

DOI: 10.7667/PSPC162104

基于系统与元件动态交互量化分析的电力系统 连锁故障事故链识别方法

宣晓华¹, 周野^{2,3}, 宋晓芳^{2,3}, 吴翊轩^{2,3}, 薛峰^{2,3}, 邓晖¹, 华文¹

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211006; 3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211006)

摘要: 针对现有的连锁故障事故链搜索方法一般只考虑线路的过负荷保护或确定性模拟保护控制的动作等不足, 提出了基于系统与元件动态交互量化分析的电力系统连锁故障事故链识别方法。该方法基于事故链模型, 提出关键元件保护控制动作评估指标, 用于量化关键元件保护控制的动作情况。进一步根据该指标计算临界情况下关键元件保护控制的动作概率, 确定连锁故障事故链的后续事件。最后, 基于风险指标筛选高风险连锁故障事故链。对2017夏高峰负荷情况下的某实际电网进行仿真, 结果验证了所提方法的可靠性和有效性。

关键词: 连锁故障; 事故链; 关键元件; 保护控制; 评估指标

A novel searching method of fault chains for power system cascading outages based on quantitative analysis of dynamic interaction between system and components

XUAN Xiaohua¹, ZHOU Ye^{2,3}, SONG Xiaofang^{2,3}, WU Hongxuan^{2,3}, XUE Feng^{2,3}, DENG Hui¹, HUA Wen¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211006, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211006, China)

Abstract: Because the traditional searching method of fault chains for cascading outages usually only consider the over-load protection or simulate the action of protection and control deterministically, a novel searching method of fault chains for power system cascading outages which is based on quantitative analysis of dynamic interaction between system and components is proposed. Based on fault chain model, an evaluating index is established. This index is used to quantize the action situation of protection and control of key elements. Furthermore, according to the index, the action probability of protection and control of key elements under critical condition is figured out to confirm subsequent events of fault chains for cascading outages. Finally, high risk fault chains are screened out based on the risk index. Taken some actual power system under the summer peak load condition in 2017 as an example, the simulation result proves reliability and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Science and Technology Project of Zhejiang Electric Power Company "Research on UHV AC/DC Power Grid Security and Stability Characteristics and Defense Capability for Severe Fault".

Key words: cascading outages; fault chains; key elements; protection and control; evaluating index

0 引言

近年来, 国内外发生了多起电力系统大停电事故, 如2003年的美加大停电事故、西欧大停电事故和意大利大停电事故; 2009年和2011年巴西先后发生了大停电事故; 2012年夏季印度连续发生了两起大停电事故^[1], 2015年3月31日土耳其突发了

一场大停电事故^[2]。中国虽然没有发生过上述特别严重的大停电事故, 但也曾发生数起由连锁故障引发的局部地区停电事故, 如2006年的7月1日发生的华中电网停电事故^[3]。这些大停电事故对人民的日常生活和经济造成了非常严重的影响, 甚至威胁着社会稳定。

大停电事故的发展是电力系统运行状态不断恶化和愈演愈烈的过程, 都是从少量简单的元件故障开始, 经过一系列复杂的相继开断发展而来的。以往分析表明, 在大停电事故的发展过程中往往伴随

基金项目: 浙江省电力公司科技项目“特高压交直流电网安全稳定特性和严重故障抵御能力研究”

着连锁故障, 连锁故障对大停电的发生起着推波助澜的作用^[4-5]。按照墨菲定律, 如果某一事件存在发生的可能性, 尽管可能性或许很低, 但在某一情况下一定会发生。同理, 虽然发生连锁故障大停电属于极小概率事件, 可一旦发生其直接损失巨大, 间接损失更是难以估量^[6]。因此, 有必要建立适当的连锁故障模型, 深入研究连锁故障的演化机理, 掌握连锁故障的发展规律^[7]。

目前, 已有的连锁故障分析模型种类繁多, 功能各异^[8]。根据建模的出发点不同, 可将电力系统连锁故障分析模型大致分为基于潮流/稳定计算的研究方法和基于网络拓扑的研究方法两大类^[9]。其中, 基于潮流/稳定计算的研究方法主要包括复杂系统自组织临界性的相关研究和连锁故障模式搜索策略研究两个方面^[10]。复杂系统自组织临界性的相关研究主要有 OPA 模型及其改进模型^[11-12]、隐性故障模型^[13]、Manchester 模型^[14]、级联故障(CASCADE)模型^[15]和分支过程模型^[16]等; 模式搜索策略研究方面, 主要有故障树分析法和事故链模型^[17]。基于网络拓扑的研究方法主要利用复杂网络理论, 结合电网自身特点从电网全局的角度对电网的连锁故障进行研究, 寻求连锁故障发生的结构根源^[18]。基于复杂系统自组织临界性研究的模型可揭示连锁故障发生的机理, 量化连锁故障发生的风险, 但无法详细模拟连锁故障反应机制, 难以给运行和规划人员提供决策信息; 模式搜索策略, 可直观地表达连锁故障事件的发展路径和最终结果; 其中事故链模型不仅可以研究大停电的宏观现象, 也能详细地模拟连锁故障反应机制, 为连锁故障控制研究提供了一个可工程应用的方法, 但其在后续环节的确定和计算速度上还需改进^[19]; 基于事故链进行连锁故障分析的关键是如何搜索高风险事故链, 由于电网规模大且事故诱因多样, 研究重点在于如何提高事故链搜索速度以及搜索后续关键环节^[20-21]。文献[22]从预防大停电事故的角度, 提出基于事故链的电力系统连锁故障风险模糊综合评估方法。该方法根据事故链影响因素的量化评估值计算发生概率, 并采用严重程度指标从系统暂态安全的角度评估事故链的后果。应用模糊综合评估方法对事故链的风险进行评估和等级划分, 并给出风险等级的释义和相应的预防控制指导方案。文献[23]提出一种同时考虑事故概率重要度和设备在网络中的结构重要度的事故链中间环节的预测指标, 采用离差最大化的灰色关联度算法综合考虑各类指标, 构建电网连锁故障的事故链搜索模型。基于复杂网络理论的模型可从全局对系统总体行为进行分析^[24], 但是一般忽略了电气

