^{\text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $p_{i,k}$  与  $P_{i,k}$  分别为线路  $i$  在故障过程第  $k$  阶段的故障概率与实际传输功率;  $P_{li}^{\text{rated}}$ 、 $P_{li}^{\text{max}}$  分别为线路  $i$  的额定传输功率与允许最大传输容量。

在不采取控制措施时, 以传输功率过载判断线路是否发生故障, 并将系统发生解列作为连锁故障过程的结束判据<sup>[20-24]</sup>。当系统解列形成孤岛或无线路过载后, 结束故障过程搜索。后续基于搜索得到的连锁故障过程采取阻断控制措施。

连锁故障的相邻阶段有着明确的因果关系, 可用事故链模型<sup>[8]</sup>描述连锁故障过程。前一阶段故障改变系统的运行状态, 从而导致下一故障的发生。根据相邻阶段因果关系确定连锁故障事故链  $I$ 。

$$\begin{aligned} I &= \{I_E, I_F\} \\ I_E &= \{i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_w\} \\ I_F &= \{p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_w\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: 事故链  $I$  由连锁故障过程  $I_E$  与传播路径的故障概率  $I_F$  组成;  $i_k$  与  $p_k$  分别为连锁故障第  $k$  阶段的故障线路及其故障概率;  $w$  为故障级联阶段数。本文用故障概率表征连锁故障过程中线路故障的可能性。事故链选取阶段故障概率最大的线路作为下一阶段故障线路, 因此  $p_k$  为第  $k-1$  个阶段中所有过载线路的故障概率最大值。

## 1.3 系统可观测性与连锁故障阻断控制关联性

结合前面对系统可观测性与连锁故障过程的介绍, 本节针对系统可观测性和连锁故障阻断控制的关联性展开分析。连锁故障是多阶段级联过程, 随着故障线路增多, 系统的拓扑结构发生变化, 可能影响到 PMU 对系统状态的观测情况。

以图 2 系统发生的连锁故障过程为例, 在初始阶段无故障且处于完全可观测状态下, 线路 1—3 故障断开后安装在 1 号位的 PMU 则无法量测 3 号位的信息, 3 号位由此变为不可观测节点。随着故障的传播, 在第二阶段线路 1—4 发生故障, 4 号位随之失去可观测性。如果不及时阻断连锁反应, 各节点逐渐失去联系, 而安装 PMU 的节点也便无法量测其他节点信息。由此可知, 连锁故障会持续破坏系统可观测性, 并且系统可观测性会随着级阶

段的递增而逐渐下降, 进而发展为全网大部分节点不可观、不可控状态, 最终引发大停电事故。因此, 在连锁故障研究中有必要考虑系统可观测性。

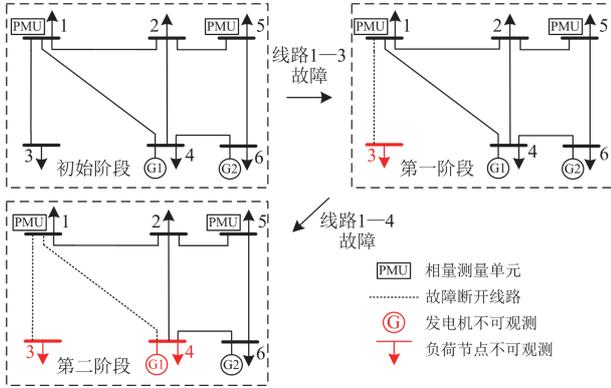


图2 连锁故障对系统可观测性的破坏

Fig. 2 Damage of cascading failure to system observability

已有研究成果<sup>[20-24]</sup>证明通过采取阻断控制措施可以有效降低线路的越限风险与系统负荷损失风险, 并且相对预防控制更经济。阻断控制的原理是通过调节全网机组出力与削减负荷来满足全网潮流不发生越限。目前阻断控制研究默认全网状态已知, 从而系统所有功率注入节点(发电节点和负荷节点)均能参与调控。实际上, 调度人员需要根据PMU获取的节点信息估算系统运行状态, 并制定调控方案, 发布节点调控命令<sup>[36]</sup>。通过通信系统向节点控制系统传递调控命令以调整机组出力与削减负荷, 当系统发生连锁故障导致PMU观测信息丢失、可观测性下降时, 其负荷量及发电机出力均无法测知。贸然调节不可观测节点可能会引发不知情故障, 甚至恶化故障情况<sup>[31,37]</sup>。

因此, 不可观测节点不能参与调控, 节点会伴随可观测性的丢失而不可控。在电力系统连锁故障控制研究中节点可控性的丢失具体体现在节点机组出力与负荷失去调控能力<sup>[38]</sup>。系统可观测性会影响控制策略中所有节点的调控方案。

综上所述, 当连锁故障发生后, 系统的可观测性与可控性会伴随故障的传播持续下降, 将会影响传统阻断控制策略的实施效果。而阻断控制的有效性会进而影响连锁故障的发展。由此可知, 系统可观测性与阻断控制是相互影响的, 二者关联性如图3所示。