特性、运行特性以及潮流特性等电网独有的特征, 并不完全适用于电网的安全稳定分析与控制。

为解决传统连锁故障事故链搜索方法难以计及保护控制的不确定性的问题, 本文提出基于系统与元件动态交互量化分析的电力系统连锁故障事故链识别方法。该方法基于事故链模型, 在时域仿真的过程中考虑现有二、三道防配置情况, 通过关键元件保护控制动作评估指标量化保护控制的不确定性因素, 计算在临界情况下关键元件保护控制的动作概率, 确定连锁故障事故链的后续事件; 此外, 根据保护控制动作概率及其动作后所需的控制代价, 评估事故链的风险, 筛选高风险连锁故障事故链, 为连锁故障防控提供参考依据^[25]。

1 事故链理论

事故链理论源于安全科学, 目前已被发展应用于众多工程领域。在电力系统中, 事故链理论认为大停电事故是由许多中间环节共同促成的, 而这些中间环节并不是必然发生的, 而是与电网运行的工况、管理和外因等一系列影响因素相关, 这些因素触发了中间环节, 从而形成了连锁故障。

定义电网事故链集合与第 k 条事故链的数学表达式为

$$L = \{\bar{L}_1, \bar{L}_2, \dots, \bar{L}_n\} \quad (1)$$

$$\bar{L}_k = \{T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{km_k}\} \quad (2)$$

式中: n 为电网事故链的个数; m_k 为事故链 \bar{L}_k 中间环节的数量; T_{kl} 为第 k 条事故链的第 l 个环节, $l=1, 2, \dots, m$ 。上述事故链及事故链集合所代表的逻辑关系可图 1 所示的事故树说明。

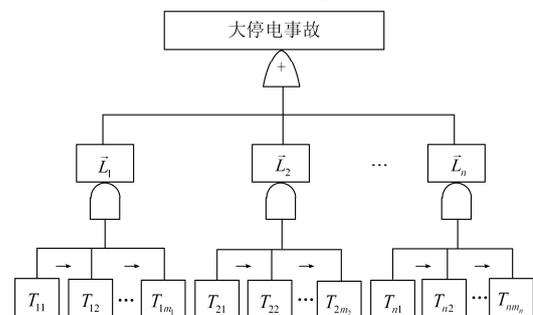


图 1 事故链逻辑关系图

Fig. 1 Logical relationship of fault chains

基于事故链的连锁故障模型为连锁故障防控提供了一种新的控制思想, 只需切断事故链的一个或者多个环节, 而不是控制所有环节就可以阻止大停电事故的发生。切断事故链的一个或多个环节的方法是对该环节所涉及的事事故影响因素进行监控, 避

免该环节故障。依据这种控制思想, 需要事先知道电力系统的事事故链。因此, 如何快速生成合理的事事故链成为了基于事故链理论模型的难点和重点。

2 基于系统与元件动态交互量化分析的连锁故障事故链搜索模型

2.1 保护控制动作评估指标

电力系统中保护或控制装置动作判据主要包含以下两种: 第一种可描述为 (E_c, T_c) , E_c 为保护控制装置电气量阈值, 一般可为电压、电流、频率和有功功率等, T_c 为允许持续的时间, 如发电机的高低频保护等; 第二种可描述为 (Q, N) , Q 为某事件, N 为保护控制动作门檻次数, 如特高压连续换相失败闭锁直流保护等。

利用时域仿真就能准确模拟保护和控制装置的动作情况, 搜索事故链。但一般只能确定性地模拟保护与自动装置动作与否, 很难考虑一些不确定性的因素, 特别是在临界情况下保护控制的动作情况。

为量化保护控制的动作情况, 将保护控制装置动作的二维判据用一维指标表示, 即关键元件保护控制动作评估指标, 其计算公式如下。

对于第一种保护控制, 其评估指标计算如式(3)。

$$\lambda = [E_c - (E_c - kT_c)] \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_c 为动态过程中所监测的电气量最大/最小值(可以是电压、电流、有功功率和频率等电气量); E_c 和 T_c 分别为保护控制装置动作门檻值和允许持续的时间; k 为把电气量偏移持续时间换算成电气量的折算因子。