## 2 考虑可观测性的阻断控制建模与求解

### 2.1 功率转移直流潮流模型

直流潮流模型具有快速求解的优势, 在连锁故障研究中被广泛应用。本文采用直流潮流模型进行

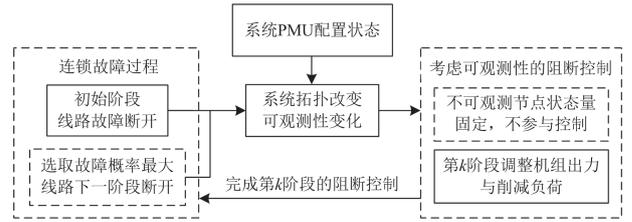


图3 系统可观测性与阻断控制的关联性

Fig. 3 Correlation between system observability and blocking control in cascading failures

分析, 通过节点-支路分布转移因子建立的直流潮流方程<sup>[21]</sup>如式(5)所示。

$$L = G_g P_g - G P_d \quad (5)$$

式中:  $L$  为系统中所有线路的有功传输向量;  $P_g$  与  $P_d$  分别为系统所有机组出力和节点负荷的有功向量;  $G_g$  与  $G$  分别为发电机-支路转移分步因子矩阵和节点-支路转移分步因子矩阵,  $G_g$  由  $G$  中所有发电机节点对应的列向量构成。

### 2.2 目标函数

阻断控制通常要求减小连锁故障的目标风险并提高调控的经济效益。其中, 当目标风险不考虑发电机调控成本时则仅为阻断控制的失负荷代价。本文以控制过程中系统有功调整成本作为模型的寻优指标, 构造目标函数公式如式(6)所示。

$$\min f = \sum_{k=1}^w \left( \prod_{x=1}^k p_{i,x} \right) \left( \alpha \sum_{n=1}^{N_g} |\Delta P_{gn,k}| + \beta \sum_{n=1}^{N_d} \Delta P_{dn,k} \right) \quad (6)$$

式中:  $p_{i,x}$  为第  $k$  阶段前的第  $x$  阶段发生故障的概率;  $\prod_{x=1}^k p_{i,x}$  为故障发展至第  $k$  阶段的概率;  $\Delta P_{gn,k}$  为节点  $n$  第  $k$  阶段的机组有功出力调整量;  $\alpha$  为调整单位机组出力的成本系数;  $\Delta P_{dn,k}$  为负荷节点  $n$  第  $k$  阶段的负荷削减量;  $\beta$  为削减单位负荷的成本系数;  $N_g$ 、 $N_d$  分别为系统中发电机节点和负荷节点总数。

### 2.3 约束条件

在阻断控制过程中, 除了基本的系统潮流稳定约束外, 还需要考虑节点可观测性约束、阻断控制约束以及系统其他约束, 具体约束如下所述。

#### 1) 节点可观测性约束

由 1.3 节关联性分析可知, 节点不可观测时, PMU 无法获取该类节点相量信息, 导致不能准确获取系统运行状态。强制调整不可控节点有可能使情况恶化, 因此调控中心不能调整其机组出力或削减负荷<sup>[31]</sup>。此外, 为了保证系统观测信息和功率调控

的准确性, 需要限制不可观测节点参与功率调控。根据模型中的节点可观测性, 对不可观测节点的机组出力与负荷调整建立以下约束, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} P_{gn,r} = P_{gn,h} \\ P_{dn,r} = P_{dn,h} \end{cases} \text{ 当 } C_{n,h} > 0 \text{ 且 } C_{n,r} = 0, \text{ 其中 } r = h+1, \dots, w \quad (7)$$

式中:  $P_{gn,h}$ 、 $P_{dn,h}$  分别为节点  $n$  在最后一可观测阶段的机组有功出力和负荷量,  $h$  为节点  $n$  最后一可观测的阶段, 节点可观测度  $C_{n,h} > 0$ ;  $r$  为节点  $n$  的不可观测阶段, 节点可观测度  $C_{n,r} = 0$ ; 节点  $n$  在  $h$  阶段之后的控制过程中, 其  $P_{gn,r}$  或  $P_{dn,r}$  均不可调整, 分别保持与  $P_{gn,h}$ 、 $P_{dn,h}$  一致。

### 2) 阻断控制约束

本文对预测故障线路构成的连锁故障过程进行控制。由式(5)可知, 在采取控制措施后线路潮流变化, 需要传播路径约束来保证连锁故障在采取控制措施后, 仍能按照原预测传播路径发展, 具体约束如式(8)所示。

$$p_{li,k} > p_{lj,k} \quad i, j \in B_k, i \in I_E, j \notin I_E \quad (8)$$

式中:  $p_{li,k}$  为预测传播路径中第  $k$  阶段故障线路  $i$  的故障概率;  $p_{lj,k}$  为第  $k$  阶段其余可能故障线路  $j$  的故障概率;  $B_k$  为系统第  $k$  阶段可能故障线路集合, 第  $k$  阶段故障线路的故障概率要大于该阶段所有可能故障线路的故障概率。

预测传播路径与非预测传播路径在控制过程中控制力度不同, 需要不同的控制力度约束。

$$\begin{cases} |P_{li,k}| \leq \mu_{1,k} P_{li}^{\max} & k = 1, 2, \dots, w-1 \\ |P_{li,k}| \leq P_{li}^{\max} & k = w \end{cases} \quad i \in I_E \cap B_k \quad (9)$$

$$\begin{cases} |P_{lj,k}| \leq \mu_{2,k} P_{lj}^{\max} & k = 1, 2, \dots, w-1 \\ |P_{lj,k}| \leq P_{lj}^{\max} & k = w \end{cases} \quad j \in B_k \quad (10)$$

式中:  $P_{lj}^{\max}$  为  $P_{lj,k}$  的最大值;  $\mu_{1,k}$ 、 $\mu_{2,k}$  分别为第  $k$  阶段预测故障线路和其他可能故障线路的过载控制系数, 对两类线路采用不同控制系数; 过载系数越小, 则控制力度越大, 在前  $w-1$  个阶段可适当允许部分线路过载, 在第  $w$  阶段结束控制, 不允许任何线路过载。通过过载控制约束, 系统在阻断控制完成后不再出现过载线路且保持稳定运行。

### 3) 系统其他约束

$$\sum_{i^l \in I_n^l} P_{li^l,k} + P_{gn,k} = \sum_{i^f \in I_n^f} P_{li^f,k} + P_{dn,k} \quad (11)$$

$$-cP_{gn}^{\text{rated}} \leq \Delta P_{gn,k} \leq cP_{gn}^{\text{rated}} \quad (12)$$

$$P_{gn}^{\min} \leq P_{gn}^0 + \sum_{x=1}^k \Delta P_{gn,x} \leq P_{gn}^{\max} \quad (13)$$

$$0 \leq \Delta P_{dn,k} \leq P_{dn}^0 \quad (14)$$

$$0 \leq \sum_{x=1}^k \Delta P_{dn,x} \leq P_{dn}^0 \quad (15)$$

$$\theta_n^{\min} \leq \theta_{n,k} \leq \theta_n^{\max} \quad (16)$$

式中:  $I_n^l$ 、 $I_n^f$  分别为节点  $n$  功率流入线路  $i^l$  和功率流出线路  $i^f$  的集合;  $P_{li^l,k}$ 、 $P_{li^f,k}$  分别为第  $k$  阶段线路  $i$  上流出和流入节点  $n$  的有功功率;  $P_{gn,k}$ 、 $P_{dn,k}$  分别为节点  $n$  在第  $k$  阶段的机组出力和有功负荷量, 当节点  $n$  为负荷节点时,  $P_{gn,k}$  即为 0;  $c$  为系统机组爬坡系数;  $P_{gn}^0$ 、 $P_{gn}^{\text{rated}}$  分别为节点  $n$  的机组初始有功出力和额定有功出力;  $P_{dn}^0$  为系统初始状态下节点  $n$  的有功负荷;  $\Delta P_{gn,x}$ 、 $\Delta P_{dn,x}$  分别为第  $k$  阶段节点  $n$  的机组有功出力调整量和负荷削减量;  $\sum_{x=1}^k \Delta P_{gn,x}$ 、

$\sum_{x=1}^k \Delta P_{dn,x}$  分别为前  $k$  阶段节点  $n$  的机组有功出力调整量和负荷削减量;  $\theta_{n,k}$  为第  $k$  阶段节点  $n$  的相角;  $P_{gn}^{\max}$ 、 $P_{gn}^{\min}$  和  $\theta_n^{\max}$ 、 $\theta_n^{\min}$  分别为节点  $n$  的机组出力与相角的上下限值。式(11)为节点功率平衡约束, 式(12)~式(15)为节点  $n$  各阶段的功率调控约束, 式(16)为节点  $n$  的相角约束。

## 2.4 求解流程

本文综合采用遗传算法和数学规划方法对考虑系统可观测性影响的阻断控制模型进行求解, 求解过程主要分为遗传算法种群迭代与个体阻断控制策略的数学规划求解两部分, 具体求解流程如图 4 所示。

遗传算法在寻优时, 仅需对初代种群中的每个个体与子代种群被选择个体进行目标风险求解即可, 大大提高了求解效率。在个体目标风险的求解过程中, 为优化模型添加节点不可观测约束, 以考虑可观测性对阻断控制的影响。详细个体目标风险值计算步骤如下:

1) 以连锁故障事故链  $I$  作为染色体, 在个体求解时将染色体解码为连锁故障过程  $I_E$  与传播路径线路故障概率  $I_F$ 。

2) 通过连锁故障过程  $I_E$  预测每阶段系统拓扑结构, 并记录故障最大级联阶段数  $w = w_1$ 。根据  $I_F$  各阶段概率更新染色体, 若系统在  $w_1$  阶段之前某一阶段故障概率为 0(记为  $w_2$  阶段), 则染色体长度由