λ 为不同值时, 其表示的物理含义如下:

$\lambda \geq 0$, 表示保护控制装置不满足动作条件, 且远离动作边界;

$\lambda \approx 0$ 接近于 0, 表示保护控制装置处于临界动作状态;

$\lambda < 0$, 表示保护控制装置满足动作条件。

对于第二种保护控制, 其评估指标计算为

$$\lambda' = \frac{N - n}{N} \quad (4)$$

式中: n 为实际动作发生的次数; N 为保护动作设置的门檻次数。

根据上述分析以及保护控制动作评估指标, 可定义保护控制动作概率计算公式为

$$P(\lambda) = \begin{cases} P & \lambda \leq 0 \\ P - \frac{\lambda}{\lambda_{\text{ref}}}(P - p) & 0 < \lambda \leq \lambda_{\text{ref}} \\ p & \lambda > \lambda_{\text{ref}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ 为保护控制动作评估指标值; λ_{ref} 为保护动作设定的门檻值; P 为保护发生隐性故障的概率(不考虑隐性故障时取 0), p 为保护正确动作的概率(不考虑隐性故障时取 1), P 和 p 值可以通过统计数据获取。因此, 保护控制动作评估指标与其动作概率的关系如图 2 所示。

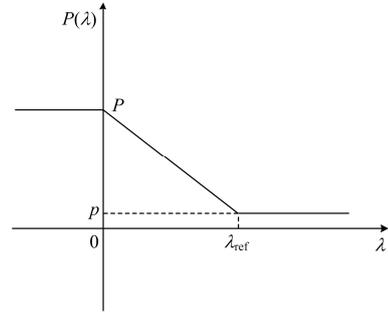


图 2 保护控制动作评估指标与其动作概率示意图

Fig. 2 Relationship between λ and $P(\lambda)$

2.2 事故链搜索流程

结合关键元件保护控制动作评估指标, 提出的事故链搜索流程如图 3 所示。

图 3 所示流程主要包含如下步骤:

1) 根据电网实时工况数据, 依据专家经验确定初始事件集, 如重要主变 $N-1$ 、 $N-2$ 故障, 关键输电线路 $N-1$ 、 $N-2$ 以及三相短路单相拒动故障等。

2) 从初始事件集中的某一事件出发, 采用时域仿真分析, 判断负荷损失量是否超出所设定的门檻值, 若超出, 进入步骤 5), 否则进入步骤 3)。

3) 判断是否有保护控制动作, 若动作则将保护控制动作作为下一事件, 进入步骤 2), 否则进入步骤 4)。

4) 计算关键元件保护控制动作评估指标及相应的动作概率, 若关键元件保护控制动作评估指标小于所设定的门檻值, 则选取指标值最小的保护控制动作作为下一事件, 进入步骤 2), 否则进入步骤 5)。