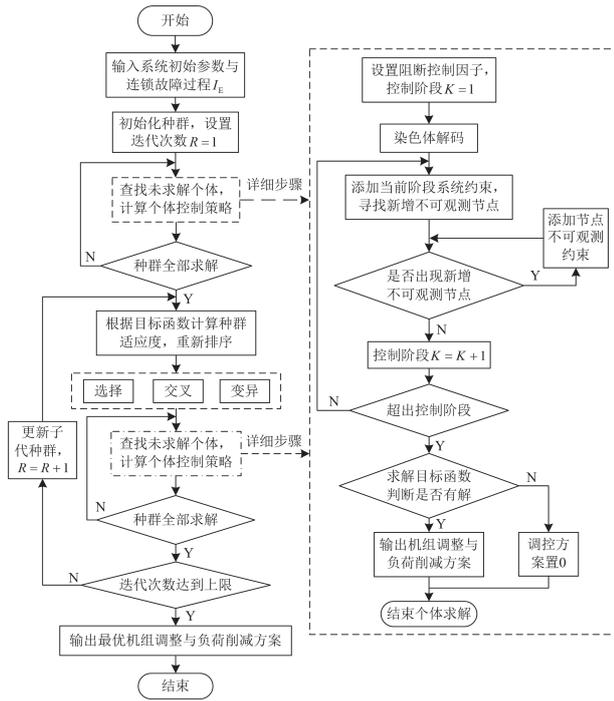


图 4 阻断控制求解流程

Fig. 4 Solving process of blocking control

$2w_1 \rightarrow 2w_2$ , 此时获取目标函数的级联阶段数为  $w = w_2$ 。修改级联阶段后, 返回第 1)步更新染色体; 否则, 为功率调控方案添加约束条件。

3) 寻找各阶段系统含有的不可观测节点, 为所有不可观测节点添加不可观测性约束, 使该类节点在  $h+1$  至  $w$  阶段的注入功率与  $h$  阶段节点注入功率一致。

4) 调用求解器对个体目标函数进行数学规划求解, 若有解, 记录并输出目标函数与阻断控制策略; 否则, 将该方案置为 0, 标记为无解。

父代种群求解完后, 对子代个体按适应度排序, 选择多个适应度较大的个体进行遗传操作并再次求解, 重复过程至迭代次数达到上限, 找出最优适应个体并输出其对应的机组调整与负荷削减方案。

### 3 算例分析

#### 3.1 IEEE 39 节点系统分析

本文以 IEEE 39 节点系统为例, 分析系统可观测性对阻断控制的影响。IEEE 39 节点系统如图 5 所示。在计算过程中, 将线路 17—18 额定传输容量修改为原来容量的 50%, 其余额定传输容量修改为原始容量的 95%, 机组出力调整和负荷削减的成本分别为 1 美元/MW 和 100 美元/MW, 机组阶段爬坡为额定容量的 15%; 线路过载控制系数为

1.4<sup>[39]</sup>; 预设线路 1—39 为初始故障。IEEE 39 节点系统 PMU 安装位置如图 5 所示。本文所提模型, 即考虑系统可观测性的连锁故障阻断控制模型记为 Model 1, 不考虑系统可观测性的模型记为 Model 2。经直流最优潮流计算得到的机组初始出力情况如表 1 所示。

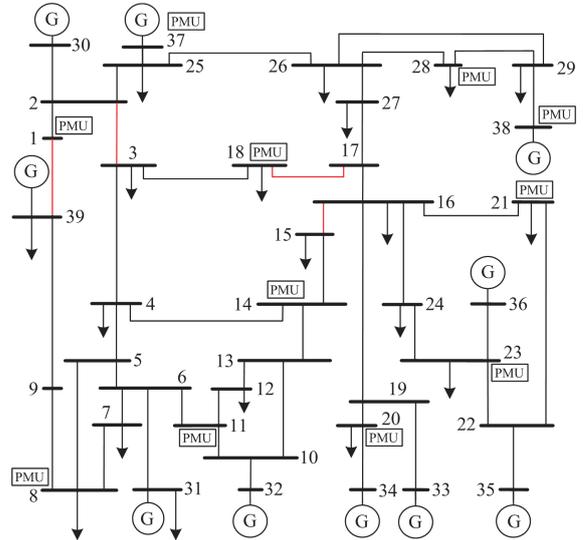


图 5 IEEE 39 节点系统

Fig. 5 IEEE 39-bus system

表 1 机组初始有功出力

Table 1 Initial active power output of generator

发电机编号	初始出力/MW	发电机编号	初始出力/MW
G1	660.85	G6	660.85
G2	646	G7	580
G3	660.85	G8	564
G4	652	G9	660.85
G5	508	G10	660.85

#### 3.1.1 故障传播路径

在不考虑控制措施时, 以线路 1—39 作为初始故障引发连锁反应, 各阶段故障线路和故障概率具体如表 2 所示。

表 2 连锁故障过程及线路故障概率

Table 2 Cascading failure process and line fault probability

故障阶段	故障线路	故障概率
第 1 阶段	1—39	1
第 2 阶段	2—3	1
第 3 阶段	17—18	1
第 4 阶段	15—16	1

线路 1—39 的故障概率为 1, 由于线路 1—39 开断, 线路 2—3 潮流由初始状态的 450.81 MW 上升至 679.44 MW。之后, 第 3、第 4 阶段故障线路