5) 计算并判断当前事故链的风险值是否大于所设定的门檻值, 若大于则保存该事故链, 进入步骤 6), 否则直接进入步骤 6)。

若当前事故链共发展到第 m 级, 则该事故链的风险值计算公式为

$$R = \sum_{i=1}^m P(d_i | d_1 d_2 \cdots d_{i-1}) C_i \quad (6)$$

式中: $P(d_i | d_1 d_2 \cdots d_{i-1})$ 为第 i 级事件发生的条件概率; C_i 为第 i 级事件发生后的控制代价。

6) 判断事故链搜索是否结束, 若结束则输出事故链集, 结束本方法, 否则进入步骤 1) 选择下一初始事件继续进行事故链搜索。

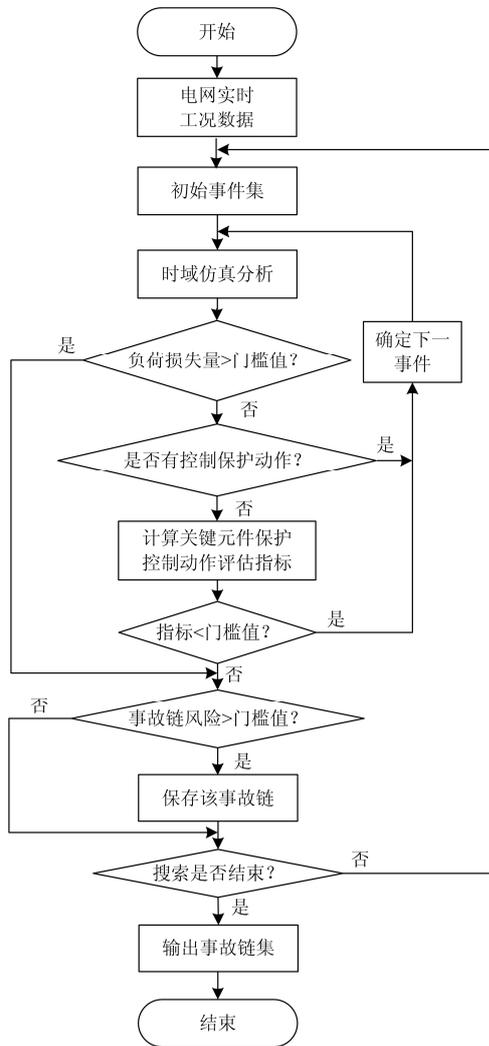


图3 事故链搜索流程

Fig. 3 Searching process of fault chains

3 算例分析

3.1 研究对象

本文以某实际电网 2017 年规划网架为研究对象, 分析夏季高峰负荷情况下该电网发生不同类型故障情况时可能出现的高风险连锁故障事故链。

3.2 初始故障集

本文分析的初始故障集主要包括该实际电网内 500 kV 线路 N-2 故障和 500 kV 线路发生三相短路单相拒动故障, 对所有的初始故障进行仿真分析可知, 所有的 500 kV 线路 N-2 故障都能维持系统稳定, 且造成连锁故障的概率极小, 故不进一步进行连锁故障分析, 重点分析部分线路三相短路单相拒动故障。为简化计算, 结合初始故障特征, 选择如下线路故障作为初始故障集中的故障, 如表 1 所示。

表 1 待分析的初始故障集

Table 1 Original fault set to be analyzed

事故链序列	初始故障	初始故障发生概率
1	莲都-瓯海	0.001
2	苍岩-凤仪	0.001
3	吴宁-丹溪	0.001
4	金华-永康	0.001

3.3 连锁故障事故链仿真

设置负荷损失的门槛值为全网负荷的 30%, 保护控制动作指标门槛值为 0.5, 事故链风险门槛值为 1 万元; 只计算发电和负荷控制代价并设切机控制代价为 0.25 万元/MW, 切负荷的控制代价为 1 万元/MW, 仿真详细情况如下。

3.3.1 事故链 1

该连锁故障事故链从莲都—瓯海线路三相短路单相拒动故障开始; 故障后宾金、灵绍直流均连续换相失败 3 次双极闭锁(如图 4 所示), 功率减少 15 000 MW; 两条直流线路母线正序电压如图 5 所示; 灵绍、宾金直流双极闭锁后, 电网频率持续下跌至 49.25 Hz (如图 6 所示), 触发低频减载提前轮动作, 减负荷共约 6200 MW; 低频减负荷后电网频率恢复稳定, 系统达到新的平衡点, 连锁故障结束(如图 7 所示), 该连锁故障事故链的风险为 9.95 万元。

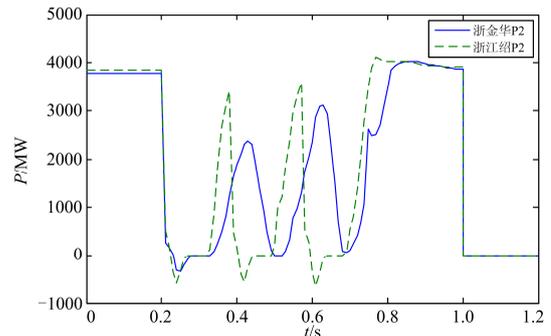


图 4 灵绍、宾金直流线路有功功率曲线

Fig. 4 Active power curve of Ling-Shao and Bin-Jin DC lines

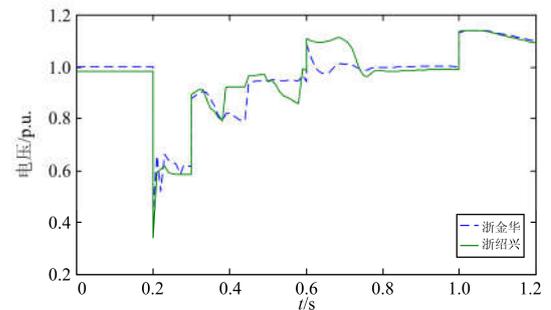


图 5 灵绍、宾金直流线路母线正序电压曲线

Fig. 5 Bus positive-sequence voltage curve of Ling-Shao and Bin-Jin DC lines

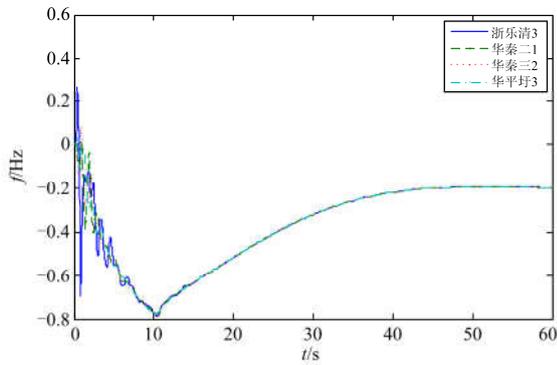


图 6 部分发电机频率曲线
Fig. 6 Frequency curve of some generators

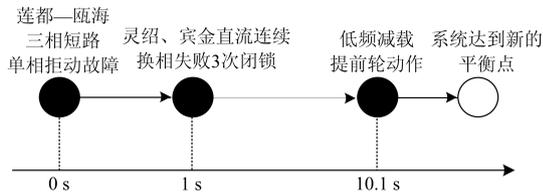


图 7 高风险连锁故障事故链 1 示意图
Fig. 7 Schematic of high-risk cascading outage fault chain 1