17—18、线路 15—16 的有功传输功率分别为 1238.44 MW 和 640.17 MW, 3 个阶段的故障线路传输功率均超过允许最大传输容量, 故障概率均为 1。第 4 阶段线路 15—16 断开后, 系统发生解列, 故障过程搜索结束并形成图 5 所示两个孤岛。该事故链最终造成的失负荷风险<sup>[8]</sup>为 713.03, 在以每条输电线路分别为初始故障的连锁故障事故链集合中失负荷风险排名第 4 位, 后续针对该事故链在前四阶段内完成阻断控制。

3.1.2 不同模型阻断控制结果比较

分别求解不同模型, 得到采取控制措施后的线路故障概率对比如表 3 所示, 目标风险值以及失负荷情况对比如表 4 所示。

表 3 不同模型阻断控制后线路故障概率比较

Table 3 Comparison of line fault probability after blocking control of different models

故障阶段	Model 1	Model 2	Model 1 不可观测节点
第 1 阶段	1	1	39
第 2 阶段	0.24	0.08	39
第 3 阶段	0.25	0	17, 27, 39
第 4 阶段	0.01	0	17, 27, 39

表 4 不同模型阻断控制结果比较

Table 4 Comparison of blocking control results of different models

Model	目标风险值	失负荷量/MW	失负荷代价
1	17 120.25	1152.18	16 637.26
2	1941.29	170.39	1390.37

分析表 3 中控制结果可知, 在采取控制措施后线路故障概率均明显下降, 从而验证了所提方法能够有效降低目标风险。对比不同模型的控制阶段数与控制后的线路故障概率, Model 2 在第 2 阶段结束控制可以取得模型优化所得最优控制方案。其中, 第 2 阶段故障概率由 1 降到了 0.08; Model 1 需要 4 个阶段取得最优控制方案, 第 3 阶段概率为 0.24。Model 1 线路故障概率明显高于 Model 2。

由表 4 可知, Model 1 在考虑 PMU 影响后的目标风险值、失负荷情况也均明显高于 Model 2。原因是对于 Model 1, 线路 1—39 的断开导致 39 号节点不可观测, 该节点的负荷量与发电机 G10 的有功出力均不可控, 在后续阶段无法参与阻断控制, 从而使得在忽略系统可观性对控制措施影响的情况下采取控制措施所花费的控制成本估计过于乐观。

3.1.3 不同初始故障的阻断控制结果

为进一步验证系统可观性对阻断控制的影响, 本文对比分析了 Model 1 和 Model 2 针对 IEEE

39 节点系统中不同初始故障线路的阻断控制策略。具体结果如表 5 所示。

表 5 不同初始故障的阻断控制结果

Table 5 Blocking control results of different initial faults

初始故障线路	Model 1		Model 2		Model 1 不可观测机组
	目标风险值	阻断阶段	目标风险值	阻断阶段	
1—2	—	—	11 412.90	3	G1
1—39	17 120.25	4	1941.29	2	G10
4—14	1812.86	4	1800.41	4	—
5—8	105.38	1	100.93	1	G2
10—11	—	—	181.69	1	G3
19—20	—	—	17372	1	G4

分析表 5 可知, 针对线路 1—39、线路 4—14、线路 5—8 分别引发的连锁故障采取控制措施时, Model 1 的目标风险较 Model 2 更高。线路 5—8 作为初始故障的连锁故障过程在单阶段内被阻断, 目标风险仅提高了 4.41%, 而线路 1—39 作为初始故障的连锁故障阻断控制中两个模型的目标风险值提高了 881%。这说明随着故障级联阶段的递增, 系统不可观测性的逐步降低会使得连锁故障的阻断控制措施受限进一步加强, 目标风险的差距逐渐提升。

同时, 在采用 Model 1 的控制方式时存在部分故障无法被有效阻断的情况。表 5 中, 由线路 1—2、线路 10—11、线路 19—20 分别作为初始故障引发的连锁故障无法被阻断, 均是由于在故障传播过程中出现部分发电机节点不可观。而在阻断控制过程中, 机组出力的调整成本系数远小于负荷削减的成本系数。然而, 在线路 4—14 引发的连锁故障中, 虽然 4、8 号负荷节点不可观, 但不存在不可观测的发电机节点, 因此在 Model 1 下目标风险仅提高了 0.69%, 远远低于其他故障过程的风险提升百分比。由此可知, 发电机节点发生不可观测情况后, 不仅会大幅增加阻断控制的代价, 还会导致一些无法求解的情况。

部分节点不可观测是由于初始条件下系统 PMU 配置冗余度较低所导致的。若为表 5 各故障过程中出现的不可观测节点安装 PMU, 则其全阶段均可被观测, 从而所有节点都能参与控制策略的制定。阻断控制措施的制定将不受可观性影响, 便可按照 Model 2 求解所得的控制策略进行调整, 不仅可以获得可行的阻断控制方法, 同时还能有效降低目标风险。一定程度上提高系统 PMU 配置冗余度可以很好地解决上述问题, 然而实际系统中受多种因素限制, 无法实现 PMU 的高冗余度配置, 因此在对连锁故障进行阻断控制时, 仍需考虑不可观