3.3.2 事故链 2

连锁故障事故链 2 从苍岩—凤仪线路三相短路单相拒动故障开始；故障后灵绍直流连续换相失败 3 次双极闭锁，宾金直流连续换相失败 2 次(如图 8 所示)，两条直流线路母线正序电压如图 9 所示；根据式(4)和式(5)，可得宾金直流保护控制动作评估指标为 1/3，双极闭锁概率为 2/3；灵绍、宾金直流双极闭锁后，共损失功率 15 000 MW，电网频率持续下跌至 49.25 Hz(如图 10 所示)，触发低频减载提前轮动作，减负荷共约 6200 MW；低频减负荷后电网频率恢复稳定，系统达到新的平衡点，连锁故障结束(如图 11 所示)，该连锁故障事故链的风险为 7.26 万元。

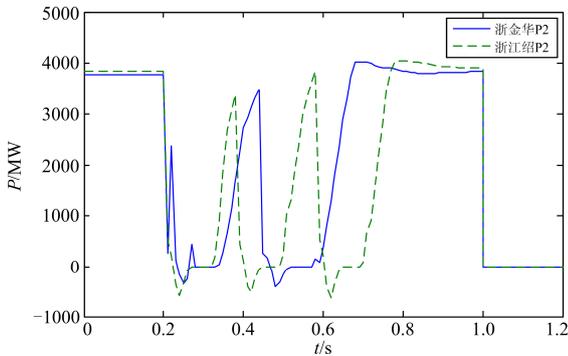


图 8 灵绍、宾金直流线路有功功率曲线
Fig. 8 Active power curve of Ling-Shao and Bin-Jin DC lines

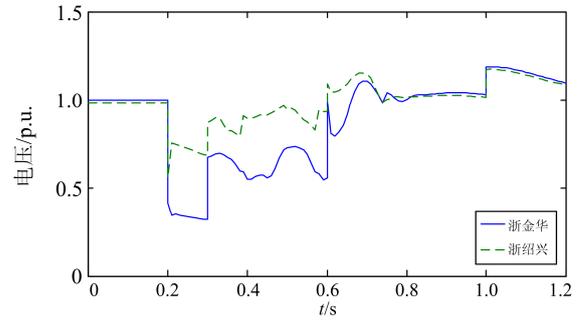


图 9 灵绍、宾金直流线路母线正序电压曲线
Fig. 9 Bus voltage of Ling-Shao and Bin-Jin DC lines

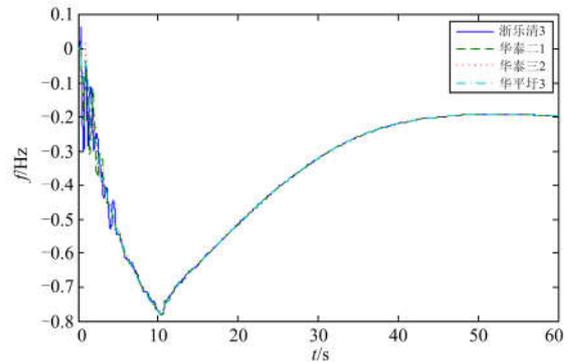


图 10 部分发电机频率曲线
Fig. 10 Frequency curve of some generators

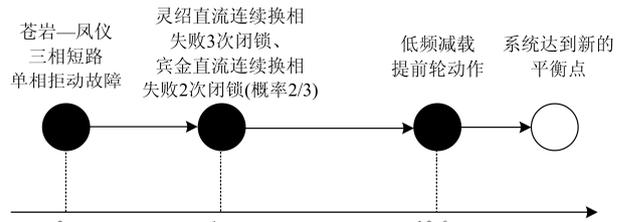


图 11 高风险连锁故障事故链 2 示意图
Fig. 11 Schematic of high-risk cascading outage fault chain 2

类似地，仿真可得到事故链 3 和事故链 4，其示意图如图 12、图 13 所示。

此外，附录给出了另一实际电网高风险连锁故障事故链的仿真结果，通过式(3)和式(5)量化关键线路低压解列动作指标及其动作概率。

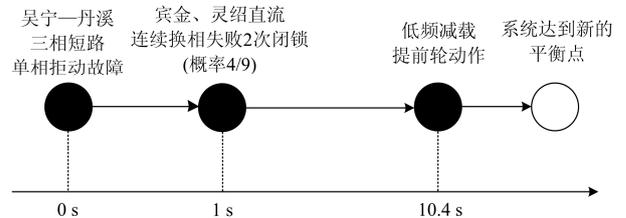


图 12 高风险连锁故障事故链 3 示意图
Fig. 12 Schematic of high-risk cascading outage fault chain 3

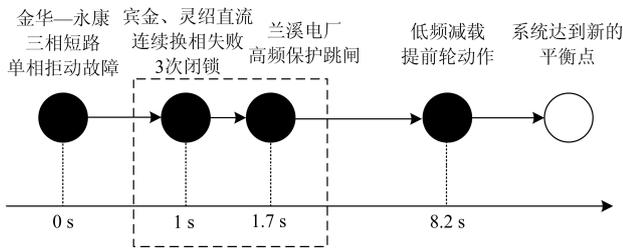


图 13 高风险连锁故障事故链 4 示意图

Fig. 13 Schematic of high-risk cascading outage fault chain 4

3.3.3 仿真结果分析

对上述连锁故障事故链的仿真结果分析可得如下结论:

1) 在典型运行方式下, 500 kV 线路三相短路单相拒动故障可能导致较大风险的连锁故障发生且高风险连锁故障事故链的关键事件为灵绍和宾金直流双极闭锁故障。

2) 如图 7 所示, 该连锁故障事故链从莲都—瓯海线路三相短路单相拒动故障开始, 经历宾金和灵绍直流连续换相失败直流闭锁, 低频减载切负荷, 最终达到新的平衡点。从该事故链搜索过程可知, 本文方法具备传统事故链搜索能力, 可准确地模拟保护控制装置确定性的动作情况, 搜索由保护控制动作而引发的高风险连锁故障事故链。

3) 如图 11 所示, 该连锁故障事故链从苍岩—凤仪线路三相短路单相拒动故障开始, 经历灵绍直流连续换相失败 3 次双极闭锁, 宾金直流连续换相失败 2 次, 双极闭锁概率为 2/3, 低频减载切负荷, 最终达到新的平衡点。分析可知, 与传统仿真过程无法继续搜索后续事件不同, 计算出保护控制装置处于临界动作状态时的概率, 从而对动作后的情况继续进行时域仿真, 搜索高风险事故链, 增加了高风险连锁故障事故链搜索途径, 完备了高风险连锁故障事故链集。

4 结论与展望

本文在事故链模型的基础上, 基于时域仿真, 结合了实际电网的运行工况以及现有二、三道防线配置情况, 综合考虑电网电气量变化与保护控制动作的交互影响, 提出了基于系统与元件动态交互量化分析的关键元件保护控制动作评估指标; 利用该指标确定后续事件, 并通过该指标建立相应的关键元件保护控制动作概率函数, 很好地模拟了临界状态下保护控制的不确定性动作情况, 增加了连锁故

障事故链的搜索路径; 基于风险指标搜索高风险连锁事故链, 可搜索出能真实反映实际大电网风险的连锁故障事故链, 为指导制定连锁故障防控策略提供了一定的研究基础。通过对 2017 夏高峰负荷情况下的某实际电网进行仿真, 验证了本文所提连锁故障事故链搜索方法的有效性。

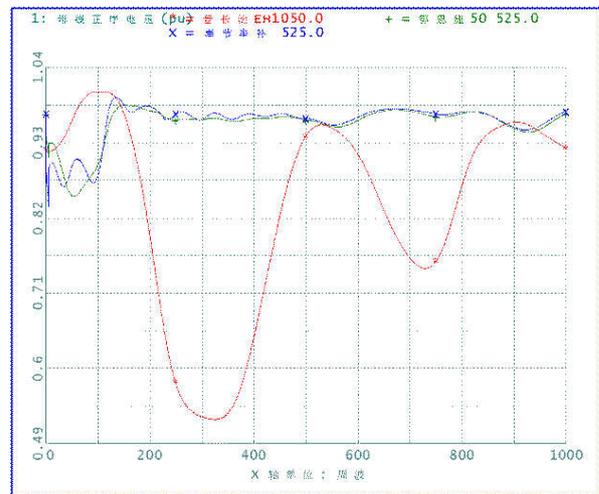
本文所提的关键元件保护控制动作评估指标可以用来模拟大部分保护控制的动作情况, 但对于一些复杂的保护控制(如风机低电压穿越)还需做进一步深入研究。此外, 对于保护控制的动作概率利用线性函数进行模拟也过于简单, 需根据实际情况做进一步研究。

附录

以某实际电网某运行方式为例, 若采用第一种保护控制评估指标进行预判, 降低特高压输送功率 800 MW, 此时若尖山主变发生 N-1 故障, 特高压解列装置不动作, 系统将达到新的平衡点, 不发生连锁故障。

若设特高压线路和渝鄂断面线路及其解列装置为关键设备, 则尖山主变 N-1 故障后的事故链搜索仿真如下。

尖山主变发生 N-1 故障后, 特高压与渝鄂断面部分母线电压曲线如附图 1 所示。



附图 1 特高压与渝鄂断面部分母线电压

Fig. 1 Bus voltage of UHV line and some cross section of Yu-E

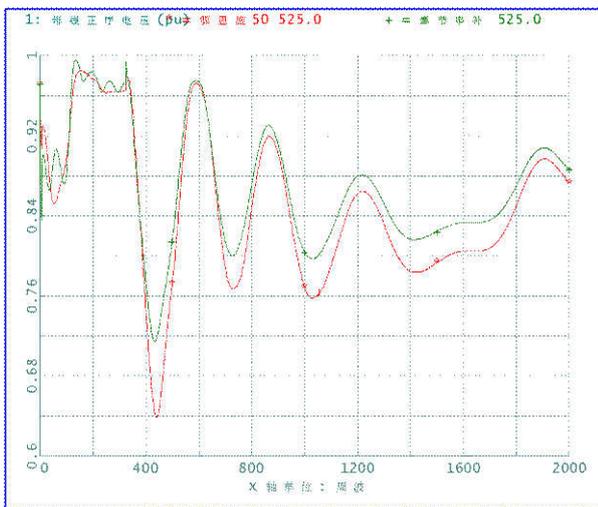
此时特高压母线电压跌落并未达到解列装置启动值, 解列装置不动作。根据电压曲线计算各关键设备保护控制动作的评估指标及其动作概率如附表 1 所示。