测节点的不可控因素。

### 3.2 IEEE 118 节点系统分析

#### 3.2.1 IEEE 118 节点系统故障传播路径

本文进一步以 IEEE 118 节点系统为例, 分析了系统可观测性对阻断控制策略的影响, 参数设置与 IEEE 39 节点系统一致。预设线路 5—8 为初始故障, 故障概率为 1, 具体连锁故障过程如表 6 所示。

表 6 IEEE 118 节点系统连锁故障过程及线路故障概率

Table 6 Cascading failure process and line fault probability of IEEE 118-bus system

故障阶段	故障线路	故障概率
第 1 阶段	5—8	1
第 2 阶段	12—16	0.48
第 3 阶段	14—15	1
第 4 阶段	13—15	1

表 6 中, 线路 5—8 开断使线路 12—16 潮流由初始状态的 4.70 MW 上升至 119.24 MW, 超过其额定传输容量。线路 12—16 断开后, 第 3、第 4 阶段的故障线路传输功率均超过允许最大容量, 故障概率均为 1。第 4 阶段线路 13—15 断开后, 系统解列, 连锁故障过程共 4 个阶段。

#### 3.2.2 IEEE 118 节点系统阻断控制结果比较

IEEE 118 节点系统的具体 PMU 安装位置如表 7 所示, 同样以 Model 1 与 Model 2 进行对比。

表 7 IEEE 118 节点系统 PMU 安装位置

Table 7 Installation location of PMU in IEEE 118-bus system

Model 1 PMU 安装位置
1, 5, 10, 12, 15, 17, 20, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 65, 72, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 102, 105, 110, 114

对 Model 1 与 Model 2 分别求解, 得到采取控制措施后的线路故障概率如表 8 所示, 目标风险值以及失负荷情况如表 9 所示。

表 8 IEEE 118 节点系统阻断控制后线路故障概率比较

Table 8 Comparison of line fault probability after blocking control of IEEE 118-bus system

故障阶段	Model 1	Model 2	Model 1 不可观测节点
第 1 阶段	1	1	26
第 2 阶段	0.17	0.19	26
第 3 阶段	0.14	0.02	26
第 4 阶段	0.42	0	13, 26

表 9 IEEE 118 节点系统阻断控制结果比较

Table 9 Comparison of blocking control results of IEEE 118-bus system

Model	目标风险值	失负荷量/MW	失负荷代价
1	1587.12	220	1289.26
2	1489.86	136.75	1304.53

对比表 8 与表 9 中两种模型分别采取控制措施后的结果, Model 2 在第 3 阶段结束控制取得最优方案, Model 1 的最优方案则是在第 4 阶段取得。阻断控制完成后系统无线路过载且稳定运行。其中, Model 1 控制后的目标函数高于 Model 2, 与 IEEE 39 算例结果一致, 再次验证了不考虑系统可观测性的控制结果过于乐观。

通过分析上述算例结果, 当连锁故障按照预测传播路径发展时, 系统由于部分节点不可控, 通常需要其他节点损失更多负荷或发电机节点增发更多出力来遏制连锁故障的传播。在低 PMU 冗余系统中节点的观测性对阻断控制的影响更加明显, 调度方制定的控制策略往往需要付出更多调控成本。

通过提高 PMU 冗余度以保证系统在故障状态仍有一定的可观测性, 可在一定程度上消除不可控影响。结合上述两个算例的不同模型控制策略可知, 若使表 3 与表 8 的不可观测节点在阻断控制过程中仍为可观测节点, 系统便处于全过程完全可控状态, 从而 Model 2 得到的控制策略与 Model 1 一致, 再次验证了系统可观测性对阻断控制的影响。

## 4 结论

当前连锁故障阻断控制研究忽略了系统可观测性对控制策略的影响。为了保证控制策略的实用性, 本文分析了可观测性与阻断控制间的关联性, 建立了计及系统可观测性的连锁故障阻断控制模型。其中, 以控制成本最小为目标, 通过不同模型对比分析, 验证了模型在考虑系统可观测性影响时阻断控制策略的制定具有较好的实用性。此外, 系统可观测性下降对阻断控制策略有显著的影响, 当系统 PMU 配置冗余度较低时, 存在目标风险提高以及无法阻断故障的情况, 通过提高 PMU 的配置冗余度可以在一定程度上消除该影响。因此, 在未来连锁故障研究中有必要考虑系统可观测性与控制策略的关联性。当前工作基于预测传播路径对连锁故障进行阻断控制, 未考虑故障路径演化与系统可观测性的交互影响, 因此研究考虑系统可观测性的路径演化阻断控制模型将是下一步的工作重点。

## 参考文献

- [1] 胡素然, 丁昊晖, 陈心宜, 等. 美国加州 2020 年轮流停电事故分析及其对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 11-18.
- HU Qinran, DING Haohui, CHEN Xinyi, et al. Analysis on rotating power outage in California, USA in 2020 and its enlightenment to power grid of China[J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 11-18.
- [2] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021 年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.  
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.
- [3] 屠竞哲, 何剑, 安学民, 等. 巴基斯坦“2023.1.23”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5319-5329.  
TU Jingzhe, HE Jian, AN Xuemin, et al. Analysis and lessons of Pakistan blackout event on January 23, 2023[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5319-5329.
- [4] 郭挺, 杨梓晴, 徐良德, 等. 考虑新能源随机波动和 T 接线的城市电网连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 59-68.  
GUO Ting, YANG Ziqing, XU Liangde, et al. Risk assessment for cascading failures in urban power grids considering the random fluctuation of renewable energy and T-connected lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 59-68.
- [5] 李国庆, 张斌, 肖桂莲, 等. 基于多尺度特征集的高占比新能源电网连锁故障数据驱动辨识方法[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 91-100.  
LI Guoqing, ZHANG Bin, XIAO Guilian, et al. Data-driven cascading failure prediction method for high-proportion renewable energy systems based on multi-scale topological features[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 91-100.
- [6] 康海鹏, 李长城, 黄思琪. 计及能源转换负荷影响的气电耦合系统连锁故障评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 133-145.  
KANG Haipeng, LI Changcheng, HUANG Siqi. Evaluation of cascading failures in an integrated gas and power system considering effects of energy conversion load[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 133-145.
- [7] 薛禹胜, 谢云云, 文福拴, 等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 1-9.  
XUE Yusheng, XIE Yunyun, WEN Fushuan, et al. A review on cascading failures in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 1-9.
- [8] 王涛, 刘雨濛, 顾雪平, 等. 基于连锁故障时空图的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5962-5972.  
WANG Tao, LIU Yumeng, GU Xueping, et al. Vulnerable lines identification of power grid based on cascading fault space-time graph[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5962-5972.
- [9] 刁塑, 刘俊勇, 刘友波, 等. 考虑电网承载结构的连锁故障模拟与防御策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 143-151.  
DIAO Su, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Cascading failure simulation and defense strategy considering grid carrying structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 143-151.
- [10] 王韶, 刘沛铮, 董光德, 等. 基于复杂网络理论计及校正控制的电力系统连锁故障模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 162-168.  
WANG Shao, LIU Peizheng, DONG Guangde, et al. Power system cascading failure model based on complex network theory with consideration of corrective control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 162-168.
- [11] ZHU Z, WU L, XIA Z. An accurate subdomain model for magnetic field computation in slotted surface-mounted permanent-magnet machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(4): 1100-1115.
- [12] VAIMAN M, BELL K, CHEN Y, et al. Risk assessment of cascading outages: methodologies and challenges[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 631-641.
- [13] 王一枫, 汤伟, 刘路登, 等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 141-148.  
WANG Yifeng, TANG Wei, LIU Ludeng, et al. Construction and application of power grid operation risk assessment and rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 141-148.
- [14] 周杨涵, 胡博, 邵常政, 等. 计及老化线路电流承载能力退化特性的电力系统连锁故障分析[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 188-194.  
ZHOU Yanghan, HU Bo, SHAO Changzheng, et al. Cascading failure analysis of power system considering current carrying capability degradation of aging lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 188-194.
- [15] 黄思琪, 李长城, 康海鹏. 计及输电线路开断时间的连锁故障快速阻断控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 111-120.  
HUANG Siqi, LI Changcheng, KANG Haipeng. Fast blocking control strategy against cascading failures considering tripping time of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 111-120.
- [16] 王安斯, 罗毅, 涂光瑜, 等. 基于事故链风险指标的输