附表 1 部分关键设备保护控制动作评估指标及概率

Table 1 Evaluation indicator and probability of protection and control action of part key devices

关键设备	评估指标	概率
特高压	0.40	0.20
渝鄂断面(张恩线)	0.87	0
渝鄂断面(奉万线)	0.82	0

根据评估指标选择特高压线路开断作为后续事件, 特高压线路开断后渝鄂断面部分母线电压曲线如附图 2 所示。



附图 2 渝鄂断面部分母线电压

Fig. 2 Bus voltage of some cross section of Yu-E

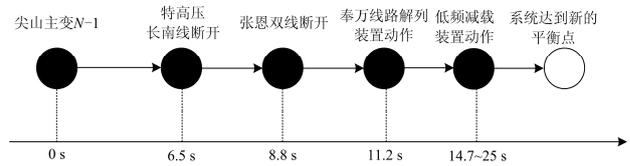
特高压断面开断后, 根据电压曲线计算各关键设备保护控制动作的评估指标以及保护动作概率, 结果如附表 2 所示。

附表 2 部分关键设备保护控制动作评估指标及概率

Table 2 Evaluation indicator and probability of protection and control action of part key devices

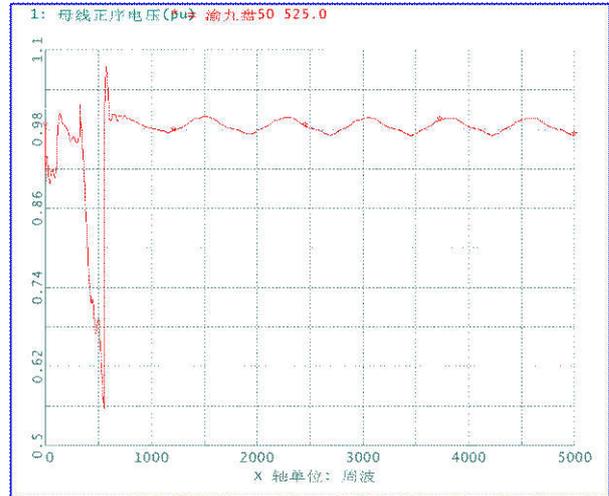
关键设备	评判指标	概率
渝鄂断面(张恩线)	0.31	0.38
渝鄂断面(奉万线)	0.51	0

选择张恩线开断作为后续事件, 张恩线路开断后奉万线路低压解列装置到达动作定值, 自动解列, 解列后该电网低频装置动作(共切负荷 8969 MW), 系统到达新的稳定平衡点, 事故链搜索结束。上述高风险连锁故障事故链可用附图 3 表示, 仿真部分结果如附图 4 和附图 5 所示。



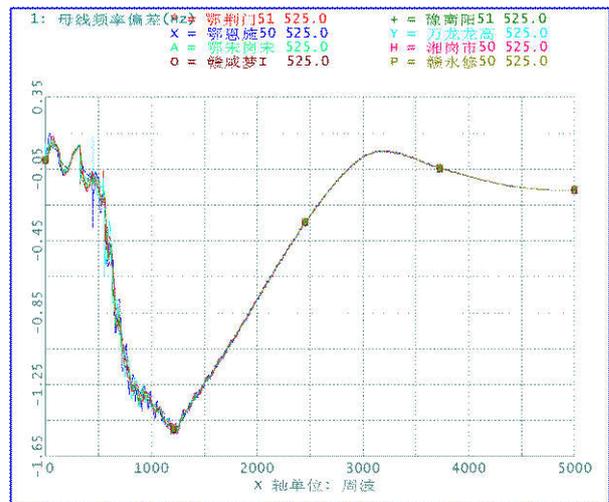
附图 3 事故链示意图

Fig. 3 Schematic of high-risk cascading outage fault chain



附图 4 九盘母线节点电压

Fig. 4 Bus node voltage of some lines



附图 5 电网部分母线频率曲线

Fig. 5 Frequency curve of part buses of power grid

参考文献

- [1] 方勇杰. 用紧急控制降低由输电断面开断引发系统崩溃的风险对印度大停电事故的思考[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 1-6.
FANG Yongjie. Application of emergency control to

- reduce risk of system collapse triggered by power transmission interface tripping: thinking on the India power blackouts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 1-6.
- [2] 李保杰, 李进波, 李洪杰, 等. 土耳其“3.31”大停电事故的分析及对我国电网安全运行的启示[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5788-5795.
LI Baojie, LI Jinbo, LI Hongjie, et al. Analysis of Turkish blackout on March 31, 2015 and lessons on China power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5788-5795.
- [3] 周勇, 陈震海. 华中(河南)电网“7.1”事故分析与思考[J]. 湖南电力, 2008, 28(3): 28-30, 47.
- [4] 金波, 肖先勇, 陈晶, 等. 考虑保护失效和电网动态平衡特性的连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 1-7.
JIN Bo, XIAO Xianyong, CHEN Jing, et al. A method of risk assessment considering protection failures and dynamic equilibrium of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 1-7.
- [5] 蔡晔, 曹一家, 谭玉东, 等. 基于标准化结构熵的电网结构对连锁故障的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 36-43.
CAI Ye, CAO Yijia, TAN Yudong, et al. Influences of power grid structure on cascading failure based on standard structure entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 36-43.
- [6] 张晶晶, 王政余, 丁明, 等. 并联储能型 FACTS 元件对连锁故障的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 90-96.
ZHANG Jingjing, WANG Zhengyu, DING Ming, et al. The security correction strategy in ac and dc hybrid power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 90-96.
- [7] 毕如玉, 林涛, 陈汝斯, 等. 交直流混合电力系统的安全校正策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 50-57.
BI Ruyi, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Influences of FACTS element with energy storage on cascading failures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 50-57.
- [8] PETERSEN P F, JOHANSSON H, NIELSEN A H. Investigation of suitability of cascading outage assessment methods for real-time assessment[C] // PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015: 1-5.
- [9] 刘友波, 胡斌, 刘俊勇, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(一)——相关理论方法与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 148-155.
LIU Youbo, HU Bin, LIU Junyong, et al. Power system cascading failure analysis theories and application I——related theories and applications[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 148-155.
- [10] 刘文颖, 但扬清, 朱艳伟, 等. 复杂电网自组织临界态辨识物理指标研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 274-280, 288.
LIU Wenyong, DAN Yangqing, ZHU Yanwei, et al. Research on physical indicators to identify power system self-organized critical state[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 274-280, 288.
- [11] CARRERAS B A, LYNCH V E, DOBSON I, et al. Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts[J]. Chaos, 2002, 12(4): 985-994.
- [12] 龚媛, 梅生伟, 张雪敏, 等. 考虑电力系统规划的 OPA 模型及自组织临界特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2021-2028.
GONG Yuan, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin, et al. An improved OPA model considering planning and self-organized criticality analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2021-2028.
- [13] CHEN Jie, THORP J S, DOBSON I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(4): 318-326.
- [14] NEDIC D P, DOBSON I, KIRSCHEN D S, et al. Criticality in a cascading failure blackout model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(9): 627-633.
- [15] DOBSON I, CARRERAS B, NEWMAN D E. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[C] // Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2003.
- [16] DOBSON I, CARRERAS B, NEWMAN D E. Branching process models for the exponentially increasing portions of cascading failure blackouts[C] // Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2005.
- [17] 丁明, 肖遥, 张晶晶, 等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 821-829.
DING Ming, XIAO Yao, ZHANG Jingjing, et al. Risk assessment model of power grid cascading failures based on fault chain and dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 821-829.
- [18] 范文礼, 刘志刚. 基于复杂网络的电网连锁故障模型研究综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 124-131.

- FAN Wenli, LIU Zhigang. An overview on modeling of cascading failures in power grids based on complex system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 124-131.
- [19] 罗毅, 王英英, 万卫, 等. 电网连锁故障的事故链模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 1-5.
- LUO Yi, WANG Yingying, WAN Wei, et al. Fault chains model for cascading failure of grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 1-5.
- [20] WANG Ansi, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 442-450.
- [21] 马志远, 石立宝, 姚良忠, 等. 电网连锁故障的事故链搜索模型及策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3292-3302.
- MA Zhiyuan, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Study on the modeling and search strategy of event chain for cascading failure in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3292-3302.
- [22] 王英英, 罗毅, 涂光瑜, 等. 基于事故链的电力系统连锁故障风险模糊综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(增刊): 25-30.
- WANG Yingying, LUO Yi, YU Guangyu, et al. Risk assessment of cascading failures in power system based on fault chain and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(S): 25-30.
- [23] 王涛, 王兴武, 顾雪平, 等. 基于概率及结构重要度的电力系统事故链模型与仿真[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 51-56.
- WANG Tao, WANG Xingwu, GU Xueping, et al. Power system fault chain model and simulation based on probability and structural importance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 51-56.
- [24] 蔡泽祥, 王星华, 任晓娜. 复杂网络理论及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 114-121.
- CAI Zexiang, WANG Xinghua, REN Xiaona. A review of complex network theory and its application in power systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 114-121.
- [25] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI 10.1186/s41601-016-0012-2.
-
- 收稿日期: 2016-12-26; 修回日期: 2017-02-27
- 作者简介:
- 宣晓华(1965—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行控制;
- 周野(1984—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: zhouye3@sgepri.sgcc.com.cn
- 宋晓芳(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。
- (编辑 葛艳娜)