- 电脆弱度在线评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 44-50.
- WANG Ansi, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Online transmission vulnerability assessment method based on the fault chain risk index[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 44-50.
- [17] 邓慧琼, 罗杰, 王晓铭, 等. 考虑安全性和经济性的连锁故障预防控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(5): 100-108.
- DENG Huiqiong, LUO Jie, WANG Xiaoming, et al. Preventive control strategy of cascading failure considering security and economy[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(5): 100-108.
- [18] 林一峰, 王增平, 王彤, 等. 构建更加坚强电网安全“第一道防线”的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 170-178.
- LIN Yifeng, WANG Zengping, WANG Tong, et al. Discussion on building a stronger first line of defense for grid security[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 170-178.
- [19] 丁明, 钱宇骋, 张晶晶, 等. 基于风险评估的电力系统连锁故障协调控制模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 1-8.
- DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing, et al. Coordinated control model of power system cascading failures based on risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 1-8.
- [20] 甘国晓, 耿光超, 高波, 等. 考虑线路停运概率的电力系统连锁故障阻断控制[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 266-272.
- GAN Guoxiao, GENG Guangchao, GAO Bo, et al. Blocking control of power system cascading failures considering line outages probability[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 266-272.
- [21] 刘雨濛, 顾雪平, 王涛. 计及传播路径的电力系统连锁故障多阶段阻断控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 151-157.
- LIU Yumeng, GU Xueping, WANG Tao. Multi-stage blocking control of power system cascading failures considering propagation path[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 151-157.
- [22] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于灵敏度和潮流熵的线路过负荷控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 58-66.
- YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Control strategy for line overload based on sensitivity and power flow entropy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 58-66.
- [23] 吴宇航, 王涛, 范辉, 等. 利用灵敏度分析的规模风电并网系统连锁故障阻断控制[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3743-3755.
- WU Yuhang, WANG Tao, FAN Hui, et al. Blocking control of cascading failures for large-scale wind power system using sensitivity analysis[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3743-3755.
- [24] LIU Yumeng, WANG Tao, GU Xueping. A risk-based multi-step corrective control method for mitigation of cascading failures[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(10): 766-775.
- [25] 郭庆来, 辛蜀骏, 王剑辉, 等. 由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 145-147.
- GUO Qinglai, XIN Shujun, WANG Jianhui, et al. Comprehensive security assessment for a cyber physical energy system: a lesson from Ukraine's blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 145-147.
- [26] 韩宇奇, 郭创新, 朱炳铨, 等. 基于改进渗流理论的信息物理融合电力系统连锁故障模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 30-37.
- HAN Yuqi, GUO Chuangxin, ZHU Bingquan, et al. Model cascading failures in cyber physical power system based on improved percolation theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 30-37.
- [27] 顾雪平, 周光奇, 李少岩. 计及系统可观测性的网络化简与黑启动分区方案制定[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 114-122.
- GU Xueping, ZHOU Guangqi, LI Shaoyan. Network simplification and formation of black-start zone partitioning scheme considering system observability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 114-122.
- [28] 张晶晶, 吴佳瑜, 齐先军, 等. 基于网络依存关系的CPPS连锁故障分析及风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 164-171.
- ZHANG Jingjing, WU Jiayu, QI Xianjun, et al. Cascading failure analysis and risk assessment of CPPS based on network dependency[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 164-171.
- [29] 张大波, 连帅, 陶维青, 等. 基于PMU的电网等值在互联电网运行可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 40-47.
- ZHANG Dabo, LIAN Shuai, TAO Weiqing, et al. Application of PMU-based grid equivalent model in operation reliability evaluation of interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 40-47.

- [30] 陈晓刚, 陶佳, 江全元, 等. 考虑高风险连锁故障的PMU配置方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 31(4): 11-14.  
CHEN Xiaogang, TAO Jia, JIANG Quanyuan, et al. Model cascading failures in cyber physical power system based on improved percolation theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 31(4): 11-14.
- [31] 袁汉杰, 李更丰, 龙涛, 等. 计及状态估计与可观性的电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4274-4283.  
YUAN Hanjie, LI Gengfeng, LONG Tao, et al. Power system reliability assessment considering state estimation and observability[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4274-4283.
- [32] 倪明, 颜诘, 柏瑞, 等. 电力系统防恶意信息攻击的思考[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 148-151.  
NI Ming, YAN Jie, BO Rui, et al. Power system cyber attack and its defense[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 148-151.
- [33] 鲍威, 蒋雪冬, 陈利跃, 等. 考虑观测冗余度最大的0-1线性规划电力系统PMU最优配置[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2051-2056.  
BAO Wei, JIANG Xuedong, CHEN Liyue, et al. A 0-1 linear programming approach to optimal phasor measurement units placement considering maximized system observability redundancy[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2051-2056.
- [34] 曹鹏, 刘敏. 基于改进的整数规划法结合零注入节点的PMU优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 143-150.  
CAO Peng, LIU Min. PMU placement method based on improved integer programming method combined with zero injection buses[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 143-150.
- [35] 李妍莎, 蔡晔, 曹一家, 等. 面向联合检修的电力信息物理系统输电线路脆弱相关性辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 120-128.  
LI Yansha, CAI Ye, CAO Yijia, et al. Vulnerable correlation identification of a transmission line in the power cyber physical system for federated maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 120-128.
- [36] 遼宝中, 李庚银, 王剑晓, 等. 计及监测与控制功能的电力信息物理系统关键输电线路辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2556-2566.  
TI Baozhong, LI Gengyin, WANG Jianxiao, et al. Identification of critical transmission lines in cyber-physical power system considering monitoring function and control function[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2556-2566.
- [37] 汤奕, 李峰, 王琦, 等. 通信系统故障对电力系统实时负荷控制影响的量化评价方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 90-96.  
TANG Yi, LI Feng, WANG Qi, et al. Quantitative evaluation of communication system fault effect on real-time load control of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 90-96.
- [38] AMINIFAR F, FOTUHI-FIRUZABAD M, SHAHIDEHPOUR M, et al. Impact of WAMS malfunction on power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1302-1309.
- [39] 张海翔, 吕飞鹏. 基于连锁故障序列分析的电网脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 32-38.  
ZHANG Haixiang, LÜ Feipeng. Vulnerability evaluation of power grid based on the analysis of cascading failure sequence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 32-38.

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-07-10

作者简介:

刘雨濛(1992—), 女, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电力系统连锁故障分析及风险控制、系统韧性评估与提升技术; E-mail: lym\_yomand@163.com

刘欢(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统连锁故障分析及风险控制; E-mail: 2031156991@qq.com

顾雪平(1964—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障诊断与恢复处理、电力系统安全防护与恢复控制等。E-mail: xpgu@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)